

Inhaltsverzeichnis

| | |
|--|-----------|
| 0 Vorwort | 6 |
| 1 Einleitung..... | 7 |
| 2 Physikalisch mathematische Grundlagen | 9 |
| 2.1 <i>Wärmeleitung innerhalb homogener Bauteile.....</i> | 9 |
| 2.2 <i>Instationäre Temperaturverteilungen in homogenen Bauteilen</i> | 10 |
| 2.3 <i>Anfangsbedingungen</i> | 11 |
| 2.4 <i>Randbedingungen</i> | 11 |
| 2.4.1 Randbedingungen aus Wärmeübergängen | 12 |
| 2.4.2 Randbedingungen aus Wärmestrahlung..... | 12 |
| 2.4.3 Bilanz über alle Wärmeflüsse aus den Randbedingungen | 14 |
| 2.5 <i>Zusammenfassung physikalischer Einschränkungen und Vereinfachungen</i> | 14 |
| 3 Lösungsmethoden zur Berechnung von instationären Temperaturverteilungen und von Wärmeströmen | 16 |
| 3.1 <i>Analytische Verfahren.....</i> | 16 |
| 3.2 <i>Numerische Näherungslösungen mit Hilfe von Computern</i> | 17 |
| 3.2.1 Grundlagen..... | 17 |
| 3.2.2 Explizites Differenzenverfahren..... | 18 |
| 3.2.3 Methode der teilweisen Integration | 20 |
| 3.2.4 Implizite Methode | 21 |
| 3.2.5 Vergleich der Verfahren und Begründung der für diese Arbeit gewählten Verfahren | 25 |
| 3.2.6 Verfahren zur Näherung der Randtemperaturen..... | 27 |
| 3.2.7 Verfahren zur Berechnung der Randtemperaturen zwischen einer festen Schicht und einer gasförmigen Schicht (bzw. der Umgebung)..... | 31 |
| 3.2.8 Verfahren zur Berechnung der Randtemperaturen zwischen zwei festen Schichten mit Wärmeübergang | 34 |

| | | |
|----------|---|-----------|
| 4 | Beschreibung der Wärmebilanzen in den Randabschnitten für bautechnische Anwendungen.. | 37 |
| 4.1 | <i>Wärmeübergänge</i> | 37 |
| 4.1.1 | Wärmeübergang durch Wärmeleitung zwischen zwei festen Stoffen | 37 |
| 4.1.2 | Wärmeübergang zwischen einem festen Stoff und Gasen (Luft), Flüssigkeiten oder Schüttungen | 38 |
| 4.2 | <i>Bestimmen der an der Wand ausgetauschten Strahlungsenergien</i> | 41 |
| 4.2.1 | Bestimmen der auf die Wand treffenden Strahlungsenergie Q_s aus Direkt- und Diffusstrahlung | 42 |
| 4.2.2 | <i>Der Anteil der Reflexionsstrahlung</i> | 51 |
| 4.2.3 | <i>Emittierte Strahlung</i> | 52 |
| 5 | Beschreibung des Programmsystems „DynaTherm“ | 53 |
| 5.1 | <i>Erläuterung der Tabellenstruktur und Funktion der einzelnen Programm-Module</i> | 53 |
| 5.2 | <i>Überblick der obersten Programmstruktur in DynaTherm</i> | 56 |
| 5.3 | <i>Beschreibung der „Arbeitsblätter“</i> | 58 |
| 5.3.1 | Arbeitsblatt {Wandaufbau} | 58 |
| 5.3.2 | Arbeitsblatt {Material-Datenbank} | 59 |
| 5.3.3 | Arbeitsblatt {Randbedingungen} | 60 |
| 5.3.4 | Arbeitsblatt {Animation} | 61 |
| 5.3.5 | Arbeitsblatt {Ausgabewerte} | 61 |
| 5.3.6 | Arbeitsblatt {3D-Diagramm} | 61 |
| 5.3.7 | Arbeitsblatt {Berechnungsoptionen} | 62 |
| 5.3.8 | Arbeitsblätter {Notizen}, {Hilfe} und {Info} | 62 |
| 5.4 | <i>Beschreibung der Programmmodule zur Temperaturberechnung</i> | 63 |
| 6 | Berechnungsergebnisse eines konkreten Beispiels im Vergleich zu Berechnungs-ergebnissen aus der Literatur..... | 65 |

7 Vergleich mit Messergebnissen aus dem eigenen

Versuch..... 70

7.1 Versuchsaufbau..... 70

7.2 Versuchsablauf..... 72

7.3 Auswertung..... 72

8 Anwenden der Ergebnisse auf eine baupraktische

Fragestellung des instationären Wärmeschutzes..... 79

9 Zusammenfassung..... 84

10 Anhang.....Anhang

Seite

Anhang A) Bedienungsanleitung.....2

1. Generelle Bedienungshinweise.....4

2. Erzeugen eines neuen Bauteils.....5

3. Hinzufügen von neuen Materialien.....7

4. Stationäre Wärmeleitungsberechnungen.....9

5. Instationäre Wärmeleitungsberechnungen.....11

5.1 Eingabe der Randbedingungen.....11

5.2 Einstellen der Optionen für Berechnung und Ausgabe.....13

5.3 Animierte Ausgabe der berechneten Ergebnisse.....16

5.4 Die Matrix aller ausgegebenen Temperaturwerte.....17

5.5 3-Dimensionale Ausgabe des berechneten Temperaturprofils.....19

5.6 Zusätzliche Funktion.....20

Anhang B) Programm Module.....21

1 Arbeitsblatt Wandaufbau:.....21

2 Arbeitsblatt Material-Datenbank:.....25

3 Arbeitsblatt Randbedingungen:.....26

4 Arbeitsblatt Berechnungs Optionen.....37

5 Arbeitsblatt Animation.....41

6 Arbeitsblatt Ausgabewerte:.....42

7 Arbeitsblatt 3D-Diagramm:.....42

8 Der Ordner Module.....43

Das Test-Modul aus DynaTest.....62

Anhang C) Berechnung der auf die Wand treffenden Strahlungsenergie Q_s aus [57].....78

Anhang D) Mathematische Herleitung des gewählten expliziten Differenzenverfahrens aus [54].....92

Anhang E) Stoffwerte.....95

Anhang F) Lageplan (-Skizze) der Versuchswand.....103

Anhang G) Inhalt der beiliegenden CD.....104

11 Literaturverzeichnis

Abbildungsverzeichnis

| | | |
|--------------|---|----|
| Abbildung 1 | Wärmefluss durch ein Flächenelement | 10 |
| Abbildung 2 | Wärmestromänderung durch ein Volumenelement | 11 |
| Abbildung 3 | Vergleich der Berechnungsverfahren nach [35] | 27 |
| Abbildung 4 | Randtemperatur ohne virtuelle Schichten | 28 |
| Abbildung 5 | Randtemperatur gemittelt mit Hilfe einer virtuellen Schicht... | 29 |
| Abbildung 6 | Randtemperaturen durch Einfügen eines zusätzlichen Abschnittes Δx pro Schicht..... | 30 |
| Abbildung 7 | Wärmebilanz an inneren Wärmeübergängen..... | 34 |
| Abbildung 8 | Von DynaTherm errechnete empirische Strahlung auf eine horizontale Fläche..... | 44 |
| Abbildung 9 | Einstrahlung auf eine senkrechte Wand am 3.2.2000..... | 46 |
| Abbildung 10 | Berechnungsmodell für metrologisch gemessene Globalstrahlung am 3.2.00 | 49 |
| Abbildung 11 | Direkte Zellbeschreibung z.B. (B2)..... | 55 |
| Abbildung 12 | Beschreibung eines Spalten- bzw. Zeilenbereichs z.B. (B3:B6) | 55 |
| Abbildung 13 | Beschreibung eines Bereichs aus mehreren Zeilen und Spalten z.B. (A3:C6)..... | 55 |
| Abbildung 14 | Überblick der obersten Programmstruktur in DynaTherm | 57 |
| Abbildung 15 | Vergleich der Berechnungswerte zu einem analytischen Ergebnis | 66 |
| Abbildung 16 | Aufbau der Versuchswand..... | 70 |
| Abbildung 17 | Versuchswand | 71 |
| Abbildung 18 | Ungenauigkeiten der Temperatursensoren..... | 73 |
| Abbildung 19 | Globalstrahlung vom 5.2-7.2.2000 | 76 |
| Abbildung 20 | Vergleich der Berechnungsergebnisse mit den Messergebnissen in der Versuchswand..... | 76 |
| Abbildung 21 | Transparente Wärmedämmung in der Praxis aus [54] | 81 |
| Abbildung 22 | Transparente Wärmedämmung aus [54] | 81 |
| Abbildung 23 | Effekt der konstanten Innentemperatur durch transparente Wärmedämmung aus [54] | 82 |

Tabellenverzeichnis

| | | |
|------------------|---|-----------------|
| Tabelle 1 | Vergleich von numerischen Lösungsverfahren für die instationäre Wärmeleitungsgleichung | 25 |
| Tabelle 2 | Wärmeübergangszahlen α in $\text{kcal/m}^2 \text{ h grad}$ nach [28].... | 39 |
| Tabelle 3 | Von DynaTherm errechnete Strahlungsflüsse auf eine senkrechte Wand am 3.2.2000..... | 46 |
| Tabelle 4 | Absorptionszahl a_s für Außenschichten | 52 |
| Tabelle 5 | Vergleich der untersuchten Berechnungsverfahren | 67 |
| Tabelle Anhang C | Trübungsfaktor nach Schüpp..... | Anhang Seite 91 |

Gleichungsverzeichnis

| | |
|----------------------|----|
| Gleichung 1 | 9 |
| Gleichung 2 | 10 |
| Gleichung 3 | 12 |
| Gleichung 4 | 13 |
| Gleichung 5 | 13 |
| Gleichung 6 | 14 |
| Gleichung 7 | 14 |
| Gleichung 8 | 18 |
| Gleichung 9 | 18 |
| Gleichung 10 | 18 |
| Gleichung 11 | 18 |
| Gleichung 12 | 19 |
| Gleichung 13 | 20 |
| Gleichung 14 | 20 |
| Gleichung 15 | 20 |
| Gleichung 16 | 21 |
| Gleichung 17 | 21 |
| Gleichung 18 | 22 |
| Gleichung 19 | 22 |
| Gleichung 20 | 22 |
| Gleichung 21 | 22 |
| Gleichungen 22 | 23 |
| Gleichungen 23 | 23 |
| Gleichung 24 | 31 |
| Gleichung 25 | 32 |
| Gleichung 26 | 32 |
| Gleichung 27 | 33 |
| Gleichung 28 | 33 |
| Gleichung 29 | 34 |
| Gleichung 30 | 35 |
| Gleichung 31 | 35 |
| Gleichung 32 | 36 |
| Gleichung 33 | 40 |
| Gleichung 34 | 40 |
| Gleichung 35 | 41 |
| Gleichung 36 | 42 |
| Gleichung 37 | 48 |
| Gleichung 38 | 48 |
| Gleichung 39 | 49 |
| Gleichung 40 | 50 |
| Gleichung 41 | 52 |
| Gleichung 42 | 68 |
| Gleichung 43 | 68 |
| Gleichung 44 | 68 |
| Gleichung 45 | 77 |

0 Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand im Rahmen einer Diplomarbeit an der Fachhochschule für Technik und Wirtschaft in Berlin im Studiengang Bauingenieurwesen. Herr Prof. Dr. Ing. Bunte, der sich in seiner Dissertation „Zum karbonatisierungsbedingten Verlust der Dauerhaftigkeit von Außenbauteilen aus Stahlbeton“ mit dem Thema der instationären Wärmeleitung befasste, suchte nun nach einer programmtechnischen Grundlage, die es ermöglicht, instationäre Temperaturverteilungen in Abhängigkeit von den entscheidenden meteorologischen Randbedingungen zu berechnen. Er regte mich an, diese Fragestellung zum Inhalt meiner Diplomarbeit zu machen. Seine Dissertation schuf mir eine ausgezeichnete Ausgangsbasis zum Thema. Im Verlauf der Arbeit unterstützte er mich mit zahlreichen Ratschlägen und wertvollen Literaturhinweisen. Ich danke Herrn Prof. Dr. Bunte herzlich für seine freundliche und geduldige Zusammenarbeit. Herrn Dipl.Ing. Fischer danke ich für Diskussionen wichtiger Fragestellungen. Des weiteren möchte ich dem Laborpersonal danken. Frau Dipl.Ing. Elsholz und Herr Arnold arbeiteten mich in den teilweise bereits vorhandenen Versuchsaufbau ein, rückten die mehrere 100 kg schwere Betonwand an den rechten Ort und unterstützten mich bei der Aufnahme der Messreihen. Herr Dipl.Ing Lehsten stellte mir meterweise Daten der FHTW- eigenen Wetterstation zur Verfügung.

Zum Schluss möchte ich meiner Familie und allen Freunden danken, die mich mit zahlreichen Hinweisen unterstützten und bei der Testung der bedienerfreundlichen Programmoberfläche mitwirkten.

weitere Infos, Kontakt und Dokumente unter:

www.holznagels.de/DynaTherm/DynaTherm.htm

Anhang (105 Seiten) und Literaturverzeichnis finden sie ebenfalls auf dieser Seite als .pdf Datei.

1 Einleitung

Durch den immer größer werdenden Drang zur Energieeinsparung ist die Kenntnis der tatsächlichen Wärmeleitvorgänge in einem Bauteil unabdingbar. Mit den herkömmlichen Berechnungsverfahren, die nur den k-Wert eines Bauteils berücksichtigen, lassen sich die Vorteile moderner Bauteile, wie z.B. Fassaden mit transparenter Wärmedämmung bzgl. des Wärmeschutzes nicht mehr rechnerisch nachweisen.

Die instationäre Wärmeleitung wird im Bauwesen nur in der Forschung konsequent untersucht. Da sich die Berechnung in Abhängigkeit von den im Wärmeschutz für das Bauwesen maßgeblichen Randbedingungen auf analytische Weise außerordentlich aufwendig oder aussichtslos darstellt, weicht man auf ein Differenzenverfahren aus. Bis vor kurzem war aber auch dieses Verfahren äußerst langwierig, kompliziert oder sehr ungenau. Mit der Geschwindigkeit und der Allgegenwart heutiger Rechenmaschinen ist es inzwischen jedoch möglich, die instationäre Wärmeleitung durch Bauteile numerisch in angemessener Zeit, mit geringem Aufwand und sehr guter Genauigkeit zu simulieren.

Mit dem in dieser Arbeit entwickelten Programmsystem „DynaTherm“ ist es nun auch für den praktischen Ingenieur ein leichtes, die Einflüsse der instationären Wärmeleitung in seine Bauplanung mit einzubeziehen.

In hoher Geschwindigkeit werden Ergebnisse erzielt, die nahezu eine analytische Genauigkeit erreichen. Dies und die offene Art der Programmierung machen das Programmsystem auch für weiterführende wissenschaftliche Anwendungen außerordentlich interessant.

Die leichte Bedienung und die anschauliche Darstellung der Temperaturleitvorgänge können dem Anwender in kürzester Zeit die Problematik und außerordentliche Relevanz der instationären Wärmeleitung verdeutlichen. Dies ist besonders wichtig, da dieses Thema immer noch all zu stark unterschätzt wird.

Die bautechnisch relevanten meteorologischen Randbedingungen werden in ausführlicher Weise untersucht und sind in das Programmsystem

eingearbeitet. Es wird ein leistungsfähiges Werkzeug zur Verfügung gestellt, das es ermöglicht, die Sonnenstrahlung auf ein beliebig orientiertes Bauteil schnell und unkompliziert zu berücksichtigen.

Mit DynaTherm kann berechnet werden, wie viel Energie bei entsprechender Bauweise von der Umgebung im Winter gewonnen bzw. wie verhindert werden kann, dass im Sommer zu viel Wärmeenergie durch ein Außenbauteil fließt.

Die Ergebnisse dieser Arbeit können dazu beitragen völlig neuartige Bauteile zu entwickeln. Durch passives Konstanthalten der Temperatur (allein durch den Wandaufbau) der Innenoberfläche einer Außenwand lässt sich die Behaglichkeit ohne energieverwendende aktive Klimatechnik erhöhen.

Mit dem entwickelten Programmsystem lassen sich außerdem Aufheiz- und Abkühlvorgänge simulieren, z.B. für Brandwände, Reaktorbehälter, Ofenwände, Silowände und Erdoberflächen.

DynaTherm kann als programmatische Grundlage für alle Fragestellungen dienen, die die Kenntnis instationärer Temperaturverteilungen in Abhängigkeit der für das Bauwesen entscheidenden Randbedingungen erfordern, z.B.:

- Wandheizungen: Temperaturen und Energieverbrauch
- Temperaturveränderungen infolge der Hydratation von Beton
- Spannungen (Dehnungsfugen) infolge Temperaturänderung in Bauteilen
- Feuchtetransport, Diffusionsvorgänge, Eisbildung (tatsächlicher Ort des Gefrierpunkts)
- Einfluss transparenter Bauteile.

Der größte Anwendungsbereich wird jedoch beim instationären Wärmeschutz liegen. Um das von der Bauforschung angestrebte Nullenergiehaus auch bis in die Wirklichkeit zu transportieren, muss ein Umdenken in der Bauindustrie und in der Gesellschaft stattfinden, wie es von vielen Wissenschaftlern gefordert wird. DynaTherm soll dazu beitragen, diesen Prozess des Umdenkens, der immer noch viel zu langsam voranschreitet, hin zu ökologischerem und dadurch auch wirtschaftlicherem Bauen zu beschleunigen.

2 Physikalisch mathematische Grundlagen

Wärme kann auf unterschiedliche Art und Weise transportiert werden.

a) Wärmeleitung:

Wärmeenergie wird zwischen Molekülen durch Kontakt (direkter Wärmeaustausch) transportiert.

b) Konvektion:

Die Wärmeenergie wird durch Stoffbewegungen transportiert z.B. innerhalb von Flüssigkeiten und Gasen.

c) Strahlung:

Der Wärmetransport erfolgt in Form elektromagnetischer Wellen.

In dieser Arbeit wird die Wärmeleitung und die instationäre Temperaturverteilung in linearen homogenen Baustoffen unter der Berücksichtigung von Wärmeübergängen und Strahlung an den Randschichten untersucht.

2.1 Wärmeleitung innerhalb homogener Bauteile

Die Berechnung des Wärmetransports durch Wärmeleitung geschieht mit Hilfe des Grundgesetzes der molekularen Wärmeleitung nach dem Fourierschen Gesetz [35]:

$$\dot{q} = \frac{d\vec{Q}}{dF \cdot dt} = -\lambda \begin{pmatrix} \frac{\partial T}{\partial x} \\ \frac{\partial T}{\partial y} \\ \frac{\partial T}{\partial z} \end{pmatrix}$$

Gleichung 1

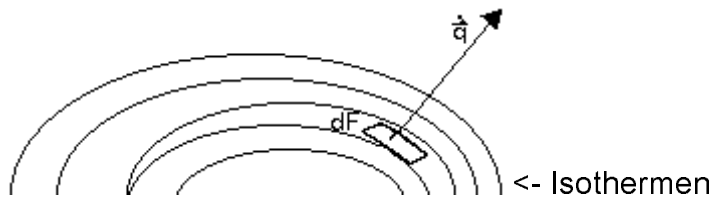


Abbildung 1 Wärmefluss durch ein Flächenelement

Der Wärmefluss \vec{q} gibt an, wie viel und in welche Richtung Wärme pro Zeiteinheit dt durch das Flächenelement dF fließt. Der Betrag ist ein Maß für die Stärke des Wärmeflusses, die Richtung gibt die Richtung des stärksten Wärmeflusses zu einem Punkt des Körpers an.

$\left(\begin{array}{c} \frac{\partial T}{\partial x} \\ \frac{\partial T}{\partial y} \\ \frac{\partial T}{\partial z} \end{array} \right)$ ist dabei der Gradient der Temperaturverteilung $T(x,y,z,t)$ im Körper.

Die Wärme fließt demnach in Richtung des stärksten Temperaturabfalls. Voraussetzung für dieses Gesetz ist ein homogener Körper, dessen Wärmeleitfähigkeit λ unabhängig von der Temperatur und von der Richtung im Körper ist (isotropes Material). Für einige Stoffe ist insbesondere die letzte Bedingung nicht erfüllt, z.B. für Holz, dessen Wärmeleitfähigkeit quer und zur Faserrichtung messbar unterschiedlich ist.

2.2 Instationäre Temperaturverteilungen in homogenen Bauteilen

Gleichung (1) reicht noch nicht aus, um die zeitliche Änderung der Temperaturverteilung in einem Körper zu beschreiben. Dazu benötigt man zusätzlich die partielle Wärmeleitungsdifferentialgleichung zur Beschreibung instationärer Temperaturverteilungen (hier ohne innere Wärmequellen aus [35]).

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\lambda}{\rho c} \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right)$$

Gleichung 2

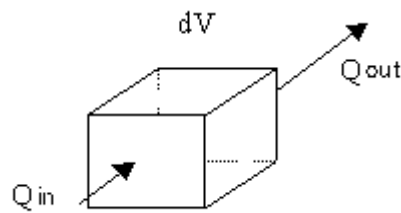


Abbildung 2 Wärmestromänderung durch ein Volumenelement

Die innere Energie eines Volumenelements pro Zeiteinheit ändert sich ($\rho c \frac{\partial T}{\partial t}$) und führt zu einer Temperaturänderung, wenn eine Wärmestromänderung am Ort x, y, z auftritt. Die Temperaturänderung ist proportional zur Temperaturleitfähigkeit $a = \frac{\lambda}{\rho c}$ und zum Laplaceoperator, angewendet auf die Temperatur

$$\left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right).$$

Hierbei ist c die spezifische Wärmekapazität des Stoffes und ρ die Dichte.

Gleichung (2) wird in der Literatur auch als Poissongleichung bezeichnet. Im stationären Fall ist $\frac{\partial T}{\partial t} = 0$ und Gleichung (2) ist dann die Laplacegleichung.

2.3 Anfangsbedingungen

Um aus den Gleichungen (1) und (2) Temperaturverteilungen zum Zeitpunkt $t > 0$ zu berechnen, muss die Anfangstemperaturverteilung $T(x, y, z, 0)$ zum Zeitpunkt $t = 0$ bekannt sein.

2.4 Randbedingungen

Für die Berechnung des zeitlichen und räumlichen Temperaturverlaufs innerhalb eines Körpers sind zusätzliche Aussagen zum Wärmetransport an den Oberflächen (Randbedingungen) erforderlich.

2.4.1 Randbedingungen aus Wärmeübergängen

An den Grenzflächen zwischen Materialien treten in Abhängigkeit von der Beschaffenheit der Grenzfläche, den Kontaktkräften und evtl. auftretender Konvektion (z.B. an der Grenze zwischen gasförmigen und festen Stoffen) komplizierte Wärmeübergangsprozesse auf, die sich nicht oder nur teilweise in einfachen Formeln ausdrücken lassen. Gute Näherungslösungen hat man mit der Wärmeübergangsgleichung [35]:

$$Q_{W\ddot{u}(\alpha)} = \alpha (T_1 - T_2)$$

Gleichung 3

Hierin ist α der Wärmeübergangskoeffizient (siehe Pkt. 4), welcher von den angrenzenden Materialien und der Art des Kontakts abhängt. T_1 und T_2 sind die Randtemperaturen der beiden Materialien.

Wird dieser Wärmeübergangskoeffizient unendlich groß (idealer Kontakt), muss $T_1 = T_2$ sein, damit die fließende Wärmeenergie endlich bleibt. In der Literatur [35] bezeichnet man diesen Fall als Randbedingung erster Art. Der allgemeinere Fall (Gleichung 3) wird als Randbedingung zweiter Art bezeichnet. Im entwickelten Programmsystem wird der ideale Kontakt durch $1/\alpha = 0$ berücksichtigt.

2.4.2 Randbedingungen aus Wärmestrahlung

Der Einfluss der Wärmestrahlung ist maßgeblich abhängig von der Intensität der auf das Bauteil treffenden Strahlung, der Temperatur von Wandoberfläche und Umgebung sowie von der Oberflächenbeschaffenheit des bestrahlten Mediums.

Der Wärmeaustausch durch Strahlungsenergie einer Wandoberfläche auf der Erde setzt sich nach [26] und [57] zusammen aus (siehe auch Anhang C):

a) Absorption von Sonnenstrahlung (direkte Sonnenstrahlung + Reflexionsstrahlung der Umgebung wie Erdboden oder Gegenständen + diffuse Himmelsstrahlung, zusammen auch als Globalstrahlung bezeichnet)

Die diffuse Himmelsstrahlung entsteht durch eine teilweise **Reflektion** von Sonnenstrahlung an Partikeln (zum größten Teil Wassermoleküle) in der Atmosphäre.

$$Q_s = a_s I$$

Gleichung 4

Q_s : Wärmefluss infolge absorbierter Sonnenstrahlung (siehe Pkt. 4.2)

[W/(m²)]

a_s : Absorptionskoeffizient für Sonnenstrahlung (siehe Pkt. 4.2.3)

I : Auf die Bauteiloberfläche auftreffende Globalstrahlung [W/(m²)]

b) Eigenabstrahlung der Wand: Jede Oberfläche strahlt nach dem Stefan-Boltzmannschen- Gesetz Wärme ab. [35]

$$Q_t = \varepsilon_0 C_s \left(\frac{T_{W0}}{100} \right)^4$$

Gleichung 5

Q_t : Wärmefluss infolge Emission [W/(m²)]

ε_0 : Emissionszahl der Wand

C_s : Strahlungszahl der Wand [W/(m²K⁴)]

T_{W0} : Temperatur der Wandoberfläche [Kelvin]

c) Absorption von Wärmestrahlung aus der Umgebung (atmosphärische Gegenstrahlung)

Die atmosphärische Gegenstrahlung Q_w entsteht durch eine teilweise **Absorption** der Sonnenstrahlung und kurz darauf erfolgender **Emission** von Wärmestrahlung von Partikeln (zum größten Teil Wassermoleküle in der Atmosphäre) und der Umgebung (Gebäude und Gegenstände). Q_w besteht aus langwelliger Strahlung und wird daher oft als Temperatur- bzw. Wärmestrahlung bezeichnet.

$$Q_w = a_0 W$$

Gleichung 6

Ein genauerer Ansatz findet sich in [3].

Q_w : Wärmefluss infolge Wärmestrahlung [W/(m²)]

a_0 : Absorptionskoeffizient für Wärmestrahlung (langwellige Strahlung)

W : Auf die Bauteiloberfläche auftreffende langwellige atmosphärische Gegenstrahlung [W/(m²)]

2.4.3 Bilanz über alle Wärmeflüsse aus den Randbedingungen

Addiert man alle Wärmeflüsse aus Punkt 2 so erhält man den gesamten Wärmefluss Q_{Rand} , welcher am Rand einer Materialschicht ausgetauscht wird.

$$Q_{Rand} = Q_{Wü(\alpha)} + Q_s - Q_t + Q_w$$

Gleichung 7

Q_{Rand} : Wärmefluss, am äußeren Randabschnitt einer Schicht nach Gleichung 1

$Q_{Wü(\alpha)}$: Wärmefluss infolge eines Wärmeübergangs [W/(m²)]

Q_s : Wärmefluss infolge absorbierter Sonnenstrahlung [W/(m²)]

Q_t : Wärmefluss infolge Strahlungsemission der Wand [W/(m²)]

Q_w : Wärmefluss infolge absorbierter atmosphärischer Gegenstrahlung [W/(m²)]

**2.5 Zusammenfassung physikalischer
Einschränkungen und Vereinfachungen**

In dieser Arbeit werden nur eindimensionale Fragestellungen behandelt. Das gewählte Berechnungsmodell lässt sich also nicht ohne zusätzliche Erweiterungen auf z.B. Gebäudeecken oder gekrümmte Flächen anwenden.

Es wird davon ausgegangen, dass die äußere Umgebung des Bauteils unendlich ausgedehnt ist. Die Ausdehnung der Wand in die beiden nicht

untersuchten Freiheitsgrade wird ebenfalls als unendlich und das Material homogen angenommen. Alle Randbedingungen (Außentemperatur, Wind, Sonneneinstrahlung usw.) werden an jedem Punkt der jeweiligen Außenfläche als vollkommen gleich angesetzt und ändern sich nur gemeinsam nach der Zeit Δt . Sind diese Bedingungen gegeben, können sich die Wärmemengen auch nur noch in einer Achse bewegen und sich Temperaturdifferenzen nur in dieser Dimension ändern. Mehrdimensionale Berechnungsmodelle sind zu finden in [35].

Es werden keine inneren Wärmequellen berücksichtigt. (siehe hierfür [35])

Die Stoffwerte ρ , λ und c sind über die jeweilige Materialschicht und die betrachtete Zeit konstant und isotrop sowie von äußeren Einflüssen wie Temperatur oder Feuchtegehalt unabhängig. In den Arbeiten [15], [35] werden auch diese Einflüsse berücksichtigt.

Feste Materialschichten sind stoffundurchlässig z.B. für Luft und Wasser, so dass kein Wärmetransport durch Konvektion innerhalb des Materials möglich ist. Berechnungsmethoden hierfür findet man in [15], [35] und [29].

Alle festen Schichten sind außerdem opak (also strahlungsundurchlässig), so dass in diesen Schichten kein Wärmetransport durch Strahlung möglich ist.

Für hinterlüftete Konstruktionen schlägt Liersch [21], [22] und [23] ein Berechnungsmodell in Abhängigkeit der Strömungsgeschwindigkeit vor. In eventuellen Gasschichten eines Bauteils wird der Wärmetransport durch Konvektion nicht direkt berücksichtigt. Cammerer bietet in [34] ein Modell, welches die Konvektion in äquivalenten Wärmeübergangszahlen ausdrückt.

Für den Einfluss des gegenseitigen Wärmeaustauschs durch Strahlungsenergie der umschließenden Materialien einer Gasschicht ermittelt Cammerer [34] äquivalente Wärmeleitfähigkeitszahlen. Mit diesen Äquivalentwerten lassen sich - im Gegensatz zu aus der Literatur bekannten instationären Berechnungsmethoden ohne Wärmeübergänge zwischen den Materialschichten - auch solche Bauteile mit dem in der Diplomarbeit entwickelten Programmsystem "DynaTherm" simulieren.

Ein Großteil dieser Einschränkungen lässt sich durch geringfügige Änderungen des Programmsystem aufheben (siehe Pkt. 9).

3 Lösungsmethoden zur Berechnung von instationären Temperaturverteilungen und von Wärmeströmen

Aus der Literatur sind eine Vielzahl von Lösungsansätzen für die Berechnung der instationären Wärmeleitung bekannt geworden. Es wird im folgenden eine Zusammenstellung bekannter Verfahren gegeben und auf einige Verfahren, die für die Lösung der Aufgabenstellung näher untersucht wurden, ausführlicher eingegangen.

Die Verfahren lassen sich nach analytischen und numerischen Lösungen einteilen.

3.1 Analytische Verfahren

Die partielle Differentialgleichung (2) lässt sich zusammen mit den Anfangsbedingungen nach Punkt 2.3 und den Randbedingungen nach Punkt 2.4 unter speziellen Voraussetzungen analytisch (Ermittlung der Funktion T in Abhängigkeit vom Ort (x,y,z) und der Zeit t) lösen [35]. Selbst für sehr einfache geometrische Voraussetzungen und sehr einfache Randbedingungen ergeben sich komplexe Lösungsfunktionen. Jede kleine Änderung in den Lösungsbedingungen führt zu - mit erheblichem mathematischen Aufwand zu ermittelnden - neuen Lösungsfunktionen. Für nicht analytisch darstellbare Randbedingungen und einen komplizierteren inneren Aufbau des zu untersuchenden Körpers ist eine analytische Lösung nicht möglich [35], [10] und [18].

Die Wärmeleitungsgleichung (2) hat denselben Aufbau wie die Diffusionsgleichung und wie partielle Differentialgleichungen aus der Elektrotechnik. In der Elektrotechnik gibt es eine Lösungsmethode mit Hilfe von Transformationen [35] (Laplace-Transformation), die aber ebenfalls nur für einfache Randbedingungen zu übersichtlichen und handhabbaren Berechnungen führt.

In dieser Arbeit liegt der Schwerpunkt auf der Lösung von linearen Wärmeleitungsproblemen mit einem komplexen Wandaufbau und vielfältigen

(auch nicht analytisch gegebenen) inneren und äußeren Randbedingungen. Dabei sollen sich diese Nebenbedingungen schnell und leicht ändern lassen, ohne dass das Lösungsverfahren ständig neu angepasst werden muss. Aus diesem Grund wurden numerische Näherungslösungen auf ihre Tauglichkeit in dieser Arbeit untersucht.

Um die Güte eines numerischen Verfahrens einschätzen zu können, ist jedoch unbedingt ein Vergleich mit der exakten analytischen Lösung erforderlich. Deshalb wurden die ausgewählten numerischen Verfahren mit bekannten Lösungen für einfache Probleme verglichen und ihre Leistungsfähigkeit auch an diesem Vergleich nachgewiesen (siehe Pkt. 6).

3.2 Numerische Näherungslösungen mit Hilfe von Computern

Auch für die numerische Lösung gibt es in der Literatur sehr viele Lösungsansätze. Teilweise wurden ausgefeilte Techniken entwickelt (auch mit groben Vereinfachungen), um beim jeweiligen Stand der Rechentechnik in relativ kurzen Rechenzeiten zufriedenstellende Ergebnisse zu erhalten. Im folgenden werden drei Verfahren näher vorgestellt und aus der Analyse dieser Verfahren das in dieser Arbeit verwendete Verfahren ausführlicher erläutert.

3.2.1 Grundlagen

Alle bekannten numerischen Verfahren¹ beruhen darauf, Ableitungen in der partiellen Differentialgleichung (2) durch Differenzengleichungen zu ersetzen. Beim Grenzübergang ($\Delta t \rightarrow 0$ und $\Delta x \rightarrow 0$) gehen dann die numerischen Lösungen in die exakten Lösungen über. Mit endlichen Δt und Δx macht man Fehler. Die Größe des Fehlers ist von der Größe der Differenzen und von dem gewählten Verfahren abhängig.

¹Außer FEM -Methoden (finite element methods), welche nach [33] Funktionale minimieren. Diese werden insbesondere für räumliche geometrische Anordnungen verwendet und werden hier nicht näher untersucht.

Definition der diskreten Temperaturen

$$T_{n,k} = T(n\Delta x, k\Delta t)$$

Δt = Zeitabschnitt k = Zeitschritt

Δx = Ortsabschnitt n = Ortschritt

Gleichung 8**Ersetzen der 1. zeitlichen Ableitung der Wärmeleitungsgleichung (2)**

$$\frac{\partial T}{\partial t} \approx \frac{T(n\Delta x, k\Delta t + \Delta t) - T(n\Delta x, k\Delta t)}{\Delta t} = \frac{T_{n,k+1} - T_{n,k}}{\Delta t}$$

Gleichung 9**Ersetzen der 2. örtlichen Ableitung der Wärmeleitungsgleichung (2)**

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} \approx \frac{T_{n+1,k} - 2T_{n,k} + T_{n-1,k}}{\Delta x^2}$$

Gleichung 10**3.2.2 Explizites Differenzenverfahren**

Die partielle Differentialgleichung (2) wird durch Einsetzen der Differenzen (9) und (10) durch folgende Gleichung ersetzt (mathematische Herleitung, siehe Anhang D):

$$T_{n,k+1} = m (T_{n+1,k} - 2T_{n,k} + T_{n-1,k}) + T_{n,k} \quad 1 \leq n \leq N; \quad 0 \leq k$$

$$m = \frac{\lambda}{c\rho} \frac{\Delta t}{\Delta x^2}$$

Gleichung 11

Innerhalb eines homogenen Stoffs der Länge l , welcher in N Abschnitte der Länge Δx aufgeteilt ist, lässt sich die Temperatur eines beliebigen Abschnitts in der Schicht zum Zeitschritt $(k+1)\Delta t$ aus der Temperatur des betrachteten Abschnitts und dessen Nachbarabschnitten zum Zeitpunkt $k\Delta t$ ermitteln.

Die Randpunkte verlangen eine besondere Behandlung (siehe Pkt. 3.2.6 – Pkt 3.2.8).

Fehlerabschätzung:

Für die Berechnung wird eine konstante Temperatur in jedem Abschnitt angenommen. Durch diese Diskretisierung entstehen Temperatursprünge zwischen den Abschnitten.

Zweckmäßigerweise ordnet man den berechneten Temperaturwert $T_{n,k}$ der Mitte des Abschnitts zu.

Da in der Wärmeleitungsgleichung auch die Zeit durch Differenzen ersetzt wurde, gibt es ebenfalls Temperatursprünge zwischen den Zeitschritten. Zwischenwerte gibt es in der Berechnung (im Gegensatz zu dem realen Temperaturverlauf) nicht.

Die Abschätzungen der bei diesem Verfahren in jedem Zeitschritt (lokaler) und über einen längeren Zeitraum (globaler) auftretenden Fehler sind in der Literatur nur sehr allgemein gehalten [30], [35] und [10]. Deshalb wurde eine Fehlerabschätzung durch Vergleich der analytischen Lösung mit der Näherungslösung für eine einfache Problemstellung vorgenommen (siehe Pkt. 6).

Wichtig ist die Einhaltung der absoluten Stabilitätsbedingung nach Gleichung 12:

absolute Stabilität:
$$m = \frac{\lambda}{c\rho} \frac{\Delta t}{\Delta x^2} \leq 0.5 \quad (\text{Modul, Gitter-Fourier-Zahl})$$

Gleichung 12

Ist diese Bedingung nicht erfüllt, erhält man keine sinnvollen Temperaturwerte. Das Verfahren ist überaus stabil und die Fehler der errechneten Temperaturwerte sind über einen weiten Wertebereich bis $m \leq 0.5$ von der Gitter-Fourierzahl (12), von dem Zeitschritt Δt und von der Abschnittsgröße Δx relativ unabhängig (siehe Pkt. 6).

3.2.3 Methode der teilweisen Integration

Wird nach [19] nur die zweite örtliche Ableitung durch Differenzenquotienten ersetzt, erhält man:

$$\frac{\partial T_n(t)}{\partial t} = \frac{\lambda}{c\rho\Delta x^2} (T_{n+1}(t) - 2T_n(t) + T_{n-1}(t)) \quad 1 \leq n \leq N$$

Gleichung 13

Setzt man $T_{n+1}(t)$ und $T_{n-1}(t)$ für das Zeitintervall $k\Delta t \leq t \leq (k+1)\Delta t$ konstant zu $T_{n+1,k}$ bzw. $T_{n-1,k}$, so erhält man die einfache zeitliche Ableitung der Temperatur $T_n(t)$

$$\frac{\partial T_n(t)}{\partial t} = w(T_{n+1,k} + T_{n-1,k}) - 2wT_n(t)$$

$$w = \frac{\lambda}{c\rho(\Delta x^2)}$$

Gleichung 14

mit der Lösung

$$T_n(t) = \left(T_{n,k} - \frac{T_{n+1,k} + T_{n-1,k}}{2}\right)e^{-2w(t-k\Delta t)} + \frac{T_{n+1,k} + T_{n-1,k}}{2} \quad k\Delta t \leq t \leq (k+1)\Delta t$$

Gleichung 15

Ist die Temperaturverteilung zu einem Zeitpunkt $k\Delta t$ bekannt, kann eine Temperaturverteilung zum Zeitpunkt $k\Delta t + \Delta t = (k+1)\Delta t$ mit Gleichung (15) ermittelt werden. Die Randpunkte verlangen auch hier eine besondere Behandlung (siehe Punkt 3.2.6 – 3.2.8). Dieses Verfahren wurde ebenfalls programmiert (siehe Anhang B).

Fehlerabschätzung:

Es zeigt sich jedoch, dass die Abweichungen zu bekannten analytischen Lösungen bei einem gegebenen Δx und Δt größer als bei dem reinen expliziten Verfahren sind (siehe Pkt. 6).

Der Rechenzeitaufwand wird hier also für qualitativ gleichwertige Ergebnisse höher. Der Grund liegt im wesentlichen in der Annahme des Ansatzes, dass während der Integration in der Zeit von $k\Delta t$ bis $(k+1)\Delta t$ die Temperaturen in den Nachbarabschnitten $n+1$ und $n-1$ als konstant angesehen werden.

Johannsen [19] erhält ebenfalls diese Ungenauigkeiten und schlägt deshalb vor, bei der Neuberechnung der Temperatur im Abschnitt n zum Zeitpunkt $\Delta t(k+1)$ den schon berechneten neuen Temperaturwert des Abschnitts n-1 oder n+1 zu berücksichtigen. Jedoch ändert das Vorgehen nichts wesentlich an dem prinzipiellen Mangel des Verfahrens, dass der Rechenfehler proportional zum Zeitschritt Δt und größer als beim reinen expliziten Verfahren ist. Aus diesen Gründen wurde das Verfahren nicht weiter verfolgt.

3.2.4 Implizite Methode

Die implizite Methode nach Crank-Nicholson [35] benutzt für die Näherung der zweiten örtlichen Ableitung den Mittelwert der entsprechenden Differenzenquotienten zum Zeitgitterpunkt k und zum Berechnungszeitgitterpunkt k+1:

$$T_{n,k+1} - T_{n,k} = \frac{1}{2}m \left(T_{n+1,k} - 2T_{n,k} + T_{n-1,k} \right) + \frac{1}{2}m \left(T_{n+1,k+1} - 2T_{n,k+1} + T_{n-1,k+1} \right)$$

Gleichung 16

Diese Gleichung wird umgestellt und durch die Randbedingungen (äußere und innere Randpunkte) ergänzt.

Dabei werden die unbekannten Temperaturen (k+1) auf der linken Seite der Gleichung platziert und die bekannten Werte (Temperaturen zum Zeitschritt k) auf der rechten Seite:

linker äußerer Rand (siehe Pkt. 3.2.7):

$$T_{1,k+1} \left(1 + \frac{\lambda}{\Delta x \alpha_K} \right) - \frac{\lambda}{\Delta x \alpha_K} T_{2,k+1} = T_{innen} + \frac{Q_{strahlung}}{\alpha_K}$$

Gleichung 17

rechter äußerer Rand (siehe Pkt. 3.2.7):

$$-\frac{\lambda}{\Delta x \alpha_K} T_{N-1,k+1} + \left(1 + \frac{\lambda}{\Delta x \alpha_K} \right) T_{N,k+1} = T_{außen} + \frac{Q_{strahlung}}{\alpha_K}$$

Gleichung 18

für alle inneren Temperaturen (aus Gleichung 16)

$$-T_{n-1,k+1} + \left(\frac{2}{m} + 2\right)T_{n,k+1} - T_{n+1,k+1} = T_{n-1,k} + \left(\frac{2}{m} - 2\right)T_{n,k} + T_{n+1,k}$$

Gleichung 19

innere Übergänge (siehe Pkt. 3.2.8, Gleichung 30)

$$\begin{aligned} -\frac{\lambda_1}{\Delta x_1 \alpha_{\text{kontakt}}} T_{n-1,k+1} + \left(1 + \frac{\lambda_1}{\Delta x_1 \alpha_{\text{kontakt}}}\right) T_{n,k+1} - T_{n+1,k+1} &= 0 \\ -T_{n,k+1} + \left(1 + \frac{\lambda_2}{\Delta x_2 \alpha_{\text{kontakt}}}\right) T_{n+1,k+1} - \frac{\lambda_2}{\Delta x_2 \alpha_{\text{kontakt}}} T_{n+2,k+1} &= 0 \end{aligned}$$

Wärmeleitfähigkeit der linken bzw. rechten Schicht = $\lambda_{1,2}$

Δx der linken bzw. rechten Schicht = $\Delta x_{1,2}$

Wärmeübergang zwischen zwei Schichten = α_{kontakt}

Gleichung 20

Dadurch erhält man zu jedem Zeitschritt ein zu lösendes lineares Gleichungssystem mit N unbekannten Temperaturen $T_{1,k+1}$ bis $T_{N,k+1}$ (N Anzahl der örtlichen Abschnitte).

Dieses Gleichungssystem lässt sich formal in folgende Matrixform umformen (Beispiel N=6; bei zwei Materialsichten, jede Schicht 3 Abschnitte):

$$\begin{pmatrix} a_1 & b_1 & & & & \\ c_1 & a_2 & b_2 & & & \\ & c_2 & a_3 & b_3 & & \\ & & c_3 & a_4 & b_4 & \\ & & & c_4 & a_5 & b_5 \\ & & & & c_5 & a_6 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} T_{1,k+1} \\ T_{2,k+1} \\ T_{3,k+1} \\ T_{4,k+1} \\ T_{5,k+1} \\ T_{6,k+1} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} d_1 \\ d_2 \\ d_3 \\ d_4 \\ d_5 \\ d_6 \end{pmatrix}$$

Gleichung 21

a_i, b_i, c_i und d_i ergeben sich aus Gleichung 17 bis 20.

$$a_1 = \left(1 + \frac{\lambda_1}{\Delta x_1 \alpha_K}\right); b_1 = -\frac{\lambda_1}{\Delta x_1 \alpha_K}; d_1 = T_{innen} + \frac{Q_{strahlung}}{\alpha_K}$$

$$c_1 = -1; a_2 = \left(\frac{2}{m_1} + 2\right); b_2 = -1; d_2 = T_{1,k} + \left(\frac{2}{m_1} - 2\right)T_{2,k} + T_{3,k}$$

$$c_2 = -\frac{\lambda_1}{\Delta x_1 \alpha_{kontakt}}; a_3 = \left(1 + \frac{\lambda_1}{\Delta x_1 \alpha_{kontakt}}\right); b_3 = -1; d_3 = 0$$

$$c_3 = -1; a_4 = \left(1 + \frac{\lambda_2}{\Delta x_2 \alpha_{kontakt}}\right); b_4 = -\frac{\lambda_2}{\Delta x_2 \alpha_{kontakt}}; d_4 = 0$$

$$c_4 = -1; a_5 = \left(\frac{2}{m_2} + 2\right); b_5 = -1; d_5 = T_{4,k} + \left(\frac{2}{m_2} - 2\right)T_{5,k} + T_{6,k}$$

$$c_5 = -\frac{\lambda_2}{\Delta x_2 \alpha_K}; a_6 = 1 + \frac{\lambda_2}{\Delta x_2 \alpha_K}; d_6 = T_{au\beta en} + \frac{Q_{strahlung}}{\alpha_K}$$

Gleichungen 22

Solche tridiagonalen Gleichungssysteme mit N Unbekannten lassen sich nach folgender Vorschrift lösen [30]: (mit Hilfsvariablen m_i, c_i, y_i , und l_i)

$$m_1 = a_1$$

$$\text{für } i = 1, 2, \dots, N-1$$

Begin

$$l_i = \frac{c_i}{m_i}$$

$$m_{i+1} = a_{i+1} - l_i b_i$$

End

$$y_1 = -d_1$$

$$\text{für } i = 2, 3, \dots, N$$

Begin

$$y_i = -d_i - l_{i-1} y_{i-1}$$

End

$$T_{N,k+1} = \frac{-y_N}{m_N}$$

$$\text{für } n = N-1, N-2, \dots, 1$$

Begin

$$T_{n,k+1} = -(y_n + b_n x_{n+1}) / m_n$$

End

Gleichungen 23

Ein entsprechendes Programm dazu ist Bestandteil der Dokumentation (Anhang B).

In [29] wird nachgewiesen, dass dieses Verfahren für alle Werte der Fourierzahl stabil ist (keine unsinnigen Werte liefert) und im lokalen und globalen Fehler genauer als die explizite Methode ist. Experimentell wurde die letzte Aussage in [35] nachgewiesen. Das implizite Verfahren wurde erst in der Schlussphase der Diplomarbeit programmiert und erfolgreich getestet (siehe Punkt 6)

Es ergeben sich aber noch einige Problemstellungen, die aus Zeitgründen nicht mehr ausführlich untersucht werden konnten. Aus der Literatur ist die Lösung des impliziten Verfahrens nur für einschichtige Bauteile bekannt. Mit den Gleichungssystemen (17-23) und unter der von in Pkt. 3.2.8 entwickelten Lösung für Wärmeübergänge zwischen zwei Materialschichten ist nun auch eine Lösung für mehrschichtige Bauteile gegeben. Da sich die Gleichungen 23 nur lösen lassen für Schichtfolgen, die einen Wärmeübergang besitzen ($1/\alpha > 0$), wurde zumindest ein sehr kleiner Wert für $1/\alpha$ z.B. $1/1000000$ des Wärmewiderstands angrenzenden Abschnitts $\Delta x/\lambda$) gewählt.

Es könnte in weiterführenden Arbeiten untersucht werden, ob eine andere Methode zur Lösung des linearen Gleichungssystems auch für Übergangswiderstände $1/\alpha = 0$ geeignet ist. Literatur dazu findet sich in [30].

3.2.5 Vergleich der Verfahren und Begründung der für diese Arbeit gewählten Verfahren

Vor- und Nachteile der Verfahren sind in nachfolgender Tabelle (qualitativ) zusammengestellt.

Tabelle 1 Vergleich von numerischen Lösungsverfahren für die instationäre Wärmeleitungsgleichung

| | explizites Differenzenverfahren | teilweise Integration | implizite Methode |
|-------------------------|---|---|--------------------------|
| algorithmischer Aufwand | gering | höher | höher, große Hilfsfelder |
| Rechenzeit | gering | höher (für gleichwertige Ergebnisse) | höher |
| absolute Stabilität | Modul $< 1/2$ Gleichung 12 | immer | immer |
| Fehler | gering, wenig von Δt , Δx abhängig | hoch, sehr stark von Δt abhängig | sehr gering |

Für die Berechnung instationärer Temperaturverteilungen eignen sich die explizite und die implizite Methode gleichermaßen. Für sehr feine Abschnitzaufteilungen (Δx) könnte man die explizite Methode vorziehen, um Speicherplatz zu sparen. Beim expliziten Verfahren ist in jedem Fall darauf zu achten, die absolute Stabilitätsbedingung (12) einzuhalten.

Hat man einen komplizierten Wandaufbau mit mehreren stark unterschiedlichen Schichten, sollte die implizite Methode verwendet werden. Man muss hier keine Stabilitätsbedingung einhalten und kann die Abschnittsweite (Δx) in den einzelnen Schichten dem Problem sehr frei anpassen. Insbesondere lassen sich mit dem impliziten Verfahren breite Wandschichten mit extrem dünnen Wandschichten (Folien) kombinieren. Hier müsste man beim expliziten Verfahren entweder einen virtuellen

Wärmeübergang statt der dünnen Schicht wählen und den bei solch schmalen Schichten ($<2\text{mm}$) kapazitiven Einfluss vernachlässigen oder extrem kleine Zeitschritte (zur Einhaltung der Stabilitätsbedingung) in Kauf nehmen, was heutzutage noch extrem lange Rechenzeiten bewirken kann.

Da das implizite Verfahren genauer als alle anderen arbeitet, kann man den Nachteil der größeren Rechenzeit durch größere Zeitschritte ausgleichen.

Die Simulationen in dieser Arbeit wurden mit dem expliziten Differenzverfahren durchgeführt. Das hat folgende Gründe:

- a) In der Literatur wurde das implizite Verfahren bisher nur für einschichtige Bauteile angewendet.
- b) Das mathematisch sehr aufwendige implizite Verfahren konnte erst kurz vor Abschluss der Diplomarbeit programmiert werden und nicht mehr ausführlich auf seine absolute Tauglichkeit getestet werden.
- c) Mit dem expliziten Verfahren konnten alle baupraktischen Simulationen erfolgreich durchgeführt werden.

In [35] werden explizites Verfahren, implizites Verfahren und analytische Lösungen verglichen. Das Diagramm ergibt folgende Werte (Kugel mit 4 Abschnitten):

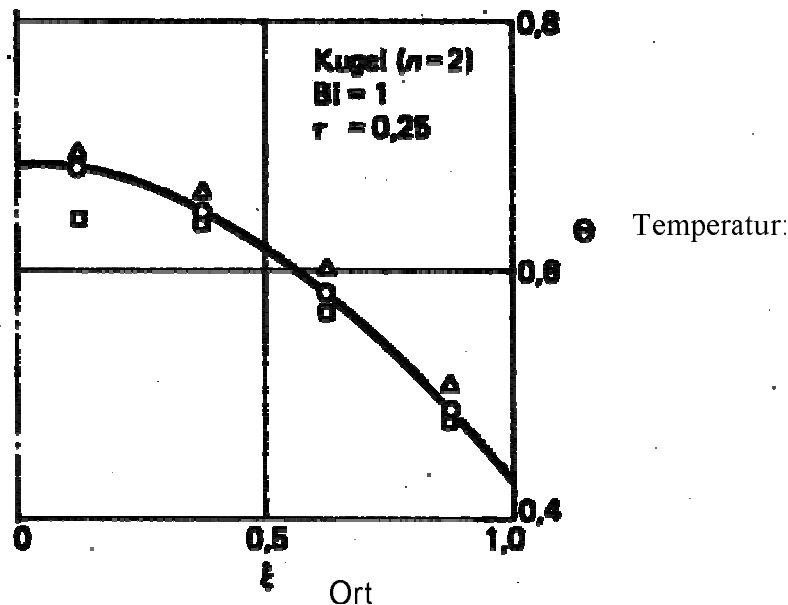


Bild 28. Vergleich der drei numerischen Methoden für $\tau=0,25$ mit dem analytischen Ergebnis.

— analytische Lösung

Differenzenverfahren:

- explizit, Gl. (113), 8 Schritte
- △ implizit, Gl. (117), 6 Schritte
- Crank-Nicholson, Gl. (128), 3 Schritte

Abbildung 3 Vergleich der Berechnungsverfahren nach [35]

In DynaTest wurde das implizierte Crank-Nicholson-Verfahren zusätzlich programmiert. (siehe Anhang G und Anhang B)

3.2.6 Verfahren zur Näherung der Randtemperaturen

Randtemperaturen treten an den beiden Außenseiten jeder Materialschicht auf. Die Randtemperaturen sind über die Wärmestrombilanzgleichung (7) gegeben. Es hat sich gezeigt (und ist auch aus der Literatur [35], [19] bekannt), dass für eine numerische Lösung der Gleichung (2), die einen möglichst geringen Näherungsfehler in das gesamte Verfahren einbringt, die Wahl der Art der Näherung der Randtemperatur entscheidend ist. Ungünstig ist, für die

Randtemperatur die Temperatur des Randabschnitts (z. B. $T_{1,k}$ für den linken Rand) zu wählen, da diese Temperatur für den gesamten Abschnitt berechnet ist und an den Abschnittsgrenzen als Folge des Näherungsverfahrens ein Sprung an der Außenkante der Schicht in der Temperaturverteilung auftritt.

Besonders stark bemerkbar macht sich dieser Fehler, wenn man ein bestimmtes Wärmeleitproblem mit stationären Randbedingungen betrachtet. Nach der Zeit $t \rightarrow \infty$ müsste die Temperaturverteilung deckungsgleich mit der analytisch berechneten stationären Temperaturverteilung sein. Dies ist unter dieser Wahl der Randtemperaturen nicht der Fall, da die Wand für die instationäre Berechnung jetzt um insgesamt $2 \cdot \Delta x/2$ schmaler ist und für $2 \cdot \Delta x/2$ der wärmeleittechnische Einfluss verloren geht.

Abhilfe würde die Wahl eines sehr kleinen Δx bringen, was aber wiederum auf Grund der Stabilitätsbedingung (12) zu einem kleineren Δt führt und dadurch auch zu höheren Rechenzeiten.

Beispiel: 2 Schichten mit 3 bzw. 4 Abschnitten unterschiedlicher Breite

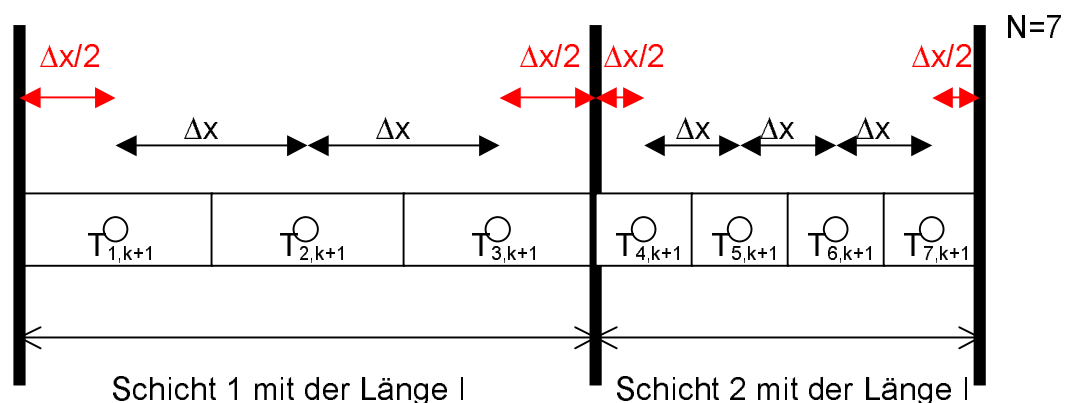


Abbildung 4 Randtemperatur ohne virtuelle Schichten

In der Literatur [35] und [19] wird deshalb bis heute jedoch ein virtueller Abschnitt an jedem äußeren Rand angefügt, der eine virtuelle Temperatur besitzt. Damit kann die Temperatur des realen Randabschnitts nach (Gleichung 7) genauer berechnet werden. Als Randtemperatur wird hier jetzt der Mittelwert zwischen virtueller Temperatur und realer Randtemperatur ermittelt.

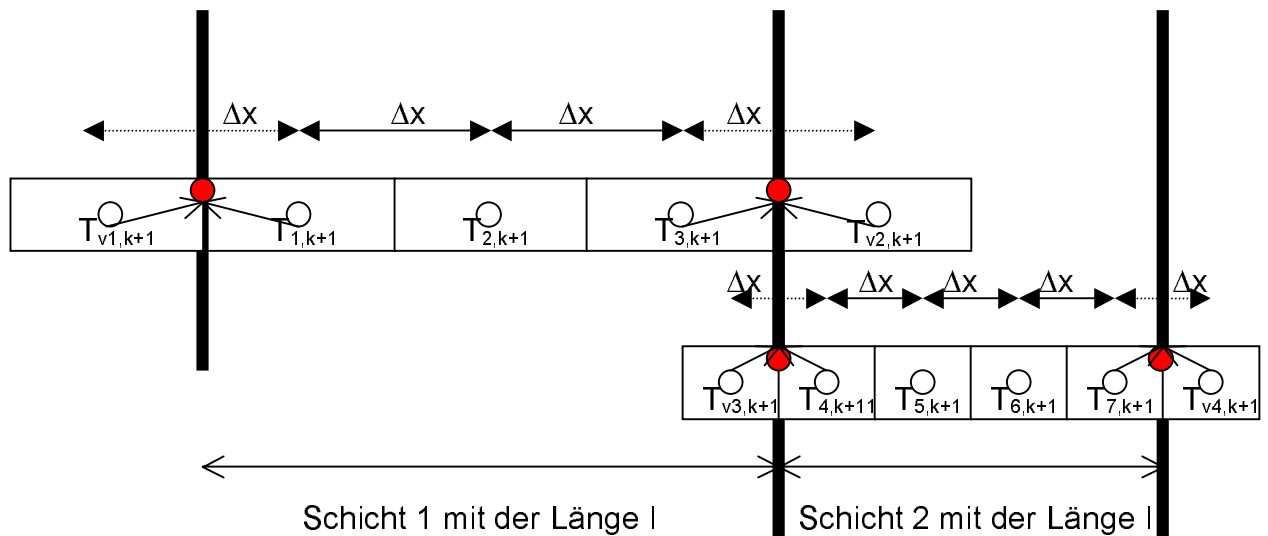


Abbildung 5 Randtemperatur gemittelt mit Hilfe einer virtuellen Schicht
 ($T_{1,k+1}$ ist jetzt ein innerer Punkt und wird durch Gleichung (11) berechnet.)

An den inneren Rändern zwischen 2 Schichten stellt sich das gleiche Problem der Näherung der Randtemperatur wie an den äußeren Rändern, welches durch Einführen der virtuellen Schichten für linken und rechten Rand gelöst werden kann.

In den aus der Literatur bekannten numerischen instationären Berechnungen von Temperaturverläufen wird ein idealer Wärmeübergang zwischen den Schichten vorausgesetzt (Randtemperaturen beider aneinandergrenzender Schichten sind gleich groß).

Das Prinzip der beiden virtuellen Schichten an den Rändern bringt eine wesentliche Verbesserung in der Rechengenauigkeit mit sich. Aus der Literatur ist aber die Verwendung der virtuellen Schichten für **innere Wärmeübergänge** (mit variablen Δx) nicht bekannt.

Die Methode der zwei äußeren virtuellen Schichten würde unter Berücksichtigung von Wärmeübergängen (Kontaktwiderständen) zwischen zwei festen Materialschichten jedoch zu sehr umfangreichen zeitaufwendigen Randtemperaturberechnungen führen. Erschwerend kommt hinzu, dass (um für die Berechnung flexibel zu sein und auch bei unterschiedlichsten Materialien

im Wandaufbau die Stabilitätsbedingung (12) einhalten zu können) im erarbeiteten Programm die Möglichkeit besteht, Δx für jede Schicht unterschiedlich zu wählen.

Um dieses Prinzip auch dafür und insbesondere auch bei der expliziten Methode einsetzen zu können, wurde eine Verbesserung, im Sinne einer deutlichen Vereinfachung vorgenommen. Statt zwei virtueller Randabschnitte wird ein zusätzlicher Abschnitt je Schicht eingefügt.

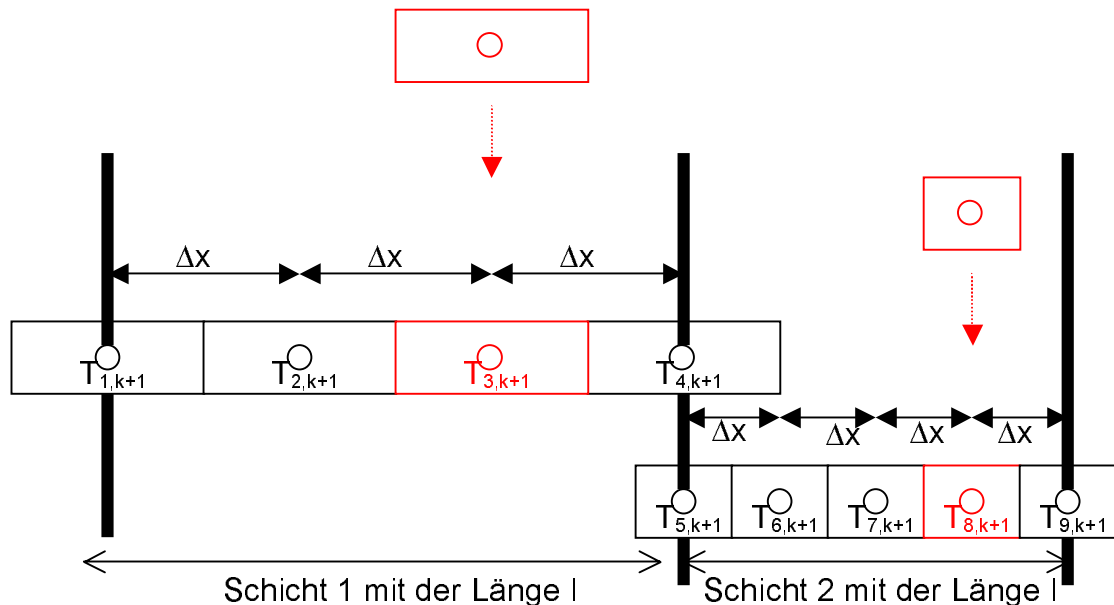


Abbildung 6 Randtemperaturen durch Einfügen eines zusätzlichen Abschnittes Δx pro Schicht

Jetzt gestaltet sich die Temperaturberechnung sehr einfach. Jeder Schicht ist zu ihrer realen Abschnittszahl nur ein virtueller Abschnitt hinzuzufügen. Alle Berechnungen können weiterhin so durchgeführt werden, als ob ohne virtuelle Schicht gerechnet wird. Die beiden äußersten Temperaturwerte einer Schicht können jetzt direkt als Randtemperaturen gewertet werden. Der kapazitive und wärmeleittechnische Einfluss von $2 \cdot \Delta x / 2$, der ohne eine virtuelle Erweiterung verloren geht wird ebenfalls durch das Mitrechnen eines kompletten virtuellen Abschnittes Δx nun exakt berücksichtigt. Nach der Zeit $\Delta t \rightarrow \infty$ überlagern sich die Temperaturkurven der stationären und der instationären Berechnung selbst bei sehr großen Abschnitten Δx .

Die Verfahren nach Pkt. 3.2.2 bis Pkt. 3.2.4 können ohne Änderungen angewendet werden, es ist jeweils für die Berechnung nur ein Abschnitt (Δx) pro Schicht hinzuzufügen.

Ein algorithmischer Test ergab die Gleichwertigkeit von 2 virtuellen Randabschnitten und einem zusätzlichen virtuellen Abschnitt pro Schicht.

3.2.7 Verfahren zur Berechnung der Randtemperaturen zwischen einer festen Schicht und einer gasförmigen Schicht (bzw. der Umgebung)

Für die Ränder die in Kontakt mit einer Gasschicht stehen, gilt die allgemeine Wärmebilanzgleichung (7).

Da auch hier der Energieerhaltungssatz gilt, muss der Wärmefluss, der in den Randabschnitt ($n=1$ bzw. $n=N$) hineinfließt gleich dem Wärmefluss sein, der ihn verlässt. Man kann also für den äußeren Rand die Wärmebilanzgleichung (7) nach T_1 und T_N durch Einsetzen und Umstellen auflösen.

Beispiel für den linken Rand:

$$\begin{aligned}
 Q_{\dot{A}-Rand} &= Q_k + Q_{Strahlung} \\
 \frac{\lambda}{\Delta x} (T_{1,k+1} - T_{2,k+1}) &= \alpha_K (T_{innen} - T_{1,k+1}) + Q_{Strahlung} \\
 R &= \frac{\Delta x}{\lambda} \quad R_{\alpha_K} = \frac{1}{\alpha_K} \\
 \frac{(T_{1,k+1} - T_{2,k+1})}{R} &= \frac{T_{innen} - T_{1,k+1}}{R_{\alpha_K}} + Q_{Strahlung} \quad \left| + \frac{T_{2,k+1}}{R} + \frac{T_{1,k+1}}{R_{\alpha_K}} \right. \\
 T_{1,k+1} \frac{R + R_{\alpha_K}}{R R_{\alpha_K}} &= \frac{T_{innen}}{R_{\alpha_K}} + \frac{T_{2,k+1}}{R} + Q_{Strahlung} \quad \left| \frac{R R_{\alpha_K}}{R + R_{\alpha_K}} \right. \\
 T_{1,k+1} &= \frac{R T_{innen}}{R + R_{\alpha_K}} + \frac{R_{\alpha_K} T_{2,k+1}}{R + R_{\alpha_K}} + Q_{Strahlung} \frac{R R_{\alpha_K}}{R + R_{\alpha_K}}; \\
 n &= 1 \text{ (linker Rand)}
 \end{aligned}$$

entsprechend für den rechten Rand:

$$\begin{aligned}
 T_{N,k+1} &= \frac{R T_{außen}}{R + R_{\alpha_K}} + \frac{R_{\alpha_K} T_{N-1,k+1}}{R + R_{\alpha_K}} + Q_{Strahlung} \frac{R R_{\alpha_K}}{R + R_{\alpha_K}}; \\
 n &= N \text{ (rechter Rand)}
 \end{aligned}$$

Gleichung 24

Für Q_{Strahlung} lassen sich beliebig viele Wärmeflüsse einsetzen z.B. wie in Punkt 4.2 die Sonnenstrahlung. Es sind aber auch andere zusätzliche Wärmequellen denkbar wie z.B. ein elektrischer Wärmestrahler usw. Mit den in der bautechnischen Literatur benutzten Berechnungsverfahren (siehe Pkt. 3.2.7.1) lassen sich solche zusätzlichen Wärmequellen nicht so schnell und einfach einbringen. In [25] werden die verschiedenen virtuellen Temperaturen und virtuellen Wärmeübergänge, wie sie in der Literatur benutzt werden (siehe Punkt 3.2.7.1) kritisiert, da sie oft nicht alle Strahlungsenergien korrekt berücksichtigen. Wählt man den o.g. Ansatz, erübrigt sich die Frage, was für eine virtuelle Temperatur man benutzen sollte und man kann sich der eigentlichen Problematik zuwenden, welche Strahlungsanteile nach Punkt 2.4.2 berücksichtigt werden sollten.

3.2.7.1 Beschreibung der Rechenvorschrift für die Außenseiten des Bauteils unter Berücksichtigung einer virtuellen Temperatur und eines virtuellen Wärmeübergangs

In [10],[8],[14] und [3] wird die Wärmestrahlung durch ein zusätzliches α_s für langwellige Strahlung und die Globalstrahlung durch eine virtuelle Temperatur berücksichtigt, um auch für den äußeren Rand die Randbedingungsgleichung (7) benutzen zu können.

$$\alpha_{ges} = \alpha_K + \alpha_s$$

Gleichung 25

α_{ges} : Wärmeübergangszahl (Gesamt) [W/(m²*K)]

α_K : Wärmeübergangszahl infolge Konvektion [W/(m²*K)]

α_s : Wärmeübergangszahl infolge langwelliger Strahlung [W/(m²*K)]

$$\alpha_s = \varepsilon C_s \frac{T_{wo}^4 - T_a^4}{100^4 (T_{wo} - T_a)}$$

Gleichung 26

T_{wo} : Temperatur der Wandoberfläche [Kelvin]

T_a : Außentemperatur [Kelvin]

C_s : Strahlungszahl [W/(m²K⁴)]

$$T_{a(fiktiv)} = T_a + \frac{a_s I}{\alpha_{ges}} - K_{Tu}$$

Gleichung 27

Mit dem Korrekturfaktor K_{Tu} , siehe [10]

$K_{Tu} = 0^\circ\text{C}$, in Zeiten, in denen Globalstrahlung vorhanden ist

$K_{Tu} = 3^\circ\text{C}$, für vertikale Flächen in Zeiten fehlender Globalstrahlung und

$K_{Tu} = 5^\circ\text{C}$ für horizontale Flächen in Zeiten fehlender Globalstrahlung

$T_{a(fiktiv)}$:fiktive Außentemperatur [Kelvin]

a_s :Absorptionskoeffizient für Sonnenstrahlung (siehe Punkt 4.2.3)

I :Auf die Bauteiloberfläche auftreffende Globalstrahlung [W/m^2]

α_{ges} : α_{gesamt} [$\text{W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$]

Nach [14] aus dem Jahre 1976 lautet die Bilanzgleichung des Wärmeaustauschs der Wand mit der Umgebung damit:

$$\dot{Q}_{\dot{A}-Rand} = -(\alpha_k + \alpha_s)(T_{WO} - T_{a(fiktiv)})$$

Gleichung 28

Diese Lösung ist zwar zulässig, jedoch für einen Außenstehenden schwer nachvollziehbar. Die Energiewerte sind nicht mehr klar erkennbar. $T_{a(fiktiv)}$ kann z.B. auch nicht einfach experimentell ermittelt werden, sondern muss immer erst berechnet werden. Auf den ersten Blick ergibt sich zum Beispiel ein Widerspruch, wenn $T_{WO} = T_{a(fiktiv)}$ ist, dann ist die Energiemenge, die an der Wandoberfläche ausgetauscht wird gleich 0, obwohl Strahlungsenergie vorhanden ist. Für die Innenseite der Wand müsste man außerdem einen neuen Ansatz wählen, ohne den Koeffizienten K_{Tu} (wie in [14]).

Von daher möchte ich einen anderen Weg gehen, der einfacher zu verstehen ist und bei dem man für Wandinnen und –außenseite den gleichen Lösungsansatz wählen kann. Die Randbedingungen werden dazu gleich in der tatsächlich vorhandenen Oberflächentemperatur T_{WO} (T_1 bzw. T_N) berücksichtigt (siehe Punkt 3.2.7, Gleichung 24).

3.2.8 Verfahren zur Berechnung der Randtemperaturen zwischen zwei festen Schichten mit Wärmeübergang

Für die inneren Ränder zwischen zwei Schichten mit Wärmeübergang gilt wieder die allgemeine Wärmebilanzgleichung (7). Die Wärme, welche aus einer inneren Randschicht fließt, muss der Wärmemenge entsprechen, die durch den Wärmeübergang zwischen den Schichten fließt und gleich der Wärmemenge sein, welche in die nächste Schicht fließt.

Bilanzgleichung (7) bei direktem Kontakt (ohne Strahlungseinfluss) vereinfacht sich zu:

$$Q_{\text{kontakt}} = \alpha_{\text{kontakt}}(T_1 - T_2)$$

Gleichung 29

α_{Kontakt} : Wärmeübergang infolge nicht idealen Kontaktes zweier Schichten
(siehe Pkt 4.1)[W/(m²*K)]

T_1 : Temperatur der linken Wandoberfläche [Kelvin]

T_2 : Temperatur der rechten Wandoberfläche [Kelvin]

Q_{Kontakt} : Wärmefluss infolge nicht idealen Kontaktes [W/(m²)]

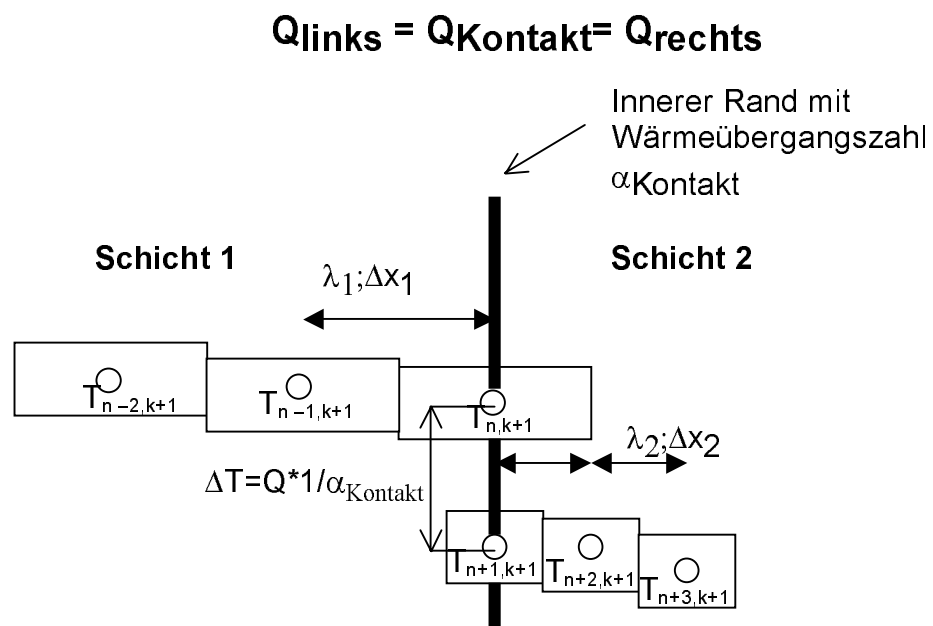


Abbildung 7 Wärmebilanz an inneren Wärmeübergängen

$$\frac{T_{n,k+1} - T_{n-1,k+1}}{R_1} = \frac{T_{n+1,k+1} - T_{n,k+1}}{R_\alpha} = \frac{T_{n+2,k+1} - T_{n+1,k+1}}{R_2}$$

$$R_1 = \frac{\Delta x_1}{\lambda_1}; \quad R_\alpha = \frac{1}{\alpha_{\text{kontakt}}}; \quad R_2 = \frac{\Delta x_2}{\lambda_2}$$

Gleichung 30

Dieses Gleichungssystem lässt sich wie folgt lösen:

$$T_{n,k+1} - T_{n-1,k+1} = \frac{R_1}{R_\alpha} (T_{n+1,k+1} - T_{n,k+1}) \quad \text{I}$$

$$T_{n+1,k+1} - T_{n,k+1} = \frac{R_\alpha}{R_2} (T_{n+2,k+1} - T_{n+1,k+1}) \quad \text{II}$$

$$T_{n+1,k+1} \left(1 + \frac{R_2}{R_\alpha} \right) = T_{n+2,k+1} + \left(\frac{R_2}{R_\alpha} \right) T_{n,k+1} \quad \text{II}$$

$$T_{n,k+1} - T_{n-1,k+1} = \frac{R_1}{R_\alpha} \left(\frac{T_{n+2,k+1} + \left(\frac{R_2}{R_\alpha} \right) T_{n,k+1}}{1 + \frac{R_2}{R_\alpha}} \right) - \frac{R_1}{R_\alpha} T_{n,k+1} \quad \text{II in I}$$

$$T_{n,k+1} - T_{n-1,k+1} = \frac{R_1}{R_\alpha + R_2} T_{n+2,k+1} + \left(\frac{R_1 R_2}{R_\alpha (R_\alpha + R_2)} \right) T_{n,k+1} - \frac{R_1}{R_\alpha} T_{n,k+1}$$

$$R_\alpha T_{n,k+1} - R_\alpha T_{n-1,k+1} = \frac{R_\alpha R_1}{R_\alpha + R_2} T_{n+2,k+1} + \left(\frac{R_1 R_2}{R_\alpha + R_2} \right) T_{n,k+1} - R_1 T_{n,k+1}$$

$$R_\alpha (R_\alpha + R_2) T_{n,k+1} - R_1 R_2 T_{n,k+1} + (R_\alpha + R_2) R_1 T_{n,k+1}$$

$$= R_\alpha (R_\alpha + R_2) T_{n-1,k+1} + R_1 R_\alpha T_{n+2,k+1}$$

$$\frac{(R_\alpha^2 T_{n,k+1} + R_\alpha R_2 T_{n,k+1} - R_1 R_2 T_{n,k+1} + R_\alpha R_1 T_{n,k+1} + R_1 R_2 T_{n,k+1})}{R_\alpha} =$$

$$R_\alpha T_{n,k+1} + R_2 T_{n,k+1} + R_1 T_{n,k+1} = (R_\alpha + R_2) T_{n-1,k+1} + R_1 T_{n+2,k+1}$$

$$T_{n,k+1} = \frac{R_\alpha + R_2}{R_1 + R_2 + R_\alpha} T_{n-1,k+1} + \frac{R_1}{R_1 + R_2 + R_\alpha} T_{n+2,k+1}$$

Gleichung 31

Lösungen sind dann die gesuchten Randtemperaturen $T_{n,k+1}$ und $T_{n+1,k+1}$ in Abhängigkeit von den vorher berechneten inneren Temperaturwerten.

$$T_{n,k+1} = T_{n-1,k+1} + \frac{R_1}{R_1 + R_2 + R_{\alpha(\text{kontakt})}} (T_{n+2,k+1} - T_{n-1,k+1})$$
$$T_{n+1,k+1} = T_{n+2,k+1} - \frac{R_2}{R_1 + R_2 + R_{\alpha(\text{kontakt})}} (T_{n+2,k+1} - T_{n-1,k+1})$$

Gleichung 32

Ist der Wärmeübergang ideal, kann $R_{\alpha(\text{Kontakt})} = 1/\alpha = 0$ gesetzt werden.

Aus der Literatur ist solch eine Möglichkeit der Berücksichtigung der inneren Wärmeübergänge nicht bekannt.

4 Beschreibung der Wärmebilanzen in den Randabschnitten für bautechnische Anwendungen

4.1 Wärmeübergänge

4.1.1 Wärmeübergang durch Wärmeleitung zwischen zwei festen Stoffen

In der bautechnischen Literatur befinden sich hauptsächlich alle Materialsichten im idealen Kontakt zur benachbarten Schicht. Nur an den Außenkanten des Bauteils berücksichtigt man den nicht idealen Kontakt durch die Wärmeübergangszahl α . Betrachtet man den Temperaturverlauf über die Querschnittsfläche des Bauteils kann man dies durch einen plötzlichen Temperatursprung an den Außenkanten des Bauteils erkennen.

Der Faktor α kennzeichnet das Vermögen, Wärme an einem Übergang zwischen zwei Stoffen zu übertragen. α_{Kontakt} wird also bei idealem Kontakt, zwischen den festen Materialsichten als unendlich groß angenommen. Der zusätzliche Wärmewiderstand $\frac{1}{\alpha_{\text{(Kontakt)}}}$ verschwindet.

Die Autoren [28] [34] idealisieren diesen Kontakt nicht, sondern erfassen ihn als zusätzlichen Wärmewiderstand (für stationäre Wärmeleitvorgänge), hier kann man auch an den Berührungsstellen der Materialsichten Temperatursprünge erkennen.

In meinem Berechnungsmodell ist es möglich, bei Bedarf die Qualität des Kontakts in Form eines Wärmewiderstands α auch für instationäre Wärmeleitvorgänge mit zu berücksichtigen. Wärmewiderstände infolge Korrosion, dünner Folien, lose Putze, Lacke und andere Anstriche können in die Berechnung mit einfließen.

Die erforderlichen $\alpha_{\text{(Kontakt)}}$ -Werte müssen für feste Schichtkombinationen experimentell ermittelt werden, eine Berechnung ist nicht möglich.

In der Baupraxis interessiert gegenwärtig nur der k-Wert. Der k-Wert umfasst alle Wärmewiderstände (Übergänge und Wärmeleitfähigkeit) einer Schichtkombination (Fenster, Wände,...) in einem Wert und der Kehrwert kann als Wärmewiderstand sehr gut zur Berechnung stationärer Wärmeströme genutzt werden. Anders jedoch ist es bei der instationären Wärmeberechnung. Hier muss zwischen Wärmewiderständen aus Wärmeleitung (mit einem kapazitiven Anteil) und Wärmewiderständen aus Übergängen (ohne kapazitiven Anteil) unterschieden werden, da beide unterschiedlich zum zeitlichen Temperaturanstieg oder Temperaturabfall beitragen.

Da es keine genormten Werte für α zwischen zwei festen Materialien gibt und der Einfluss auf den (statischen) k-Wert des Bauteils gering ist, vernachlässigt man hier α in der Baupraxis, anders hingegen bei Schichten, die aus Gasen, Schüttungen oder Flüssigkeiten bestehen.

Bei instationären Temperatursimulationen spielt der Wärmeübergang eine sehr große und wichtige Rolle, ohne ihn lassen sich geschichtete Bauteile nicht korrekt berechnen. (siehe Punkt 4.1.2).

4.1.2 Wärmeübergang zwischen einem festen Stoff und Gasen (Luft), Flüssigkeiten oder Schüttungen

Auf die Problematik des Wärmeübergangs zwischen einem festen Stoff und einer Flüssigkeit (erläutert in [35]) soll hier nicht weiter eingegangen werden. Das Programm dürfte sich jedoch auch auf solche Fragestellungen erweitern lassen. So könnte man den Einfluss der immer häufiger anzutreffenden Warmwassersolaranlagen auf Dächern oder Wandheizungen auf den Wärmehaushalt eines Bauteils untersuchen.

Schüttungen und Gase beschäftigen den Bauingenieur jedoch sehr häufig. Ausführliche Berechnungen für solche α -Werte sind beschrieben in [35][34][21]. Schüttungen findet man häufig in Fußbodenaufbauten usw. In modernen Fenstern befinden sich Edelgase, Dachkonstruktionen sind häufig hinterlüftet.

Die Größenordnung der durch Versuche ermittelten Wärmeübergangszahlen geht aus Tab. 2 hervor.

Tabelle 2 Wärmeübergangszahlen α in kcal/m² h grad nach [28]

| | |
|---------------------------------|------------|
| Für praktisch ruhende Luft | 3-20 |
| für strömende Luft | 10-100 |
| für strömende Flüssigkeiten | 200-10000 |
| für siedende Flüssigkeiten | 1000-20000 |
| für kondensierenden Wasserdampf | 6000-60000 |

Die Unterschiede in den α - Werten sind danach so groß, dass jede empirische Formel zur Berechnung der Wärmeübergangszahl nur für einen engen Anwendungsbereich gelten kann.

„**Einflussgrößen:** Die Wärmeübergangszahl hängt ab von den Eigenschaften und dem Zustand des strömenden Mediums, der Strömungsgeschwindigkeit sowie der Form, den Abmessungen und der Rauigkeit der Oberflächen des Strömungs- bzw. Wärmeübertragungsraumes ...“[27].

Unter den Stoffeigenschaften interessieren die Wärmeleitzahl (λ), die spezifische Wärme (c) die Dichte (ρ) und die Zähigkeit (ν bzw. η).

Als Kenngrößen für den Wärmeübergang aus diesen Werten sind von Bedeutung:

1. Reynolds – Zahl
2. Péclet – Zahl
3. Prandtl – Zahl
4. Grashof- Zahl.

Ausführlich ist die Berechnung beschrieben in [35].

„... Die Zahl der auf den Wärmeübergang Einfluss nehmenden Faktoren läßt die Schwierigkeit jeder theoretischen und experimentellen Behandlung des Problems erkennen, zumal die Stoffwerte druck- und temperaturabhängig sind. Zur Vereinfachung werden diese im jeweiligen Betrachtungsbereich als konstant angenommen. Mit Hilfe der Prandtlschen Grenzschichttheorie ist für bestimmte Fälle eine mathematische Lösung möglich, wobei allerdings auch noch experimentell zu ermittelnde Einflusswerte in die Formeln eingehen. Da

der verwickelte Aufbau dieser Formeln die Anwendung in der Praxis erschwert, gibt man im allgemeinen aus Versuchen abgeleiteten einfacheren Beziehungen den Vorzug. Mit Hilfe von Ähnlichkeitsbetrachtungen lassen sich die Versuchsergebnisse ordnen und in einheitlichen Gleichungsformen für bestimmte Gültigkeitsbereiche wiedergeben.“ [27]

Im Bauwesen benutzt man in der Praxis für die Wärmeübergänge (infolge Konvektion) zur Außenluft empirisch ermittelte Werte α_K , die in der DIN4108 Teil 4 Tafel 10.18a festgehalten sind.

In der Bauforschung hat sich für den äußeren Wärmeübergang eines Bauteils eine empirische Formel herauskristallisiert, die zusätzlich zu einem Wert α_0 die Windgeschwindigkeit berücksichtigt [3] [9]. Dieser wird auch in DynaTherm verwendet.

$$\alpha_K = \alpha_0 + \alpha_w v_w$$

Gleichung 33

v_w : Windgeschwindigkeit [m/s]

α_0 : 6.4 – 8.7 [W/m²K], (empirisch ermittelte Werte)

α_w : 4,1 [Ws/(m³K)]

α_K : Wärmeübergang infolge Konvektion[(W/m²K)]

Es gibt noch einen ausführlicheren Ansatz zur Berechnung von α_K nach Grigull, zu finden in [14].

$$\alpha_K = 0,137 \lambda \left[\frac{g}{\nu a} \beta (T_{wo} - T_a) \right]^{\frac{1}{3}}$$

Gleichung 34

α_K : Wärmeübergang infolge Konvektion[(W/m²K)]

λ : Wärmeleitfähigkeit der Luft

β : Auftriebsbeiwert

ν : kinematische Zähigkeit

a : Temperaturleitfähigkeit

T_{wo} : Temperatur an der Wandoberfläche

T_a : Außentemperatur

Dieser stellt jedoch immer noch eine grobe Näherung dar und wird auch in [14] nur als eine Option angeboten. Die Berücksichtigung dieses Ansatzes wäre ebenfalls umsetzbar, es ist jedoch fraglich, ob für diese Fragestellung mit angemessenem Aufwand tatsächlich der Wirklichkeit besser entsprechende α -Werte berechnet werden könnten.

4.2 Bestimmen der an der Wand ausgetauschten Strahlungsenergien

Für die beiden äußersten Ränder eines Bauteils wird aus Gleichung (7) unter Verwendung von α_k (Gleichung 22):

$$Q_{\dot{A}-Rand} = Q_k + Q_s - Q_t + Q_w$$

Gleichung 35

- Q_{A-Rand} : Wärmefluss im äußeren Abschnitt eines Bauteils [W/m²]
 Q_k : Wärmefluss am Wärmeübergang infolge Konvektion(α_k) [W/m²]
 Q_s : Wärmefluss infolge absorbierter Sonnenstrahlung [W/m²]
 Q_t : Wärmefluss infolge Emission der Wand [W/m²]
 Q_w : Auf die Bauteiloberfläche auftreffende langwellige Wärmestrahlung [W/m²]

Laut [8] hebt sich $Q_w - Q_t$ jedoch ungefähr auf. Außerdem ist Q_s gegen Q_w und Q_t meist um ein Vielfaches größer, so dass in dieser und anderen Arbeiten der Einfluss dieser Energien vernachlässigt wird.

Hinzu kommt, dass eine ausreichend genaue Berechnung der atmosphärischen Gegenstrahlung Q_w nicht möglich ist, da sie stark von der Umgebung abhängt. Sind jedoch Messwerte direkt am Bauteil gemessen vorhanden, ist die Menge der eintreffenden Strahlung sehr genau bestimmt und in diesem Fall wäre es nicht abwegig, auch die Abstrahlung des Bauteils

Q_t (nach dem Stefan- Boltzmannschen- Gesetz) ins Programm einzubinden. Ist dies wie im Versuch in Punkt 7 nicht möglich, würde also die Berücksichtigung der Abstrahlung Q_t allein ohne Q_w den Fehler unnötig erhöhen.

Gleichung (24) vereinfacht sich damit zu:

$$Q_{\dot{A}-Rand} = Q_k + Q_s$$

Gleichung 36

Werden zusätzliche äußere Energien wie Q_w und Q_t benötigt, lassen sich diese sehr einfach zu Gleichung 24 dazu addieren (siehe Pkt. 3.2.7) und in das Programm einbinden. Entsprechende Freiräume sind im Programm vorgesehen.

4.2.1 Bestimmen der auf die Wand treffenden Strahlungsenergie Q_s aus Direkt- und Diffusstrahlung

Die Berechnung der auf eine Wand eintreffenden Strahlungsmenge zu einem beliebigen Zeitpunkt im Jahr ist eine äußerst komplexe, jedoch ausführlich erforschte Fragestellung. In [57] wird ein gut geeignetes und ausgezeichnet erläutertes System von Formeln angegeben, welches hier übernommen wird (siehe Anhang C). Mit dessen Hilfe lässt sich in einer Funktion weniger Größen, die auftreffende Sonnenstrahlungsenergie G_{tot} auf eine beliebig orientierte Fläche berechnen.

$G_{tot} = F(\text{Datum, Uhrzeit, geographische Länge, geographische Breite, Trübung, Reflektion, Flächenorientierung})$

Es ist jedoch darauf zu achten, dass der Einfluss der Verschattung (Verhinderung des Auftreffens von Strahlungsenergien durch „Fremdkörper“) manuell berücksichtigt werden muss!

Um die Sonnenstrahlungsenergie auf eine Bauteiloberfläche zu bestimmen, sind folgende Möglichkeiten, die eintreffende Strahlung zu ermitteln denkbar.

a)

Die einfachste und genaueste Möglichkeit der Berücksichtigung der Sonnenstrahlungsenergie ist es, die Strahlung, welche auf das Bauteil trifft mit einem Sensor direkt am Bauteil in $[W/m^2]$ in Richtung der Flächennormalen zu messen.

Ein mobiler Sensor, der dies ermöglicht, war jedoch für das in Punkt 7 durchgeführte Experiment nicht vorhanden.

b)

Die zweite Möglichkeit besteht darin, vorhandene Strahlungswerte auf Bauteiloberflächen z.B. aus der DIN4710 zu verwenden. Das ist jedoch für das in Punkt 7 beschriebene Experiment nicht zulässig, da hier keine saisonalen Durchschnittswerte benutzt werden können. Für sinnvolle Vergleiche der berechneten Temperaturverläufe im Bauteil mit Messergebnissen in der Wand müssen die Wetterbedingungen in unmittelbarer Nähe zum Bauteil und zur Versuchszeit gemessen werden.

Für unabhängige Simulationen ist die Verwendung genormter Werte aus der DIN jedoch eine sehr praktische Lösung, kann man doch so das angedachte Bauteil an „verschiedenen Orten“ zu den unterschiedlichsten klimatischen Bedingungen testen.

c)

Da die Werte in der DIN jedoch immer für einen bestimmten Zeitraum und bestimmte Vorzugsrichtungen (Nord, Süd, Südwest usw.) gelten und das Einlesen der Daten sehr mühselig sein kann, wird solch eine empirische Strahlung mit den Gleichungen Anhang C.9 und Anhang C.10 in Abhängigkeit vom Sonnenstand (also auch Jahrestag) und einem Trübungsfaktor B nach Anhang C Tabelle 1 berechnet. Es ist zu beachten, dass die Gleichungen nur für einen unbewölkten Himmel angewendet werden dürfen.

Für eine horizontale Fläche am 3.02.00 mit dem Trübungsfaktor $B = 0,15$ (Geographische Breite 53.52° , -Länge $13,4^\circ$) errechnet DynaTherm folgende Werte:

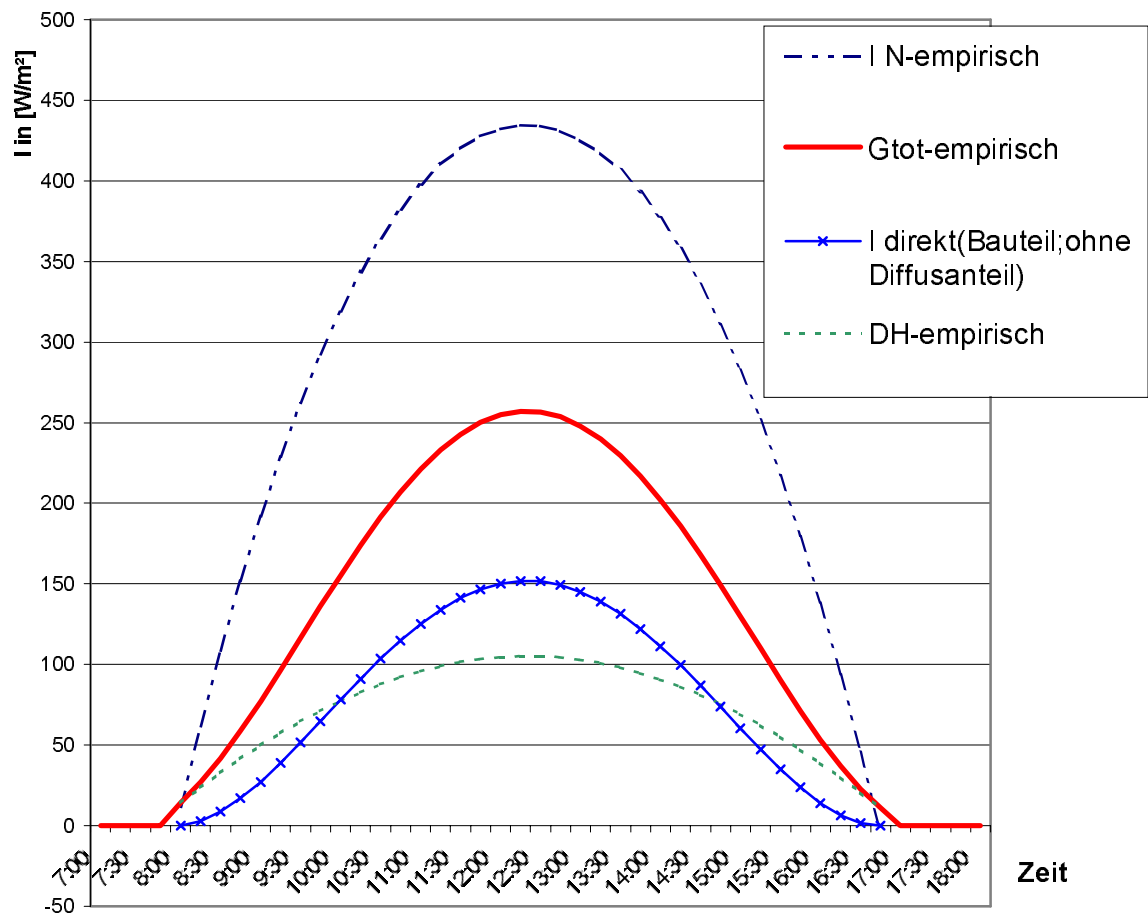


Abbildung 8 Von DynaTherm errechnete empirische Strahlung auf eine horizontale Fläche

Hierin sind:

I_N -empirisch = Normalstrahlung der Sonne nach Gleichung Anhang C.10 (Strahlung in Richtung der Sonnenstrahlung)

DH -empirisch = diffuse Strahlung auf eine horizontale Fläche nach Gleichung Anhang C.9 (für eine horizontale Fläche ist $DH_{empirisch} = D_{(Bauteil)}$)

Mit I_N -empirisch und DH -empirisch lässt sich nach Gleichung Anhang C.18 die empirische Gesamtstrahlung $G_{tot-empirisch}$ auf eine beliebig geneigte Fläche berechnen.

$I_{\text{direkt}}(\text{Bauteil})$ = direkte Strahlung auf das Bauteil (hier eine horizontale Fläche); nach Gleichung Anhang C.13

$$I_{\text{direkt}}(\text{Bauteil}) = I_{\text{N-empirisch}} \cos(\theta_{(\alpha=0)})$$

(α = Neigung des Bauteils zur Horizontalen)

$G_{\text{tot-empirisch}}$ = Summe aus $I_{\text{direkt}}(\text{Bauteil})$ und $D(\text{Bauteil})$ der auf das Bauteil treffenden Strahlung nach Gleichung Anhang C.18

Aus diesen Werten kann also von DynaTherm - ohne dass vom Anwender irgendwelche Eingaben hinsichtlich der Sonnenstrahlung vorgenommen werden müssen - die empirische Strahlung für einen wolkenfreien Himmel auf eine beliebig geneigte Fläche berechnet werden. Damit steht ein außerordentlich leistungsfähiges Werkzeug zur Strahlungsberechnung auf eine beliebig geneigte Fläche zur Verfügung.

Für eine im Freien senkrecht stehende Wand mit:

| | |
|-----------------------|------------------------|
| Azimet: | $A_s = 90^\circ$ |
| Neigung: | $\alpha = 90^\circ$ |
| Geographische Länge: | $52,52^\circ$ (Berlin) |
| Geographische Breite: | $13,4^\circ$ (Berlin) |

errechnet DynaTherm am 3.2.2000 folgende Werte:

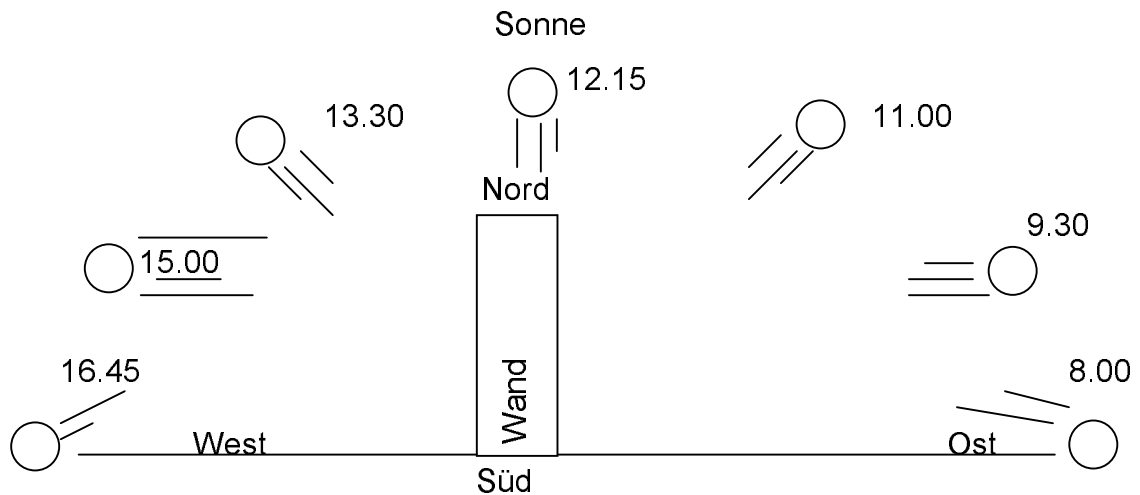


Abbildung 9 Einstrahlung auf eine senkrechte Wand am 3.2.2000

Tabelle 3 Von DynaTherm errechnete Strahlungsflüsse auf eine senkrechte Wand am 3.2.2000

| Westseite | [W/m ²] | Ostseite | [W/m ²] |
|---------------------------|---------------------|---------------------------|---------------------|
| 8.00 Uhr | | 8.00 Uhr | |
| D(Bauteil) = | 4 | D(Bauteil) = | 4 |
| I(direkt) Bauteil= | 0 | I(direkt) Bauteil= | 112 |
| 9.30 Uhr | | 9.30 Uhr | |
| D(Bauteil) = | 18 | D(Bauteil) = | 18 |
| I(direkt) Bauteil= | 0 | I(direkt) Bauteil= | 304 |
| 11.00 Uhr | | 11.00 Uhr | |
| D(Bauteil) = | 26 | D(Bauteil) = | 26 |
| I(direkt) Bauteil= | 0 | I(direkt) Bauteil= | 210 |
| 12.15 Uhr | | 12.15 Uhr | |
| D(Bauteil) = | 27 | D(Bauteil) = | 27 |
| <u>I(direkt) Bauteil=</u> | <u>0</u> | <u>I(direkt) Bauteil=</u> | <u>15</u> |
| 13.30 Uhr | | 13.30 Uhr | |
| D(Bauteil) = | 26 | D(Bauteil) = | 26 |
| I(direkt) Bauteil= | 188 | I(direkt) Bauteil= | 0 |
| 15.00 Uhr | | 15.00 Uhr | |
| D(Bauteil) = | 19 | D(Bauteil) = | 19 |
| I(direkt) Bauteil= | 306 | I(direkt) Bauteil= | 0 |
| 16.45 Uhr | | 15.00 Uhr | |
| D(Bauteil) = | 3 | D(Bauteil) = | 3 |
| I(direkt) Bauteil= | 92 | I(direkt) Bauteil= | 0 |

Der Nachteil der Verfahren b und c liegt auf der Hand. In beiden Fällen handelt es sich um empirische Werte. Starke Änderungen der eintreffenden Strahlung z.B. in Form von Bewölkung werden nicht berücksichtigt.

In DynaTherm befindet sich ein Schalter, um solche direkt am Bauteil gemessenen, genormten Werte oder die im folgenden erläuterte gemessene Globalstrahlung sofort verwenden zu können, ohne das Programm zu ändern.

d)

Die einzige Möglichkeit zur Bestimmung der Sonnenstrahlung auf die Erdoberfläche zum Zeitpunkt des Versuchs in der Nähe des Bauteils war das Messen der meteorologischen Globalstrahlung und der Reflexionsstrahlung mit der FHTW eigenen Wetterstation.

Eine der Aufgaben der Diplomarbeit war es, aus diesen Messwerten, die auf ein beliebig orientiertes Bauteil (auf der Erde) treffende Strahlung zum jeweils aktuellen Zeitpunkt der Messung zu bestimmen, um den Temperaturverlauf in einer Betonwand in Abhängigkeit von der Sonnenstrahlung mit DynaTherm zu berechnen und mit den Temperaturmesswerten im Bauteil zu vergleichen.

Die meteorologisch gemessene Globalstrahlung $G_H(\text{gemessen})$ ist definiert als die Strahlung, die auf eine freie horizontale Fläche trifft (also ohne Reflexionsstrahlung). Das Problem ist nun, dass man aus diesem Messwert nicht erkennen kann, ob es sich in jenem Moment um hauptsächlich direkte Sonnenstrahlen (freier Himmel) bzw. zum größeren Teil um diffuse Strahlung (bewölkt oder aber auch sehr diesig) handelt.

Da sich die Strahlungsanteile I_N und DH nach Gleichung Anhang C.13 und Gleichung C.15 unterschiedlich auf eine beliebig geneigte Fläche auswirken, lässt sich allein mit $G_H(\text{gemessen})$ (meteorologisch gemessene Globalstrahlung auf eine horizontale Fläche) die Strahlung auf eine beliebig geneigte Fläche nicht berechnen.

Zur exakten Ermittlung von $I_{\text{direkt-H}}$ (ohne Diffusanteil) (direkter Strahlungsanteil auf die horizontale Fläche) würde man einen zweiten Sensor benötigen, der sich in einem sensorgroßen Kernschatten einer Abdeckung

befindet, welche der Sonne folgt, so dass der genaue diffuse Anteil $DH_{\text{(gemessen)}}$ der Sonnenstrahlung gemessen werden kann. Die Differenz der meteorologisch gemessenen Globalstrahlung $G_{H\text{(gemessen)}}$ und $DH_{\text{(gemessen)}}$ wäre der Anteil $I_{\text{direkt-H}}$ (ohne Diffusanteil) (auf eine horizontale Fläche) der Sonnenstrahlung, mit dem man dann nach Gleichung 39 $I_{N\text{(gemessen)}}$ berechnen könnte.

e)

Da solch ein Sensor nicht vorhanden war, musste ein Ersatzmodell geschaffen werden, welches die meteorologisch gemessene Globalstrahlung auf I_N und DH aufteilt.

Die diffuse Strahlung besitzt die meiste Zeit einen deutlich geringeren Einfluss als die direkte Strahlung und soll deshalb nicht gemessen, sondern hier aus der empirischen Formel (Gleichung Anhang C.9) für die Horizontale berechnet werden.

Zieht man diese berechnete Strahlung $DH_{\text{(errechnet)}}$ nun von der gemessenen Globalstrahlung ab, hat man eine relativ gute Näherung für den Anteil der direkten Strahlung $I_{\text{direkt-H(Modell)}}$ (ohne Diffusanteil) auf eine horizontale Fläche.

$$I_{\text{direkt-H(Modell)}} = G_{H\text{(gemessen)}} - DH_{\text{(errechnet)}}$$

Gleichung 37

Die so ermittelte Strahlung ist jedoch noch nicht die Strahlung $I_{N\text{(Modell)}}$ in Richtung der direkten Sonnenstrahlen, sondern die Strahlung $I_{\text{direkt-H(Modell)}}$ mit dem Winkel θ zur direkten Sonnenstrahlung, da der Sensor waagrecht ($\alpha=0$) nach oben ausgerichtet ist.

$$I_{\text{direkt-H(ohne Diffusanteil)}} = I_{N\text{(Modell)}} \cos(\theta_{\alpha=0})$$

nach Anhang C Abbildung 1.(Seite 87) ergibt sich :

$$\cos(\theta_{\alpha=0}) = \sin(h)$$

Gleichung 38

α : Neigung der Fläche zur Horizontalen

θ : Winkel der Flächennormalen zur Sonnenstrahlung

h : Sonnenhöhe (Anhang C)

Um Gleichung 42 für eine beliebig geneigte Wand benutzen zu können, muss jedoch wieder die Strahlung I_N (ohne Diffusanteil) und DH vorliegen.

$$I_N(\text{Modell}) = \frac{I_{\text{direkt}} - H(\text{ohne Diffusanteil})}{\sin(h)}$$

Gleichung 39

Für den 3.02.2000 (Trübungsfaktor $B=0,15$) ergeben sich nach dem beschriebenen Modell für eine horizontale Fläche, mit einer an der FHTW gemessenen Globalstrahlung für Berlin folgende Werte:

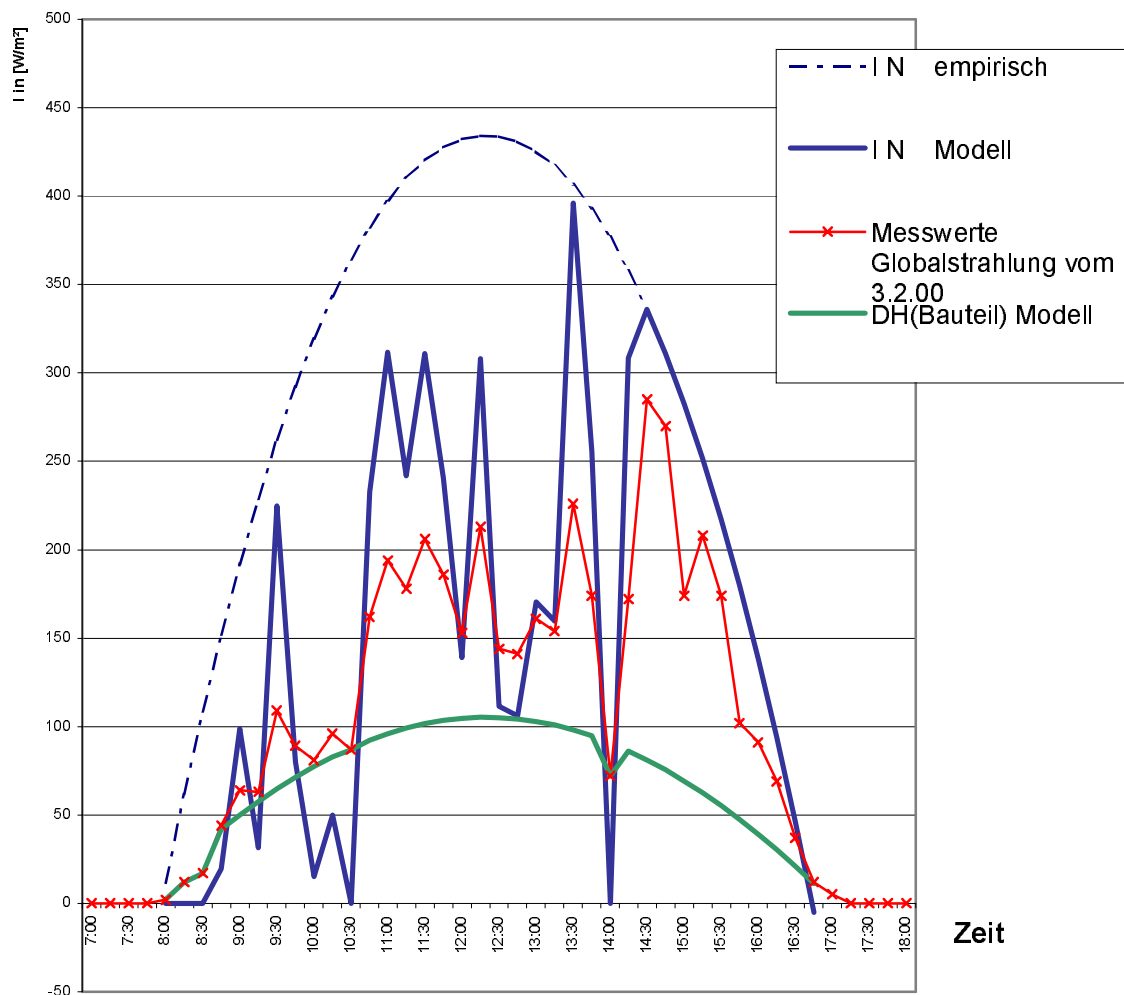


Abbildung 10 Berechnungsmodell für metrologisch gemessene Globalstrahlung am 3.2.00

Hierin sind:

I_N -empirisch nach Gleichung Anhang C. 10

$I_N(\text{Modell})$ nach Gleichung 39

$DH(\text{Modell})$ nach Gleichung Anhang C. 9 und im folgenden erläuterte Korrektur

Kommt es zu etwas höheren Diffusstrahlungen $DH(\text{Modell})$ oder Direktstrahlungen $I_N(\text{Modell})$, als sie nach den theoretischen Gleichungen Anhang C 10 und 9 auftreten dürften, werden diese auf den maximalen theoretischen Wert gekappt. Dies kann passieren, wenn zur Berechnung der Strahlungsanteile ein leicht abweichender Wert des Trübungsfaktors zur Realität angenommen wurde oder Messfehler bei der Bestimmung der Globalstrahlung auftreten. In Abbildung 10 ist dies z.B. für die Diffusstrahlungen $DH(\text{Modell})$ um 14.00 der Fall. Die Direktstrahlung $I_N(\text{Modell})$ wird von 15.00-16.45 Uhr auf die theoretisch maximale Strahlung nach Gleichung Anhang C 10 begrenzt.

Die in [57] ermittelten Winkel $\cos(\theta)$ (Winkel zwischen Richtung der Sonnenstrahlung und Normalen der Wand) wurden mit den Berechnungen von Franke [8] überprüft und ergaben eine Übereinstimmung.

Aus diesen modellhaften Normal- $I_N(\text{Modell})$ (ohne Diffusanteil) und $DH(\text{Modell})$ -Strahlungen und der vernachlässigten Reflexionsstrahlung siehe (Punkt 4.2.2.) kann mit Gleichung Anhang C.18 die eintreffende Sonnenstrahlung auf eine beliebig geneigte Fläche G_{tot} errechnet werden. Ohne die Reflexionsstrahlung wird aus dieser Gleichung:

$$G_{\text{tot}} = I + H = I_{N(\text{Modell})} \cos(\theta) + D_{H(\text{Modell})} \frac{(1 + \cos(\alpha))}{2}$$

Gleichung 40

Zusammenfassung:

Das entwickelte Berechnungsmodell nach Punkt 4.2 e) beruht auf sehr starken Näherungen und ist nur sinnvoll, wenn wie in diesem Fall konkrete Messergebnisse in einem Bauteil mit DynaTherm nachgewiesen werden sollen und nur ein Sensor, der die Globalstrahlung misst, zur Verfügung steht.

Obwohl die Berechnungswerte, wie in Punkt 7 nachgewiesen, sehr gut mit den Messwerten übereinstimmen, wird dringend empfohlen, einen Sensor zu verwenden, der die Strahlung direkt am Bauteil misst (Punkt 4.2 a), wenn das Berechnungsmodell in DynaTherm bezüglich der Wärmeleitung tiefergehend mit Messwerten aus der Realität verglichen werden soll.

Sollen Bauteile an unterschiedlichen Orten simuliert werden, wird man bekannten Werten von Wetterstationen (aus Messergebnissen der Vergangenheit) wie z.B. in Punkt 4.2. b) und c) beschrieben den Vorzug geben.

4.2.2 Der Anteil der Reflexionsstrahlung

Die Messwerte der Wetterstation ergeben für einen klaren Sommertag im Juli eine Reflexionsstrahlung (für einen zum Erdboden ausgerichteten Sensor) von maximal 180 W/m^2 . Die gemessene Globalstrahlung liegt teilweise um den Faktor 7,5 höher. Nach Gleichung Anhang C.17 ist die auftreffende Reflexionsstrahlung stark winkelabhängig. Für vertikale Wände verringert sich der Einfluss bereits um 50%, für horizontale Flächen wird sie Null. Außerdem kommt hinzu, dass sie sehr stark vom Aufbau der Umgebung abhängig ist und in voller Stärke nur in Nähe des Erdbodens auftritt (an hohen Häusern geht sie ebenfalls auch für vertikale Flächen gegen einen sehr kleinen Wert). Von daher soll hier die Reflexionsstrahlung wie auch in [8] unberücksichtigt bleiben. Ein Einbinden der Messwerte ins Programm ist möglich (siehe Punkt 3.2.7), würde aber den Aufwand bei der Dateneingabe nur unnötig erhöhen.

4.2.3 Emittierte Strahlung

Das Bauteil selbst absorbiert nur einen Teil der Strahlung, da ein Teil der Strahlung wieder reflektiert wird. Um aus G_{tot} die Strahlungsenergie Q_s zu erhalten, die vom Bauteil wirklich aufgenommen wird, muss der Anteil der Sonnenstrahlung (wie in Pkt 2.4.2 angegeben) mit einem empirisch ermittelten Faktor der Absorptionszahl a_s multipliziert werden.

$$Q_s = a_s G_{tot}$$

Gleichung 41

Laut Franke [8] kann man im Bauwesen meist von sehr groben Werten für a_s ausgehen, da Fassaden im allgemeinen mit der Zeit schnell verschmutzen.

Tabelle 4 Absorptionszahl a_s für Außenschichten

helle Flächen $a_s=0,5$

graue Flächen $a_s=0,7$

dunkle Flächen $a_s=0,9$

Für stark reflektierende Flächen wie Metall, Abdeckungen oder Glas kann a_s schnell sehr kleine Werte annehmen. Man sollte hier genauere Werte experimentell ermitteln oder vom Hersteller erfragen (z.B. **Kupfer poliert $a_s=0,17$** aus [21], siehe Anhang E).

In der DIN 4108-20 fanden sich ähnliche Näherungswerte. Für reflektierende Flächen wird dort zusätzlich $a_s = 0,2$ angegeben.

5 Beschreibung des Programmsystems „DynaTherm“

Die Entscheidung diese Aufgabe in Excel zu lösen, rührt vor allen Dingen daher, dass der Ingenieur mit diesem Programmsystem außerordentlich gut vertraut ist. Durch die einfache Integration von „Visual Basic for Applications (VBA)“ lässt sich das gesamte Programm ohne großen Aufwand erweitern und verändern. Die Tabellenfunktionen von Excel eignen sich hervorragend zur einfachen Bearbeitung solch großer Datenmengen, wie sie hier für viele Fragestellungen anfallen. Die gewonnenen Berechnungswerte können vom Anwender nach Belieben weiterverarbeitet und ausgewertet werden. Der Anwender hat dabei völlig freie Hand.

Es lassen sich alle Möglichkeiten der graphischen Darstellung von Excel für bereits errechnete Daten nutzen. Die Daten können für zusätzliche Programm-Module oder externe Anwendungen problemlos durch das einheitliche „Microsoft Clipbord“ verwendet werden.

Hinzu kommt, dass sich vorhandene Randbedingungen wie z.B. gemessene Daten von Wetterstationen oder gemittelte Werte (z.B. aus der DIN 4710) ohne Probleme einlesen lassen. So kann das Bauteil an verschiedenen Orten und zu verschiedenen Wettersituationen getestet werden.

5.1 Erläuterung der Tabellenstruktur und Funktion der einzelnen Programm-Module

Alle Begriffe, die Excel - Standardfunktionen und Objekte beschreiben, werden im folgenden in Anführungszeichen gesetzt. Sollte einer der Begriffe unbekannt sein, kann man diesen Begriff in der „Excel-Online-Hilfe“ oder anderer Excel Standard Literatur nachschlagen.

Zum Betrachten oder Bearbeiten der Programm- Module ist der VBA- Editor von Excel aufzurufen (über den Menüpunkt „Extras – Makro - Visual-Basic Editor“). Im Anhang dieser Arbeit befinden sich ebenfalls alle Module nach „Arbeitsblättern“ sortiert.

Die Programmmodule {instationäre Berechnung} und {stationär_Berechnungsoptionen} wurden als separates Modul im „Ordner Module“ in der „Arbeitsmappe“ gespeichert.

Alle anderen Programmmodule wurden im verwendeten „Arbeitsblatt“ gespeichert, so dass eine inhaltliche Ordnung vorhanden ist. In der folgenden Abbildung zur Programmstruktur von DynaTherm sind aus Übersichtsgründen nur die Module aufgezeigt, die wirklich zur Temperaturberechnung beitragen. In Punkt 5.3 werden alle Module zu jedem Arbeitsblatt noch einmal kurz genannt und in Punkt 5.4 kurz erläutert.

Um den programmtechnischen Hintergrund von DynaTherm zu verstehen, sind keine besonderen Informatikkenntnisse nötig. Um DynaTherm zu erstellen, benutzte ich lediglich die „Excel-Online-Hilfe“ und [15]. Alle vorhergehenden Kenntnisse habe ich im normalen Informatikunterricht an der Schule und während meines Studiums als Bauingenieur an der FHTW erworben.

Im weiteren Verlauf der Beschreibung wird ein solches Grundwissen vorausgesetzt. Dieses lässt sich jedoch schnell mit [15] oder ähnlicher Literatur erwerben, auch wenn man keine Vorkenntnisse besitzt.

Alle Programme wurden so erstellt, dass sie möglichst einfach zu verändern und zu verstehen sind. Das Programm-Modul {instationäre_Berechnung} wurde besonders auf seine maximale Geschwindigkeit hin programmiert und erscheint daher auf den ersten Blick vielleicht als eine ungewöhnliche Lösung.

Am schnellsten und einfachsten lässt sich die Funktionsweise der „Zellfunktionen“ verstehen, wenn man sich die Funktion in der „Bearbeitungsleiste“ anschaut und die entsprechenden Funktionen, die man vielleicht noch nicht kennt, in der „Online Hilfe“ von Excel nachschlägt. Dort sind sehr ausführliche und anschauliche Erklärungen vorhanden. Hilfreich sind dabei die von mir gewählten Farben der „Zellen“ und auch das Tool zu „Spurensuche“ unter dem Menüpunkt „Extras-Detektiv“. Von daher wird in den Erläuterungen zu den Arbeitsblättern nur auf die verwendeten Strukturen und einige besondere Funktionen, die zur Lösung benutzt wurden, eingegangen.

Einzelheiten zu Programmen sind des besseren Verständnisses wegen in Kommentaren im Programmcode (siehe Anhang B) eingefügt.

Alle von mir selbst erstellte Bezeichnungen für Arbeitsblätter und Programm-Module werden zum besseren Verständnis in geschweifte Klammern {} gesetzt.

Um in der Tabelle einen Bereich zu erläutern, benutze ich die Excel übliche Schreibweise.



Abbildung 11 Direkte Zellbeschreibung z.B. (B2)



Abbildung 12 Beschreibung eines Spalten- bzw. Zeilenbereichs z.B. (B3:B6)



Abbildung 13 Beschreibung eines Bereichs aus mehreren Zeilen und Spalten z.B. (A3:C6)

5.2 Überblick der obersten Programmstruktur in DynaTherm

Das Programm besteht aus einer Vielzahl von „Arbeitsblättern“ und „VBA-Berechnungsmodulen“, die komplex miteinander in Verbindung stehen. Diese Verbindungen sollen in diesem Punkt erläutert werden. Eine Bedienungsanleitung zur Vorgehensweise bei der Anwendung des Programms befindet sich im Anhang A.

Im Arbeitsblatt {Material-Datenbank} stehen die zur Berechnung benötigten Stoffdaten und Wärmeübergangszahlen.

Das Arbeitsblatt {Wandaufbau} kann aus dieser Tabelle mit konkreten Daten für den gewählten Wandaufbau gefüllt werden.

Bevor Temperaturverläufe berechnet werden können, müssen im „Arbeitsblatt“ {Randbedingungen} die äußeren Randbedingungen eingetragen werden.

Jetzt können im Arbeitsblatt „Berechnungsoptionen“ die für die Berechnung gewünschten Parameter eingestellt werden.

Im Arbeitsblatt {Berechnungsoptionen} oder {Animation} kann jetzt das Programm-Modul {instationäre_Berechnung} gestartet werden. Die errechneten Daten werden in das Arbeitsblatt {Ausgabewerte} eingetragen.

Diese Daten werden in den Arbeitsblättern {Animation} und {3D-Graphik} in Form von Diagrammen ausgewertet.

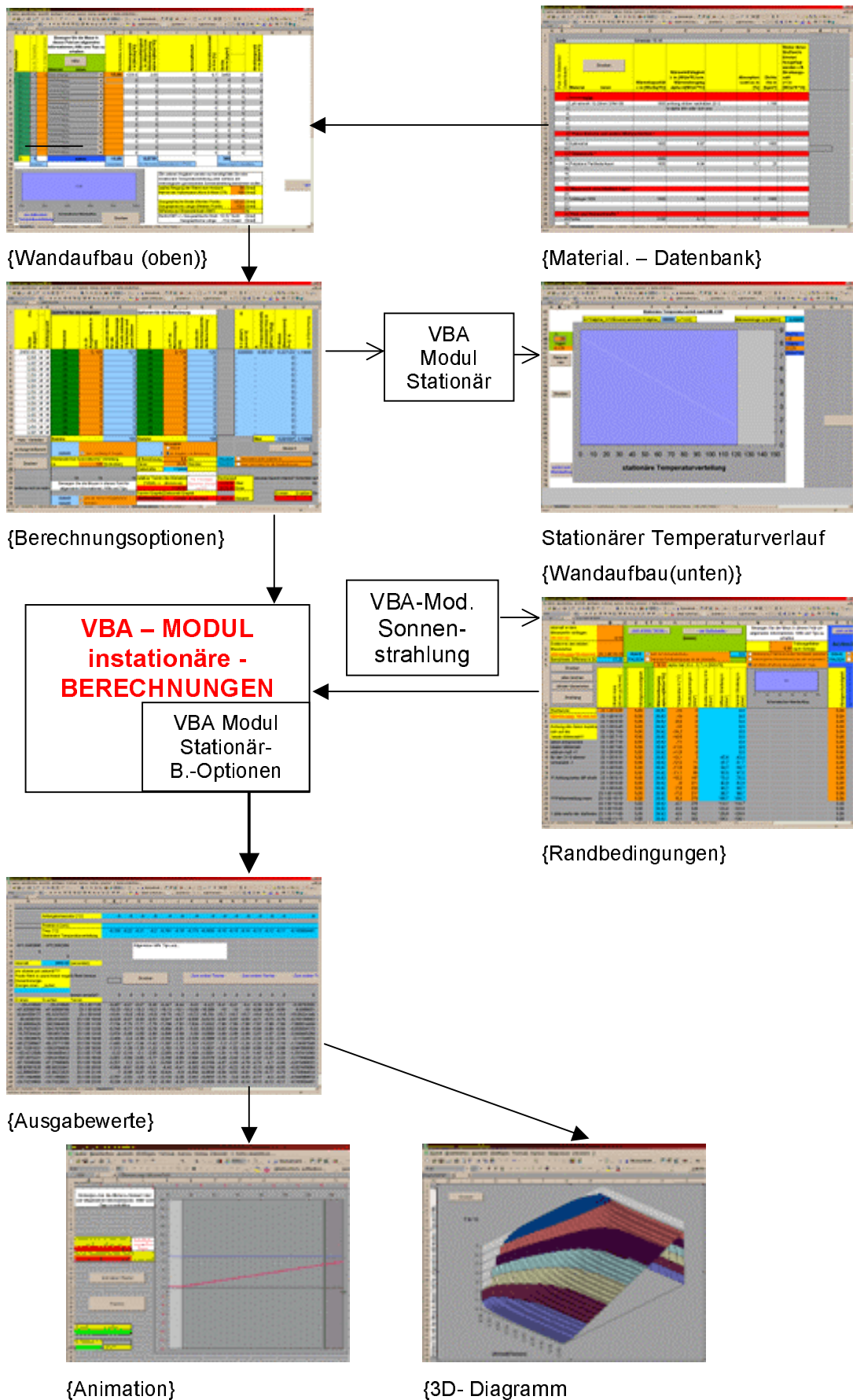


Abbildung 14 Überblick der obersten Programmstruktur in DynaTherm

5.3 Beschreibung der „Arbeitsblätter“

(Erläuterung der Tabellenstruktur und der Funktion sowie der enthaltenen Programme mit dem entsprechenden VBA Quellcode.)

In jedem Arbeitsblatt befindet sich ein Feld für „Allgemeine Hinweise, Tipps und Hilfe“ für das entsprechende Arbeitsblatt. Hier wird genauso wie bei den Fehlerfeldern ein „Kommentar“ zur entsprechenden Zelle hinzugefügt.

Alle Eingabefelder (orange) sind durch die Funktion „Gültigkeit“ auf sinnvolle Eingaben beschränkt. Alle Zellen, in denen keine Eingaben stattfinden sollen, wurden mit der Option „Blatt-Schützen“ gesperrt. Um die Übersicht zu erhöhen, wurden Spalten bzw. Zeilenumbrüche eingeführt (rote Linie), die dafür sorgen das bestimmte Spalten bzw. Zeilen immer sichtbar bleiben. Diese lassen sich über die Funktion „Fixieren“ aufheben oder ändern.

5.3.1 Arbeitsblatt {Wandaufbau}

Es wurden folgende Programm-Module in diesem „Arbeitsblatt“ erstellt:

| | |
|------------------------|---|
| {Bauteil_Drucken } | (druckt den Wandaufbau) |
| {Diagram_Drucken} | (druckt das Diagramm zur stationären Temperaturverteilung) |
| {Neues_Bauteil} | (löscht alle Bauteile und Schichtdicken) |
| {stationär_Wandaufbau} | (berechnet die stationäre Temperaturverteilung) |

Navigationsfelder:

| |
|------------------------------|
| {zurück_zum_Wandaufbau} |
| {zur_stationären_Berechnung} |

5.3.1.1 Wandaufbau

Für die „Dropdown- Menüs“ wurden die von Excel angebotenen „Steuerelemente“ benutzt. Sie beziehen sich auf die Namen der Materialien im Arbeitsblatt {Material-Datenbank} im Bereich (C3-C198). Der Ausgabewert

dieser Felder ist eine laufende Nummer für den definierten Bereich. (C3)=1 (C4)=2 usw. Die Ausgabe dieser Werte erfolgt im Bereich {Wandaufbau(D3:D17)}.

Anhand dieser laufenden Positionsnummer orientiert sich die Funktion „INDEX“ in jeder einzelnen Zelle im Bereich G3:M17) und kann somit die Stoffwerte aus der {Material-Datenbank} ausgeben.

Alle anderen Ausgabewerte werden durch einfache „Wenn-dann-Beziehungen“ und Verwenden der Grundrechenarten mit einer „Funktion“ in der jeweiligen Zelle gelöst.

Als Diagramm wird ein „Balkendiagramm“ benutzt, dass die Dicke der Schichten in diesem „Arbeitsblatt“ als Eingangswerte erhält.

5.3.1.2 Die stationäre Wärmeleitungsberechnung

Als Diagramm kommt ein „Kombinationsdiagramm“ aus „Balken- und Liniendiagramm“ zum Einsatz, um Wandaufbau und Temperaturverlauf gemeinsam darzustellen.

Eingangswerte sind die Daten aus dem „Arbeitsblatt“ {Berechnungsoptionen(N3:N17)} und die Temperaturwerte im Bereich (F35:VQ35), diese wurden von dem Modul {stationär_Wandaufbau} errechnet.

5.3.2 Arbeitsblatt {Material-Datenbank}

Programme:

{Drucken} (druckt die Material-Datenbank)

Alle Werte sind einfache Zahlen- bzw. Texteingaben. Die Werte dienen als Quelle für die Funktion „INDEX“ in den Blättern {Wandaufbau} und {Berechnungsoptionen}. Das „Arbeitsblatt“ enthält ein einziges Programmmodul {Drucken} zum Ausdrucken der Materialdatenbank.

5.3.3 Arbeitsblatt {Randbedingungen}

Programme:

| | |
|--|--|
| {Drucken}: | (druckt die Randbedingungen) |
| {alles_Löschen}: | (löscht alle Werte) |
| {Löschen}: | (löschen der alten Berechneten Werte) |
| {Uhrzeit_generieren}: | (Trägt die entsprechenden Uhrzeiten ein und kopiert die Formel für den äußeren Wärmeübergang in Spalte (G) und (U).) |
| {auftreffende_ Strahlungsenergien}: | (berechnet die Strahlung, die aufs Bauteil trifft) |

Navigation:

{Schaltfläche29_BeiKlick, {Schaltfläche30_BeiKlick},
{Schaltfläche31_BeiKlick}

Es gibt hier nur zwei unterschiedliche Excel Funktionen:

- In (B4) wird die Differenz des Start- und Endtermins in Stunden berechnet
- In den Spalten (G) und (U) wird α_k aus α_0 und der jeweiligen Windgeschwindigkeit durch die Gleichung 33 in der Zelle direkt berechnet.
So lässt sich die Änderung von α_0 sehr schön direkt in α_k erkennen.

Um Speicherplatz zu sparen, wird diese Formel (aus Zelle (G7) bzw. (U7)) vom Programm {Uhrzeit_generieren} nur für den wirklich benötigten Bereich bis zur Endzeit kopiert. Würde man die Formel in die gesamte Spalte kopieren, würde der Speicherplatz um 6 MB ansteigen.

Außerdem werden vom Programm {Uhrzeit_generieren} in Spalte (B) die Termine als {Zeitwert} von Start bis Endtermin in dem entsprechend gewählten Zeitabständen eingetragen.

Für die Optionen dieses Arbeitsblattes wurden hier wieder Kombinationsfelder verwendet.

5.3.4 Arbeitsblatt {Animation}

Programme:

{Drucken}: (druckt das Arbeitsblatt aus)

{start_instationäre_Berechnung} (startet des Programm-Modul zur instationären Berechnung)

Dieses Arbeitsblatt enthält ein Feld (A2), das mit einem Kommentar für die allgemeine Hilfe versehen wurde und ein „Kombinationsdiagramm“, das als Datenquelle die Temperaturwerte im Blatt {Ausgabewerte} und die Schichtdicke aus dem Blatt {Berechnungsoptionen} benutzt.

5.3.5 Arbeitsblatt {Ausgabewerte}

Programme:

{Drucken}: (druckt das Arbeitsblatt aus)

Navigation:

{Schaltfläche2_BeiKlick}

Dieses „Arbeitsblatt“ dient hauptsächlich zur Ausgabe der errechneten Werte der Programme {instationäre_Berechnung} sowie {stationär_Wandaufbau} und als Datenquelle für die Diagramme in den Arbeitsblättern {3D-Diagramm}, {Animation} und {Berechnungsoptionen}

5.3.6 Arbeitsblatt {3D-Diagramm}

Programme:

{Drucken}: (druckt das Arbeitsblatt aus)

Dieses Arbeitsblatt enthält ein Feld (A2), dass mit einem Kommentar für die allgemeine Hilfe versehen wurde und ein „3D Flächen Diagramm“, dass als Datenquelle die Temperaturwerte im Blatt {Ausgabewerte} benutzt.

5.3.7 Arbeitsblatt {Berechnungsoptionen}

Programme:

| | |
|---------------------------------------|---|
| {Drucken}: | (druckt das Arbeitsblatt aus) |
| {Ausgabenverteilung} | (verteilt die darzustellenden Berechnungswerte auf die gewünschte Menge auf bis zu 15 Ausgabewerte) |
| {Anfangstemp} | (legt die Anfangstemperatur fest) |
| {dx_Ausgabe_gleich_ dx_Berechnung} | (kopiert die gewählte Abschnittsbreite (dx) der Ausgabewert in Spalte M in die Spalte P) |

Navigation:

{Makro2}

Alle eingegebenen Bauteile werden hier noch einmal direkt hintereinander sortiert, so dass das Modul {Berechnungsoptionen} die Stoffwerte problemlos einlesen kann. Dies geschieht mit Hilfe der Funktion „Verweis“ in Spalte (B), die sich an der Pos.Nr., die in Spalte A bestimmt wurde, orientiert. An der laufenden Material-Datenbanknummer in Spalte (B) kann sich nun wieder die Funktion „Index“ orientieren und alle Stoffwerte in den Bereich (C3:K17) übertragen. Zur Auswahl der Optionen wurden die von Excel angebotenen „Steuerelemente“ benutzt. Die {Fehlerfelder} überprüfen die Eingaben auf sinnvolle Werte durch einfache Zellverknüpfungen und „Wenn-dann-Beziehung“ direkt in der „Zelle“.

Gesondert im Ordner Module befindet sich

{Stationär_

Berechnungsoptionen} (berechnet die Stationären Temperaturverlauf)

{instationäre_Berechnung} (berechnet den instationären Temperaturverlauf)

5.3.8 Arbeitsblätter {Notizen}, {Hilfe} und {Info}

Diese Arbeitsblätter enthalten keinerlei Funktionen oder Programme. Es wird lediglich von den graphischen Werkzeugen, die in Excel zur Verfügung stehen, Gebrauch gemacht. Der 3D-Schriftzug wurde mit „Wordart“ erzeugt.

5.4 Beschreibung der Programmmodule zur Temperaturberechnung

Einzelheiten zu den Programmen sind des besseren Verständnisses wegen in Kommentaren im Programmcode (siehe Anhang B) eingebunden.

Im folgenden werden die Eingangs- und Ausgangswerte der für die Temperaturberechnungen relevanten Programm-Module beschrieben.

Berechnung der instationären Temperaturverteilung in dem Programm-Modul {instationäre_Berechnung}

Eingangswerte

Aus dem Arbeitsblatt {Berechnungs-Optionen}

Stoffwerte: $\lambda_i, \rho_i, c_i, \alpha_i$

Optionen $\Delta x_i, \Delta t_i, t$

Anfangstemperaturverteilung $T(x)$

Anzeigeoptionen (Δx_i)

Aus {Randbedingungen}

Innentemperatur

Außentemperatur

Wärmeübergang innen

Wärmeübergang außen

Strahlung innen

Strahlung außen

Absorptionsfaktor der Strahlung innen

Absorptionsfaktor der Strahlung außen

Berechnung

Ausgabe

In {Ausgabewerte}()

Temperaturverlauf übers Bauteil zu gewählten Zeitschritten

Berechnung der auftreffenden Strahlungsenergien in dem Modul
{Randbedingungen}

Eingangswerte

Aus dem Arbeitsblatt {Randbedingungen}

Strahlung an der Innenseite
Strahlung an der Außenseite
Startzeit
Intervall
Endzeit
Art der Strahlung
Windgeschwindigkeit

Berechnung**Ausgabe**

Im Arbeitsblatt {Randbedingungen}
Uhrzeiten für das gewählte Intervall
Wärmeübergang, innen und außen
Diffus-; Direkt-; Gesamt-
Strahlung pro m², die auf die Innenseite der Wand trifft
Strahlung pro m², die auf die Außenseite der Wand trifft

Berechnung der stationären Temperaturverteilung in dem Modul
{stationär_Wandaufbau}

Eingangswerte

Aus dem Arbeitsblatt {Berechnungs-Optionen}()

Stoffwerte λ_i, α_i
Anzeigeoptionen (Δx_i)

Aus dem Arbeitsblatt {Randbedingungen}

Innentemperatur innen
Außentemperatur außen

Wärmeübergang innen
Wärmeübergang außen

Berechnung**Ausgabe**

In {Ausgabewerte}()
Temperaturverlauf übers Bauteil nach der Zeit unendlich

6 Berechnungsergebnisse eines konkreten Beispiels im Vergleich zu Berechnungsergebnissen aus der Literatur

Die Richtigkeit des gewählten Berechnungsverfahrens muss auf zwei Arten geprüft werden. So muss für $t \rightarrow \infty$ bei konstanten Randbedingungen die instationäre Temperaturverteilung in die stationäre übergehen. Dies ist für DynaTherm immer gegeben, wenn Bedingung Gleichung 12 eingehalten wird. Zum zweiten muss die Geschwindigkeit überprüft werden, mit der dieser Ausgleichvorgang geschieht. Diese beiden Bedingungen sollen im folgenden anhand ausgewählter Beispiele bewiesen werden.

Johannsen bietet in [19] ein einfaches Beispiel für eine 10 cm dicke Betonwand, an dem sich die Genauigkeit der Rechenergebnisse sehr gut aufzeigen lässt.

Umgerechnete Stoffwerte:

Beton:

$$c = 1223,48 \text{ Ws/(kgK)}$$

$$\rho = 2400 \text{ Kg/m}^3$$

$$\lambda = 2,03 \text{ W/(mK)}$$

$$\alpha_{\text{innen}} \text{ und } \alpha_{\text{außen}} = 8,12 \text{ W/(m}^2\text{K)}$$

Es wird eine Betonwand berechnet mit der Dicke $d=10\text{cm}$. Zum Zeitpunkt $t<0$ besitzt die Wand sowie die Umgebung durchgehend eine Temperatur von 10°C . Zum Zeitpunkt $t=0$ tritt ein plötzlicher Temperatursturz auf. Die Umgebungstemperatur beträgt für alle Zeiten $t>0$ nun 0°C .

Es wird der Zeitpunkt für $(t=3)$ Stunden nach dem plötzlichen Temperatursturz genauer untersucht.

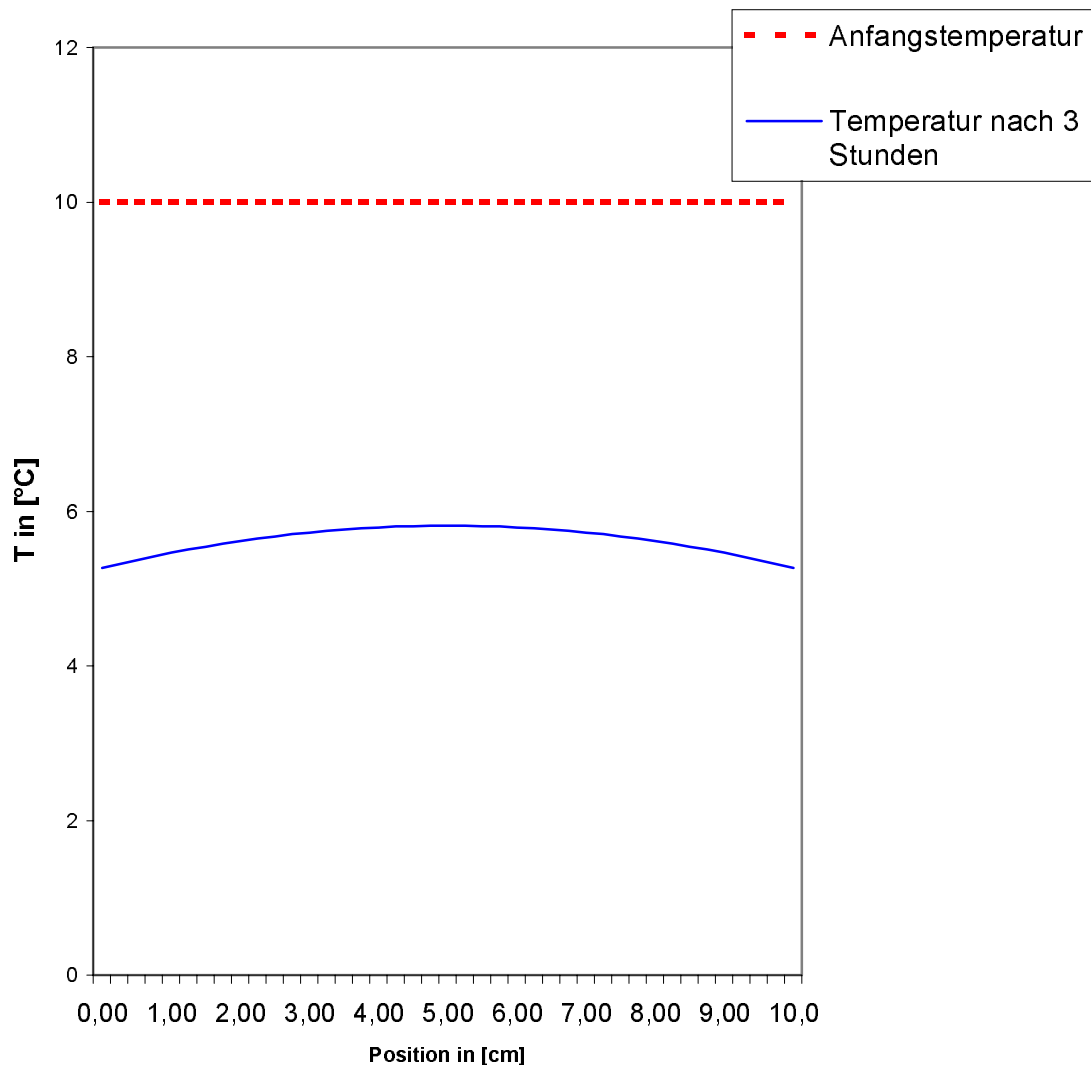


Abbildung 15 Vergleich der Berechnungswerte zu einem analytischen Ergebnis

Johannsen [19] gibt als analytisches Ergebnis (ermittelt über ein Diagramm) rund $5,8^{\circ}\text{C}$ für die Mitte der Wand (Position 5cm) zum Zeitpunkt $t = 3\text{h}$ an.

Mit „DynaTherm“ erhält man mit $dx = 0,25\text{ cm}$ und $dt = 4\text{ sec}$ $5,813^{\circ}\text{C}$.

Die Rechenzeit beträgt bei stündlicher Berechnung der Temperaturwerte ohne „Animation“ 2 Sekunden. Das in DynaTherm ermittelte Ergebnis ist näher am analytischen Wert als die von Johannsen nach dem Differenzenverfahren berechneten Werte.

An diesem Beispiel ist gezeigt, dass mit der im Programm DynaTherm leicht veränderten Berechnungsmethode sehr genaue Ergebnisse, in sehr hoher

Geschwindigkeit erzielt werden können. Δx ist natürlich um ein vielfaches kleiner als in [19].

Tabelle 5 Vergleich der untersuchten Berechnungsverfahren

| Rechenzeit [sec] | Δx in [cm] | Δt in [sec] | T analytisch | teilweise Integration | explizites Verfahren | implizites Verfahren |
|---------------------|-----------------------|------------------------|-----------------|--------------------------|-------------------------|-------------------------|
| 19 | 0,25 | 1 | 5,8 | 7,122 | 5,814 | 5,814 |
| 13 | 0,25 | 2 | 5,8 | 7,245 | 5,815 | 5,813 |
| 9 | 0,25 | 4 | 5,8 | 7,511 | 5,815 | 5,813 |
| 6 | 0,25 | 60 | 5,8 | 9,837 | nicht lösbar | 5,823 |

Tabelle 5 vergleicht die o.g. Berechnungsverfahren mit der analytischen Lösung von Johannsen [19]. Die Ergebnisse für das explizite und implizite Verfahren sind in einem weiten Bereich von Δt nahezu gleich. Lediglich für $\Delta t = 60s$ versagt das explizite Verfahren (Stabilitätsbedingung (12) nicht eingehalten). Mit der kapazitiven Korrektur [36] nach Gleichung 44 liegen die Werte weniger als $1/10$ °C höher.

Für das Verfahren der teilweisen Integration weichen die Ergebnisse stark vom analytischen Wert ab und der Fehler ist zu Δt proportional.

Die Rechenzeit wurde mit einem Pentium 433Mhz für alle 3 Verfahren gleichzeitig von DynaTest ermittelt. Das Programmsystem DynaTest befindet sich ebenfalls auf der CD-Rom. Das Test-Modul {INSTATEXPLIZIT} von DynaTest befindet sich im Anhang B.

Zur Verifikation der Strahlungsberechnungen wurde eine bekannte numerische Lösung [36] für eine einschichtige Keramik mit Strahlungseinflüssen auf beiden Rändern untersucht. Bei dem Beispiel handelt es sich um eine 3cm dicke Keramik mit der Anfangstemperatur 20°C und folgenden Stoffeigenschaften:

$$\lambda=3 \text{ W/mK} \quad \rho=1600 \text{ kg/m}^3 \quad c=0,8 \text{ kJ/kgK} \quad \varepsilon=0,8$$

Eine Seite ist einer konstanten Strahlungsquelle von 1000 °C ausgesetzt. Die andere Randschicht führt einen strahlungsmaßigen Wärmeaustausch mit einer 20°C Temperatur aus. Zusätzlich fließt durch Konvektion Wärme ab $h=1,92dT^{1/4} \text{ (W/m}^2\text{K)}$ ($Q_{\text{konv}}=h \cdot T$).

In [36] wird eine interessante Verfeinerung in den Randbedingungen eingeführt. Die Wärmemenge, welche durch die Randschicht fließt, fließt teilweise in die Wand ein, teilweise wird sie zur Erhöhung der Temperatur in dem $\frac{1}{2} dx$ starken Randabschnitt verwendet.

$$R = \frac{\Delta x}{\lambda} \quad R_\alpha = \frac{1}{\alpha_k} \quad R_c = \frac{2\Delta t}{\rho c \Delta x}$$

Gleichung 42

So gilt für den linken Rand dann folgende Wärmebilanzgleichung:

$$\frac{T_{1,k+1} - T_{2,k+1}}{R} + \frac{T_{1,k+1} - T_{1,k}}{R_c} = \frac{T_{innen} - T_{1,k+1}}{R_\alpha} + Q_{Strahlung}$$

Gleichung 43

mit der Lösung

$$T_{1,k+1} = \frac{\frac{T_{1,k}}{R_c} + \frac{T_{2,k+1}}{R} + \frac{T_{innen}}{R_\alpha} + Q_{Strahlung}}{\frac{1}{R_\alpha} + \frac{1}{R_c} + \frac{1}{R_\alpha}}$$

(entsprechend für den rechten Rand)

Gleichung 44

Diese Modifikation in den Randschichten wurde programmiert (siehe Anhang B. Modul DynaTest und Anhang G. DynaTest). Die folgende Abbildung zeigt den Temperaturverlauf durch das Keramikbauteil für $t = 0$ bis $t = 150$ Sekunden. Die Ergebnisse mit dem angepassten Programm DynaTest ergeben eine sehr gute Übereinstimmung (Abweichung kleiner 1%). Ohne die zusätzliche Erweiterung werden ca. 10% abweichende Werte ermittelt. Die stationäre Temperaturverteilung stimmt auch ohne die zusätzliche Erweiterung exakt mit den Werten aus [36] überein.

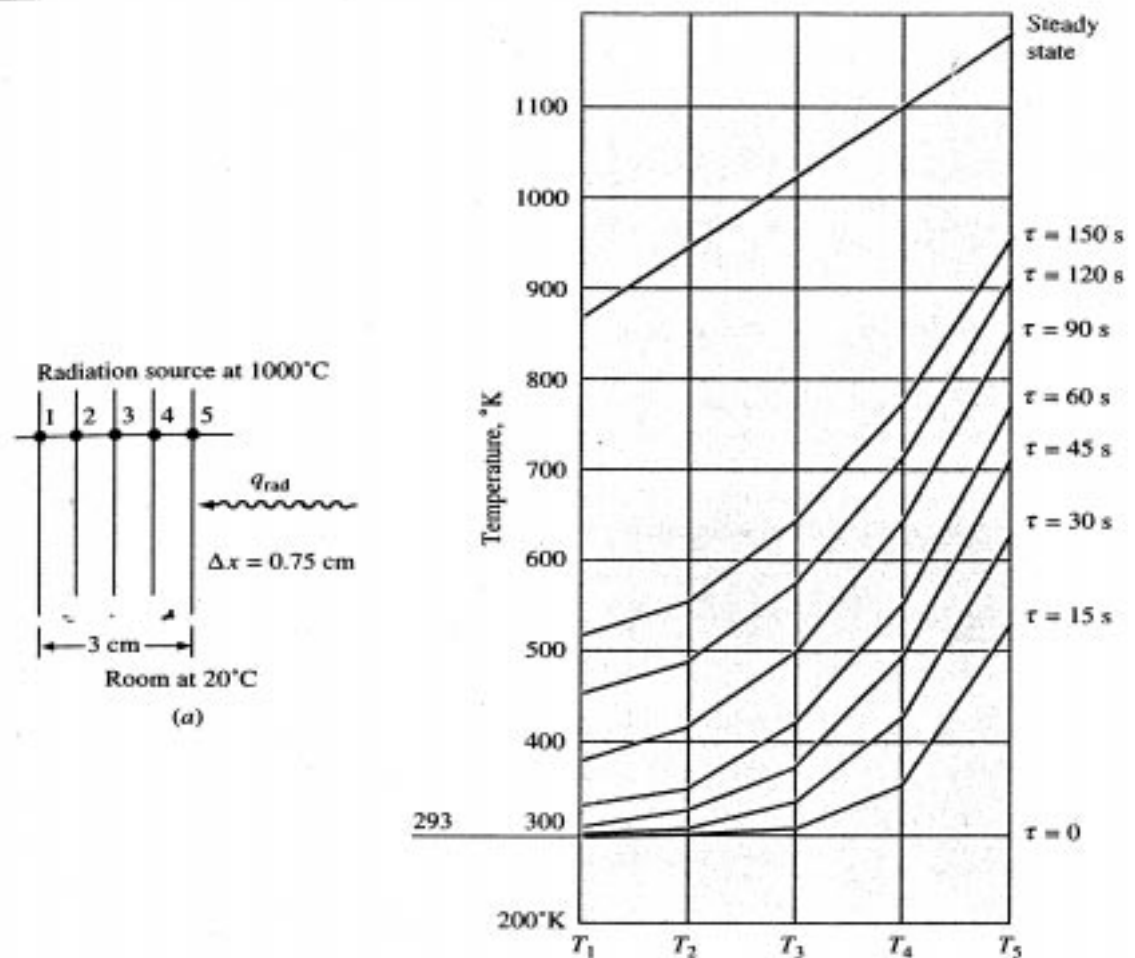


Abbildung Temperaturverteilung infolge Strahlung aus [36]

Das Beispiel in [36] ist wegen der hohen Strahlungen und den daraus resultierenden hohen Oberflächentemperaturänderungen in seiner Bedeutung so nicht auf die Baupraxis zu übertragen. In der deutschsprachigen Literatur wurde diese Modifikation der Randbedingungen nicht vorgefunden. Sie spielt auch bei geringen Temperaturänderungen nicht solch eine wesentliche Rolle (ca. $1/10^{\circ}\text{C}$ Abweichung). Trotzdem sollte in weiterführenden Arbeiten untersucht werden, ob diese Modifikation für alle Berechnungen vorgenommen werden sollte, da sie mit Sicherheit den physikalisch korrekteren Ansatz darstellt.

7 Vergleich mit Messergebnissen aus dem eigenen Versuch

Um die Übereinstimmung des gewählten Berechnungsmodell zur Wärmeleitung und der Sonnenstrahlung mit der Realität zu überprüfen, sollten Temperaturmesswerte in einer Versuchswand mit den berechneten Werten des Programmsystems DynaTherm verglichen werden.

7.1 Versuchsaufbau

Für den Versuch stand eine 0,95m*0,95m große und 0,15m dicke Betonwand auf zwei Betonfüßen senkrecht aufgerichtet zur Verfügung. Es wurden 2 Sensoren mit einem Abstand von je 5 und 15 Millimeter vom linken, sowie 2 Sensoren mit einem Abstand von je 5 und 15 Millimeter vom rechten Rand einbetoniert. Die 4 Temperatursensoren befinden sich genau in der Mitte der Wand, um so die Wärmeleitung in der Vertikalen möglichst gering zu halten. Die Sensoren liegen bezüglich der Horizontalen in einer Linie.

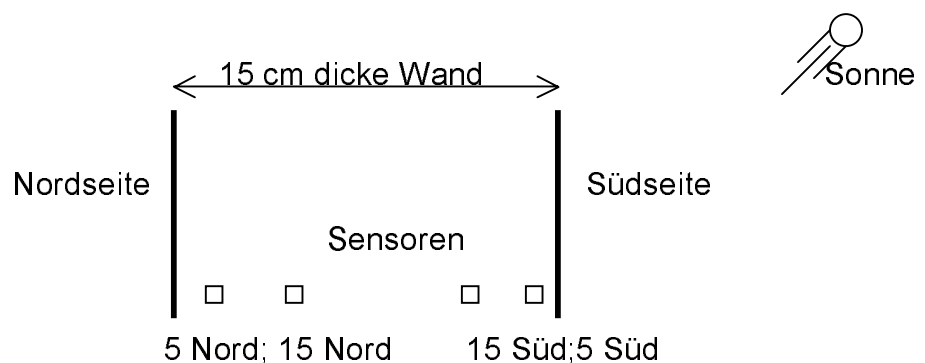


Abbildung 16 Aufbau der Versuchswand



Abbildung 17 Versuchswand

Zusätzlich wurde noch ein Temperatursensor positioniert, der die Lufttemperatur im Schatten direkt am Bauteil messen sollte.

An die Sensoren wurde ein elektronisches Messgerät (testo454) mit Speicherfunktion angeschlossen.

Um den Einfluss der Sonnenstrahlung zu untersuchen, wurde das Bauteil im Freien an einem Ort auf dem Gelände der FHTW (Blankenburg) mit möglichst wenig Verschattung über den Versuchszeitraum aufgestellt. (siehe Lageplan Anhang F). Die Wand wurde parallel zur Ost- und Westachse aufgestellt. Damit zeigt die Flächennormale für eine Seite genau nach Süden. Dies ist besonders günstig, da so über den Tag nur auf einer Seite sehr viel direkte Strahlung auf die Wand trifft. Man kann also sehr gut beobachten, wie sich die Temperatur in der Wand infolge Sonnenstrahlung fortpflanzt und einfacher Rückschlüsse aus den Ergebnissen ziehen.

Die Wetterdaten wurden von der FHTW-eigenen Wetterstation ermittelt, die sich in unmittelbarer Nachbarschaft der Wand auf dem Dach einer ca. 5m hohen Halle befindet.

7.2 Versuchsablauf

Im betrachteten Versuch wurden mit dem o.g. Aufbau die Temperaturen vom 14.01.2000 bis zum 08.02.2000 in einem Abstand von 15 min. im und am Bauteil automatisch gemessen und in einem Abstand von ca. 14 Tagen kontrolliert. Zeitgleich wurden von der Wetterstation die meteorologische Globalstrahlung, die Windgeschwindigkeit und die Lufttemperatur ermittelt. Die Daten wurden alle in eine Excel-Datei konvertiert, um sie in DynaTherm verwenden zu können und befinden sich auf der CD-Rom (siehe Anhang G).

7.3 Auswertung

Am aussagekräftigsten sind genau die Werte des Versuchs, bei denen die Temperaturdifferenzen über das Bauteil zu einem Zeitpunkt t am größten sind, da hier der Einfluss der Messfehler und des gewählten physikalischen Berechnungsmodells (Wärmeleitung und Sonnenstrahlung) am geringsten ist. Da eine Seite der Wand genau nach Süden ausgerichtet ist, war zu erwarten, dass an sonnigen Tagen die Temperaturen auf der Südseite höher seien würden als die auf der Nordseite. Alle Versuchsreihen zeigten jedoch den nicht logisch erklärbaren Sachverhalt, dass an Tagen mit hoher Sonnenstrahlung die Nordseite höhere Messwerte aufwies.

Folglich müssen die Beschriftungen der Sensoren vertauscht oder die Messfühler defekt sein. Die Wände wurden lange Zeit vor dieser Arbeit, unter Aufsicht eines vorherigen Diplomanden erstellt. Eine Besprechung mit den damals betreuenden Assistenten ergab, dass durch ein Vertauschen der Beschriftungen (z.B. auch nachträglich, da die Wand für jeden zugänglich im Freien stand) oder die Zerstörung der Messfühler (beispielsweise durch Spannungen im Beton oder Korrosion) die Ergebnisse verfälscht sein können.

Des weiteren ergaben sich nach Abbildung 18 für 3 Sensoren völlig unlogische Messwerte. Beispielsweise kam es nach einem Abkühlen der Außentemperatur am 06.02.00 um ca. 22.40 Uhr von vorher ca. 12 °C Außentemperatur (Temperaturen in der Wand ca. 7-14°C) auf 3°C Außentemperatur zu

Messwerten in der Wand für diese 3 Sensoren von -2°C . Dies ist nicht mehr zu erklären. Nur ein Sensor 15 Nord ermittelte einen sinnvollen Wert bei 5°C . Dieses Phänomen zog sich durch alle Versuchsreihen.

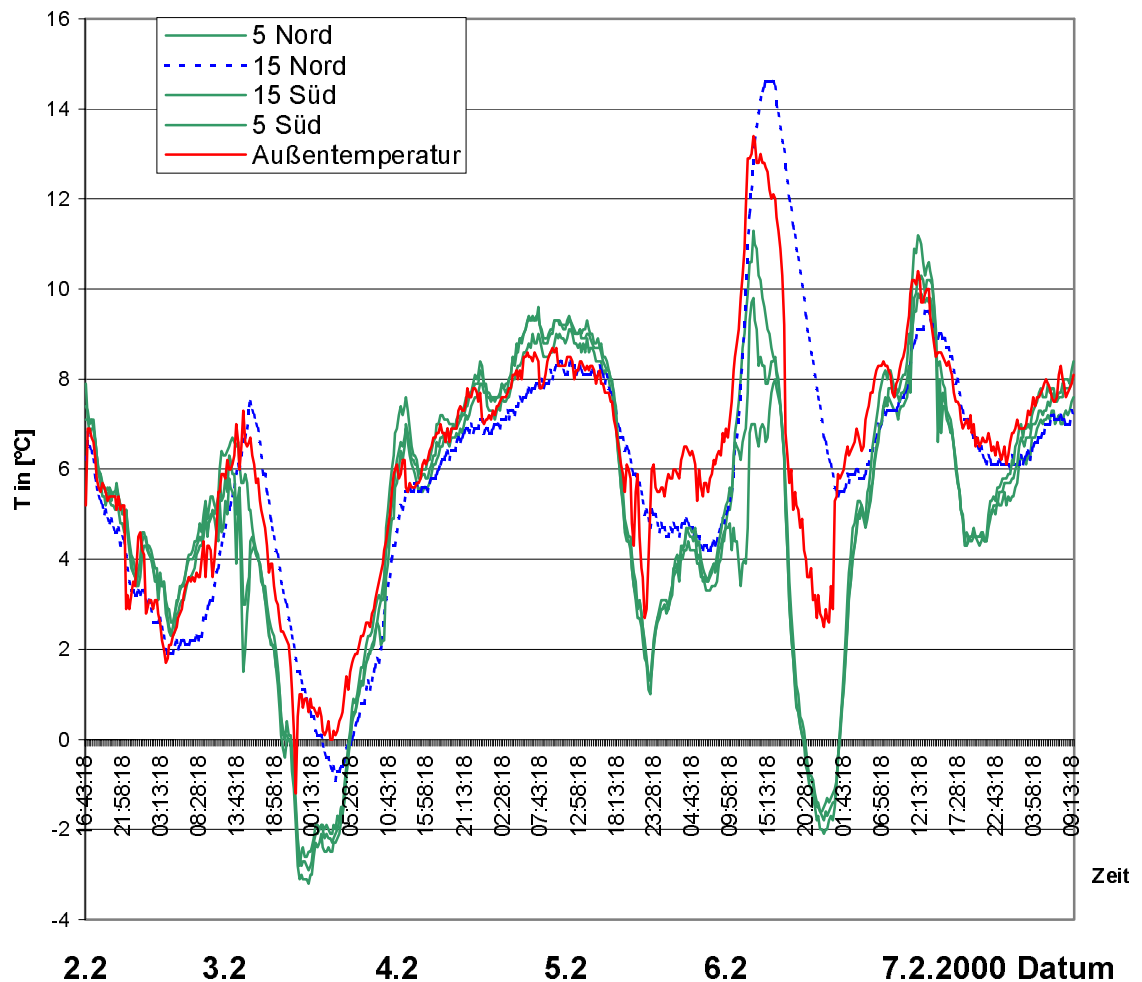


Abbildung 18 Ungenauigkeiten der Temperatursensoren

Um auszuschließen, dass die Temperaturen am Bauteil sich deutlich von denen der Wetterstation auf dem Dach unterscheiden, wurde ein zusätzlicher Sensor in der Nähe des Bauteils installiert. Die Werte dieses Sensors stimmten jedoch sehr gut mit den Werten der Wetterstation überein.

Es wird also in den weiteren Betrachtungen davon ausgegangen, dass nur Sensor 15 korrekt arbeitet. Alle anderen Sensoren können lediglich dazu dienen, einen Trend zu markieren. (kälter bzw. wärmer.)

Durch Erhitzen der Außenwand auf jeder Seite mit einem Föhn und gleichzeitiger Kontrolle der Messwerte bestätigt sich der Verdacht der defekten

Sensoren. Die Position der Sensoren konnte durch diese Überprüfung qualitativ bestätigt werden.

Starke Temperaturdifferenzen über den Querschnitt kann man in dieser Versuchsanordnung nur an Tagen messen, an denen eine relativ hohe Sonnenstrahlungsenergie auftritt.

Für Tage ohne größere direkte Sonnenstrahlung erhält man mit DynaTherm Werte, deren größte Abweichung in der Temperatur über das Bauteil zu einem Zeitpunkt t nur ca. 1,5 Grad betragen und zu ca. 80% unter 0,5 Grad liegen. Dies hat mit der sehr guten Wärmeleitfähigkeit des Betons zu tun. Der Hauptgrund, warum es zu kaum messbaren Differenzen kommt ist, dass die Wand im Freien steht und die Wärme von beiden Seiten in bzw. aus der Wand fließen kann. An einer Außenwand eines klimatisierten Raumes würde man natürlich (aufgrund der erzwungenen Innentemperatur) deutlich größere Differenzen über den Wandquerschnitt feststellen.

Hinzu kommt, dass bei einem solchen gut wärmeleitenden Stoff wie Beton und den relativ geringen Abmessungen der Wand (0,95m*0,95m) auch die Wärmeleitung in die beiden nicht untersuchten Freiheitsgrade einen spürbaren Einfluss besitzen kann.

Um das Messgerät zu überprüfen, wurden vier neue Sensoren unter ständiger Bewegung in ein sich langsam erwärmendes Wasserbad gehalten. Zusätzlich wurde ein Quecksilberthermometer ebenfalls unter ständiger Bewegung in das Wasserbad gehalten. Die Abweichung der Sensoren untereinander betrug etwa 0,5°C. Das Mittel dieser Messwerte entsprach fast genau dem Messwert des Quecksilberthermometers. Beim Herausnehmen der Temperaturfühler traten infolge des schnellen Abkühlens Unterschiede von bis zu 2°C zwischen den Temperaturfühlern auf.

Aus all diesen Gründen lässt sich aus den Messwerten in der Wand für einen Versuchszeitraum ohne größere direkte Sonnenstrahlung (ohne starke Änderung der Wandtemperatur über den Querschnitt) kein tiefergehender Vergleich anstellen.

Es wurde nun mit DynaTherm der Zeitraum (starke Sonnenstrahlung) vom 5.2.2000 bis zum 7.2.2000 durchgerechnet und die Werte mit den Messwerten

für den intakt scheinenden Sensor verglichen. Dieser Sensor befand sich nach Angaben der Assistenten 1,5 cm von der Nordseite entfernt.

Folgende Bedingungen wurden der Berechnung zugrunde gelegt:

Beton:

Wärmekapazität: 1000 Ws/(kg K)

Dichte: 2400 kg/(m³)

Wärmeleitfähigkeit: 2,1 W/(mK)

Randbedingungen:

Absorptionskoeffizient der Sonnenstrahlung: 0,7 Tabelle 4 (Seite 52)

Trübungsfaktor: 0,17 nach Anhang C, Tabelle 1

α_0 innen: 8,12 W/(m²K) nach Punkt 4.1.2

α_0 außen: 8,12 W/(m²K) nach Punkt 4.1.2

Anfangstemperatur über das Bauteil am 5.2.2000 um 13.13 Uhr: 8,1 °C

Es wurden die Wetterdaten von der FHTW-eigenen Wetterstation für den 05.02.2000 – 07.02.2000 eingetragen. (siehe CD-Rom; Anhang G)

Für die Berechnung der auftreffenden Strahlungsenergie wurde die meteorologisch gemessene Globalstrahlung zum Versuchszeitpunkt (siehe CD-Rom; Anhang G) nach Punkt 4.2. e) automatisch von DynaTherm auf die senkrechte Wand umgerechnet.

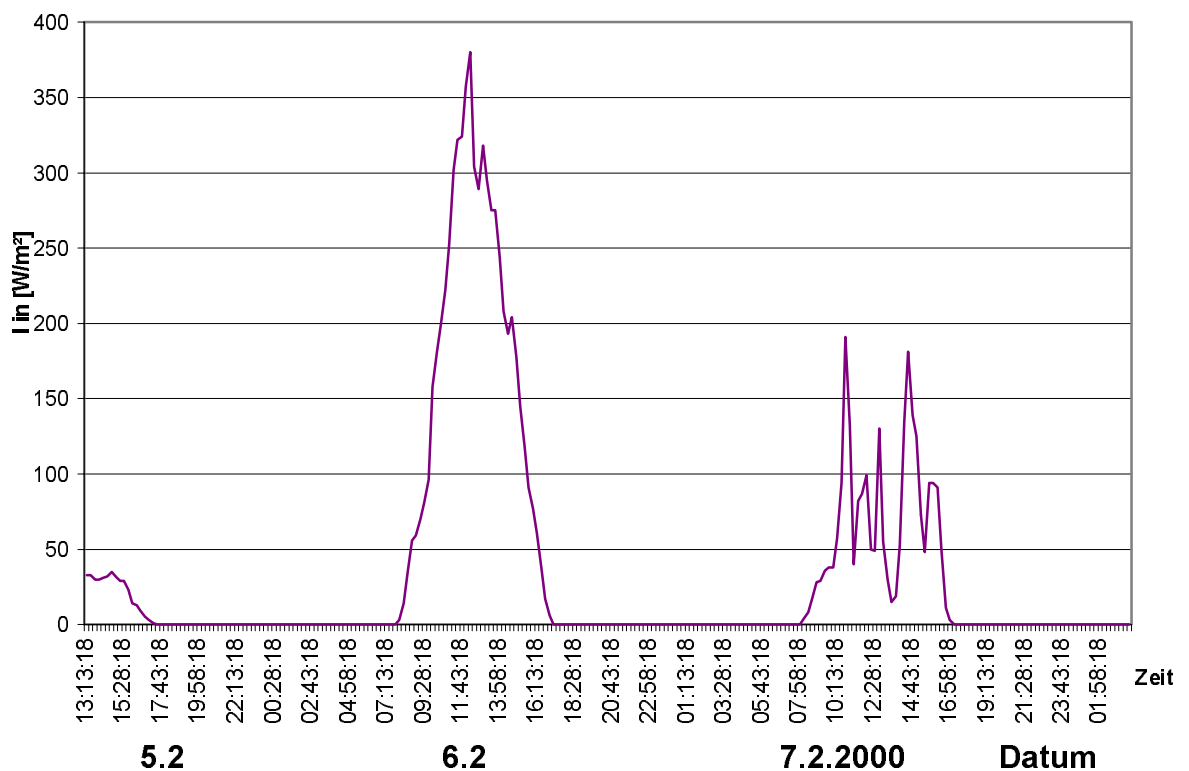
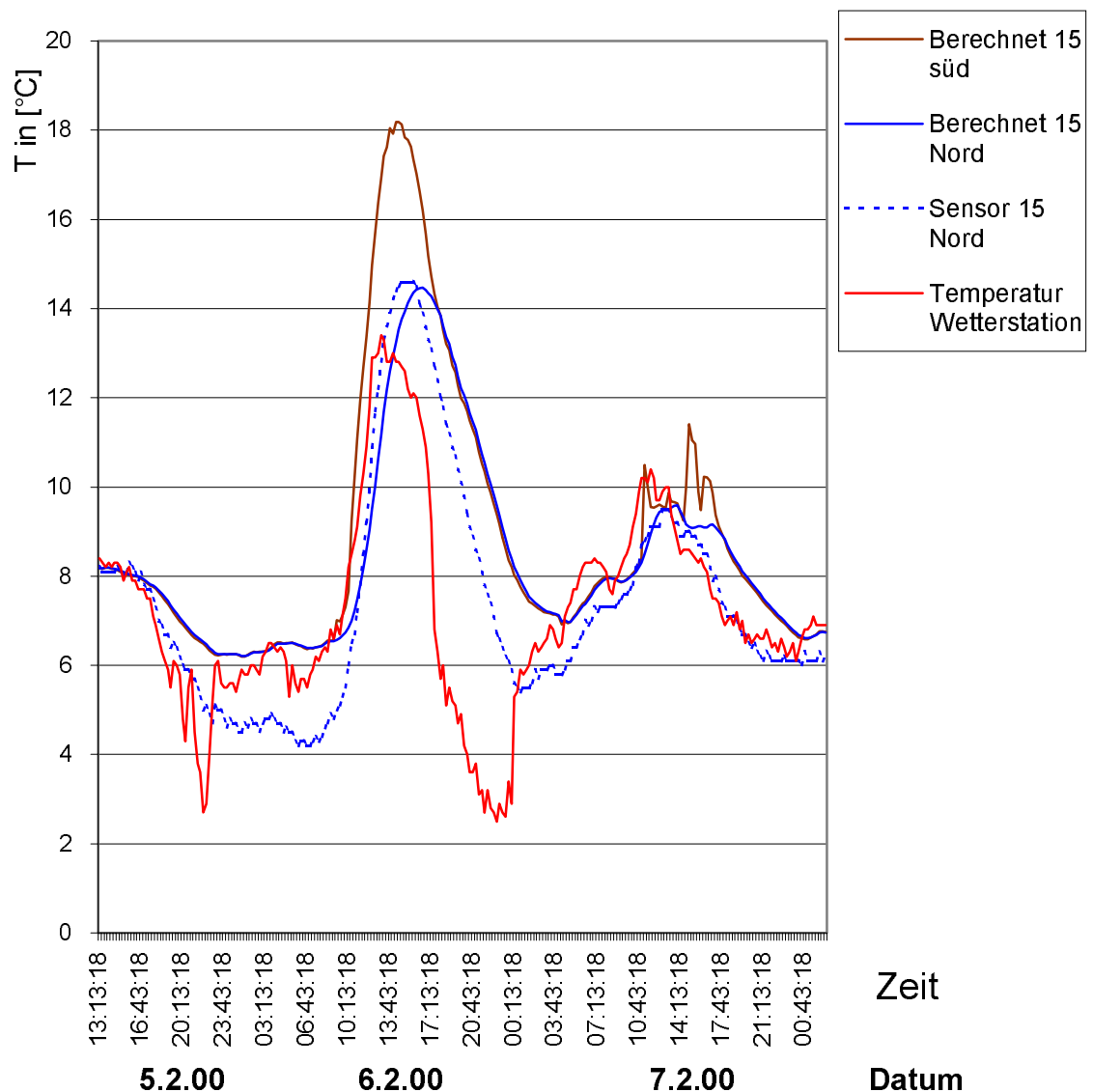


Abbildung 19 Globalstrahlung vom 5.2-7.2.2000**Abbildung 20 Vergleich der Berechnungsergebnisse mit den Messergebnissen in der Versuchswand**

Die gestrichelte „blaue“ Kurve zeigt den gemessenen Temperaturverlauf des Sensors „15 Nord“. Die durchgezogene „blaue“ Kurve wurde von DynaTherm für diese Position (1,5cm tief von der Nordseite entfernt) unter den o.g. Randbedingungen ermittelt. (die Berechnung dieser Kurve (2,5 Tage) mit Ausgabe der Berechnungswerte dauerte ca. 15 Sekunden; $dx = 0,25\text{cm}$; $dt = 2\text{sec}$)

Im Diagramm kann man eine betragsmäßig erstaunlich gute Übereinstimmung für den Zeitpunkt der höchsten Temperatur am 6.2.2000 um ca. 15.30 Uhr

feststellen. Auch der Anstieg der Kurven (also die Geschwindigkeit des Erwärmens und Abkühlens) stimmen sehr gut überein.

Das Berechnungsmodell (zur Wärmeleitung und Sonnenstrahlung) scheint für diesen Versuch durchaus eine gute Lösung darzustellen. Aufgrund der defekten Sensoren sollten jedoch nun weitere Versuchsreihen folgen, um das Ergebnis weiter zu bestätigen!

In das Diagramm wurden zusätzlich die gemessene Außentemperatur „rot“ und eine zweite von DynaTherm berechnete Temperatur (15 Süd) „braun“ eingetragen.

Da der Messwert und der Berechnungswert zum Zeitpunkt der höchsten Temperaturamplitude höhere Werte als die Außentemperatur aufweisen, lässt sich sehr gut durch die starke Sonnenstrahlung zu diesem Zeitpunkt erklären.

Betrachtet man die beiden höchsten errechneten Temperaturamplituden des Sensors „15 Nord“ und des Sensors „15 Süd“ in diesem Zeitraum, erkennt man, dass der starke Temperaturimpuls (infolge Strahlung und Außentemperatur) am 6.2.2000 auf der Südseite nur noch gedämpft die Nordseite erreicht.

Setzt man diese beiden Temperaturamplituden ins Verhältnis erhält man eine Art Temperaturamplitudendämpfung:

$$TAV = \frac{T_{\max(\text{nord})}}{T_{\max(\text{süd})}}$$

Gleichung 45

Dieser Begriff hat sich in der Bauforschung zur Beurteilung des instationären Temperaturleitverhaltens von Bauteilen durchgesetzt. Man benötigt jedoch einheitliche periodische Randbedingungen, um genormte Werte für verschiedene Materialien zu bestimmen. Aus dem Verhältnis der höchsten Innen- und Außentemperatur in einem vordefinierten Zeitraum kann dann die „Temperaturamplitudendämpfung“ berechnet werden.

Des weiteren ist zu erkennen, dass der Temperaturimpuls auf der Südseite sich zeitlich verzögert auf die Nordseite auswirkt. Die zeitliche Dauer dieser Verzögerung wird in der Bauforschung als Phasenverschiebung bezeichnet.

Die Handberechnungsmethode dieser Kennzahlen ist für mehrschichtige Bauteile äußerst komplex (zu finden in [1]). Mit DynaTherm lassen sich auch solche Kennzahlen sehr leicht und schnell bestimmen. Aus zeitlichen Gründen konnte die Berechnung der Kennzahlen der Temperaturamplitudendämpfung und der Phasenverschiebung nicht mehr weiter verfolgt und in das Programm eingebunden werden.

Würde man nun statt des Betons eine Polystyrolschicht verwenden, würde man einen kleineren Wert für TAV und die Phasenverschiebung erhalten. Da sich die Wärme deutlich schneller von der Südseite zur Nordseite bewegt und so die Nordseite, bevor sie beginnt sich durch den äußeren Temperaturabfall wieder abzukühlen, einen höheren Temperaturwert erreicht.

Dies erklärt sich aus der deutlich höheren Temperaturleitzahl (siehe Gleichung 2). Im folgenden Kapitel wird erläutert, wie sich dieser Effekt auf die Wärmemenge, die durch eine Außenwand fließt, auswirkt.

8 Anwenden der Ergebnisse auf eine baupraktische Fragestellung des instationären Wärmeschutzes

Eine der großen Möglichkeiten von DynaTherm ist es, die tatsächliche Wärmemenge zu berechnen, die ein Bauteil infolge der äußeren Randbedingungen zu jeder Zeit an die äußere Umgebung abgibt oder ihr entzieht. Interessant für das Bauwesen ist natürlich der Fall, in dem das Bauteil die äußere Hülle eines geschlossenen Raumes darstellt.

Berechnet werden soll der Wärmefluss durch die senkrechte Südwand eines klimatisierten Bürogebäudes an einem typischen Sommertag.

Es wurde ein modellhafter Wandaufbau gewählt, um den folgenden Sachverhalt möglichst gut darzustellen.

Wandaufbau (von innen nach außen):

1,5 cm Kalkputz

15 cm Beton

15 cm Polystyrol Dämmung

1,5 cm Kalkputz

Die Innen- und Außentemperatur wurde der Einfachheit halber konstant bei 20°C angesetzt. Die Anfangstemperatur über das Bauteil beträgt ebenfalls 20°C. Als zusätzliche Randbedingungen ging die empirische Sonnenstrahlung (nach Punkt 4.2.1.c)) auf die äußere Wandoberfläche für den 4.6.2000 ein (Trübungsfaktor 0,5).

Für diesen Tag (24h) erhält man für die o.g. Randbedingungen eine Wärmemenge von 45 371 Ws/m², die in den Innenraum fließt.

Würde man nach dem herkömmlichen Verfahren nur den k-Wert berücksichtigen, wäre diese Wärmemenge Null, da Innen- und Außentemperatur gleich groß sind.

Es wurden nun die Polystyrol und die Betonschicht vertauscht.

Wandaufbau (von innen nach außen):

1,5 cm Kalkputz

15 cm Polystyrol -Dämmung

15 cm Beton

1,5 cm Kalkputz

Mit denselben Randbedingungen ermittelt man jetzt für den selben Tag eine Wärmemenge von ca. 29 071 Ws/m².

Trotz völlig identischer k-Werte und den exakt gleichen Randbedingungen (und gleichen Materialien) kommt es zu deutlich unterschiedlichen Transmissionswärmefluss durch die Wand.

Es stellt sich die große Frage, inwieweit der k-Wert eines Bauteils, in der Realität ein Maß für die Transmissionswärmeverluste bzw. -gewinne ist!

Die Ergebnisse zeigen, dass die Berechnung des k-Werts allein nicht ausreichend ist, um den Transmissionswärmefluss eines Außenbauteils zu berechnen.

Ein Dämmsystem, das die Erkenntnisse, die man aus dieser Arbeit und der aktuellen Bauforschung auf diesem Gebiet gewinnt, optimal ausnutzt ist die transparente Wärmedämmung (TWD). Für solch ein Dämmsystem stellt der k-Wert nicht einmal ansatzweise ein Kriterium zur Beurteilung des Transmissionswärmeflusses in der Realität dar.

Will man in Zukunft alle Möglichkeiten ausschöpfen, um Energie einzusparen, müssen andere Nachweisverfahren zur Beurteilung des Heizenergiebedarf eines Gebäudes gefunden werden.

Beim gegenwärtigen Stand der Bautechnik wird ein relativ guter Wärmeschutz gewährleistet und es werden bedeutende Energiesparergebnisse erreicht. Diese Ergebnisse in Zukunft zu übertreffen, wird immer schwieriger und aufwendiger. Aus dieser Sicht ist die Berücksichtigung der oben diskutierten Einflüsse der instationären Wärmeverluste unabdingbar. Es ist hier also für die Zukunft ein Umdenken in der gesamten Bauindustrie notwendig! In der Bauforschung ist man sich dieser Tatsache schon lange bewusst. Niedrig- und Null-Energie-Häuser gibt es bereits in vielen Modellversuchen.

Im folgenden soll ein transparentes Wärmedämmverbundsystem unter diesen Gesichtspunkten erläutert werden.



Abbildung 21 Transparente Wärmedämmung in der Praxis aus [54]

Aufbau eines transparenten Wärmedämmverbundsystems:

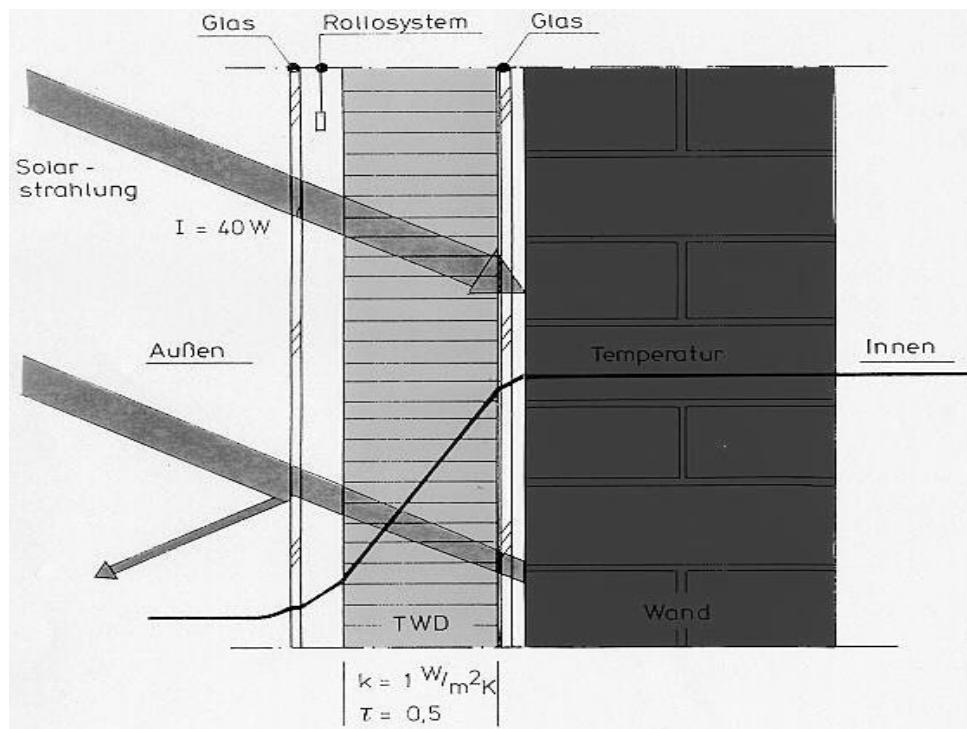


Abbildung 22 Transparente Wärmedämmung aus [54]

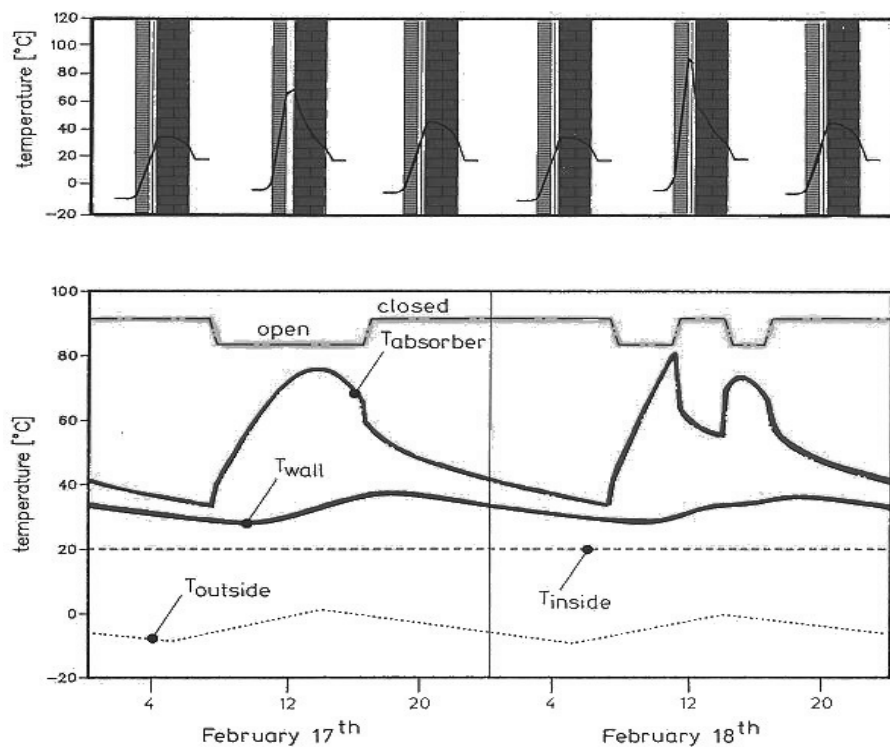


Abbildung 23 Effekt der konstanten Innentemperatur durch transparente Wärmedämmung aus [54]

Vor der tragenden Konstruktion befindet sich ein transparentes Dämmmaterial. Die Wärmeenergie der Sonnenstrahlung kann so den Bauteilkern direkt erwärmen.

Wählt man wie in Abbildung 21 als tragendes Element ein Material mit hoher Wärmekapazität, das auf der Sonnenseite schwarz gefärbt ist (höchster Absorptionsfaktor der Sonnenstrahlung) erwärmt sich die Außenseite des tragenden Bauteilkerns („ T_{absorber} “) infolge Sonnenstrahlung.

Die schlechte Wärmeleitfähigkeit der Dämmung sorgt dafür, dass bei Ausbleiben der Sonnenstrahlung die in der tragenden Konstruktion gespeicherte Wärme nur zu einem geringen Teil wieder an die Umgebung abgegeben wird. Aufgrund der schlechten Temperaturleitfähigkeit der tragenden Konstruktion erreicht die Wärme, die infolge der Sonnenstrahlung in den Bauteilkern gelangt, erst nach einer zeitlichen Verzögerung die Innenseite der Wand.

Die Wärme wird zu einem großen Teil also erst über Nacht an den Innenraum abgegeben. Durch diesen Effekt wird die Temperatur an der Innenseite der

Wand auf einem nahezu konstanten Wert gehalten (was zusätzlich die „Behaglichkeit“ erhöht).

An Tagen, an denen die Außentemperatur geringer als die gewünschte Innentemperatur ist, kann das Bauteil also die Sonnenenergie nutzen, um den Heizenergiebedarf deutlich zu verringern.

Trifft am Tage zu viel Sonnenenergie auf die Oberflächen, kann ein Rollosystem die Absorption der Sonnenstrahlung reduzieren, um ein Aufheizen des Innenraumes zu verhindern.

DynaTherm wäre z.B. eine ausgezeichnete programmtechnische Grundlage, um das Rollosystem zu steuern. Einige transparente Wärmedämmsysteme besitzen zusätzlich auch eine Hinterlüftung, um zu hohe Energien im Sommer abzuleiten. Auch diese könnten mit „DynaTherm“ elektronisch gesteuert werden. Mit solch einem „intelligenten Bauteil“ wäre es also möglich, an vielen Tagen im Jahr die Temperatur eines Innenraumes ohne Klimaanlage konstant bei 20 °C zu halten.

Die von DynaTherm berechneten Wärmemengen könnten z.B. auch für die Regelung von Klimaanlage benutzt werden oder zu deren Dimensionierung beitragen.

Natürlich stellt der Transmissionswärmefluss durch Außenwände immer nur einen Teilaspekt der Energiebilanz eines Raumes dar, von großer Bedeutung ist die Innenbauart (schwer; leicht) deren kapazitive Eigenschaften ebenfalls erheblich dazu beitragen können, die Temperaturen des Raumes zu beeinflussen.

Bauteile wie die o.g. Außenwand lassen sich nun auf ihre wärmedämmtechnischen Eigenschaften bzgl. der instationären Wärmeleitung und der realen Randbedingungen testen. Es kann nun geprüft werden, inwieweit Schichtanordnung und Stoffauswahl oder völlig neuartige Bauteile sich auf den Transmissionswärmefluss durch eine Außenwand im Sommer wie im Winter auswirken.

In dieser Arbeit lag der Schwerpunkt auf der Entwicklung der programmtechnischen Grundlage, in weiterführenden Arbeiten sollten diese und andere Anwendungsaspekte tiefergehend untersucht werden.

9 Zusammenfassung

Mit dem vorliegenden Programmsystem können Bauteile auf ihre Eigenschaften bezüglich der instationären Wärmeleitung sehr genau untersucht werden. Zusätzlich zum reinen Temperaturverlauf durch das Bauteil wird ermittelt, wie viel Wärme in bzw. aus dem Bauteil auf jeder Seite fließt.

In einem Berechnungsbeispiel wird gezeigt, dass zur Beurteilung der wärmeschutztechnischen Gesichtspunkte eines Bauteils in der Realität der k-Wert allein nicht ausreichend ist.

Es wurde ein Programmsystem geschaffen, das speziell auf die für das Bauwesen maßgeblichen Randbedingungen angepasst ist. Der Gang der Sonne und der Einfluss der einzelnen Strahlungsanteile auf ein beliebig orientiertes Bauteil lässt sich ohne zeitaufwendige Eingaben bedienerfreundlich simulieren.

Eine ausführliche Zusammenstellung von Materialkonstanten erleichtert den praktischen Einsatz.

Um die Variabilität in der Berechnung zu erhöhen, können in allen Schichten die Schrittweiten Δx unterschiedlich gewählt werden. Die Vor und Nachteile des

- expliziten Verfahrens
- des Verfahrens der teilweisen Integration und
- des impliziten Verfahrens

zur Lösung der Wärmeleitungsgleichung werden ausführlich an einem Berechnungsbeispiel herausgearbeitet.

Erstmals lassen sich Wärmeübergänge zwischen den Materialien berücksichtigen. Fluide Schichten und Schüttungen können so wesentlich genauer berücksichtigt werden.

Die Berechnungsergebnisse wurden mit Ergebnissen aus der Literatur und aus einem eigenem Versuch verglichen und ergaben eine sehr gute Übereinstimmung.

Durch die einfache Bedienung und die visuellen Darstellungsmöglichkeiten wird ein breiter Anwenderkreis erreicht. Es lässt sich sehr schnell die Bedeutung der instationären Wärmeleitung vermitteln.

Im Laufe der Zeit stieß ich auf immer neue Fragestellungen im Zusammenhang mit diesem Thema. Aus dieser Arbeit ergeben sich eine Vielzahl weiterer Aufgaben, die in fortführenden Arbeiten behandelt werden könnten.

Es wurde auf eine offene und durchsichtige Art der Programmierung wert gelegt.

Relativ unkompliziert dürften sich folgende Sachverhalte in das Programmsystem einbinden lassen:

- transparente Bauteile (auch zwischen zwei Materialschichten)
- einfache und schnelle Berechnung der Temperaturamplitudendämpfung und der Phasenverschiebung
- Berechnung des Feuchtetransports und daraus resultierendem Wärmetransport durch Konvektion
- innere Wärmequellen
- zeitlich veränderliche Stoffwerte (durch Feuchtigkeit, Temperatur usw.)
- die tatsächliche Spannungsverteilung infolge Temperatur und Feuchtigkeit
- Darstellung des Wärmeflusses an jeder Stelle im Bauteil
- genauere Berechnung der Kontaktwiderstände z.B. bei Tröpfchenbildung und Kondensation an den Randschichten
- Bestimmung von Stoffwerten und Wärmeübergängen aus Versuchen.

weitere Infos, Kontakt und Dokumente unter:

www.holznagels.de/DynaTherm/DynaTherm.htm

Anhang (105 Seiten) und Literaturverzeichnis finden sie ebenfalls auf dieser Seite als .pdf Datei.

Es folgen die ersten Seiten der Diplomarbeit:

(aus programmtechnischen Gründen am Ende in der .pdf Version)

Erarbeitung eines Rechenprogramms für den instationären Wärmetransport durch mehrschichtige Bauteile

- unter Berücksichtigung der meteorologischen Einflüsse -

Diplomarbeit

von

Matthias Holznagel

geboren am: 16.03.1976

Mat.-Nr.: 0176916

Fachhochschule für Technik und Wirtschaft Berlin

Fachbereich: Bauingenieurwesen

WS 1999/2000

Betreuer: Prof. Dr. Bunte

Gutachter: Dipl.-Ing. Fischer

Professor Dr.-Ing. Dieter Bunte
Fachbereich 2 - Ingenieurwissenschaften II
Studiengang Bauingenieurwesen

FHTW... der Fachhochschule für Technik und Wirtschaft Berlin

Fachhochschule
für Technik und Wirtschaft
Berlin

Oktober 1999

A U F G A B E N S T E L L U N G

für die Diplomarbeit von Herrn Matthias Holznagel

Thema: Erarbeitung eines Rechenprogramms für den instationären Wärmetransport durch mehrschichtige Bauteile

Zur Beurteilung des bauphysikalischen Zustandes und der Dauerhaftigkeit von Bauteilen und Bauwerken ist die Kenntnis der instationären Wärmeleitung von großer Bedeutung. Herr Holznagel soll dazu ein Rechenprogramm entwickeln, das für Lehrzwecke eingesetzt werden soll. Die Lösung der zugehörigen Differentialgleichung soll mittels Differenzenverfahren erfolgen. Die Wärmeübergangsbedingungen sollen auch die Strahlung (Solarstrahlung) erfassen.


Damit das Programm auch für Studenten verfügbar ist, wird es in Excel programmiert. Für die Eingabewerte und die Ausgabe der Rechenergebnisse sind übersichtliche Oberflächen bzw. Eingabemasken zu gestalten. Herr Holznagel soll auch versuchen, die Rechenergebnisse in einer Grafik darzustellen.

Die Richtigkeit der Rechenergebnisse ist auf zweierlei Art zu überprüfen:

- a) Es sind Messungen von Temperaturprofilen an bereits vorhandenen Versuchswänden aus Beton zu verschiedenen Witterungsbedingungen durchzuführen. Die Witterungsbedingungen sind durch die laboreigene Wetterstation bekannt.
- b) Es sind in der Literatur veröffentlichte Messergebnisse nachzurechnen.

Wenn die Richtigkeit gegeben ist, wird in Rücksprache mit dem Betreuer das Programm auf eine baupraktisch relevante Fragestellung angewendet.

Bearbeitungszeit: 5 Monate


Prof. Dr.-Ing. D. Bunte

... der Fachhochschule für Technik und Wirtschaft Berlin

Postanschrift

10513 Berlin
Telefon: 5019-0

Besprechungsprotokoll

Besprechung der Diplomarbeit am 8.2.2000

In dieser Besprechung wurde vom betreuenden Gutachter Prof.Dr.Dipl.-Ing.Bunte folgendes festgelegt:

Die Aufgabenstellung wird insoweit abgeändert, dass statt einem Vergleich der Berechnungswerte des Programms mit Versuchswerten aus der Literatur, ein Vergleich mit Berechnungswerten aus der Literatur stattfindet.

Die Art der Dokumentation der Programmmodule soll anhand von Kommentaren direkt im Programmcode erfolgen.

Für die baupraktische Fragestellung reicht es aus, einen Anwendungsvorschlag kurz zu skizzieren

.....
Prof.Dr.Dipl.-Ing. Bunte

.....
Matthias Holznagel

Unterschriften sind im original natürlich vorhanden :)

weitere Infos, Kontakt und Dokumente unter:

www.holznagels.de/DynaTherm/DynaTherm.htm

Anhang (105 Seiten) und Literaturverzeichnis finden sie ebenfalls auf dieser Seite als .pdf Datei.

Aufgrund des schlechten Umgangs von MS Word 2000 mit unterschiedlichen Druckertreibern und Druckoptionen kommt es in dieser .pdf- Version zu kleineren Formatierungsfehlern!