

**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

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 Wärmehtransport 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.

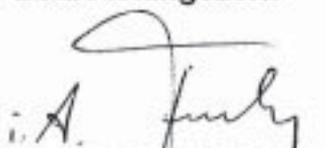
Damit das Programm auch für Studenten verfügbar ist, wird es in Excel programmiert. Für die Eingabewerte und die Ausgabe der Rechenergebnisse sind übersichtliche Oberflächen bzw. Eingabemasken zu gestalten. Herr Holznagel soll auch versuchen, die Rechenergebnisse in einer Grafik darzustellen.

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

Postanschrift

10515 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

.....
Matthais Holznagel

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	<i>Randbedingungen aus Wärmeübergängen</i>	12
2.4.2	<i>Randbedingungen aus Wärmestrahlung.....</i>	12
2.4.3	<i>Bilanz über alle Wärmeflüsse aus den Randbedingungen</i>	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	<i>Grundlagen.....</i>	17
3.2.2	<i>Explizites Differenzenverfahren.....</i>	18
3.2.3	<i>Methode der teilweisen Integration</i>	20
3.2.4	<i>Implizite Methode</i>	21
3.2.5	<i>Vergleich der Verfahren und Begründung der für diese Arbeit gewählten Verfahren</i>	25
3.2.6	<i>Verfahren zur Näherung der Randtemperaturen.....</i>	27
3.2.7	<i>Verfahren zur Berechnung der Randtemperaturen zwischen einer festen Schicht und einer gasförmigen Schicht (bzw. der Umgebung).....</i>	31
3.2.8	<i>Verfahren zur Berechnung der Randtemperaturen zwischen zwei festen Schichten mit Wärmeübergang</i>	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..... Anhang Seite 2

1. Generelle Bedienungshinweise..... Anhang Seite 4

2. Erzeugen eines neuen Bauteils..... Anhang Seite 5

3. Hinzufügen von neuen Materialien..... Anhang Seite 7

4. Stationäre Wärmeleitungsberechnungen..... Anhang Seite 9

5. Instationäre Wärmeleitungsberechnungen..... Anhang Seite 11

5.1 Eingabe der Randbedingungen..... Anhang Seite 11

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

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

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

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

5.6 Zusätzliche Funktion..... Anhang Seite 20

Anhang B) Programm Module..... Anhang Seite 21

1 Arbeitsblatt Wandaufbau:..... Anhang Seite 21

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

3 Arbeitsblatt Randbedingungen:..... Anhang Seite 26

4 Arbeitsblatt Berechnungs Optionen..... Anhang Seite 37

5 Arbeitsblatt Animation..... Anhang Seite 41

6 Arbeitsblatt Ausgabewerte:..... Anhang Seite 42

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

8 Der Ordner Module..... Anhang Seite 43

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

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

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

Anhang E) Stoffwerte..... Anhang Seite 95

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

Anhang G) Inhalt der beiliegenden CD..... Anhang Seite 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:

<http://dynatherm.blogspot.com/>

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

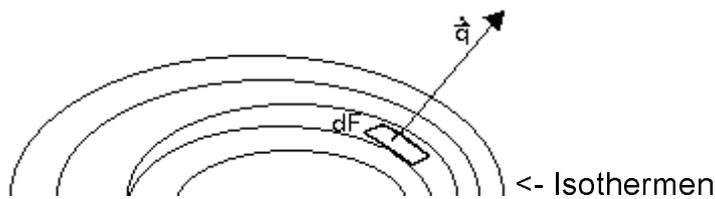


Abbildung 1 Wärmefluss durch ein Flächenelement

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

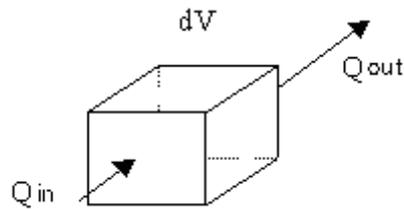


Abbildung 2 Wärmestromänderung durch ein Volumenelement

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]:

$$Q_{Wü(\alpha)} = \alpha (T_1 - T_2)$$

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 absorbiertes 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 Rechenaufwand 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 $k+1$:

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

Gleichung 16

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

Dabei werden die unbekanntes 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 unbekanntem 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.

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

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

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

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

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

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

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)

$$m_1 = a_1$$

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

$$y_1 = -d_1$$

für $i = 2, 3, \dots, N$

Begin

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

End

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

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 Abschnittsaufteilungen (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):

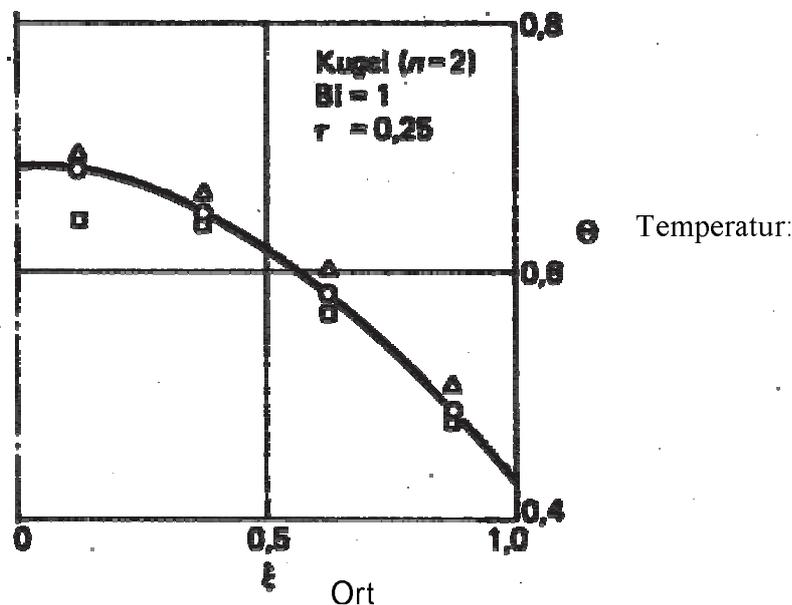


Bild 28. Vergleich der drei numerischen Methoden für $\tau=0,25$ mit dem analytischen Ergebnis.

— 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

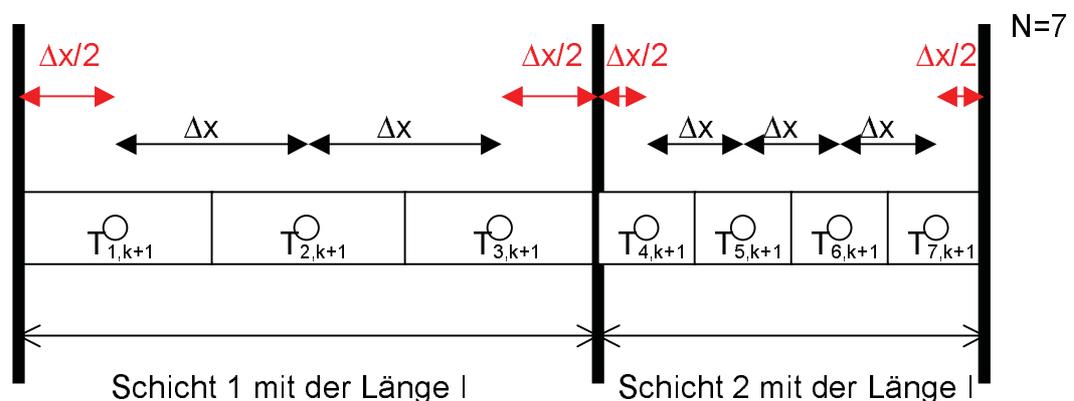


Abbildung 4 Randtemperatur ohne virtuelle Schichten

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.

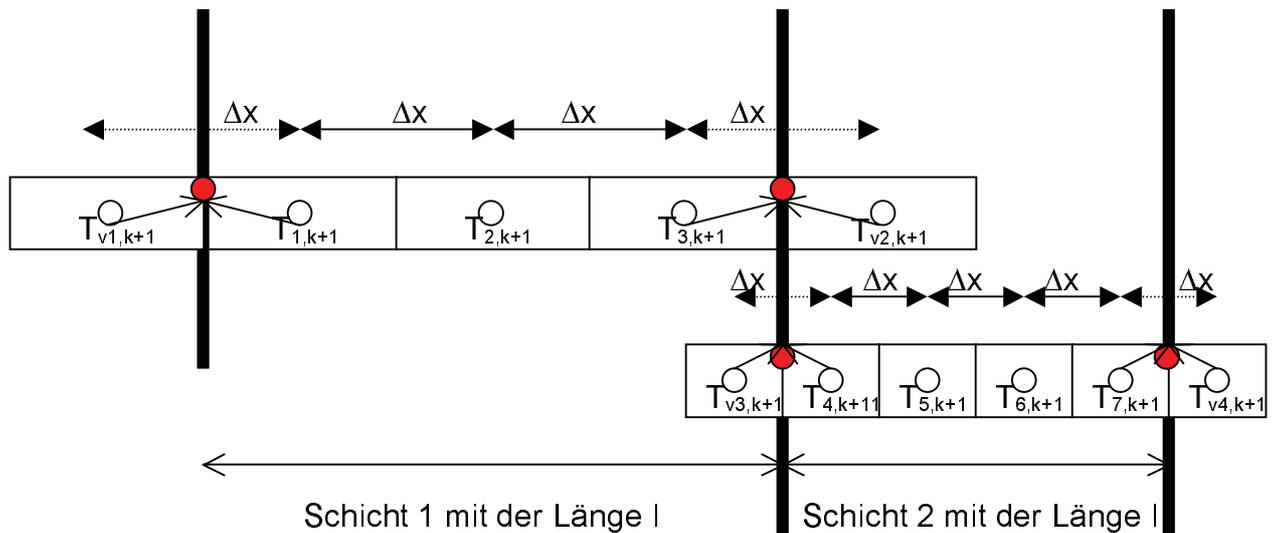


Abbildung 5 Randtemperatur gemittelt mit Hilfe einer virtuellen Schicht
($T_{1,k+1}$ ist jetzt ein innerer Punkt und wird durch Gleichung (11) berechnet.)

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.

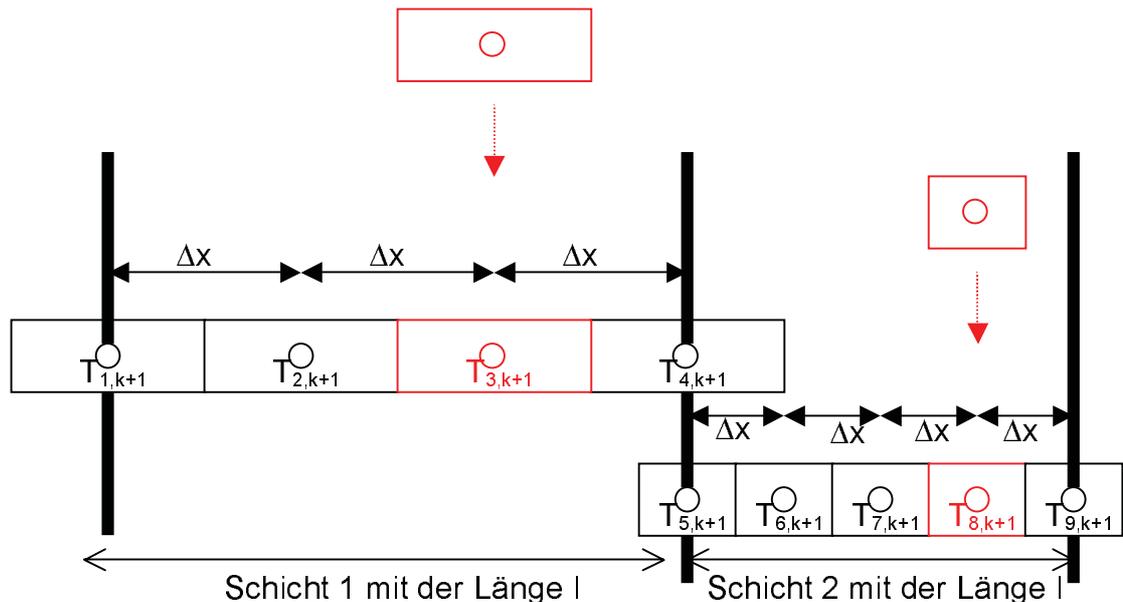


Abbildung 6 Randtemperaturen durch Einfügen eines zusätzlichen Abschnittes Δx pro Schicht

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:

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

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

$$R = \frac{\Delta x}{\lambda} \quad R_{\alpha_K} = \frac{1}{\alpha_K}$$

$$\frac{(T_{1,k+1} - T_{2,k+1})}{R} = \frac{T_{innen} - T_{1,k+1}}{R_{\alpha_K}} + Q_{Strahlung} \quad \left| + \frac{T_{2,k+1}}{R} + \frac{T_{1,k+1}}{R_{\alpha_K}} \right.$$

$$T_{1,k+1} \frac{R + R_{\alpha_K}}{R R_{\alpha_K}} = \frac{T_{innen}}{R_{\alpha_K}} + \frac{T_{2,k+1}}{R} + Q_{Strahlung} \quad \left| \frac{R R_{\alpha_K}}{R + R_{\alpha_K}} \right.$$

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

$n = 1$ (linker Rand)

entsprechend für den rechten Rand:

$$T_{N,k+1} = \frac{R T_{außen}}{R + R_{\alpha_K}} + \frac{R_{\alpha_K} T_{N-1,k+1}}{R + R_{\alpha_K}} + Q_{Strahlung} \frac{R R_{\alpha_K}}{R + R_{\alpha_K}};$$

$n = N$ (rechter Rand)

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:

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

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)]

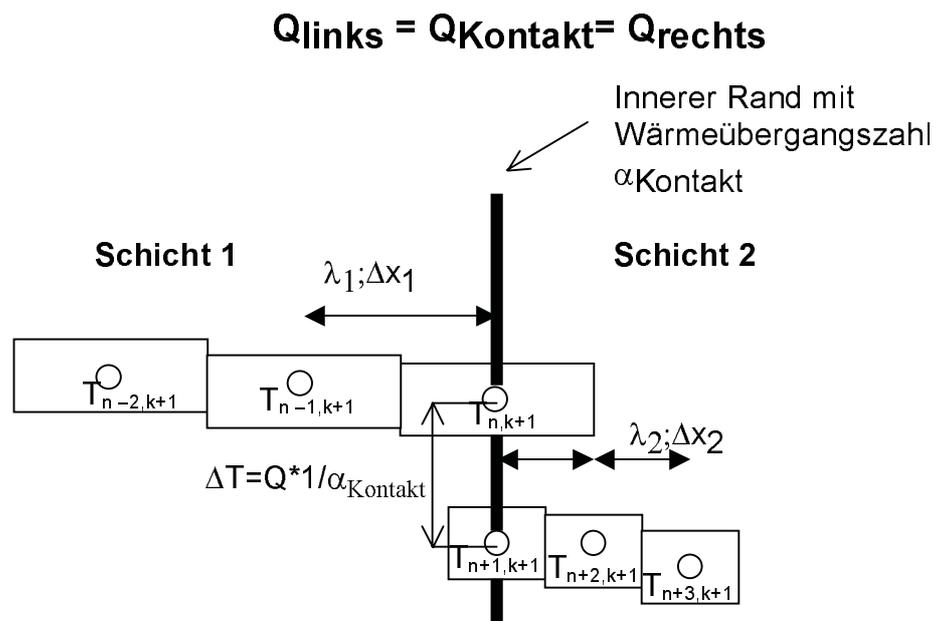


Abbildung 7 Wärmebilanz an inneren Wärmeübergängen

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

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

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 Materialschichten 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 Materialschichten 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 Materialschichten 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].

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

Gleichung 34

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

λ : Wärmeleitfähigkeit der Luft

β : Auftriebsbeiwert

v : 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):

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

Gleichung 35

- $Q_{A\text{-Rand}}$: Wärmefluss im äußeren Abschnitt eines Bauteils [W/m^2]
 Q_k : Wärmefluss am Wärmeübergang infolge Konvektion (α_k) [W/m^2]
 Q_s : Wärmefluss infolge absorbierter Sonnenstrahlung [W/m^2]
 Q_t : Wärmefluss infolge Emission der Wand [W/m^2]
 Q_w : Auf die Bauteiloberfläche auftreffende langwellige Wärmestrahlung [W/m^2]

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:

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

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.

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

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 $53,52^\circ$, -Länge $13,4^\circ$) errechnet DynaTherm folgende Werte:

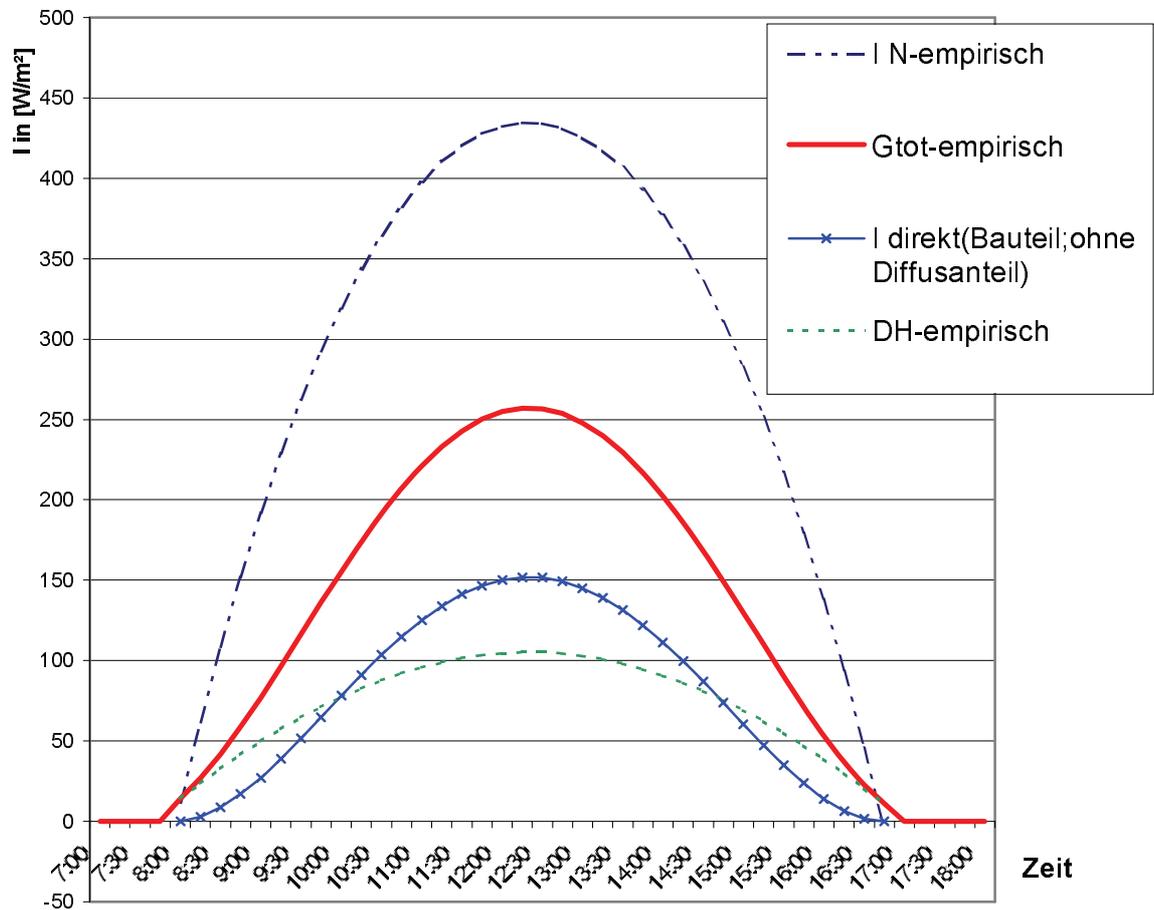


Abbildung 8 Von DynaTherm errechnete empirische Strahlung auf eine horizontale Fläche

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 $DH_{empirisch} = D(\text{Bauteil})$)

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_{direkt}(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_{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:

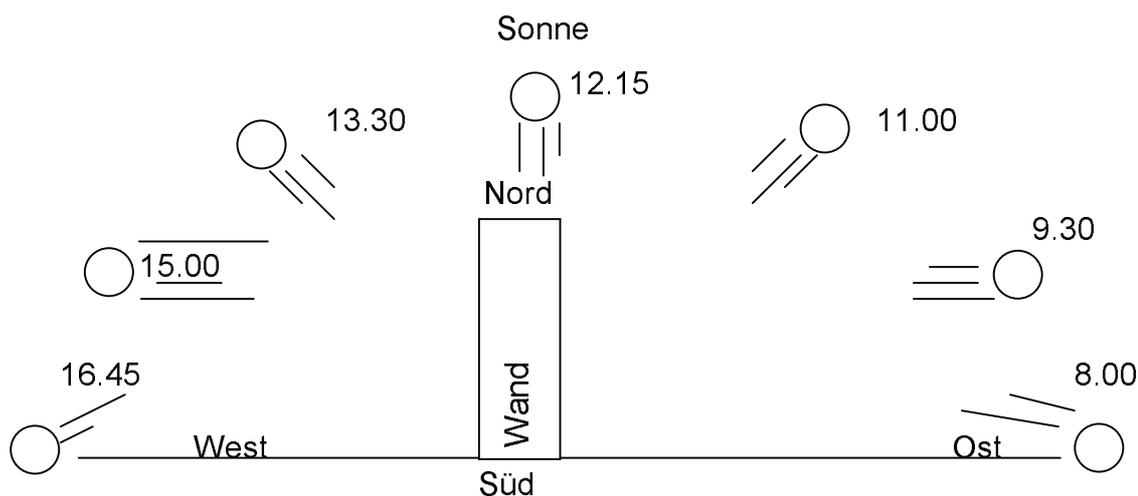


Abbildung 9 Einstrahlung auf eine senkrechte Wand am 3.2.2000

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
I(direkt) Bauteil=	0	I(direkt) Bauteil=	15
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 $G_H(\text{gemessen})$ (metrologisch 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.

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

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:

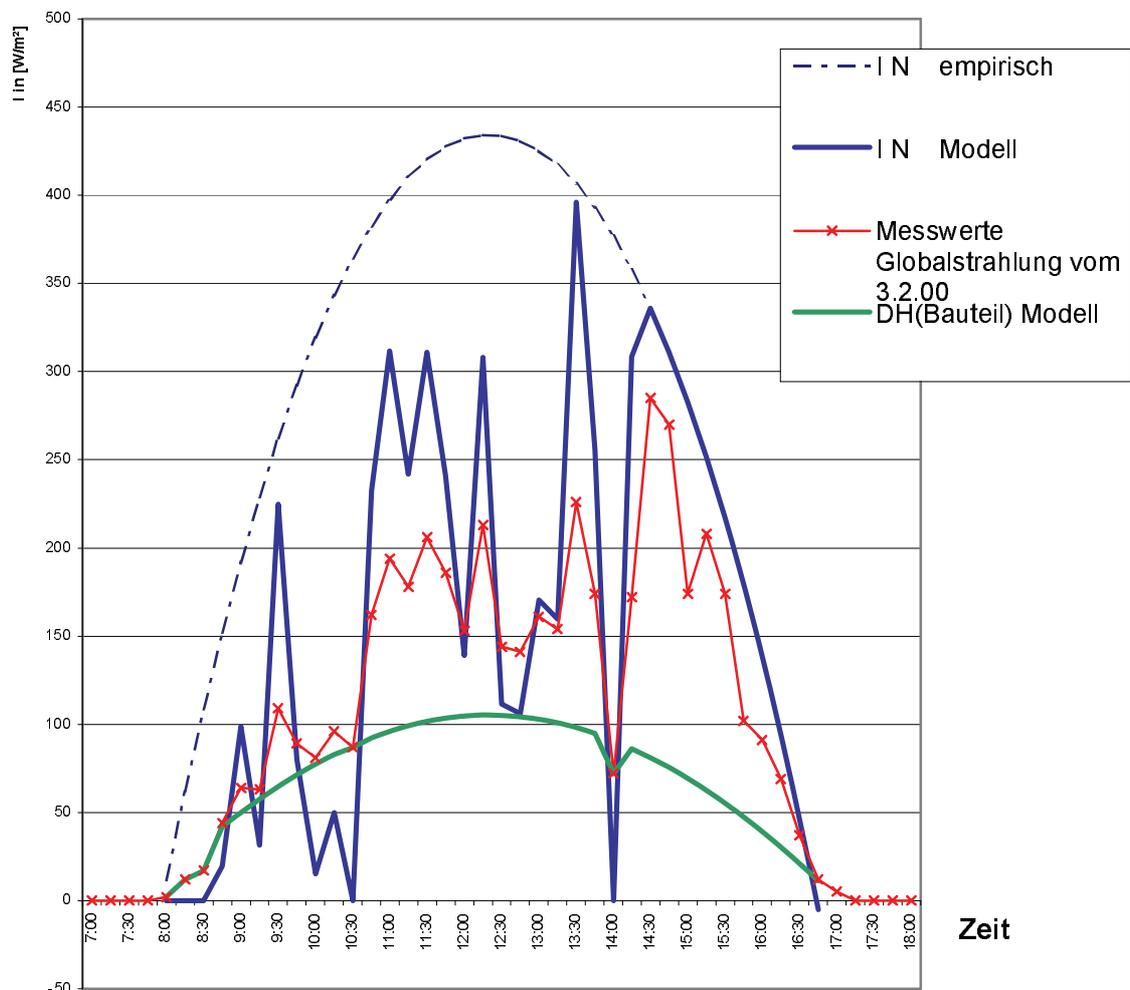


Abbildung 10 Berechnungsmodell für metrologisch gemessene Globalstrahlung am 3.2.00

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.

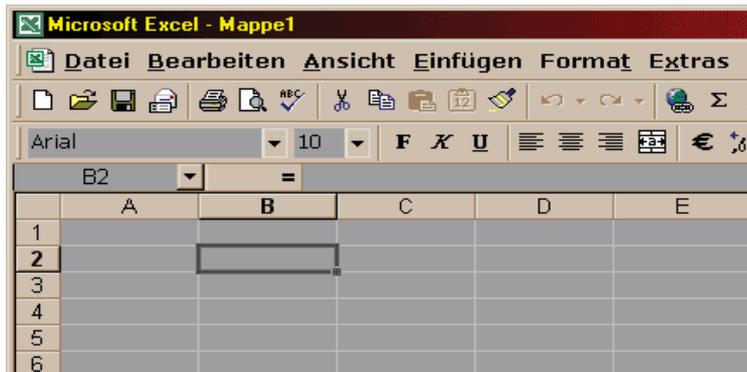


Abbildung 11 Direkte Zellbeschreibung z.B. (B2)



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.

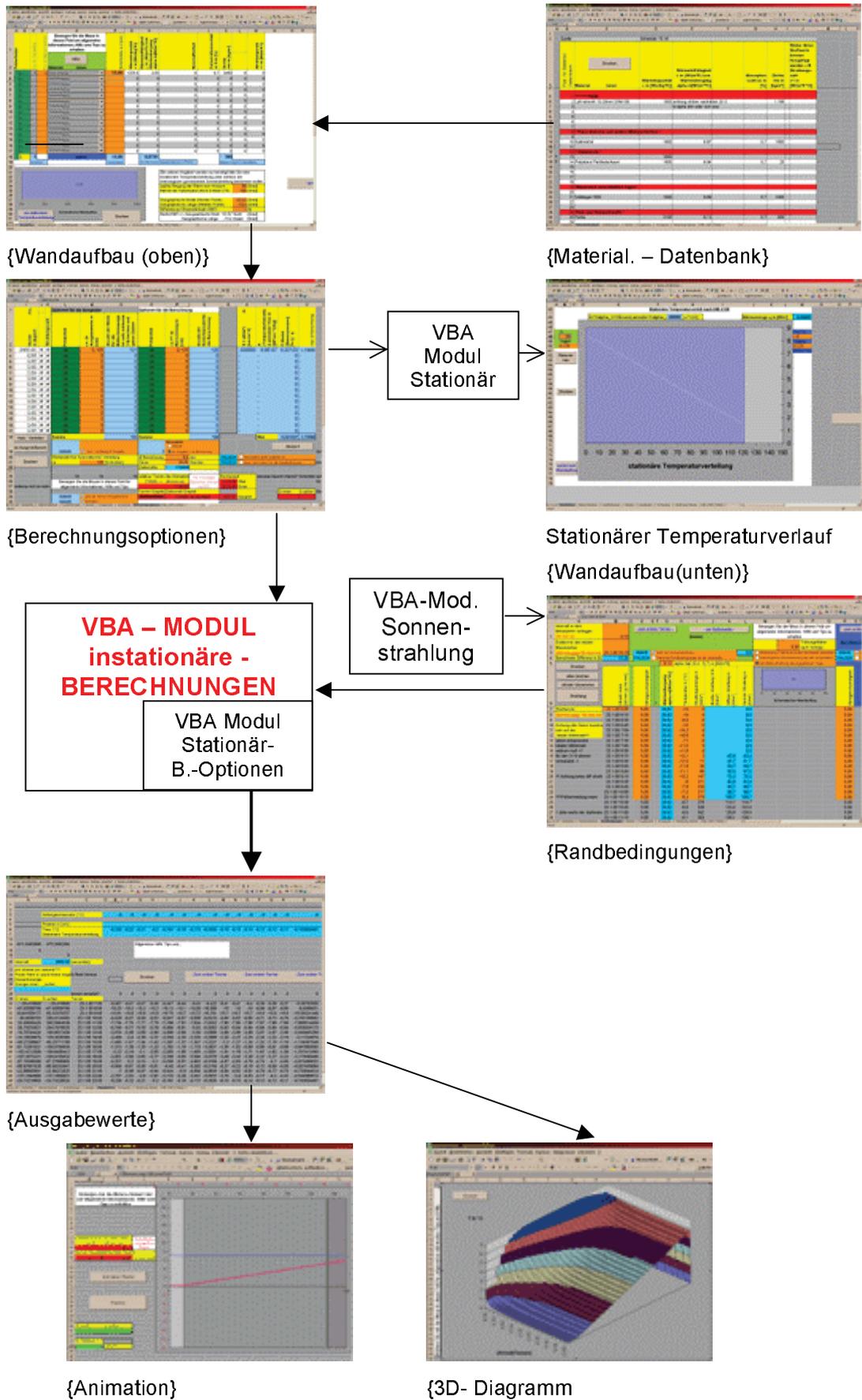


Abbildung 14 Überblick der obersten Programmstruktur in DynaTherm

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)
{Diagramm_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, das die Dicke der Schichten in diesem „Arbeitsblatt“ als Eingangswerte erhält.

5.3.1.2 Die stationäre Wärmeleitungsrechnung

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}

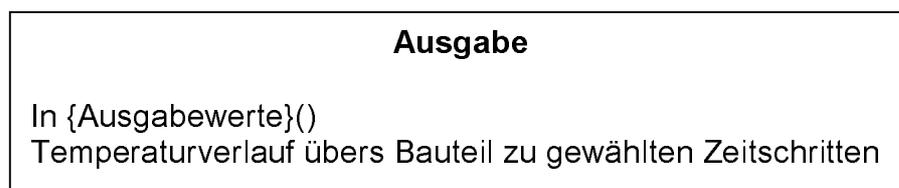
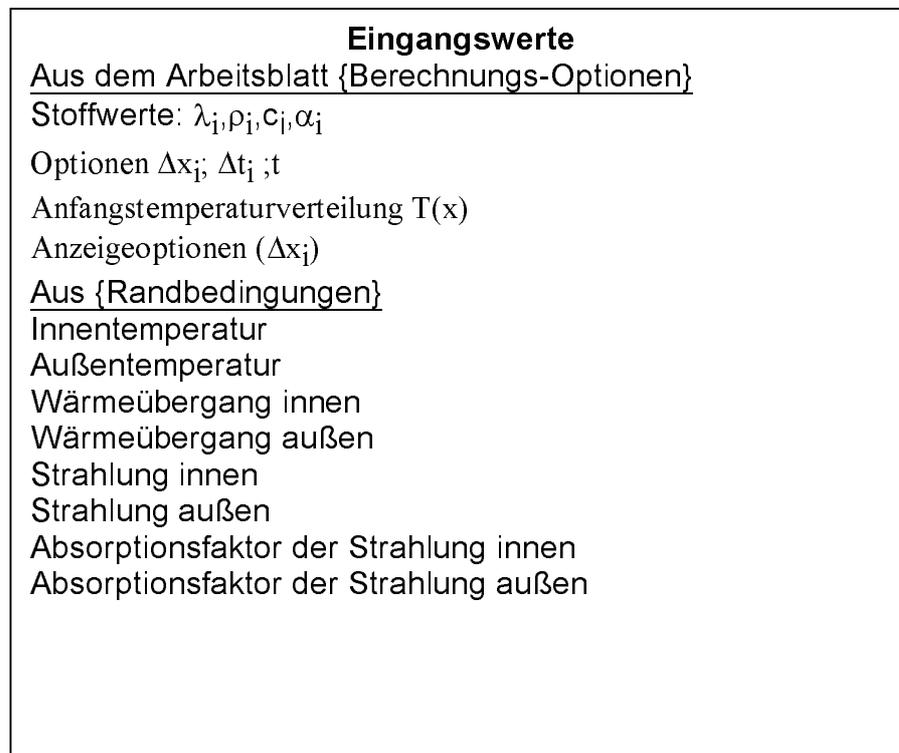
Diese Arbeitsblätter enthalten keinerlei Funktionen oder Programme. Es wird lediglich von den graphischen Werkzeugen, die in Excel zur Verfügung stehen, Gebrauch gemacht. Der 3D-Schriftzug wurde mit „Wordart“ erzeugt.

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}



Berechnung der auftreffenden Strahlungsenergien in dem Modul
{Randbedingungen}

Eingangswerte
<u>Aus dem Arbeitsblatt {Randbedingungen}</u> 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 m ² , die auf die Innenseite der Wand trifft Strahlung pro m ² , die auf die Außenseite der Wand trifft

Berechnung der stationären Temperaturverteilung in dem Modul
{stationär_Wandaufbau}

Eingangswerte
<u>Aus dem Arbeitsblatt {Berechnungs-Optionen}()</u> Stoffwerte λ_i, α_i Anzeigoptionen (Δx_i) <u>Aus dem Arbeitsblatt {Randbedingungen}</u> 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.

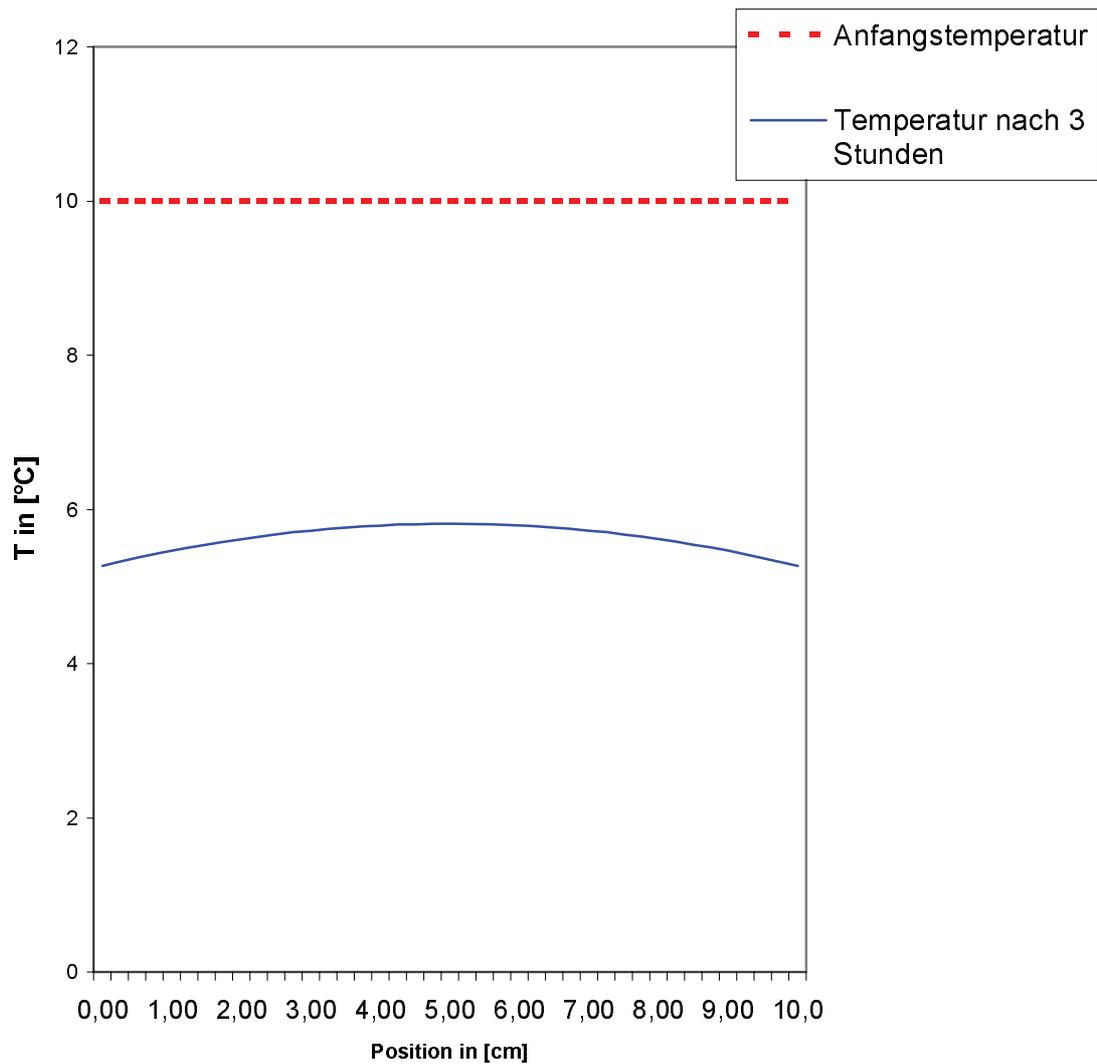


Abbildung 15 Vergleich der Berechnungswerte zu einem analytischen Ergebnis

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. dx ist natürlich um ein vielfaches kleiner als in [19].

Tabelle 5 Vergleich der untersuchten Berechnungsverfahren

Rechenzeit [sec]	dx in [cm]	dt 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 $h=1,92dT^{1/4}$ (W/m²K) ($Q_{\text{konv}}=h \cdot T$).

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.

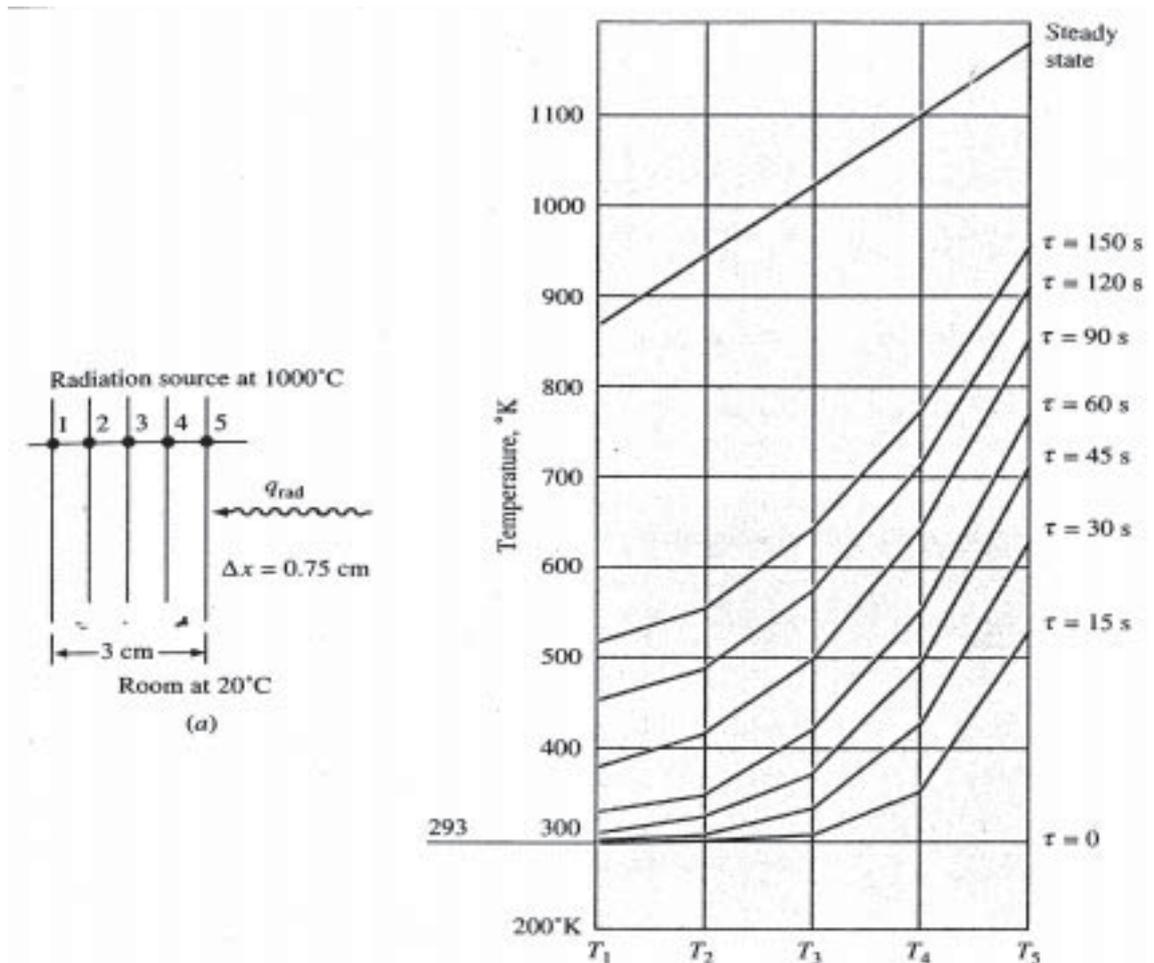


Abbildung Temperaturverteilung infolge Strahlung aus [36]

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. $1/10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 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.

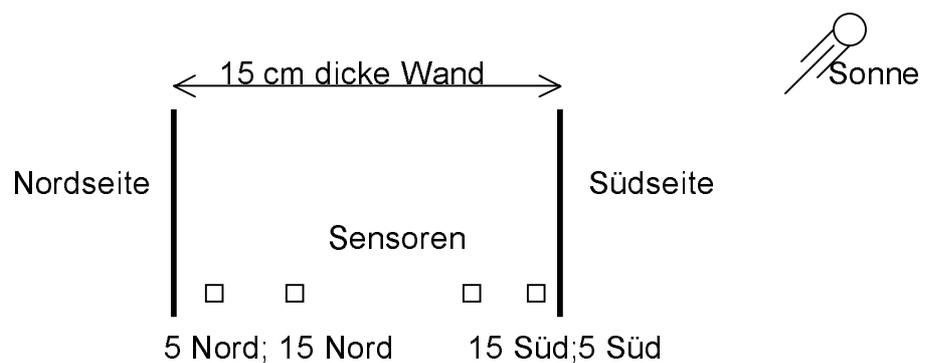


Abbildung 16 Aufbau der Versuchswand



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 Versuchsaufbau

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.

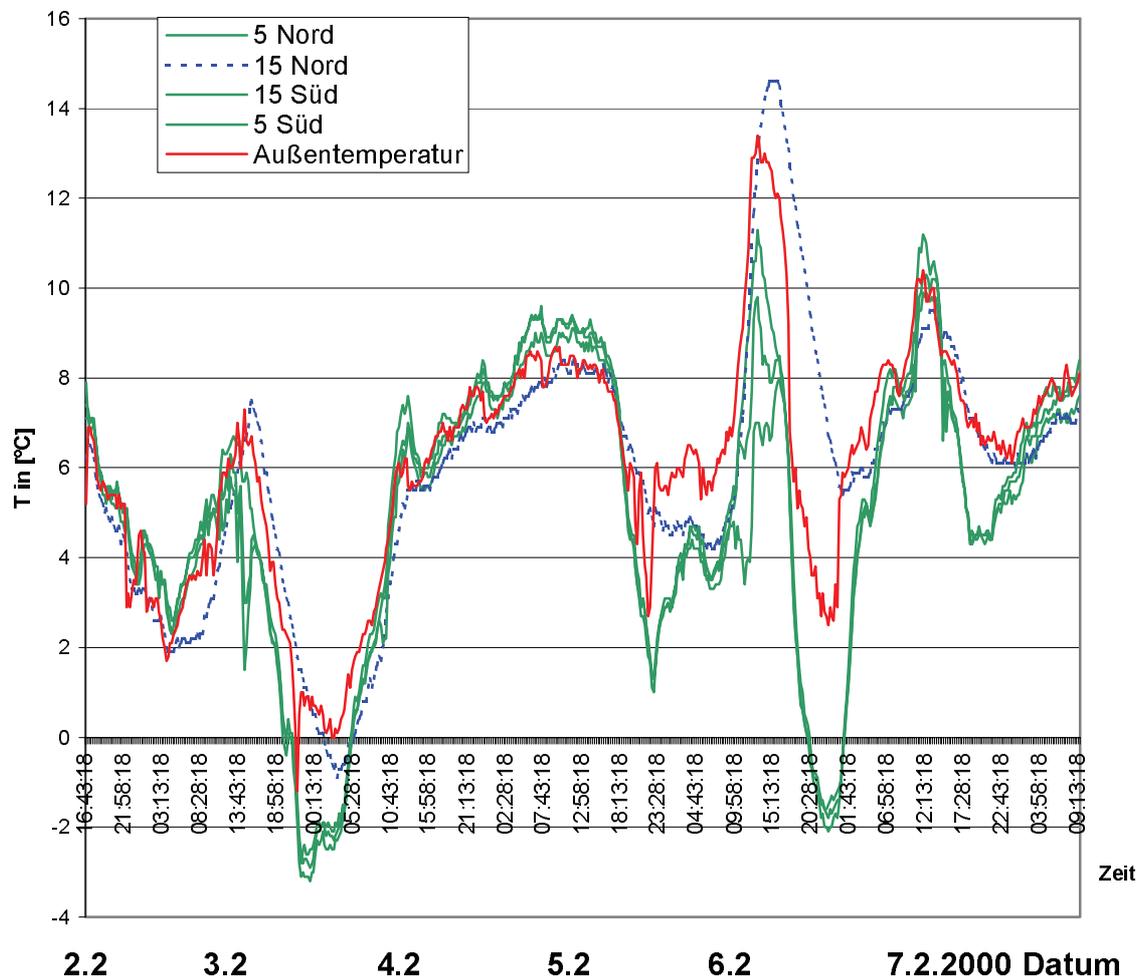


Abbildung 18 Ungenauigkeiten der Temperatursensoren

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.

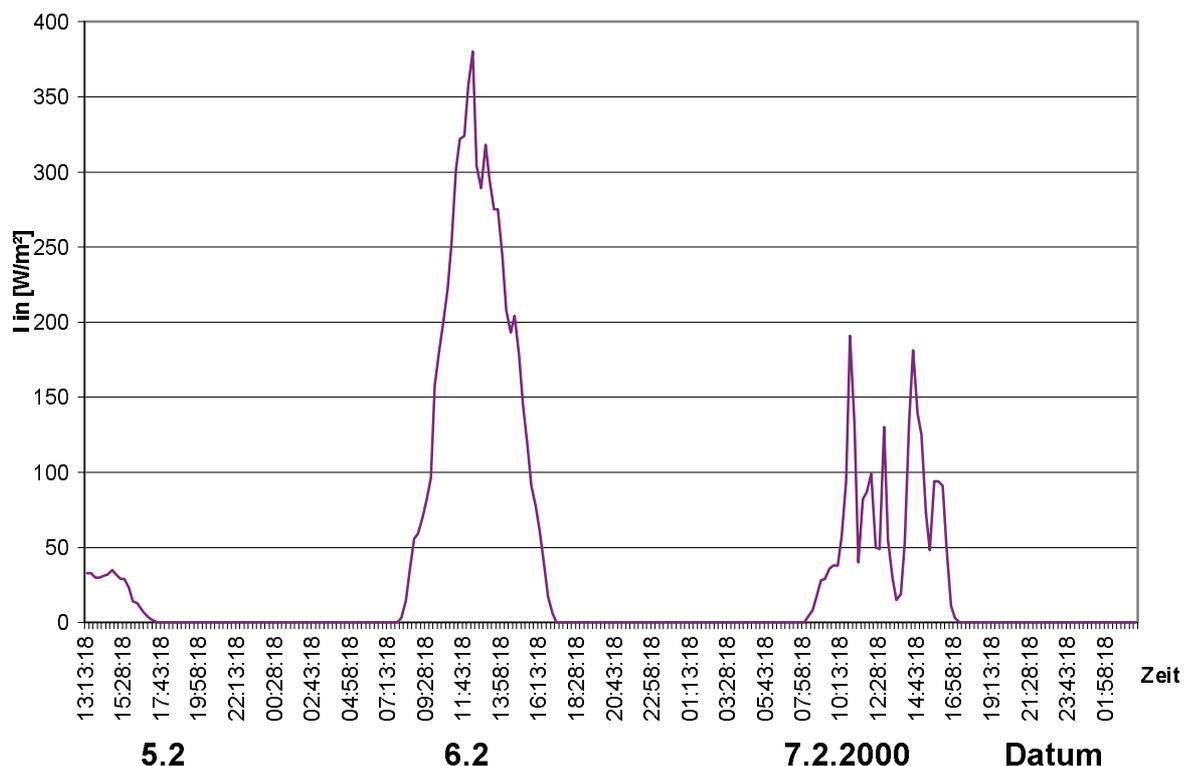
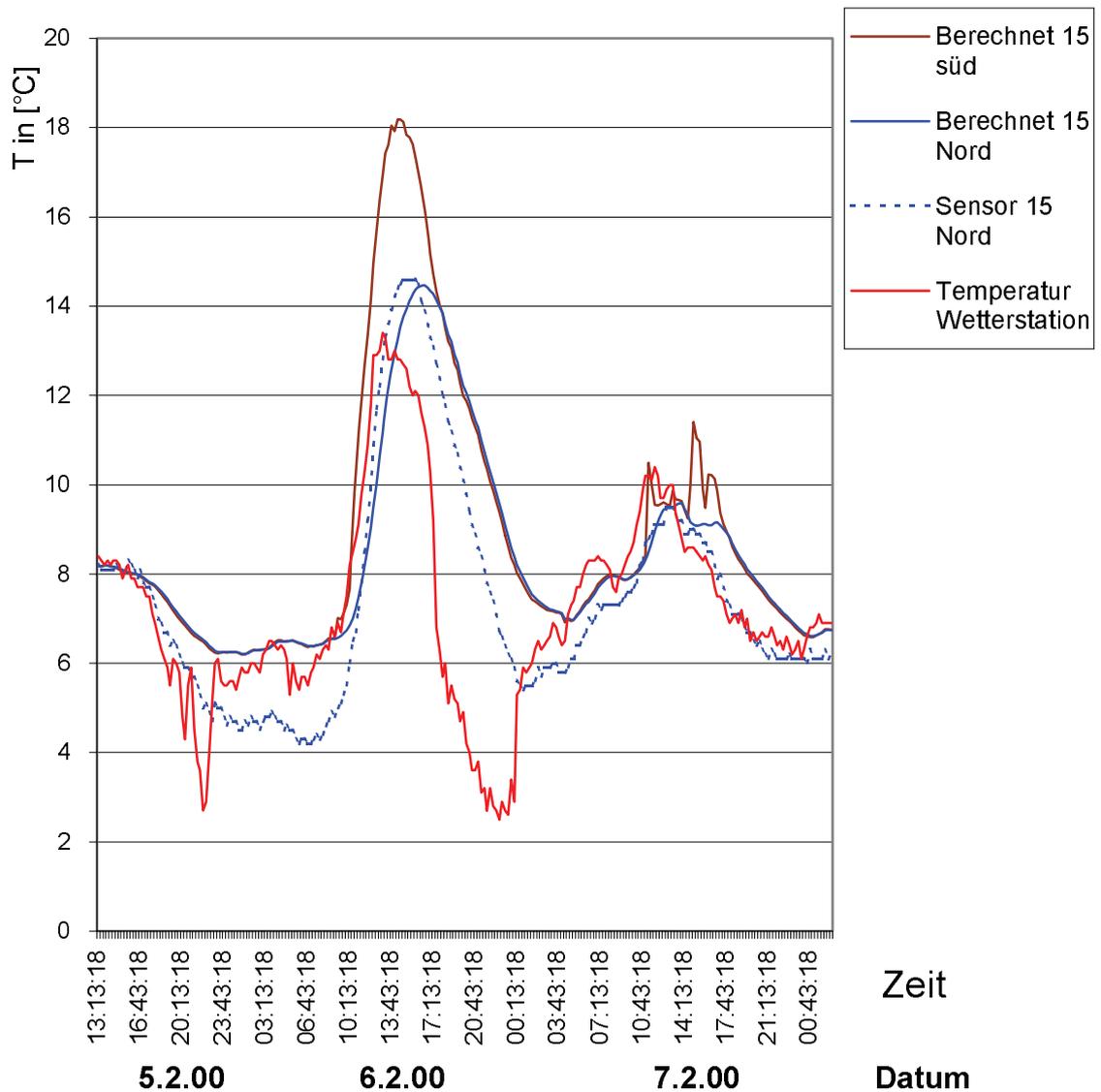


Abbildung 19 Globalstrahlung vom 5.2-7.2.2000**Abbildung 20 Vergleich der Berechnungsergebnisse mit den Messergebnissen in der Versuchswand**

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:

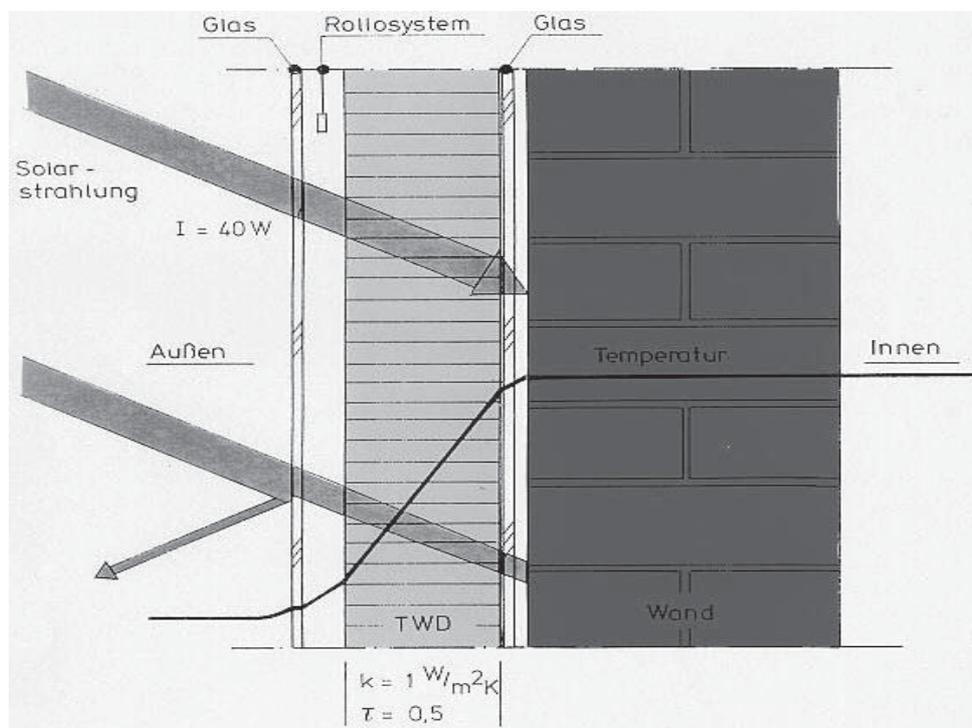


Abbildung 22 Transparente Wärmedämmung aus [54]

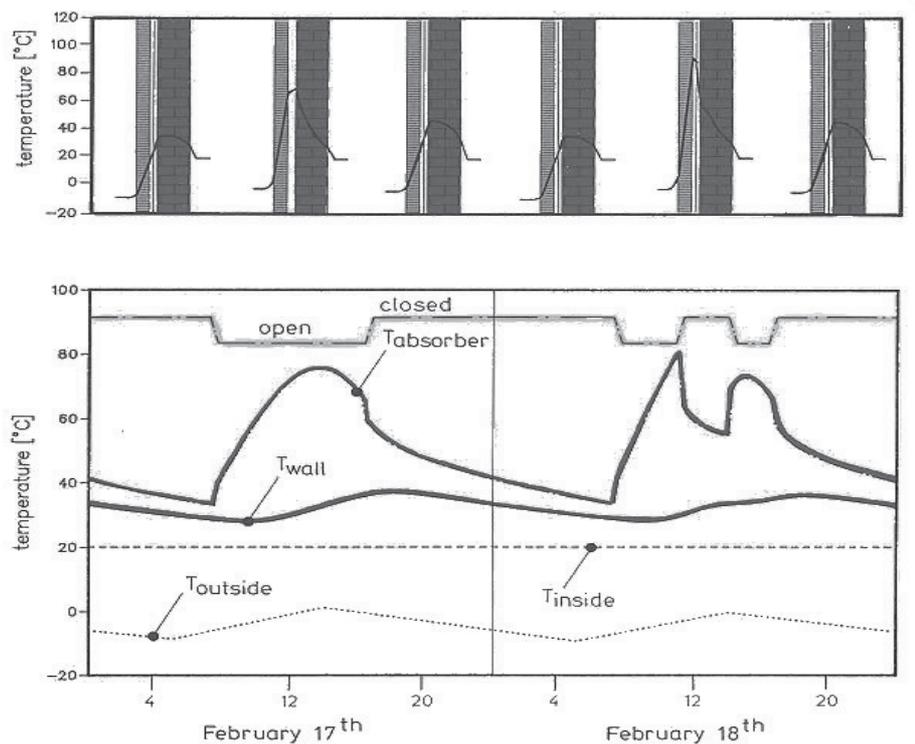


Abbildung 23 Effekt der konstanten Innentemperatur durch transparente Wärmedämmung aus [54]

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:

<http://dynatherm.blogspot.com/>

Anhang

Anhang A) Bedienungsanleitung

Ein Excel-Programm zur Berechnung der instationären Wärmeleitung in beliebig geschichteten Bauteilen unter Berücksichtigung der meteorologischen Einflüsse insbesondere für das Bauwesen

Mit "DynaTherm" können Sie sehr genaue Berechnungen durchführen, um instationäre Temperaturleitverteilungen über ein beliebig geartetes Bauteil zu untersuchen. Es stehen Ihnen alle Möglichkeiten von Excel zur weiteren Verarbeitung der errechneten Daten zu Verfügung. Die instationäre Temperaturverteilung über die Zeit wird sehr anschaulich in einer Animation dargestellt und in einer fortlaufenden Liste gespeichert. Anhand der Position und Orientierung des Bauteils wird automatisch aus der meteorologisch gemessenen Globalstrahlung und dem Sonnenstand die resultierende auf das Bauteil treffende Strahlung in dem von ihnen gewählten Intervall der Messwerte jeweils neu berechnet.

Außerdem kann "DynaTherm" den echten Transmissionswärmefluss durch ein Bauteil bestimmen. Es kann genau simuliert bzw. berechnet werden, wie viel Wärme z.B. an einem Sommertag durch eine Dachhaut fließt. Für den winterlichen Wärmeschutz kann untersucht werden, inwieweit Außenbauteile zur Wärmeengewinnung der Innenräume beitragen können. Für den sommerlichen Wärmeschutz lässt sich in Abhängigkeit der Orientierung und Position (unterschiedliche Strahlungen) der Außenwand die optimale Dämmung ermitteln, die möglichst wenig Wärme in das Bauteil über den ganzen Tag fließen lässt. Somit entstehen für den planenden Ingenieur völlig neue Möglichkeiten.

Fließen die aus den von "DynaTherm" berechneten Simulationen gewonnenen

Erkenntnisse in die Bauplanung mit ein, lässt sich auch eine sehr große Menge Energie einsparen.

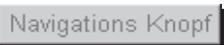
Des Weiteren lassen sich z.B. in einem beliebig geschichteten Bauteil die Stellen ermitteln, in denen die stärksten Temperaturänderungen während eines Zeitraumes auftreten. In der Simulation lassen sich optimale Wandaufbauten mit möglichst geringen zeitlichen Temperatursprüngen ermitteln und somit dadurch bedingt Spannungen im Bauteil reduzieren (bzw. tatsächliche Spannungen bestimmen).

DynaTherm ist komplett in Excel und VBA programmiert, der Quellcode liegt also offen. Es wurde bewusst auf eine leichte Erweiterbarkeit der Programm-Module Wert gelegt, so dass sich "DynaTherm" hervorragend als Grundlage für alle Arbeiten eignet, die die instationäre Wärmeleitung in beliebig geschichteten Bauteilen unter Berücksichtigung der meteorologischen Einflüsse benötigen. z.B. Feuchtetransport, Brandwände, transparente Bauteile usw.

1. Generelle Bedienungshinweise

Um sich in „DynaTherm“ besser zurechtzufinden, wurde eine einheitlich Farbstruktur gewählt. Hierin bedeuten die Farben:

orange	Vom Benutzer auszufüllendes Textfeld
blau	Werte, die automatisch durch Standard- Excelfunktionen ermittelt werden
grün	Von einer programmierten VBA- Funktion eingetragener Wert
gelb	Überschrift oder Beschreibung eines Wertes
rot grün	Fehlerfelder (bestimmt über Standard-Excelfunktionen)

 Navigations Knopf | Wählt den entsprechenden sichtbaren Bereich aus

 Modul Knopf | startet das entsprechende Programm-Modul

 Kontrollkästchen | Aktiviert die genannte Option

 Optionsfeld | Wählt eine Option der angegebenen Optionen aus

Die Fehlerfelder enthalten Kommentare, die dazu beitragen, fehlende oder unkorrekte Eingaben schnell auffindig zu machen. Erscheint also ein Fehlerfeld „rot“, bewegen Sie einfach die Maus auf dieses Feld und Sie erhalten automatisch themenspezifische Hilfe.

Zusätzlich gibt es ein deutlich gekennzeichnetes Hilfefeld für jedes Arbeitsblatt „Bewegen Sie die Maus auf dieses Feld für „allgemeine Hilfe, Tipps und Hinweise“, das mit einem Kommentar für das entsprechende Arbeitsblatt gekennzeichnet ist.

Alle Zellen, die vom „Anwender“ nicht verändert werden sollten, sind über die Option „Blattschutz“ geschützt.

Die Eingabefelder sind nach Möglichkeit mit der Funktion „Gültigkeit“ auf eine sinnvolle Eingabe beschränkt.

Machen Sie gebrauch von den Navigationsfeldern, um den jeweils relevanten Bereich des Arbeitblattes sichtbar zu machen! Ein Monitor <17 Zoll bzw. mit einer Auflösung <1024*768 Bildpunkte ist nicht zu empfehlen!

2. Erzeugen eines neuen Bauteils

The screenshot shows an Excel spreadsheet with the following data:

Material	Dicke	Wärmeleitfähigkeit λ in [W/(m·K)]	Wärmeübergangskoeffizient α in [W/(m²·K)] bzw. Wärmeübergangswiderstand $1/\alpha$ in [m²·K/W]	Dicke d in [mm]
1	1	1,50	1100	0,7
2	2	15,00	1223,40	2,03
3	4	15,00	1300	0,07
4	10	1,50	1100	0,87
5-17	1	0,00	0,00	0,00
Σ	4	33,00	7,5126	413

Below the spreadsheet, a horizontal bar chart shows the distribution of thermal resistance:

- Stationäre Temperaturverteilung: 15,00
- Schenkelwärmeübergang: 1,50
- Druckluft: 0,50

Input parameters table:

(alpha) Neigung der Wand zum Horizont	90 (Grad)
Azmut der Außenwind (Nord O=West 270)	180 (Grad)
Geographische Breite (Äußere Position)	52,52 (Grad)
Geographische Länge (Westen Positiv)	-13,4 (Grad)
Ordnung zur Greenwichzeit (GMT)	1 (Grad)
Berlin(GMT+1) Geographische Breite	52,52 North (Grad)
Geographische Länge	-13,4 East (Grad)

Beginnen Sie also damit, im „Arbeitsblatt“ {Wandaufbau} Ihren Wandaufbau zu erzeugen.

Mit dem Knopf {neu} können Sie den alten Wandaufbau löschen.

Wählen Sie über die entsprechenden „Drop-Down Menüs“ die gewünschten Materialien aus, und teilen Sie jedem Material seine entsprechende Dicke zu.

Wenn Sie zwischen zwei Materialien einen Wärmeübergang mitrechnen lassen wollen, dann wählen Sie diesen genauso aus, wie Sie ein Material auswählen, nur der Dicke darf hier kein Wert zugewiesen werden. Wichtig ist, dass Sie keine Wärmeübergänge an den Rändern des Bauteils eingeben, die äußeren Wärmeübergänge werden gesondert wie in Punkt Anhang A.4 für die stationäre und in Punkt Anhang A.5.1 für die instationäre Berechnung erläutert, eingetragen.

Es können beliebig viele Freiräume zwischen den Materialien freigelassen werden. Dies ist besonders praktisch, falls Sie später Materialschichten im Innern des Bauteils ändern, löschen oder hinzufügen wollen, da Sie die äußeren Schichten dann nicht mehr zu verändern brauchen.

Die entsprechenden Fehlerfelder für jede Zeile am linken Rand helfen Ihnen schnell, eventuelle Fehler oder vergessene Eingaben auffindig zu machen.

Finden Sie ein Material im „Drop-Down Menü“ nicht oder es hat nicht die von Ihnen benötigten Stoffeigenschaften, müssen Sie es im Arbeitsblatt „Material-Datenbank“ hinzufügen (siehe auch Punkt Anhang A.3).

Geben Sie nun die Orientierung des Bauteils in den Zellen (L24:L29) ein.

Sind alle Fehlerfelder „grün“ und Ihr Bauteilaufbau komplett, sind Sie nun mit dem Erzeugen des Bauteils fertig.

Sie können nun mit dem Knopf {Drucken} den Wandaufbau ausdrucken. Oder mit dem Knopf {zur stationären Berechnung} zur stationären Wärmeleitungsrechnung springen. Für die instationären Temperaturberechnungen verfahren Sie nach Anhang Punkt 4.

3. Hinzufügen von neuen Materialien

Pos.-Nr.	Material-Datenbank	Material	Innen	Wärmekapazität c _p [W/(kg·K)]	Wärmeleitfähigkeit λ in [W/(m·K)] bzw. Wärmübergang alpha [W/(m²·K)]	Dichte rho [kg/m³]	Andere Arten an Baustoffen können hinzugefügt werden, z.B. Stahl, Glas, etc.
1	Kalk						
2	Harte verarbeitete Steine						
3	Holzbohle (dicke >=25mm)			1700	0,09	400	
4	Polystyrol (PUR) Hartschaum (20)			1300	0,020	30	
5	Fichte Kiefer Tanne			2100	0,2	600	
7	Wärmübergang				6,000		
8	3. Randbedingung und weitere Randbedingungen						
10	Kalkmörtel			1100	0,370	1800	
11	Polystyrol Partikelschaum DIN 18154			1300	0,04	15	
12	Mineralfaserwolle (DIN 18185, 040)			1200	0,04	25	
13	Leichtbeton LM 21 DIN 1053 T1			1100	0,210	700	
14	Leichtbeton LM 36 DIN 1053 T1			1100	0,360	20	
15	Zementmörtel			1100	1,400	2000	
16	Kalkputzmörtel, Gipsmörtel, ...			1100	0,700	1400	

Wechseln Sie in das Arbeitsblatt „Material-Datenbank“. Sie können hier nun an einer beliebigen Stelle Ihr eigenes Material hinzufügen und die Stoffwerte in die entsprechenden Spalten eintragen. Sie können dabei in Ihrer gewohnten Art und Weise Daten in Excel eingeben.

Zwingend erforderlich sind die Stoffwerte λ , ρ und die Wärmekapazität c .

Der Reflexionsfaktor wird im Arbeitsblatt {Randbedingungen} eingetragen (siehe Randbedingungen Seite A.5.1).

Um die Bauteildatenbank übersichtlicher zu gestalten, bietet es sich an, die Materialien nach bestimmten Kategorien zu sortieren.

Standardmäßig sind einige Kategorien und Baustoffe, hauptsächlich aus der DIN 4108 von mir eingetragen worden. Sie können ebenfalls ohne Probleme eigene Baustoffe bzw. Kategorien eintragen, vorhandene ändern oder die Reihenfolge umsortieren.

Die laufende Positionsnummer wurde geschützt, da diese vom Programmsystem benötigt wird und selbst nicht verändert werden darf.

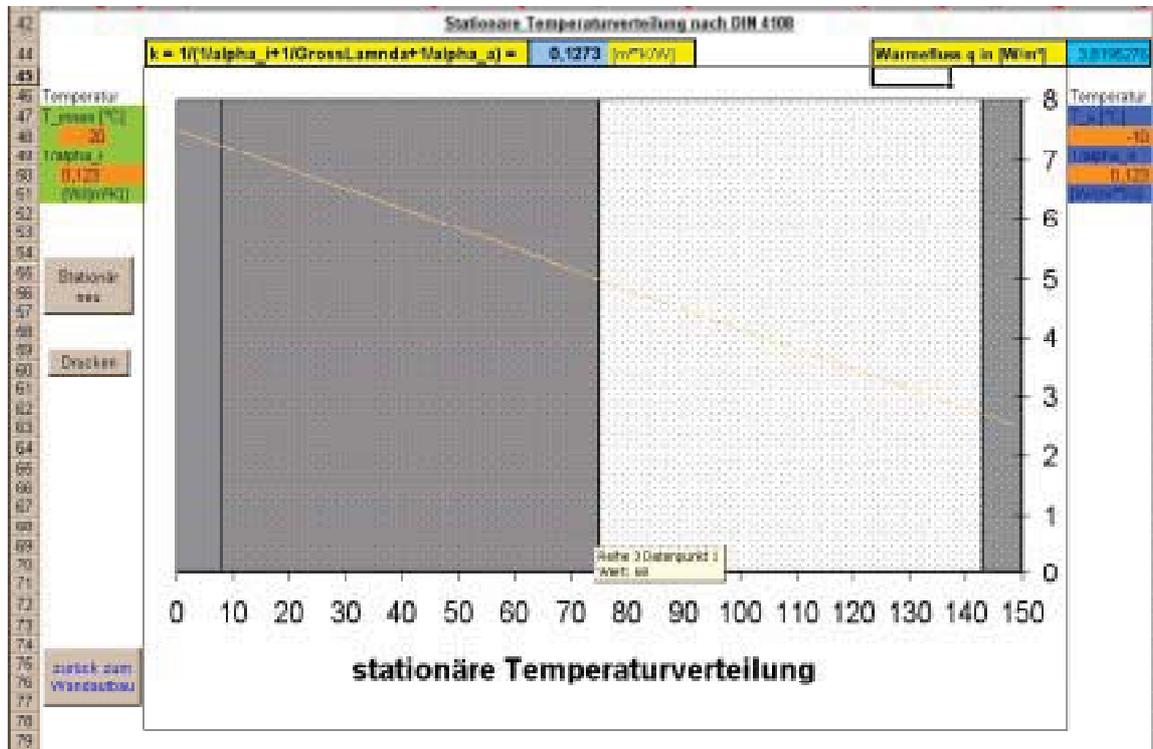
Es können keine Zellen über die Excelfunktion „Zellen einfügen“ eingefügt werden.

Am besten ist es, Sie tragen Ihre Materialien in noch freie Felder ein oder tragen Sie am Ende der Liste unter eigene Materialien ein.

Die Bauteildatenbank wurde auf 430 Einträge begrenzt. Wollen Sie mehr Materialien hinzufügen, müssen Sie auch die Zellbezüge im Arbeitsblatt „Wandaufbau“ und „Berechnungsoptionen“ ändern.

Mit dem Knopf {Drucken} können Sie die gesamte Material-Datenbank ausdrucken.

4. Stationäre Wärmeleitungsberechnungen



Um das Temperaturprofil einer Wand unter stationären Bedingungen nach der Zeit $t \rightarrow \infty$ zu erhalten, benötigen Sie nur das Arbeitsblatt „Wandaufbau“. Im Arbeitsblatt „Berechnungsoptionen“, wie standardmäßig voreingestellt, muss die Funktion Autoverteilung aktiviert sein. (siehe hierzu Punkt Anhang A.5.2)

Wenn Sie Ihr Bauteil erzeugt haben, können Sie mit dem Knopf {zur stationären Berechnung} zur stationären Berechnung springen. (Die Ein- und Ausgabe der stationären Berechnung befindet sich ebenfalls auf dem Blatt „Wandaufbau“ gleich unter dem von Ihnen aufgelisteten Bauteil.)

Geben Sie hier (Zeile 48 und Zeile 50) nun die stationären Randbedingungen ein (Temperaturen und Wärmeübergangszahlen). Achten Sie darauf, dass sie die Bauteilseiten („innen“ und „außen“) richtig zuordnen. Für stationäre Berechnungen werden in DynaTherm keine Strahlungsenergien in die Berechnung mit einbezogen.

Mit dem Button {Stationär neu} wird der entsprechende Temperaturverlauf neu berechnet. Mit {Drucken} können Sie das Diagramm mit k-Wert und Randbedingungen ausdrucken.

Die errechneten Werte, aus denen das Diagramm erzeugt wird, finden Sie im Bereich (W35:FQ35), gleich rechts neben dem Diagramm.

Standardmäßig ist im „Arbeitsblatt“ {Berechnungs-Optionen} die automatische Ausgabenverteilung aktiviert („Checkbox“ Bereich (M19)). Es kann aber sein, dass Sie deaktiviert wurde, wenn Sie nicht die Original-Datei von der CD-Rom benutzen.

Die automatische Ausgabenverteilung teilt die Schichtdicken prozentual auf (siehe Punkt Anhang A.5.2), so dass eine sinnvolle Darstellung gewährleistet ist. Haben Sie jedoch eine sehr dünne Schicht, beispielsweise eine Folie < 3mm, dann ist es möglich, sozusagen in die Darstellung hinein zu zoomen. Dies ist für die stationäre Verteilung noch nicht so wichtig, kann aber bei der instationären Wärmeleitung durchaus interessieren.

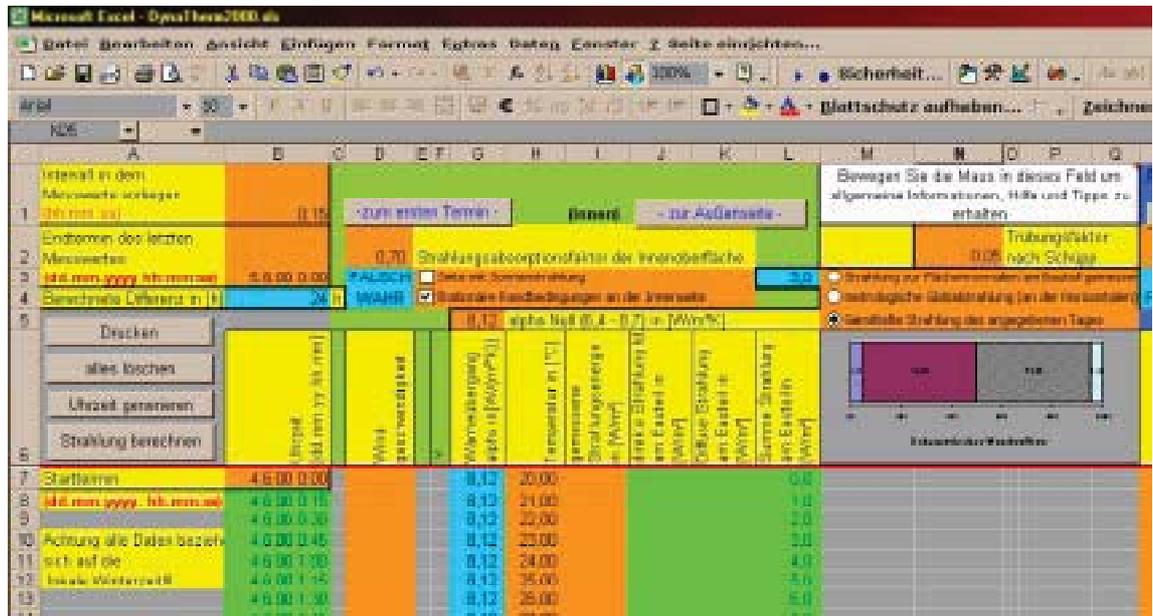
Siehe dazu Punkt Anhang A.5.2 (Manuelle Verteilung der Ausgabewerte).

Wenn Sie ein Bauteil mit mehreren Materialschichten eingegeben haben, werden Sie an den Schichtgrenzen feststellen, dass der Temperaturverlauf an der Grenze für einen kleinen Bereich waagrecht ist. Dies rührt daher, dass einem Funktionswert X im Diagramm immer nur ein Y-Wert zugeordnet werden kann. Es sollte jedoch möglich sein, aus dem Diagramm die Temperaturen am jeweils äußeren Rand jeder Schicht zu erkennen und abzulesen. Besonders auffällig wird es, wenn Sie einen Wärmeübergang zwischen den Schichten eingefügt haben. Der Wärmeübergang erstreckt sich über „einen“ Wert mit einer leichten Schräge. Eigentlich müsste er jedoch als senkrechte Gerade zu erkennen sein. Hier können Sie jetzt dafür aber genau die Temperaturen am äußeren Rand der Schicht mit der Maus als direkten Wert der Randtemperatur ablesen (Hinzu kommt, dass Knicke nicht mehr erkennbar wären, da die Temperatur immer in der Mitte des Abschnitt angesetzt wird).

An Schichten ohne Wärmeübergang werden Sie also immer zwei Werte vorfinden, die gleich groß sind. Sie entsprechen jeweils der linken bzw. rechten Randtemperatur.

5. Instationäre Wärmeleitungsberechnungen

5.1 Eingabe der Randbedingungen



Wechseln Sie in das Arbeitsblatt „Randbedingungen“.

Beginnen Sie (nachdem Sie Ihren Wandaufbau erzeugt haben) mit der Eingabe der Randbedingungen. Erzeugen Sie zuerst den zeitlichen Verlauf, benutzen Sie dazu unbedingt die hier erläuterte automatische Variante, damit die Termine im richtigen Format vorliegen.

Tragen Sie das Intervall, in dem Ihre Messwerte vorliegen, in Zelle (B1) ein. Tragen Sie die Startzeit in (B7) ein und die Endzeit in (B3) und drücken Sie den Knopf {Uhrzeit_generieren}.

Geben Sie nun jeweils für die linke (innen) und die rechte (außen) Bauteilseite den Absorptionsfaktor (Zeile 2) und α_0 (Zeile 5) ein. Hinweise zur schnellen Abschätzung des Absorptionsfaktors finden Sie unter Punkt 4.2.3.

Wollen Sie zur rechten Bauteilseite können Sie den Navigationsknopf (Zelle K1) {zur Außenseite} benutzen.

Wählen Sie für jede Seite aus, ob Sie für die Berechnung die stationären Randbedingungen benutzen wollen (günstig für klimatisierte Innen-Räume z.B. 20 °C). Wählen Sie diese Option {stationäre Randbedingungen...} (Zeile 4),

werden als Randbedingungen für die entsprechende Bauteilseite nur die Werte in Zeile (7) (Werte der Startzeit) als stationäre Randbedingungen zugrunde gelegt.

Wählen Sie nun aus, ob es sich um eine Bauteilseite handelt, die der Sonnenstrahlung ausgesetzt ist oder nicht! (Zeile 3)

Wählen Sie der Art der Strahlungsumrechnung (Zelle M4):

a) Strahlung zur Flächennormalen am Bauteil gemessen

Strahlung wurde mit einem Sensor direkt am Bauteil in Richtung der Sonnenstrahlung gemessen (siehe Punkt 4.2. a) und b))

b) metrologische Globalstrahlung (an der Horizontalen)

Es wurde die meteorologische Globalstrahlung gemessen. Diese wird nach dem Modell in 4.2.e) auf das von Ihnen erstellte Bauteil umgerechnet.

c) Gemittelte Strahlung des angegebenen Tages

Es wird eine empirische Strahlung nach Gleichung Anhang C.9 und Anhang C.10 berechnet und auf das Bauteil umgerechnet.

Für die Optionen b) und c) müssen Sie einen Trübungsfaktor nach Tabelle Anhang C 1 in Zelle (N2) angeben.

Geben Sie nun Windgeschwindigkeit, Temperatur und Strahlung ein. Ist ein Wert Null können Sie das Feld auch leer lassen. Dies entspricht dem Wert Null. Achten Sie wieder auf die richtige Einheit.

Befindet sich das Bauteil über eine bestimmte Zeit im **Schatten**, geben Sie für die o.g. Optionen b) und c) der Strahlungsart den Wert „s“ „für Schatten ein. Dann wird für diese Zeit nur die diffuse Strahlung angesetzt.

Bei der Eingabe können Sie in Ihrer gewohnten Art und Weise in Excel vorgehen. Liegen Ihnen Messwerte in einem Excel verträglichen Format vor, können Sie diese Einlesen und in die vorgesehenen Spalten wie Temperatur, Windgeschwindigkeit usw. kopieren.

Haben Sie all dies getan, sind Sie mit der Eingabe der Randbedingungen fertig. Mit {Drucken} können Sie die Randbedingungen ausdrucken.

5.2 Einstellen der Optionen für Berechnung und Ausgabe

The screenshot shows the 'Options für die Ausgabe' and 'Options für die Berechnung' tabs in the software. The main data table is as follows:

Pos.-Nr. Wandbau	Material	Schichtdicke s in [cm]	Veranschaulichungsanzahl n in [W/(m²K)]	Fehlerfeld	ca. dx Ausgabewerte in [cm]	Anzahl der Werte für die Bildschirmausgabe - minimum 3 Werte	Fehlerfeld	ca. dx Berechnung in [cm]	Anzahl der Schichten für die Berechnung - ohne virtuelle-	S = (dt/dt) in [sec/m²]	A (Temperaturleitzahl) (Lamda/(c*ho)) in [W*sec²/MKJ]	m Modul [Dimensionslos]	max dt Berechnung
1 10	Kalkmörtel	1,50	## ##	ok	0,214286	8	ok	0,214286	7	435556	4,4E-07	0,1914	5,22519
4 2	Polystyrol(PUR) Hartschaum 020	15,00	## ##	ok	0,227273	67	ok	0,227273	66	387200	5,1E-07	0,1986	5,03616
3 34	Normal Beton	15,00	## ##	ok	0,223881	68	ok	0,223881	67	399022	8,8E-07	0,3491	2,86414
6 4 10	Kalkmörtel	1,50	## ##	ok	0,25	7	ok	0,25	6	320000	4,4E-07	0,1406	7,11207
7 -	#WERT!	0,00	## ##	ok	0	0	ok	0	0	-	-	0	0
8 -	#WERT!	0,00	## ##	ok	0	0	ok	0	0	-	-	0	0
9 -	#WERT!	0,00	## ##	ok	0	0	ok	0	0	-	-	0	0
10 -	#WERT!	0,00	## ##	ok	0	0	ok	0	0	-	-	0	0
11 -	#WERT!	0,00	## ##	ok	0	0	ok	0	0	-	-	0	0
12 -	#WERT!	0,00	## ##	ok	0	0	ok	0	0	-	-	0	0
13 -	#WERT!	0,00	## ##	ok	0	0	ok	0	0	-	-	0	0
14 -	#WERT!	0,00	## ##	ok	0	0	ok	0	0	-	-	0	0
15 -	#WERT!	0,00	## ##	ok	0	0	ok	0	0	-	-	0	0
16 -	#WERT!	0,00	## ##	ok	0	0	ok	0	0	-	-	0	0
17 -	#WERT!	0,00	## ##	ok	0	0	ok	0	0	-	-	0	0
18 4 Σ	außen	33	## ##	Summe	150	Summe	146	Max	0,34914	2,8641			

The options panel at the bottom shows settings for 'Ausgabeintervall' (00:15:00), 'Ausgabe = Randbedingungsintervall' (checked), 'Anfangstemperatur' (20 C), and 'Rechenzeit' (14:02:15).

Die Optionen sollten für zwei Arten der Anwendung verschieden gewählt werden.

1. *Schnelle und sehr gute Veranschaulichung der Temperaturleitvorgänge durch das von Ihnen bestimmte Bauteil*

Um eine anschaulich möglichst gute Darstellung zu erhalten, sollten Sie die Anzahl der darzustellenden Werte in Zelle (M21) maximieren (der maximal darstellbare Wert wurde auf 150 Anzeigewerte begrenzt). Wählen Sie die Option {Automatische Ausgabenverteilung} in (M19). Ist diese Funktion aktiviert, werden die darzustellenden Werte automatisch proportional auf den von Ihnen angegebenen Wert verteilt.

Für sehr dünne Schichten werden jedoch mindestens drei Werte angezeigt (linke Randtemperatur; ein Zwischenwert; rechte Randtemperatur). Deaktivieren

Sie diese Funktion, können Sie selbst festlegen, wie viele Werte Sie pro Schicht sehen möchten (Tragen Sie dazu dx der Anzeigewerte in Spalte (M) ein).

2. *Wissenschaftliche Betrachtung der Messwerte und Ausdrucken der Berechnungswerte*

Wenn Sie sehr genaue konkrete Berechnungswerte untersuchen möchten, sollten Sie dx der Anzeigewerte so wählen, dass Sie mit dem Anzeigewert genau den Wert „treffen“, der für Sie von Interesse ist. Die maximale Anzahl aller darzustellenden Werte darf nur den Wert 150 nicht überschreiten!

(z.B. Sie haben eine 10 cm dicke Wand und wollen den Temperaturwert nach einer bestimmten Zeit an der Stelle 1,5 cm vom linken Rand berechnen.

Wählen Sie also ein dx , das ein Vielfaches dieses Werts beschreibt, also z.B. $dx=0,5\text{cm}$. Der vierte Berechnungswert ist dann der Wert an der Stelle 1,5 cm (siehe auch Anhang A.5.4).

Haben Sie sich für eine Darstellungsart entschieden (manuelle Einstellung der Werte dx für die Ausgabe bzw. automatische Ausgabenverteilung), legen Sie anschließend fest, wie groß dx für die Berechnung für jede Schicht sein soll. Auch hier gibt es eine automatische Funktion { dx Ausgabe = dx Berechnung} in Zelle (P19). Ist diese Funktion aktiviert, werden die Werte die Sie in Spalte (M) für die Ausgabe festgelegt haben, in die Spalte (P) für die Berechnung kopiert. Diese Option ist auch anzuwenden, wenn Sie als ausgegebenen Wert den genauen berechneten Wert einer exakten Position benötigen.

Wählen Sie dx für die Berechnung unterschiedlich zu den ausgegebenen Werten, erhalten Sie als ausgegebenen Wert immer nur den Wert, der in der Nähe des berechneten Wertes liegt. Je kleiner Sie jedoch dx -Berechnung wählen, desto genauer wird der dargestellte Wert dem berechneten Wert entsprechen.

Für mathematisch wissenschaftliche Vergleiche ist es auf jeden Fall ratsam, diese Option auf { dx Ausgabe = dx Berechnung} zu belassen.

Sie können auch hier manuelle Werte benutzen, wenn Sie die Option {Manuell} in Zelle (P19) wählen.

In Spalte (T) wird die Temperaturleitzahl berechnet.

Nachdem Sie sich für eine dieser Optionen entschieden haben, müssen Sie überprüfen, ob die Modulbedingung (Gitter- Fourierzahl) in Spalte (U) nach Gleichung 12 eingehalten wird ($m < 0,5$). Ist dt in Zelle (P20) zu groß, wird Ihnen dies in den entsprechenden Fehlerfeldern angezeigt. Haben Sie die manuelle Einstellung gewählt, können Sie nun dx in den entsprechenden Zellen größer wählen.

Haben Sie die Option { dx Ausgabe = dx Berechnung} gewählt, müssen Sie dt kleiner wählen, wenn immer noch Fehlerfelder „rot“ leuchten. In Spalte (V) werden für jede Schicht die maximalen Werte für dt angezeigt. In Zelle (V18) sehen Sie den maximal zulässigen Wert für dt für Ihre gewählten dx . Auch hier gibt es wieder eine automatische Funktion {automatisch größtmögliches dt } Zelle (S20). Wählen Sie diese Option, wird automatisch der maximale Wert in Zelle (V18) in die Zelle (P20) übertragen. Wählen Sie nun die Dauer der Berechnung in Stunden und tragen Sie diesen Wert in Zelle (P21) ein!

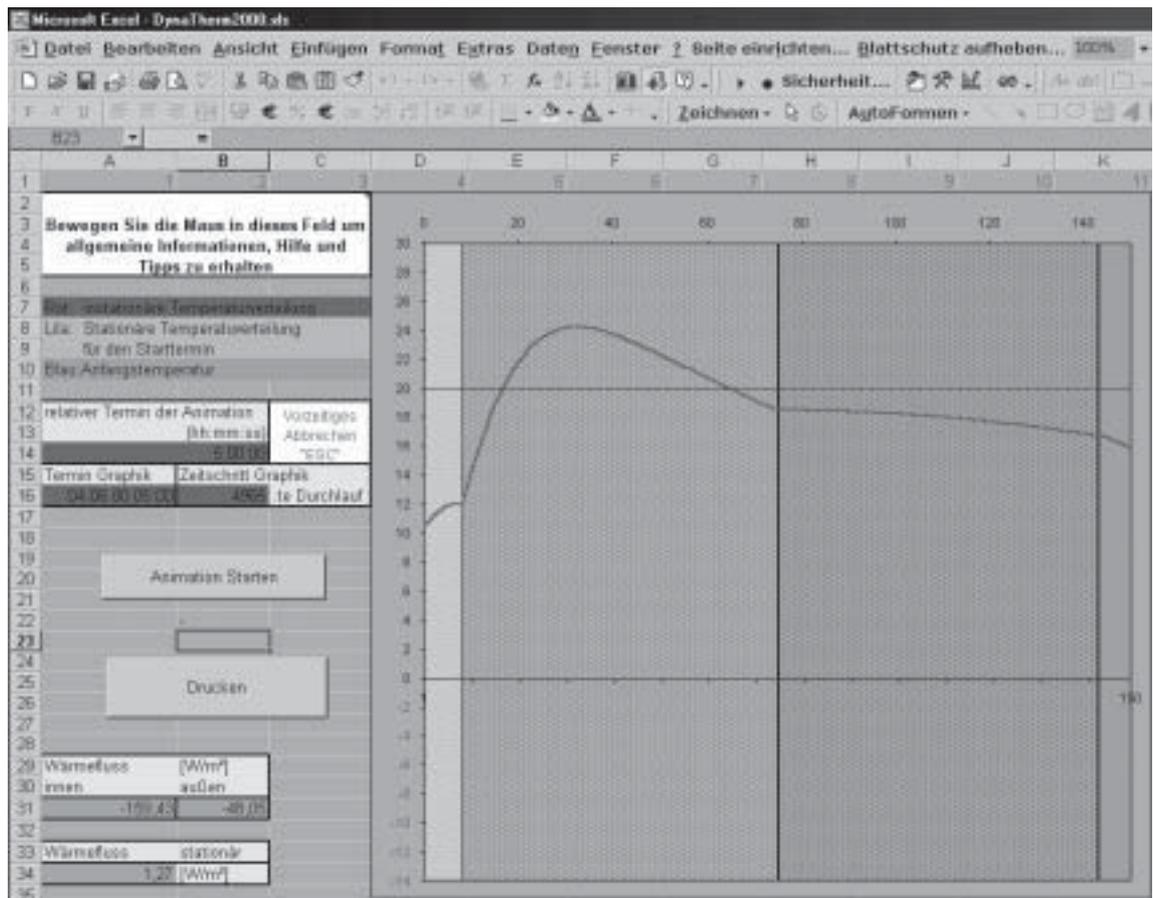
Haben Sie für dx und dt zulässige Werte gewählt, müssen Sie nun eine Anfangstemperatur in Zelle (P32) festlegen. Die Anfangstemperatur wird über den ganzen Körper als konstant angenommen (siehe Anhang A.5.7 Zusätzliche Funktion -stationäre Temperaturverteilung als Anfangstemperaturverteilung-).

Entscheidend ist nun noch die Option {Animation} in Zelle (M30). Excel benötigt ca. 1 Sekunde, um aus den berechneten Werten ein Diagramm aufzubauen. Aus diesem Grund lässt sich die Animation ausschalten. Dies ist sinnvoll, wenn Sie sehr ausführliche Berechnungen über einen sehr langen Zeitraum ausführen wollen (Berechnungen über ein simuliertes ganzes Jahr sind durchführbar). (In diesem Fall müssen Sie die Berechnung von diesem Arbeitsblatt aus starten (Knopf in Zelle (U25)).)

Sie sehen dann nur den letzten berechneten Wert nach Abschluss der Berechnung. Die berechneten Zwischenwerte werden trotzdem im Arbeitsblatt {Ausgabewerte} gespeichert.

Die Option {Liste der Werte in „Ausgabewerte“} unterbindet das „Speichern“ der berechneten Werte im Arbeitsblatt Ausgabewerte. Sie können dann die Berechnung nur im „Animationsdiagramm“ verfolgen.

5.3 Animierte Ausgabe der berechneten Ergebnisse



Wechseln Sie in das Arbeitsblatt „Animation“!

Starten sie hier die Animation, mit dem Knopf {Animation Starten} wenn Sie alle Randbedingungen und Optionen eingegeben haben.

Mit dem Knopf {Drucken} können Sie die aktuelle Ansicht ausdrucken.

5.4 Die Matrix aller ausgegebenen Temperaturwerte

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M
3		Anfangstemperatur [°C]			20,000	20,000	20,000	20,000	20,000	20,000	20,000	20,000	20,000
4													
5		Position in [cm]			0,000	0,214	0,429	0,643	0,857	1,071	1,286	1,500	1,500
6		Tneu [°C]			1,287	1,293	1,299	1,305	1,310	1,316	1,321	1,327	1,327
7		Stationäre Temperaturverteilung			1,141	1,144	1,147	1,150	1,152	1,155	1,158	1,161	1,161
14													
20	Intervall	900,000000 [secunden]											
23	Positiv fließt in die Wand hinein												
24	Negativ fließt aus der Wand heraus												
25	Gesamtenergie in [Ws/m²]												
26	innen	außen											
27	570.899,5	-1.436.440,2	Position in [cm]		0,000	0,214	0,429	0,643	0,857	1,071	1,286	1,500	1,500
28													
29	Leistung innen	L. außen [W/m²]	Termin										
30	-112,345876	-67,228062	4.6.00 0:15		14,836	15,112	15,346	15,536	15,681	15,781	15,837	15,847	15,847
31	-86,593485	-63,967493	4.6.00 0:30		11,664	11,878	12,058	12,206	12,320	12,401	12,447	12,460	12,460
32	-67,134532	-61,778969	4.6.00 0:45		9,268	9,433	9,574	9,690	9,780	9,845	9,884	9,897	9,897
33	-52,352466	-60,068423	4.6.00 1:00		7,447	7,576	7,686	7,778	7,849	7,902	7,934	7,947	7,947
34	-41,079355	-58,640618	4.6.00 1:15		6,059	6,160	6,247	6,319	6,377	6,420	6,447	6,460	6,460
35	-32,453287	-57,400803	4.6.00 1:30		4,997	5,077	5,146	5,203	5,250	5,285	5,308	5,320	5,320
36	-25,831816	-56,292933	4.6.00 1:45		4,181	4,245	4,300	4,347	4,385	4,414	4,434	4,445	4,445
37	-20,733192	-55,280239	4.6.00 2:00		3,553	3,604	3,649	3,687	3,718	3,743	3,760	3,771	3,771
38	-16,794680	-54,337389	4.6.00 2:15		3,068	3,110	3,146	3,177	3,203	3,224	3,239	3,250	3,250
39	-13,742291	-53,446564	4.6.00 2:30		2,692	2,726	2,756	2,782	2,804	2,822	2,836	2,845	2,845
40	-11,368530	-52,595132	4.6.00 2:45		2,400	2,428	2,453	2,475	2,494	2,509	2,521	2,531	2,531
41	-9,515880	-51,774124	4.6.00 3:00		2,172	2,195	2,216	2,235	2,251	2,265	2,276	2,285	2,285
42	-8,064496	-50,977178	4.6.00 3:15		1,993	2,013	2,031	2,047	2,061	2,073	2,084	2,092	2,092
43	-6,922978	-50,199799	4.6.00 3:30		1,853	1,870	1,885	1,899	1,912	1,923	1,932	1,940	1,940
44	-6,021459	-49,438818	4.6.00 3:45		1,742	1,756	1,770	1,783	1,794	1,804	1,813	1,820	1,820

Im „Arbeitsblatt“ {Ausgabewerte} werden alle Werte der instationären Berechnung übertragen.

Zeile 3: Anfangstemperatur über den Körper

Zeile 5: Position der berechneten Werte vom linken Rand des Bauteils in [cm]

Zeile 6: Berechnete Werte für das Animierte Diagramm

Zeile 7: Stationäre Temperaturwerte (bei stationären Randbedingungen)

Ab Zeile 30 sehen Sie für jeden Zeitwert (Spalte (C)) die berechneten Wärmeflüsse, in Spalte (A) und (B) die, die in (negative Werte) bzw. aus (positive Werte) der Wand fließen.

In Zelle (B20) sehen Sie das von Ihnen gewählte Intervall der Berechnungswerte. Multiplizieren Sie einen bestimmten Wärmefluss (Spalte A) (Spalte B) mit diesem Wert und Sie erhalten die Energiemenge für den entsprechenden Zeitraum.

In Zelle (A27) und Zelle (B27) wird die Wärmemenge für den gesamten berechneten Zeitraum ausgegeben.

Anhand dieser Werte können Sie also genau feststellen, wie groß die Transmissionswärmeverluste bzw. -gewinne Ihres Bauteils zu jedem Zeitpunkt, bzw. über den gesamten berechneten Zeitraum, bei den von Ihnen gewählten Randbedingungen sind.

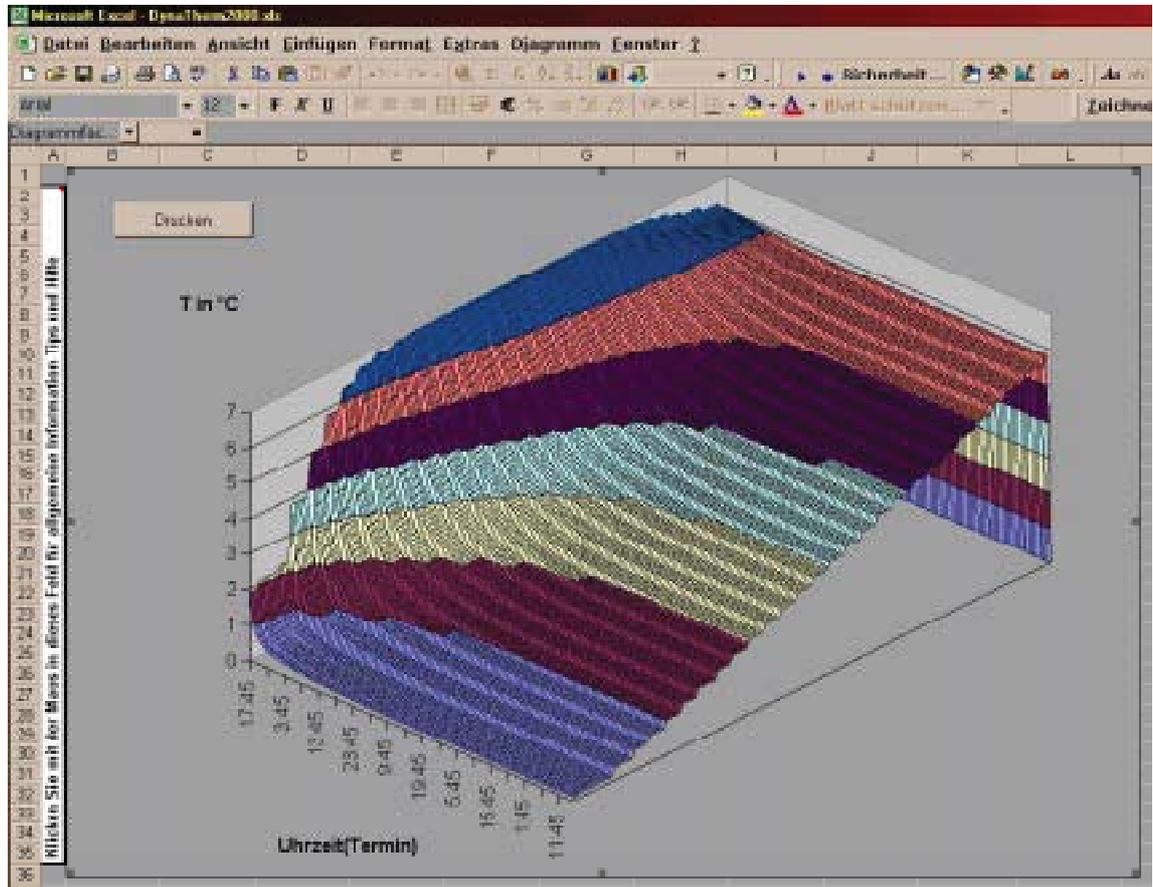
Ab Spalte (E) werden alle anzuzeigenden Temperaturwerte dargestellt. Aus diesen Daten können Sie nun mit den von Excel angebotenen Funktionen Diagramme zur Temperaturverteilung zu einem beliebigen Zeitpunkt erzeugen.

Als Beschriftung der Diagramme können Sie die Positionswerte in Zeile 5 benutzen (für das Kombinationsdiagramm scheint dies leider nicht möglich).

Es lassen sich ebenfalls 3-dimensionale Diagramme wie in Punkt 5.6 vorgeschlagen erstellen.

Für jede Schicht wird in jedem Fall die linke und die rechte Randtemperatur ausgegeben.

5.5 3-Dimensionale Ausgabe des berechneten Temperaturprofils



Dieses Arbeitsblatt soll nur als ein Darstellungsvorschlag angesehen werden. Der Darstellungsbereich wurde standardmäßig auf die ersten 95 Ausgabewerte begrenzt. Sie können jedoch über die Option "Datenquelle" des Diagramms einen beliebigen anderen Bereich für die 3-dimensionale Darstellung wählen. Über die Option "Diagrammtyp" können Sie das Diagramm in ein farbloses "durchsichtiges" Diagramm umwandeln. Dies kann die Anschaulichkeit verbessern.

Die beste Darstellung ist je nach Temperaturprofil verschieden.

Von daher experimentieren Sie etwas mit den Darstellungsoptionen für das Diagramm.

5.6 Zusätzliche Funktion

(-stationäre Temperaturverteilung als Anfangstemperaturverteilung-)

Um die Transmissionswärmeverluste für einen relativ kurzen Zeitraum zu untersuchen, reicht es nicht aus, die Anfangstemperatur über das Bauteil als einheitlich anzusehen.

Sind Innen- und Außentemperatur einer Außenwand stark unterschiedlich, würde dies die Energiebilanz verfälschen, da eine gleichmäßige Temperaturverteilung über das Bauteil im Winter praktisch zu keinem Zeitraum gegeben ist.

Es würde sich für Zeiten ohne Sonnenstrahlung immer erst eine quasistationäre Temperaturverteilung einstellen.

Um den Transmissionswärmefluss durch eine Wand z.B. auch im Winter genau zu untersuchen, wurde eine zusätzliche Funktion integriert, die als Anfangstemperaturverteilung die stationäre Temperaturverteilung für die eingetragenen Randbedingungen des Starttermins besitzt.

Hierzu muss in die Zelle (P32) im Arbeitsblatt „Berechnungsoptionen“ der Wert „stat“ eingetragen werden. Diese Funktion wurde erst in der Schlussphase programmiert und funktioniert nur, wenn die Funktion {dx Anzeige = dx Berechnung} aktiviert wurde (und soll von daher noch nicht offizieller Bestandteil des Programmsystems sein).

Anhang B) Programm Module

In den Schleifen die besonders Geschwindigkeitsrelevant sind, wird der „Cells“ Befehl zur Auswahl eines Zellinhaltes benutzt, da dieser deutlich schneller als die Auswahl per Spalten- Zeilenname(z.B. (B5)) ist.

1 Arbeitsblatt Wandaufbau:

Modul stationär_Wandaufbau

Um keine Rundungsfehler zu erhalten, werden hier die Temperaturen auf analytischen Wege berechnet!

Sub stationär_Wandaufbau()

'Wählt Arbeitsblatt "Wandaufbau" falls das Modul aus einem anderen Blatt gestartet wird

Sheets("Wandaufbau").Select

' Löschen der alten Werte

Range("W35:IV35").Select

Selection.ClearContents

'Einlesen der Startwerte

a1 = [b50] '1/alpha innen

a2 = [m50] '1/alpha außen

Ti = [b48] 'Temperatur innen

Ta = [m48] 'Temperatur außen

schichtanz = [c18] ' Anzahl der eingegebenen Material-Schichten

wdw = [h18] ' 1/ GroßLamnda = Summe über alle s/lamnda

'Berechnung des k-Werts, dT und des Wärmeflusses q

$k = 1 / (a1 + wdw + a2)$ 'k Wert

$dT = Ti - Ta$ 'Delta T

$q = k * (dT)$ 'Wärmefluss q

'Deklariert die Felder für die Temperaturberechnung

Dim statio(15000)

Dim Mark(20)

Dim sd(15)

Dim l(15)

Dim sdx(200)

Dim statioprint(1500)

Dim anfang(15)

'Überprüft ob die Automatische Ausgabenverteilung

'für dx_Anzeige stattfinden soll

If Tabelle8.[L19] = Falsch Then GoTo 10000

Tabelle8.Ausgabenverteilung

10000

' Einlesen der Stoffwerte

For i = 1 To [c18]

 sdx(i) = Sheets("Berechnungs Optionen").Cells(i + 2, 14) 'dx Ausgabe

 l(i) = Sheets("Berechnungs Optionen").Cells(i + 2, 6) ' Lamnda

 sd(i) = Sheets("Berechnungs Optionen").Cells(i + 2, 4) ' dicke der Schicht

Next i

'Berechnen der Temperaturen an jedem äußeren Rand

'T am Rand innen

statio(0) = [Ti]

statio(1) = statio(0) - q * a1

T = statio(1)

'T im Feld

For i = 2 To 30

 If schichtanz + 1 < i Then GoTo 20

 li = l(i - 1)

 sdi = sd(i - 1) / 100

'Markierung eines vorhandenen Wärmeübergangs

 If sd(i - 1) = 0 And l(i - 1) <> 0 Then Mark(i - 1) = 1: sdi = 1

'Berechnen aller Randtemperaturen

 statio(i) = T - (q * sdi / li)

 T = statio(i)

Next i

' T am Rand außen

20

 statio(i) = T - q * a2

 T = statio(i)

'Vorbereiten der Ausgabewerte Ausgabe

' Zuordnen der Schichtanzahl der Materialien

ssdx = Sheets("Berechnungs Optionen").[N18] ' Summe aller Schichten

anfang(0) = 0

For i = 1 To 15

 anfang(i) = sdx(i) + vorgänger

 vorgänger = vorgänger + anfang(i)

Next i

'Berechnen der Zwischenwerte der Randtemperaturen

For i = 1 To schichtanz

 n = i

 T = statio(i)

 anfang1 = anfang(i)

 statioprint(anfang(i - 1) + 1) = statio(i)

 If sdx(i) = 0 Then statioprint(anfang(i - 1) + 1) = statio(i): GoTo 10

 For x = 2 To sdx(i)

```
statioprint(anfang(i - 1) + x) = T - (statio(i) - statio(i + 1)) / (sdx(i) - 1)
```

```
T = statioprint(anfang(i - 1) + x)
```

```
Next x
```

```
10
```

```
Next i
```

```
'-----
```

```
'Ausgabe der berechneten Werte
```

```
For i = 1 To ssdx
```

```
Cells(35, i + 22) = statioprint(i)
```

```
Next i
```

```
'-----
```

```
'Navigation zum Diagramm stationär_Wandaufbau
```

```
Application.Goto Reference:="Wandaufbau!R42C1:R79C13"
```

```
Range("B48").Select
```

```
End Sub
```

Weitere Module:

```
Sub Zur_Stationären_Berechnung()
```

```
' Navigation
```

```
ActiveWindow.LargeScroll Down:=1
```

```
ActiveWindow.ScrollRow = 34
```

```
ActiveWindow.ScrollRow = 1
```

```
ActiveWindow.SmallScroll Down:=41
```

```
End Sub
```

```
Sub Zurück_zum_Wandaufbau()
```

```
'
```

```
' Navigation
```

```
Range("a1").Select
```

```
Range("F3").Select
```

```
End Sub
```

```
Sub Neues_Bauteil()
```

```
'Entfernt alle Schichtdicken im Bereich(F3:F17)
```

```
'Trägt in den Bereich (D3:D17) den Wert 1 ein ; entspricht Bauteil "****kein"
```

```
' Tastenkombination: Strg+n
```

```
'
```

```
    Range("F3:F17").Select
```

```
    Selection.ClearContents
```

```
    Range("D3").Select
```

```
    ActiveCell.FormulaR1C1 = "1"
```

```
    Selection.AutoFill Destination:=Range("D3:D17"), Type:=xlFillDefault
```

```
    Range("D3:D17").Select
```

```
    Range("F3").Select
```

```
End Sub
```

```
Sub Bauteil_Drucken()
```

```
'
```

```
' Druckt den Schichtaufbau
```

```
'
```

```
    Range("A1:M32").Select
```

```
    Range("M32").Activate
```

```
    ActiveWindow.SelectedSheets.PrintOut Copies:=1
```

```
End Sub
```

```
Sub Diagram_Drucken()
```

```
'
```

```
' Druckt die Stationäre Temperaturverteilung in diesem "Arbeitsblatt"
```

```
    Range("A42:M78").Select
```

```
    Selection.PrintOut Copies:=1
```

```
    Range("A42").Select
```

```
End Sub
```

2 Arbeitsblatt Material-Datenbank:

Modul Drucken:

```
Sub Drucken()
```

```
'
```

```
'Druckt alle Werte
```

```
Columns("B:J").Select
Selection.PrintOut Copies:=1
Range("M3").Select
End Sub
```

3 Arbeitsblatt Randbedingungen:

Modul Auftreffende_Strahlungsenergien:

```
Sub Auftreffende_Strahlungsenergien()
'Das Arbeitsblatt Randbedingungen wird ausgewählt
Sheets("Randbedingungen").Select
'Die Module löschen und Uhrzeitgenerieren werden ausgeführt
Sheets("Randbedingungen").Löschen
Sheets("Randbedingungen").Uhrzeit_generieren
'Zelle B7 wird ausgewählt (Zwecks leichtere Navigation im Arbeitsblatt)
Range("B7").Select

'Zuweisen der Startwerte
Pi = 4 * Atn(1) 'Die Zahl pi ist in VBA nicht enthalten, sie entspricht diesem Wert!

startzeit = [B7]
Endzeit = [B3]
intervall = [B1]
alpha = Sheets("Wandaufbau").[L24] ' Neigung der Wand
Aw = Sheets("Wandaufbau").[L25] ' Azimut der Wand
Geographische_Länge = Sheets("Wandaufbau").[L28]
Geographische_Breite = Sheets("Wandaufbau").[L27]
Differenz_zu_GMT = Sheets("Wandaufbau").[L29]

Sonnenstrahlung_i_ja_nein = [D3] 'innen
Sonnenstrahlung_a_ja_nein = [R3] ' außen
zeit = startzeit 'lokale Ortszeit
b = [N2] ' Trübungsfaktor nach Schüpp
```

' Strahlung direkt am Bauteil gemessen?

If [L3] = 1 Then ' direkt gemessen Strahlung auf das Bauteil!

Do While zeit < Endzeit

i = i + 1

eingetragene_Strahlung_innen = Cells(i + 6, 9)

eingetragene_Strahlung_außen = eingetragene_Strahlung_außen

'die eingetragenen Werte in Spalte i werden in Spalte L kopiert

If Sonnenstrahlung_i_ja_nein <> Falsch Then Cells(i + 6, 12) =

eingetragene_Strahlung_innen

'die eingetragenen Werte in Spalte W werden in Spalte Z kopiert

If Sonnenstrahlung_a_ja_nein <> Falsch Then Cells(i + 6, 26) =

eingetragene_Strahlung_außen

zeit = zeit + intervall

Loop

GoTo ende ' Alle Werte bis zur Endzeit wurden kopiert das Programm springt zum

Ende

End If

'-----

'Wurde die Strahlung nicht am Bauteil gemessen werden, nun die Sonnenhöhe und

Cos Teta berechnet

Do While zeit < Endzeit

i = i + 1

' Es wird die Tagnummer des Tages d berechnet 1...365 Genauigkeit +- 5 Tage

If Month(Cells(i + 6, 2)) = 1 Then d = Day(Cells(i + 6, 2))

d = (Month(Cells(i + 6, 2)) - 1) * 30 + Day(Cells(i + 6, 2))

' Berechnung des Winkels Phi nach Gleichung Anhang C.1

phi = 0.9863 * (d - 2.8749) + 1.9137 * Sin(0.9863 * (d - 2.8749) * Pi / 180) + 102.06

' Berechnung des Umrechnungswinkels T nach Gleichung Anhang C.3

T = (360 / 365) * d 'Umrechnungswinkel

' Berechnung der Zeitgleichung nach Gleichung Anhang C.3

z = 0.008 * Cos(T * Pi / 180) - 0.122 * Sin(T * Pi / 180) - 0.052 * Cos(2 * T * Pi / 180) -
- 0.157 * Sin(2 * T * Pi / 180) - 0.001 * Cos(3 * T * Pi / 180) - 0.005 * Sin(3 * T * Pi / 180)

' _ ist das Zeichen für einen manuellen Zeilenumbruch

'Die Arkusfunktionen sind in VBA nicht enthalten es müssen

'folgende Funktionen benutzt werden

'Arkussinus(X) = Atn(X / Sqr(-X * X + 1))

'Arkuskosinus(X) = Atn(-X / Sqr(-X * X + 1)) + 2 * Atn(1)

'alle Winkel müssen ins Bogenmaß umgerechnet werden

'Berechnen der Deklination nach Gleichung Anhang C.2

sin_Deklination = -0.3979 * Sin(phi * Pi / 180)

Deklination = Atn(sin_Deklination / Sqr(-sin_Deklination * sin_Deklination + 1)) * 180 /

Pi 'korrekt!! und überprüft

'Berechnen der lokalen Ortszeit in Stunden aus dem aktuellen Zeitwert im Arbeitsblatt

lokale_Ortszeit = Hour(zeit) - 0 + Minute(zeit) / 60 'sommer winterzeit!!!

'Berechnen der wahren Ortszeit nach Gleichung Anhang C.4

Wahre_Ortszeit = lokale_Ortszeit + z + ((Differenz_zu_GMT * -15 -

Geographische_Länge) / 15)

'Berechnen des Stundenwinkels w nach Gl. Anhang C.5

w = 15 * Wahre_Ortszeit

'Berechnen der Sonnenhöhe h nach Gleichung Anhang C.6

sin_h = -Cos(Deklination * Pi / 180) * Cos(Geographische_Breite * Pi / 180) * Cos(w *
Pi / 180) _

+ Sin(Deklination * Pi / 180) * Sin(Geographische_Breite * Pi / 180) 'sin der
Sonnenhöhe

'wenn größer eins dann Fehler

h = Atn(sin_h / Sqr(-sin_h * sin_h + 1)) * 180 / Pi 'Sonnenhöhe

"-----"

"Berechnung von As nach Gleichung Anhang C.7 wird für cos teta jedoch hier nicht
mehr explizit benötigt

"Da Ass zwischen 0 und 360 Grad liegt der Arcsin aber nur zwischen +-90 definiert ist

"muss mit Hilfe von Ass und Ass1 eine Fallunterscheidung zur Umrechnung des
Winkels vorgenommen werden

"sin_Ass = (Cos(Deklination * Pi / 180) * Sin(w * Pi / 180)) / Cos(h * Pi / 180) ' sin
des Sonnenazimut

```
"sin_Ass1 = (Cos(Deklination * Pi / 180) * Sin((w + 0.001) * Pi / 180)) / Cos(h * Pi / 180)
' sin des Sonnenazimut
```

```
"Ass = Atn(sin_Ass / Sqr(-sin_Ass * sin_Ass + 1)) * 180 / Pi
```

```
"If sin_Ass1 > 1 Or sin_Ass1 < -1 Then Ass1 = 90: GoTo 33
```

```
"Ass1 = Atn(sin_Ass1 / Sqr(-sin_Ass1 * sin_Ass1 + 1)) * 180 / Pi
```

```
"33
```

```
""1.Quadrant
```

```
"If Ass > 0 And Ass1 > Ass Then Ass = Ass
```

```
""2.Quadrant
```

```
"If Ass > 0 And Ass1 < Ass Then Ass = 180 - Abs(Ass)
```

```
""3.Quadrant
```

```
"If Ass < 0 And Ass1 < Ass Then Ass = 180 + Abs(Ass)
```

```
""2.Quadrant
```

```
"If Ass < 0 And Ass1 > Ass Then Ass = 360 - Abs(Ass)
```

```
"-----
```

```
'cos teta für die zu berechnende Wand Anhang C.11
```

```
cos_teta = Sin(Deklination * Pi / 180) * Sin(Geographische_Breite * Pi / 180) *
```

```
Cos(alpha * Pi / 180) _
```

```
+ Sin(Deklination * Pi / 180) * Cos(Geographische_Breite * Pi / 180) * Sin(alpha * Pi /
```

```
180) * Cos(Aw * Pi / 180) _
```

```
- Cos(Deklination * Pi / 180) * Cos(Geographische_Breite * Pi / 180) * Cos(alpha * Pi /
```

```
180) * Cos(w * Pi / 180) _
```

```
'cos teta für die Horizontale des Sensors Anhang C.11
```

```
cos_teta_sensor = Sin(h * Pi / 180)
```

```
If h < 0 Then cos_teta = 0 ' Sonne befindet sich "hinter der Erde"
```

```
'-----
```

```
eingetragene_Strahlung_innen = Cells(i + 6, 9)
```

```
eingetragene_Strahlung_außen = Cells(i + 6, 23)
```

```
'Berechnung der Diffusen Strahlung nach Gleichung Anhang C.9
```

$$DH = -215 * b^2 * \sin_h^2 - 282 * b * \sin_h - 81.2 * \sin_h^2 - 1182 * b^2 * \sin_h + 1425 * b * \sin_h + 104 * \sin_h + 317 * b^2 - 8 * b + 4.3$$

'Berechnung der Direkten Strahlung nach Gleichung Anhang C.10

$$I_{N_berechnet} = (-13637 * b^2 * \sin_h^2 + 8745 * b * \sin_h^2 - 1724 * \sin_h^2 + 9492 * b^2 * \sin_h - 8120 * b * \sin_h + 2524 * \sin_h + 4864 * b^2 - 2071 * b + 192)$$

'-----

'Direkte Strahlung und diffuse Strahlung wird nach der Näherungsformel Gleichung Anhang C.9 und 10 berücksichtigt

'für einen wolkenfreien Himmel auf eine horizontale Fläche gerechnet

If [L3] = 3 Then

If h > 0 And Sonnenstrahlung_i_ja_nein <> Falsch Then Cells(i + 6, 11) = ((1 + Cos((alpha - 180) * Pi / 180)) / 2) * DH ' -180 da Rückseite

'Wandfläche der Flächennormalen ist im Schatten hintere Seite erhält jetzt die Strahlung

If cos_teta < 0 And Sonnenstrahlung_i_ja_nein <> Falsch Then

If h > 0 And Sonnenstrahlung_i_ja_nein <> Falsch Then Cells(i + 6, 10) =

I_N_berechnet * Abs(cos_teta)

End If

If h > 0 And Sonnenstrahlung_a_ja_nein <> Falsch Then Cells(i + 6, 25) = ((1 + Cos(alpha * Pi / 180)) / 2) * DH

'Wandfläche der Flächennormalen erhält die Strahlung

If cos_teta > 0 And Sonnenstrahlung_a_ja_nein <> Falsch Then

If h > 0 And Sonnenstrahlung_a_ja_nein <> Falsch Then Cells(i + 6, 24) =

I_N_berechnet * cos_teta

End If

GoTo ende_schleife

End If

'-----

'wenn Sonnenstrahlung vorhanden Aktiviert wurde: Ausgabe der einstrahlenden Diffusen Strahlung nach Gleichung Anhang C 14

If DH > eingetragene_Strahlung_innen Then DH = eingetragene_Strahlung_innen

If h > 0 And Sonnenstrahlung_i_ja_nein <> Falsch Then Cells(i + 6, 11) = ((1 + Cos((alpha - 180) * Pi / 180)) / 2) * DH ' -180 da Rückseite

If DH > eingetragene_Strahlung_außen Then DH = eingetragene_Strahlung_außen

If h > 0 And Sonnenstrahlung_a_ja_nein <> Falsch Then Cells(i + 6, 25) = ((1 + Cos(alpha * Pi / 180)) / 2) * DH

'Das Näherungsmodell nach Punkt 4.2.1. e) kommt zur Anwendung

'wenn in den Randbedingungen "gemessene Globalstrahlung" aktiviert wurde

'Wandfläche der Flächennormalen ist im Schatten hintere Seite erhält jetzt die strahlung

If cos_teta < 0 And Sonnenstrahlung_i_ja_nein <> Falsch Then

If eingetragene_Strahlung_innen = "s" Then GoTo schatten_innen: 'schatten I0=0

i0_innen = (eingetragene_Strahlung_innen - DH) / cos_teta_sensor '

'falls kleine ungenauigkeiten in der messung oder berechnung vorkommen

If i0_innen > I_N_berechnet Then i0_außen = I_N_berechnet

schatten_innen:

If i0_innen <= 0 Then i0_innen = 0

' Berechnung der Eintreffenden Strahlung nach Gleichung Anhang C.13

iD_innen = i0_innen * Abs(cos_teta)

Cells(i + 6, 10) = iD_innen 'Empfangene_Strahlung

GoTo ende_schleife

End If

'Wandfläche der Flächennormalen erhält die Strahlung

If cos_teta > 0 And Sonnenstrahlung_a_ja_nein <> Falsch Then

'Berechnung von IN nach Gleichung Anhang C13

If eingetragene_Strahlung_außen = "s" Then GoTo schatten_außen:

i0_außen = (eingetragene_Strahlung_außen - DH) / cos_teta_sensor

'Cells(i + 6, 28) = i0_außen ' !!!IN zum testen nur für außen

'falls kleine Ungenauigkeiten in der Messung oder Berechnung vorkommen

'wird hier der maximal mögliche Werte nach Gleichung Anhang C.10 für die Direkte Strahlung angesetzt

If i0_außen > I_N_berechnet Then i0_außen = I_N_berechnet

schatten_außen:

If i0_außen <= 0 Then i0_außen = 0

' Berechnung der Eintreffenden Strahlung nach Gleichung Anhang C.13

iD_außen = i0_außen * cos_teta

Cells(i + 6, 24) = iD_außen 'Empfangene Strahlung

End If

ende_schleife: ' Position Ende der Schleife

'falls Schatten angegeben wurde direkte Strahlung gleich 0

If eingetragene_Strahlung_innen = "s" Then Cells(i + 6, 10) = 0

If eingetragene_Strahlung_außen = "s" Then Cells(i + 6, 24) = 0

'Addieren des direkten und Diffusen Strahlungsanteils

'und Eintragen in die Spalten L und Z

Cells(i + 6, 12) = Cells(i + 6, 10) + Cells(i + 6, 11)

Cells(i + 6, 26) = Cells(i + 6, 24) + Cells(i + 6, 25)

zeit = zeit + intervall

Loop

ende: 'endmarke

End Sub

Modul Uhrzeit_generieren:

Sub Uhrzeit_generieren()

'Arbeitsblatt Randbedingungen wird ausgewählt

Sheets("Randbedingungen").Select

'Einlesen der Startwerte

startzeit = [B7]

Endzeit = [B3]

intervall = [B1]

'Trägt die Zeit im angegebenen Intervall in Spalte B ein

zeit = startzeit

Do While zeit < Endzeit

i = i + 1

zeit = zeit + intervall: Cells(i + 7, 2) = zeit

Cells(i + 6, 29) = Cells(i + 6, 2)

Loop

'Kopiert die Formel für den Wärmeübergang

'in Spalte G und U

Cells(7, 7).Select

Selection.Copy

Range(Cells(8, 7), Cells(i + 7, 7)).Select

ActiveSheet.Paste

Cells(7, 21).Select

Selection.Copy

Range(Cells(8, 21), Cells(i + 7, 21)).Select

ActiveSheet.Paste

End Sub

Modul alles_löschen:

Sub alles_löschen()

'Löscht alle Werte

Range("B8:AC65536").Select

'löscht Zellfarben (funktioniert nicht bei aktivem "Blattschutz"

'und wurde deshalb auskommentiert")

'Selection.Interior.ColorIndex = xlNone

Selection.ClearContents

End Sub

Modul löschen:

Sub löschen()

'Löschen der alten berechneten Werte

Sheets("Randbedingungen").Select

Range("J7:J65536").ClearContents

Range("k7:J65536").ClearContents

Range("l7:J65536").ClearContents

Range("x7:x65536").ClearContents

Range("y7:x65536").ClearContents

Range("z7:x65536").ClearContents

Range("ac7:ac65536").ClearContents

Range("ab7:ab65536").ClearContents

Range("aa7:aa65536").ClearContents

Range("B8:B65536").ClearContents

Range("g8:g65536").ClearContents

Range("u8:u65536").ClearContents

"" Farben neu anlegen (nur für die ersten Felder um Speicherplatz zu sparen!)

"" Falls diese vom Anwender durch kopieren von Daten durcheinander gebracht wurden

"" Dieser Teil wurde auskommentiert, da er nicht funktioniert wenn das Blatt "geschützt" ist!

""

"" Range("A25:AC65536").Interior.ColorIndex = xlNone

""

"" Range("J7:L24").Select

"" With Selection.Interior

"" .ColorIndex = 37

"" .Pattern = xlSolid

"" End With

"" Selection.Interior.ColorIndex = 33

"" Range("x7:z24").Select

"" With Selection.Interior

```
"" .ColorIndex = 37
"" .Pattern = xlSolid
"" End With
"" Selection.Interior.ColorIndex = 33
""
"" Range("H7:I24").Select
"" With Selection.Interior
"" .ColorIndex = 45
"" .Pattern = xlSolid
"" End With
"" Range("V7:W24").Select
"" With Selection.Interior
"" .ColorIndex = 45
"" .Pattern = xlSolid
"" End With
""
"" Range("D7:D24").Select
"" With Selection.Interior
"" .ColorIndex = 45
"" .Pattern = xlSolid
"" End With
"" Range("R7:R24").Select
"" With Selection.Interior
"" .ColorIndex = 45
"" .Pattern = xlSolid
"" End With
```

End Sub

Modul Drucken:

Sub Drucken()

'Druckt alle Randbedingungen

Columns("A:AC").Select

Selection.PrintOut Copies:=1

ActiveWindow.SmallScroll ToRight:=-1

Range("B7").Select

End Sub

Sub Schaltfläche29_BeiKlick()

'Navigation

 Range("B7").Select

End Sub

Sub Schaltfläche30_BeiKlick()

' Navigation

 Range("aa1").Select

 Range("v7").Select

End Sub

Sub Schaltfläche31_BeiKlick()

' Navigation

 Columns("B:L").Select

 Range("h7").Select

End Sub

4 Arbeitsblatt Berechnungs Optionen

Modul Ausgabenverteilung:

Sub Ausgabenverteilung()

'Wählt Arbeitsblatt "Berechnungs Optionen", falls das Modul aus einem anderen Blatt gestartet wird

Sheets("Berechnungs Optionen").Select

'säubern(Löschen überflüssiger dx aus der Tabelle)

If [B3] = "-" Or [D3] = 0 Then [P3] = 0: [M3] = 0

If [B4] = "-" Or [D4] = 0 Then [P4] = 0: [M4] = 0

If [b5] = "-" Or [D5] = 0 Then [p5] = 0: [M5] = 0

If [b6] = "-" Or [D6] = 0 Then [p6] = 0: [M6] = 0

If [B7] = "-" Or [D7] = 0 Then [p7] = 0: [M7] = 0

If [b8] = "-" Or [D8] = 0 Then [p8] = 0: [M8] = 0

If [b9] = "-" Or [D9] = 0 Then [p9] = 0: [M9] = 0

If [b10] = "-" Or [D10] = 0 Then [p10] = 0: [M10] = 0

If [b11] = "-" Or [D11] = 0 Then [p11] = 0: [M11] = 0

If [b12] = "-" Or [D12] = 0 Then [p12] = 0: [M12] = 0

If [b13] = "-" Or [D13] = 0 Then [p13] = 0: [M13] = 0

If [b14] = "-" Or [D14] = 0 Then [p14] = 0: [M14] = 0

If [b15] = "-" Or [D15] = 0 Then [p15] = 0: [M15] = 0

If [b16] = "-" Or [D16] = 0 Then [p16] = 0: [M16] = 0

If [b17] = "-" Or [D17] = 0 Then [p17] = 0: [M17] = 0

'Zuordnen der Stoffwerte zu den Schichten um sie in der Schleife verwenden zu können

'Hilfsfelder Deklarieren

Dim sd(15)

Dim sdx(15)

For i = 1 To [a18]

```
sd(i) = Cells(i + 2, 4) ' Dicke der Schicht
Next i

gesamtDicke = [D18]
prozschicht = [M21] ' Anzahl der Ausgabepixel
schichtanzahl = [a18]

Dim Schichten(300)

For i = 1 To schichtanzahl
If sd(i) = 0 Then wü = wü + 1 'Anzahl der inneren Wärmeübergänge
Next i

korrektur = 0 ' Rundungsrest
summe = 0 'Gesamtpixelzahl
For i = 1 To schichtanzahl
If (sd(i) <> 0) Then 'kein Wärmeübergang
pixel = 0 'Pixelzahl in der Schicht
While (pixel < (sd(i) * (prozschicht + wü - schichtanzahl) / gesamtDicke +
korrektur))
' solange Pixelzahl in Schicht kleiner der Gesamtpixelzahl für die Schicht
pixel = pixel + 1
summe = summe + 1
Wend
korrektur = (sd(i) * (prozschicht + wü - schichtanzahl) / gesamtDicke + korrektur)
- pixel
'Korrektur enthält Rundungsrest
Schichten(i) = pixel 'Pixelzahl in Schicht
End If
Next i

If (summe > (prozschicht + wü - schichtanzahl)) Then Schichten(i - 1) =
Schichten(i - 1) - 1
' wenn Gesamtpixelzahl grösser als Anzahl der Ausgabepixel reduzieren
merker = 0
```

```
For i = 1 To schichtanzahl
If sd(i) <> 0 Then
While Schichten(i) < 2 ' wenn Pixelzahl in Schicht < 2 ,Pixelzahl in dieser
Schicht erhöhen
Schichten(i) = Schichten(i) + 1
merker = merker + 1
Wend
End If
Next i
'jetzt müssen in den anderen Schichten diese Pixel (merker) wieder abgezogen
werden
For i = 1 To schichtanzahl
If merker = 0 Then GoTo 111111
If sd(i) <> 0 Then
If Schichten(i) > 2 Then
Schichten(i) = Schichten(i) - 1
merker = merker - 1
End If
End If
Next i
111111 ' fertig

'Berechnet die Werte delta x aus den oben ermittelten Schichten
For i = 1 To 15
If Schichten(i) <> 0 Then Cells(i + 2, 13) = sd(i) / Schichten(i)
Next i

'Navigation
Cells(22, 16).Select

End Sub
```

weitere Module:

```
Sub anfangstemp()
```

```
'gibt die gleichmäßige Anfangstemperatur aus!
```

```
For i = 1 To [N18]
```

```
    Sheets("Ausgabewerte").Cells(3, i + 4) = [P32]
```

```
Next i
```

```
End Sub
```

```
Sub dx_Ausgabe_gleich_dx_berechnung()
```

```
'kopiert die Werte in Spalte M in Spalte P
```

```
'dx Ausgabe entspricht jetzt dx Berechnung
```

```
    Range("M3:M17").Select
```

```
    Selection.Copy
```

```
    Range("P3").Select
```

```
    ActiveSheet.Paste
```

```
End Sub
```

```
Sub Drucken()
```

```
"Druckt die Optionen
```

```
    Range("A1:V32").Select
```

```
    Selection.PrintOut Copies:=1
```

```
    ActiveWindow.LargeScroll ToRight:=-1
```

```
    Range("P20").Select
```

```
End Sub
```

```
Sub Makro2()
```

```
" Navigation
```

```
    Columns("L:V").Select
```

```
    Application.Goto Reference:="R1C12:R1C22"
```

```
Range("p20").Select
```

```
End Sub
```

5 Arbeitsblatt Animation

Modul start_instationäre_Berechnung:

```
Sub start_instationäre_Berechnung()
```

```
'Dieser Wert wird für das Modul "instationäre  
'Temperaturberechnug gesetzt, das Modul Orientiert sich an diesem Wert  
'und weiß so das dieses Arbeitsblatt für die Animation ausgewählt werden soll  
[B22] = "Animation läuft!"  
Range("B23").Select
```

```
'Aktiviert den Schalter Animation  
Sheets("berechnungs optionen").[L30] = "WAHR"
```

```
'Startet das Modul zu instationären Berechnung  
Modul4.instationäre_Berechnung
```

```
End Sub
```

Modul Drucken:

```
Sub Drucken()
```

```
' Druckt das Arbeitsblatt
```

```
ActiveWindow.SelectedSheets.PrintOut Copies:=1  
End Sub
```

6 Arbeitsblatt Ausgabewerte:

Aufgrund eines Speziellen VBA – Befehls im Modul {instationäre_Berechnung} (zum Löschen der alten Werte), konnte dieses Arbeitsblatt nicht geschützt werden.

Modul Schaltfläche2_BeiKlick:

```
Sub Schaltfläche2_BeiKlick()
```

```
,
```

```
' Navigation
```

```
    Range("A30").Select
```

```
End Sub
```

Modul Drucken:

```
Sub drucken()
```

```
' drucken
```

```
    Columns("A:AF").Select
```

```
    ActiveWindow.SelectedSheets.PrintOut Copies:=1
```

```
End Sub
```

7 Arbeitsblatt 3D-Diagramm:

Modul Drucken:

```
Sub Schaltfläche1_BeiKlick()
```

```
,
```

```
' Druckt das 3D Diagramm
```

```
    ActiveWindow.SelectedSheets.PrintOut Copies:=1
```

```
End Sub
```

8 Der Ordner Module

In diesem Ordner sind die beiden Hauptprogramme gespeichert.

'Globale Variable
'Feld der Temperaturen zum Zeitschritt k
'zu Beginn der Berechnung befindet sich in diesem Feld also die
Anfangstemperatur
Public tov()

Modul instationäre_Berechnung:

Sub instationäre_Berechnung()
'Berechnung der instationären Temperaturverteilung
'von beliebig vielen Schichten mit Wärmeübergang zwischen den Schichten
'und an den aussenwänden
'An den Außenwänden können zusätzlih Wärmemengen ausgetauscht werden
'Wärmewiderstand 0 bedeutet kein Wärmeübergang zwischen 2 Schichten oder
Aussenwand
'innerhalb einer Schicht
' $t_{neu}(i) = a * (t_{old}(i + 1) + t_{old}(i - 1)) - b * t_{old}(i)$
'linker rand
' $t_{neu}[1] = (t_{neu}[2] + c * temp_{Innen}) / (1.0 + c) + Q / alpha$
'zwischen den Schichten
'i-1,i alte schicht; | i+1,i+2 neue schicht
'l1, dx1 alpha l2, dx2
' $r1 = dx1 / l1$; $ra = 1 / alpha$; $r2 = dx2 / l2$
' $t_{neu}(i) = t_{neu}(i-1) + r1 * (t_{neu}(i+2) - t_{neu}(i-1)) / (r1 + r2 + ra)$
' $t_{neu}(i+1) = t_{neu}(i+2) - r2 * (t_{neu}(i+2) - t_{neu}(i-1)) / (r1 + r2 + ra)$
'rechter rand
' $t_{neu}[max] = (c * t_{neu}[max-1] + temp_{außen}) / (1.0 + c) + Q / alpha$

'Wählt Arbeitsblatt "Berechnungs Optionen" falls das Modul aus einem anderen Blatt gestartet wird

```
Sheets("Berechnungs Optionen").Select
```

'Wenn die Automatische Ausgabenverteilung aktiviert ist

'wird das modul dx_Ausgabe_gleich_dx_berechnung gestartet

```
If [L19] <> Falsch Then Tabelle8.Ausgabenverteilung
```

```
genauigkeit = Tabelle8.[O19]
```

```
If genauigkeit = 2 Then Tabelle8.dx_Ausgabe_gleich_dx_berechnung
```

'Wenn die Option automatisch größt mögliches dt

'aktiviert ist, wird der ermittelte Wert aus Zelle P20 in Zelle v18 kopiert

```
If [r20] <> Falsch Then [P20] = [v18]
```

'Fehlertests

On Error GoTo abbruchBehandlung:

```
Application.EnableCancelKey = xlErrorHandler
```

```
If [P20] < 0.05 Then MsgBox " Sie haben dt kleiner sehr klein gewählt. Hieraus  
entstehen in den meisten Fällen sehr lange Rechenzeiten! Für vorzeitiges  
Abbrechen drücken Sie hiernach ESC!"
```

```
If [L25] + [M25] + [N25] < 45 Then MsgBox "FEHLER! Überprüfen Sie alle  
Fehler Felder in diesem Blatt und im Blatt Wandaufbau!": GoTo  
abbruchBehandlung
```

```
If [N18] > 150 And [L19] = Falsch Then MsgBox "Achtung zu viele Schichten für  
die Ausgabe wählen Sie dx für die Ausgabe entsprechend größer bzw. Schalten  
Sie auf automatische Ausgabenverteilung!": GoTo abbruchBehandlung
```

'alte Werte Löschen

```
Sheets("Ausgabewerte").Select
```

```
[a16] = 5
```

```
[a16].Select  
Selection.SpecialCells(xlCellTypeConstants, 1).Select  
Application.CutCopyMode = False  
Selection.ClearContents  
[a16] = 5
```

'Wählt Arbeitsblatt "Berechnungs Optionen"

'falls das Modul aus einem anderen Blatt gestartet wird

```
Sheets("Berechnungs Optionen").Select
```

'Ausführen der folgenden Programm-Module

```
Tabelle2.Auftreffende_Strahlungsenergien
```

```
Tabelle8.Select
```

```
Tabelle8.anfangstemp
```

```
[P27] = 0 'relativer Termin wird gelöscht
```

```
Cells(26, 18) = Time 'Startzeit zur Berechnungszeitmessung
```

```
Range("p38").Select 'Positionierung des sichtbaren Bereichs
```

'Dauer Automatisch für alle Randbedingungen?

```
If [R21] <> Falsch Then [P21] = Sheets("Randbedingungen").[B4]
```

'Ausgabeintervall= Randbedingungenintervall?

```
If [L31] <> Falsch Then [M32] = Sheets("Randbedingungen").[B1]
```

'Einlesen der Startwerte

```
Randbedingungenintervall = Sheets("Randbedingungen").[B1] * 24 * 3600 / [P20]
```

```
delta_t_Berechnung = [P20]
```

```
zeitschritte = [P22]
```

```
Ausgabeintervall = [M32] * 24 * 3600 / delta_t_Berechnung
```

```
Animation = Cells(30, 12)
```

```
Ausgabewerte = Cells(29, 12)
```

'Konstante Randbedingungen?

```
konstante_Randbedingungen_innen = Sheets("Randbedingungen").[D4]
```

konstante_Randbedingungen_Außen = Sheets("Randbedingungen").[R4]

'Anfangsrandbedingungen aus "Randbedingungen"

tempinnen = Sheets("Randbedingungen").Cells(7, 8)

tempausen = Sheets("Randbedingungen").Cells(7, 22)

alpha_i = Sheets("Randbedingungen").Cells(7, 7)

alpha_a = Sheets("Randbedingungen").Cells(7, 21)

Strahlungsenergie_i = Sheets("Randbedingungen").Cells(7, 12)

Strahlungsenergie_a = Sheets("Randbedingungen").Cells(7, 26)

T = Sheets("Randbedingungen").[B7] 'Startzeit

tani = Sheets("Randbedingungen").[B7] 'Startzeit

dt = Sheets("Berechnungs Optionen").[M32] ' Zeitintervall der Ausgabe

'Absorptionszahl der Sonnenstarhlung innen und außen

as_zahl_i = Sheets("Randbedingungen").[D2]

as_zahl_a = Sheets("Randbedingungen").[R2]

schichtanzahl = [a18]

summe_werte_Anzeige = [N18] 'Summe der Pixel für die Ausgabe

'Hilfsfelder

Dim Ausgabe_tnv()

ReDim Ausgabe_tnv(summe_werte_Anzeige + 10)

Dim r() As Double

Dim ra() As Double

Dim F() As Double

Dim b() As Double

'Dim tov() As Double 'dies Feld wurde Global Deklariert

Dim tnv() As Double

Dim indexanfv(), indexendv()

Dim q() As Double

Dim werte_Anzeige(15)

Dim s_Berechnung(15)

Dim sdx(15)

Dim sd(15)

Dim l(15)

'Einlesen der Stoffwerte

For i = 1 To [a18]

sdx(i) = Cells(i + 2, 16) ' dx Berechnung

l(i) = Cells(i + 2, 6) ' Lamnda bzw. Wärmeübergang

sd(i) = Cells(i + 2, 4) ' dicke der Schicht

Next i

w = 0 'Zähler für Widerstände Alpha (Wärmeübergänge)

For i = 2 To schichtanzahl

If sd(i) = 0 And l(i) <> 0 Then w = w + 1

Next i

'Dimensionierung der Hilfsfelder

ReDim r(schichtanzahl - w) 'Widerstände der Schichten

ReDim ra(schichtanzahl - w + 1) 'aussere und innere

Wärmeübergangswiderstände

ReDim indexanfv(schichtanzahl - w) 'anfangsindex der Schicht

ReDim indexendv(schichtanzahl - w) 'endindex der Schicht

ReDim F(schichtanzahl - w) 'Fourierfaktoren zu den Schichten

ReDim b(schichtanzahl - w) '2*F-1 'Hilfsfaktor

'Berechnung der Wärmeübergangswiderstände ra

z = 1

For i = 2 To schichtanzahl - w

z = z + 1

If sd(z) = 0 And l(z) <> 0 Then ra(i) = 1 / l(z): z = z + 1

Next i

'Wärmeübergangswiderstände r_a für die Randschichten

$r_a(1) = 1 / \alpha_{\text{in}}$

$r_a(\text{schichtanzahl} - w + 1) = 1 / \alpha_{\text{au}}$

'Ermitteln der Indexe der berechneten Temperaturabschnitte

'für jede Schicht

indexanf(1) = 1

anf = indexanf(1)

ende = indexendv(1)

ende = 0

z = 0

For i = 1 To schichtanzahl - w

z = z + 1

If sd(z) = 0 And l(z) <> 0 Then z = z + 1

indexendv(i) = ende + Cells(2 + z, 17) + 1 ' +1 eine virtuelle volle schicht

If i < schichtanzahl - w Then indexanf(i + 1) = indexendv(i) + 1

ende = indexendv(i)

Next i

'Dimensionieren der Temperaturberechnungsfelder

'enthält den Temperaturwert für jeden Abschnitt Δx

ReDim tov(indexendv(schichtanzahl - w))

ReDim tnv(indexendv(schichtanzahl - w))

'q ist Optional kann die wärmemengen in jedem Abschnitt Δx enthalten

ReDim q(indexendv(schichtanzahl - w))

'Einlesen der Fourier-Module und Wärmewiderstände

'Berechnen der Hilfskonstanten für jede Schicht

z = 0

For i = 1 To schichtanzahl - w

z = z + 1

If sd(z) = 0 And l(z) <> 0 Then z = z + 1

```
r(i) = Cells(2 + z, 16) * 0.01 / l(z) ' dx/lamda - Wärmewiderstand eines
Abschnitts
F(i) = Cells(2 + z, 21) 'Fourier-Modul
b(i) = 2 * F(i) - 1# ' Faktor
s_Berechnung(i) = Cells(z + 2, 17) 'Abschnittsanzahl der Schicht für die
Berechnung
werte_Anzeige(i) = Cells(z + 2, 14) 'Abschnittsanzahl der Schicht für die
Anzeige
Next i
```

```
'Anfangstemperatur
```

```
'Wenn an beiden Seiten stationäre Randtemperaturen vorliegen oder eine
stationäre Temperaturverteilung
```

```
'als Anfangstemperatur berechnet werden soll
```

```
'wird die Stationäre Temperaturverteilung über das Bauteil berechnet
```

```
If konstante_Randbedingungen_Außen And konstante_Randbedingungen_innen
```

```
<> Falsch Or _
```

```
Sheets("Berechnungs Optionen").[P32] = "stat" Then
```

```
Modul4.stationär_Berechnungsoptionen
```

```
'Wenn die Anfangstemperatur über den Querschnitt einen
```

```
'gleichmäßigen konkreten Startwert haben soll wird dieser hier in tov()
eingetragen
```

```
If [P32] <> "stat" Then
```

```
Anfangstemperatur = [P32]
```

```
For i = 1 To indexendv(schichtanzahl - w)
```

```
    tov(i) = Anfangstemperatur
```

```
Next i
```

```
End If
```

'wenn das Modul vom start_instationäre_Berechnung vom Arbeitsblatt

"Animation" gestartet wurde

'wird das Arbeitsblatt Animation ausgewählt

If Sheets("Animation").[B22] = "Animation läuft!" Then

Sheets("Animation").Select

.....

'Hauptberechnungsschleife

.....

For n = 1 To zeitschritte

'Einlesen der instationären Randbedingungen im angegebenen Intervall

If ((n Mod Randbedingungsintervall) = 0) Then

zeitzähler = zeitzähler + 1

If konstante_Randbedingungen_innen <> Falsch Then GoTo 77

tempinnen = Sheets("Randbedingungen").Cells(zeitzähler + 7, 8)

alpha_i = Sheets("Randbedingungen").Cells(zeitzähler + 7, 7)

If alpha_i = 0 Then MsgBox "Achtung! Sie haben nicht alle Randbedingungen für den zu berechnenden Zeitraum eingegeben (alpha =0)": GoTo abbruchBehandlung

Strahlungsenergie_i = Sheets("Randbedingungen").Cells(zeitzähler + 7, 10)

77

If konstante_Randbedingungen_Außen <> Falsch Then GoTo 88

tempausen = Sheets("Randbedingungen").Cells(zeitzähler + 7, 22)

alpha_a = Sheets("Randbedingungen").Cells(zeitzähler + 7, 21)

If alpha_a = 0 Then MsgBox "Achtung! Sie haben nicht alle Randbedingungen für den zu berechnenden Zeitraum eingegeben (alpha =0)": GoTo abbruchBehandlung

Strahlungsenergie_a = Sheets("Randbedingungen").Cells(zeitzähler + 7, 24)

88

End If

'Berechnung der inneren temperaturwerte für jede Schicht

For i = 1 To schichtanzahl - w

FF = F(i)

bb = b(i)

iend = indexendv(i) - 1

For j = indexanfv(i) + 1 To iend 'j für jede Schicht

tnv(j) = FF * (tov(j + 1) + tov(j - 1)) - bb * tov(j) 'nach Gleichung 11

Next j

Next i

'alle Nicht -Rand und Nicht -Übergangstemperaturen sind jetzt berechnet

'linke Randtemperatur

cc = (l(1) / (alpha1 * sdx(1) * 0.01)) 'lamda/(alpha*dx)

tnv(1) = (tnv(2) * cc + tempinnen + as_zahl_i * Strahlungsenergie_i / alpha1) / (1# + cc) 'nach Gleichung 24

'Wärmemenge q

qtest_i = (l(1) * ((tnv(1) - tnv(2)) / (sdx(1) / 100))) * delta_t_Berechnung 'nach Gleichung 1

summe_q_i = summe_q_i + qtest_i

'rechte Randtemperatur

cc = (l(schichtanzahl) / (alphaa * sdx(schichtanzahl) * 0.01))

maxv = indexendv(schichtanzahl - w)

tnv(maxv) = (tnv(maxv - 1) * cc + tempaussen + as_zahl_a *

Strahlungsenergie_a / alphaa) / (1# + cc) 'nach Gleichung 24

'Wärmemenge q

qtest_a = (l(schichtanzahl) * ((tnv(maxv) - tnv(maxv - 1)) / (sdx(schichtanzahl) / 100))) * delta_t_Berechnung 'nach Gleichung 1

summe_q_a = summe_q_a + qtest_a

'jetzt die inneren Übergänge

For j = 1 To schichtanzahl - w - 1 'j für jede Schicht

'nach Gleichungen 32

$$\text{tnv}(\text{indexendv}(j)) = \text{tnv}(\text{indexendv}(j) - 1) + (r(j) * (\text{tnv}(\text{indexanfv}(j + 1) + 1) - \text{tnv}(\text{indexendv}(j) - 1))) / (r(j) + r(j + 1) + ra(j + 1))$$

$$\text{tnv}(\text{indexanfv}(j + 1)) = \text{tnv}(\text{indexanfv}(j + 1) + 1) - (r(j + 1) * (\text{tnv}(\text{indexanfv}(j + 1) + 1) - \text{tnv}(\text{indexendv}(j) - 1))) / (r(j) + r(j + 1) + ra(j + 1))$$

Next j

'es sind jetzt alle neuen Temperaturwerte tnv() aus den alten Temperaturwerten tov() berechnet

'Werte ins told-Feld für die Neuberechnung übertragen

For i = 1 To indexendv(schichtanzahl - w)

 tov(i) = tnv(i)

Next i

.....

'Berechnen der Verteilung der berechneten Werte in tnv für die Ausgabe auf die festgelegte Anzahl von Werten

.....

If (((n Mod Ausgabeintervall) = 0) Or (n = CLng(zeitschritte))) Then

Ausgabenverteilung:

pixel = 1

fakkor = 0 ' Korrekturfaktor

For j = 1 To schichtanzahl - w

fak = (werte_Anzeige(j)) / (s_Berechnung(j)) 'Anzeigepixel pro Schicht

'genauso viele Anzeigewerte wie Berechnungswerte ?

If (werte_Anzeige(j) = s_Berechnung(j) + 1) Then

 For i = 1 To werte_Anzeige(j)

 Ausgabe_tnv(pixel) = tnv(i + indexanfv(j) - 1)

 pixel = pixel + 1

 Next i

Else

fakint = 0

Ausgabe_tnv(pixel) = tnv(indexanfv(j)) ' ersten Berechnungswert der Schicht
unbedingt in Ausgabefeld eintragen

pixel = pixel + 1

fakint = fakint + 1

For i = 2 To fak / 2 ' erster Temperaturwert pro Schicht nur in 1/2
Ausgabeabschnitt eintragen

fakint = fakint + 1

Ausgabe_tnv(pixel) = tnv(indexanfv(j))

pixel = pixel + 1

Next i

fakkor = fakkor + fak / 2 - fakint ' Korrekturfaktor updaten

For k = 1 To s_Berechnung(j) - 1 'jetzt die anderen Temperaturwerte der
Schicht in Ausgabefeld eintragen

i = 1

fakint = 0

Do While (i <= (fakkor + fak))

fakint = fakint + 1

 Ausgabe_tnv(pixel) = tnv(indexanfv(j) + k)

 pixel = pixel + 1

 i = i + 1

Loop

fakkor = fakkor + fak - fakint

Next k

i = 1

fakint = 0

ins = 0

While (i < (fakkor + fak / 2)) 'letzter Temperaturwert pro Schicht nur in 1/2
Ausgabeabschnitt eintragen

ins = 1

fakint = fakint + 1

Ausgabe_tnv(pixel) = tnv(indexendv(j))

pixel = pixel + 1

i = i + 1

Wend

If ins = 0 Then ' letzten Berechnungswert der Schicht unbedingt in Ausgabefeld eintragen

pixel = pixel + 1

Ausgabe_tnv(pixel - 1) = tnv(indexendv(j))

End If

fakkor = fakkor + fak / 2 - fakint 'Korrekturfaktor updaten

End If

Next j

End If

' letzte Ausgabe?

If schluss = 1 Then GoTo letzte_Ausgabe

.....

'Animierte Ausgabe?

If Animation = Falsch Then GoTo 10000

If (((n Mod Ausgabeintervall) = 0) Or (n = CLng(zeitschritte))) Then

 tani = tani + dt

 trelativ = trelativ + dt

 Sheets("Berechnungs Optionen").Cells(27, 16) = trelativ 'relativer Termin in Stunden

 Sheets("Berechnungs Optionen").Cells(29, 15) = tani 'absoluter Termin

 Sheets("Berechnungs Optionen").Cells(29, 16) = n 'aktueller Zeitschritt

'Ausgabe der in diesem Zeitschritt berechneten Werte

'für das Animationsdiagramm

 For i = 1 To summe_werte_Anzeige + 1

 Sheets("Ausgabewerte").Cells(6, i + 4) = Ausgabe_tnv(i)

 Next i

'Ausgabe des Wärmeflusses in diesem Zeitschritt

Sheets("Berechnungs Optionen").Cells(29, 21) = qtest_i / delta_t_Berechnung

```
Sheets("Berechnungs Optionen").Cells(29, 22) = qtest_a / delta_t_Berechnung  
'q(maxv)
```

```
'Fügt eine notwendige Pause ein so das Excel das Diagramm erzeugen kann
```

```
Dim Pausenlänge, Start, Gesamtdauer
```

```
    Pausenlänge = 1 ' Dauer festlegen.
```

```
    Start = Timer ' Anfangszeit setzen.
```

```
    Do While Timer < Start + Pausenlänge
```

```
        DoEvents ' Steuerung an andere Prozesse
```

```
    Loop
```

```
End If
```

```
10000
```

```
.....  
' Ausgabe in Ausgabewerte
```

```
If Ausgabewerte = Falsch Then GoTo 1000000
```

```
If (((n Mod Ausgabeintervall) = 0) Or (n = CLng(zeitschritte))) Then
```

```
    zähler = zähler + 1
```

```
    T = T + dt
```

```
    Sheets("Ausgabewerte").Cells(29 + zähler, 3) = T 'absoluter Termin
```

```
    Sheets("Berechnungs Optionen").Cells(29, 16) = n 'aktueller Zeitschritt
```

```
    'Ausgabe der in diesem Zeitschritt berechneten Werte
```

```
    'in das Arbeitsblatt Ausgabewerte (für jeden Wert eine neue Zeile)
```

```
    For i = 1 To summe_werte_Anzeige + 1
```

```
        Sheets("Ausgabewerte").Cells(29 + zähler, i + 4) = Ausgabe_tnv(i)
```

```
    Next i
```

```
'Ausgabe des Wärmeflusses in diesem Zeitschritt
```

```
    Sheets("Ausgabewerte").Cells(29 + zähler, 1) = qtest_i / delta_t_Berechnung  
'q(0)
```

```
    Sheets("Ausgabewerte").Cells(29 + zähler, 2) = qtest_a / delta_t_Berechnung  
'q(maxv)
```

```
End If
1000000
Next n
```

```
.....
```

```
'Berechnen der Positionen der Ausgabewerte in [cm] vom linken Rand
```

```
Dim position
```

```
ReDim position(150)
```

```
stelle = 1
```

```
For j = 1 To schichtanzahl - w
```

```
For i = 0 To werte_Anzeige(j) - 1
```

```
position(stelle) = (sd(j) / (werte_Anzeige(j) - 1)) * i + vorgänger
```

```
stelle = stelle + 1
```

```
Next i
```

```
vorgänger = position(stelle - 1)
```

```
Next j
```

```
    'Ausgabe der errechneten Positionen
```

```
    For i = 1 To summe_werte_Anzeige
```

```
    Sheets("Ausgabewerte").Cells(5, i + 4) = position(i)
```

```
    Next i
```

```
.....
```

```
'letzte Ausgabe
```

```
'Summe der Wärmemenge Q die über den Berechnungszeitraum geflossen ist
```

```
Sheets("Ausgabewerte").[A27] = summe_q_i
```

```
Sheets("Ausgabewerte").[B27] = summe_q_a
```

```
'Führt noch einmal die Ausgabenverteilung
```

```
'für die letzten Berechneten Werte aus
```

```
schluss = 1
```

GoTo Ausgabenverteilung:

letzte_Ausgabe:

```
Sheets("Berechnungs Optionen").Cells(29, 16) = n 'aktueller Zeitschritt
Sheets("Berechnungs Optionen").Cells(27, 18) = Time 'aktuelle Uhrzeit; um die
Rechenzeit zu ermitteln!
'ausgabe der letzten berechneten Werte in das Arbeitsblatt Ausgabewerte
For i = 1 To summe_werte_Anzeige + 1
    Sheets("Ausgabewerte").Cells(6, i + 4) = Ausgabe_tnv(i)
Next i
GoTo ende
```

abbruchBehandlung:

```
If Err = 18 Then
```

```
Sheets("Animation").[B22] = "-"
```

```
MsgBox "Sie haben den Vorgang abgebrochen."
```

```
End If
```

ende: 'endmarke

```
Sheets("Animation").[B22] = "-"
```

```
End Sub
```

Modul stationär_Berechnungsoptionen:

```
Sub stationär_Berechnungsoptionen()
```

```
'Randbedingungen
```

```
rai = 1 / Sheets("Randbedingungen").[G7]    '1/alpha innen
```

```
raa = 1 / Sheets("Randbedingungen").[U7]    '1/alpha außen
```

```
tempinnen = Sheets("Randbedingungen").[H7]  'Innentemperatur
```

```
tempausssen = Sheets("Randbedingungen").[V7] 'Außentemperatur
```

'Deklarieren der Hilfsfelder

Dim Mark(20)

Dim sd(15)

Dim l(15)

Dim sdx(15)

Dim anfang(15)

Dim statio(15000)

Dim statioprint(160)

'Wählt Arbeitsblatt "Berechnungs Optionen" falls das Modul aus einem anderen Blatt gestartet wird

Sheets("Berechnungs Optionen").Select

If [L19] <> Falsch Then Tabelle8.Ausgabenverteilung

'säubern(Löschen überflüssiger dx aus der Tabelle)

If [B3] = "-" Or [D3] = 0 Then [P3] = 0: [M3] = 0

If [B4] = "-" Or [D4] = 0 Then [P4] = 0: [M4] = 0

If [b5] = "-" Or [D5] = 0 Then [p5] = 0: [M5] = 0

If [b6] = "-" Or [D6] = 0 Then [p6] = 0: [M6] = 0

If [B7] = "-" Or [D7] = 0 Then [p7] = 0: [M7] = 0

If [b8] = "-" Or [D8] = 0 Then [p8] = 0: [M8] = 0

If [b9] = "-" Or [D9] = 0 Then [p9] = 0: [M9] = 0

If [b10] = "-" Or [D10] = 0 Then [p10] = 0: [M10] = 0

If [b11] = "-" Or [D11] = 0 Then [p11] = 0: [M11] = 0

If [b12] = "-" Or [D12] = 0 Then [p12] = 0: [M12] = 0

If [b13] = "-" Or [D13] = 0 Then [p13] = 0: [M13] = 0

If [b14] = "-" Or [D14] = 0 Then [p14] = 0: [M14] = 0

If [b15] = "-" Or [D15] = 0 Then [p15] = 0: [M15] = 0

If [b16] = "-" Or [D16] = 0 Then [p16] = 0: [M16] = 0

If [b17] = "-" Or [D17] = 0 Then [p17] = 0: [M17] = 0

schichtanz = [a18] ' Anzahl der Eingegebenen Material-Schichten

wdw = [f18] ' 1/ GroßLamnda = summe über alle s/lamnda

k = 1 / (rai + wdw + raa) 'k Wert

dt = tempinnen - tempaussen 'Delta T

q = k * (dt) 'Wärmemenge Q

Cells(32, 21) = q

'Zuordnen der Stoffwerte zu den Schichten um sie in der Schleife Verwenden zu können

For i = 1 To [a18]

 sdx(i) = Cells(i + 2, 14) 'dx Ausgabe

 l(i) = Cells(i + 2, 6) ' Lamnda

 sd(i) = Cells(i + 2, 4) ' dicke der Schicht

Next i

'Berechnen der Temperaturen an jedem äußeren Rand jeder Schicht

'T am Rand innen

statio(0) = [tempinnen]

statio(1) = statio(0) - q * rai

T = statio(1)

'T im Feld

For i = 2 To 30

 If schichtanz + 1 < i Then GoTo 20

 li = l(i - 1)

 sdi = sd(i - 1) / 100

 If sd(i - 1) = 0 And l(i - 1) <> 0 Then Mark(i - 1) = 1: sdi = 1 'Markierung eines Vorhandenen Wärmeübergangs

 statio(i) = T - (q * sdi / li)

 T = statio(i)

Next i

'T am Rand außen

20

statio(i) = T - q * raa

T = statio(i)

'Vorbereiten der Ausgabewerte

'Zuordnen der Schichtanzahl der Materialien

ssdx = [N18] ' Summe aller Schichten

anfang(0) = 0

For i = 1 To 15

anfang(i) = sdx(i) + vorgänger

vorgänger = anfang(i)

Next i

'Lineares Füllen der Zwischenwerte der berechneten Randtemperaturen

For i = 1 To schichtanz

n = i

T = statio(i)

anfang1 = anfang(i)

statioprint(anfang(i - 1) + 1) = statio(i)

If sdx(i) = 0 Then statioprint(anfang(i - 1) + 1) = statio(i): GoTo 10

For x = 2 To sdx(i)

statioprint(anfang(i - 1) + x) = T - (statio(i) - statio(i + 1)) / (sdx(i) - 1)

T = statioprint(anfang(i - 1) + x)

Next x

10

Next i

'Zusatzfunktion (-stationäre Temperaturverteilung als
Anfangstemperaturverteilung-)

If Sheets("Berechnungs Optionen").[P32] = "stat" And [O19] = 2 Then

```
For i = 1 To ssdx  
tov(i) = statioprint(i)  
Next i  
End If
```

```
'Ausgabe im Arbeitsblatt Ausgabewerte
```

```
For i = 1 To ssdx '  
Sheets("Ausgabewerte").Cells(7, i + 4) = statioprint(i)  
Next i
```

```
End Sub
```

Das Test-Modul aus DynaTest

Dieses Modul ist aus dem Programmsystem DynaTest und wurde zu Test und nachweiszwecken Programmiert.

Sub INSTATEXPLIZIT()

'experimentelles Testprogramm zur Berechnung

'verschiedener Varianten der instationären Temperaturverteilung

'von n Schichten mit Wärmeübergang zwischen den Schichten

'und an den aussenwänden

'explizites Differenzenverfahren

'Temperaturfeld tnv

'teilweise Integration

'Temperaturfeld tntwint

'implizites Verfahren

'Temperaturfeld timp

'ein virtueller Abschnitt pro Schicht

'Berechnung der Strahlung in einem Keramikplättchen (Punkt 6)

'mit und ohne Berücksichtigung der kapazitiven Korrektur (Punkt 6)

' diese Schalter sind zu setzen für die unterschiedlichen Tests

' kapazitiveKorrektur = 1

' Keramik = 0 twint tneu mit kapazitiver Korrektur in den Rändern,
Berechnung beliebiger Bauteile

' kapazitiveKorrektur = 1

' Keramik = 1 twint tneu mit kapazitiver Korrektur für die spezielle Keramik
nach [36]

kapazitiveKorrektur = 1 ' 1 oder 0 das implizite Verfahren rechnet nicht mit
kapazitiver Korrektur

Keramik = 0 ' 1 Oder 0

Sheets("Berechnungs Optionen").Select 'Wählt Arbeitsblatt "Berechnungs Optionen" falls das Modul aus einem anderen Blatt gestartet wird

If [L19] <> Falsch Then Tabelle8.Ausgabenverteilung

genauigkeit = Tabelle8.[O19]

If genauigkeit = 2 Then Tabelle8.Makro1

If [r20] <> Falsch Then [P20] = [v18]

If [P20] < 0.05 Then MsgBox " Sie haben dt kleiner sehr klein gewählt hieraus entstehen in den meisten fällen sehr lange rechenzeiten! Für vorzeitiges Abbrechen drücken sie hiernach ESC!"

If [L25] + [M25] + [N25] < 45 Then MsgBox "FEHLER! Überprüfen Sie alle Fehler Felder in diesem Blatt und im Blatt Wandaufbau!" ': GoTo abbruchBehandlung

If [N18] > 150 And [L19] = Falsch Then MsgBox "Achtung zu viele Schichten für die Ausgabe wählen sie dx für die Ausgabe entsprechend größer bzw. Schalten sie auf automatische Ausgabenverteilung!" ': GoTo abbruchBehandlung

'On Error GoTo abbruchBehandlung

'Application.EnableCancelKey = xlErrorHandler

'

'alte Werte Löschen

Sheets("Ausgabewerte").Select

[a16] = 5

[a16].Select

Selection.SpecialCells(xlCellTypeConstants, 1).Select

Application.CutCopyMode = False

Selection.ClearContents

[a16] = 5

Sheets("Berechnungs Optionen").Select 'Wählt Arbeitsblatt "Berechnungs Optionen" falls das Modul aus einem anderen Blatt gestartet wird

'alte Werte Löschen

Cells(33, 20) = "-" ' q löschen

Tabelle2.Auftreffende_Strahlungsenergien

Tabelle8.Select

Tabelle8.anfangstemp

Range("V1").Select 'Positionierung des sichtbaren Bereichs

If [R21] <> Falsch Then [P21] = Sheets("Randbedingungen").[B4]

If [L31] <> Falsch Then [M32] = Sheets("Randbedingungen").[B1]

Randbedingungsintervall = Sheets("Randbedingungen").[B1] * 24 * 3600 / [P20]

Cells(26, 18) = Time 'Startzeit

Ausgabeintervall = [M32] * 24 * 3600 / [P20]

Animation = Cells(30, 12)

Ausgabewerte = Cells(29, 12)

konstante_Randbedingungen_innen = Sheets("Randbedingungen").[D4]

konstante_Randbedingungen_Außen = Sheets("Randbedingungen").[R4]

If konstante_Randbedingungen_Außen And konstante_Randbedingungen_innen

<> Falsch Then Tabelle8.stationärlose Else

'Variablenzuordnung

'Bereitstellen der Parameter

schichtanzahl = [a18] ' ermittelt aus schichttabelle

zeitschritte = [P22]

summe_Anzeige_dx = [N18] 'Summe der Schichten für die Ausgabe

Max = [Q18]

Dim Ausgabe_tnv()

ReDim Ausgabe_tnv(summe_Anzeige_dx + 10)

Dim Ausgabe_ttwint()

ReDim Ausgabe_ttwint(summe_Anzeige_dx + 10)

Dim Ausgabe_timp()

ReDim Ausgabe_timp(summe_Anzeige_dx + 10)

'Anfangsrandbedingungen aus "Randbedingungen"

tempinnen = Sheets("Randbedingungen").Cells(7, 8)

```
tempausen = Sheets("Randbedingungen").Cells(7, 22)
alpha_i = Sheets("Randbedingungen").Cells(7, 7)
alpha_a = Sheets("Randbedingungen").Cells(7, 21)
Strahlungsenergie_i = Sheets("Randbedingungen").Cells(7, 12)
Strahlungsenergie_a = Sheets("Randbedingungen").Cells(7, 26)
T = Sheets("Randbedingungen").[B7] 'Startzeit
tani = Sheets("Randbedingungen").[B7] 'Startzeit
dT = Sheets("Berechnungs Optionen").[M32] ' dt Ausgabe
delta_t = Sheets("Berechnungs Optionen").[P20]
delta_t_berechnung = delta_t
Dim r() As Double
Dim ra() As Double
Dim F() As Double
Dim b() As Double
Dim tov() As Double, tnv() As Double
Dim totwint() As Double, tntwint() As Double
Dim timp() As Double, dimp() As Double, aimp() As Double, bimp() As Double,
cimp() As Double
Dim limp() As Double, mimp() As Double

Dim lcrxx() As Double ' enthält lamda/(c*rho*dx*dx) für jede Schicht in twint

Dim indexanfv(), indexendv()
Dim q() As Double

Dim s_Anzeige(15)
Dim Anzeige_dx(15)
Dim s_Berechnung(15)
Dim sdx(15)
Dim sd(15)
Dim l(15)
```

```
If Cells(3, 8) = 0 Then as_zahl_i = 0.7 Else as_zahl_i = Cells(3, 8)
If Cells(schichtanzahl + 2, 8) = 0 Then as_zahl_a = 0.7 Else as_zahl_a =
Cells(schichtanzahl + 2, 8)
```

```
For i = 1 To [a18]
sdx(i) = Cells(i + 2, 16) ' dx Berechnung
l(i) = Cells(i + 2, 6) ' Lamnda
sd(i) = Cells(i + 2, 4) ' Dicke der Schicht
Next i
```

```
w = 0 'Zähler für Widerstände Alpha ( Wärmeübergänge)
For i = 2 To schichtanzahl
If sd(i) = 0 And l(i) <> 0 Then w = w + 1
Next i
```

```
ReDim r(schichtanzahl - w) 'Widerstände der Schichten
ReDim ra(schichtanzahl - w + 1) 'aussere und innere
Wärmeübergangswiderstände
ReDim indexanf(v)(schichtanzahl - w) 'Anfangsindex der Schicht
ReDim indexend(v)(schichtanzahl - w) 'Endindex der Schicht
ReDim F(schichtanzahl - w) 'Faktoren zu den Schichten
ReDim b(schichtanzahl - w)
ReDim lcrxx(schichtanzahl - w) ' für twint
z = 1
For i = 2 To schichtanzahl - w
z = z + 1
If sd(z) = 0 And l(z) <> 0 Then ra(i) = 1 / l(z): z = z + 1
Next i
ra(1) = 1 / alpha_i '1/alpha_i
ra(schichtanzahl - w + 1) = 1 / alpha_a '1/alpha_a
```

```
' Indexe für absolute Berechnungsschicht dx vom Anfang entfernt
```

```
indexanfv(1) = 1
```

```
anf = indexanfv(1)
```

```
ende = indexendv(1)
```

```
ende = 0
```

```
z = 0
```

```
For i = 1 To schichtanzahl - w
```

```
    z = z + 1
```

```
    If sd(z) = 0 And l(z) <> 0 Then z = z + 1
```

```
    indexendv(i) = ende + Cells(2 + z, 17) + 1
```

```
    If i < schichtanzahl - w Then indexanfv(i + 1) = indexendv(i) + 1
```

```
    ende = indexendv(i)
```

```
Next i
```

```
ReDim tov(indexendv(schichtanzahl - w))
```

```
ReDim tnv(indexendv(schichtanzahl - w))
```

```
ReDim q(indexendv(schichtanzahl - w))
```

```
ReDim tntwint(indexendv(schichtanzahl - w))
```

```
ReDim totwint(indexendv(schichtanzahl - w))
```

```
ReDim timp(indexendv(schichtanzahl - w))
```

```
ReDim aimp(indexendv(schichtanzahl - w))
```

```
ReDim bimp(indexendv(schichtanzahl - w))
```

```
ReDim cimp(indexendv(schichtanzahl - w))
```

```
ReDim dimp(indexendv(schichtanzahl - w))
```

```
ReDim limp(indexendv(schichtanzahl - w))
```

```
ReDim mimp(indexendv(schichtanzahl - w))
```

```
z = 0
```

```
For i = 1 To schichtanzahl - w
```

```
    z = z + 1
```

```
    If sd(z) = 0 And l(z) <> 0 Then z = z + 1
```

```
    r(i) = Cells(2 + z, 16) * 0.01 / l(z) ' dx1/lamda1
```

```
    F(i) = Cells(2 + z, 21) 'F-Modul
```

```
rhoaussen = Cells(2 + z, 5) ' Stoffwerte der äusseren Schicht
caussen = Cells(2 + z, 9)
sdxaussen = Cells(2 + z, 16)
lcrxx(i) = F(i) / delta_t ' für twint lcrxx=lamda/(c* rho*dx*dx)
b(i) = 2 * F(i) - 1# ' Faktor
s_Berechnung(i) = Cells(z + 2, 17)
s_Anzeige(i) = Cells(z + 2, 14)
Next i
```

'Anfangstemperaturen für alle Verfahren

```
Anfangstemperatur = [P32]
For i = 1 To indexendv(schichtanzahl - w)
  tov(i) = Anfangstemperatur
  totwint(i) = Anfangstemperatur
  timp(i) = Anfangstemperatur
  tntwint(i) = Anfangstemperatur
Next i
```

```
For i = 1 To schichtanzahl - w
  For j = indexanfv(i) + 1 To indexendv(i) - 1
    cimp(j - 1) = -1
    aimp(j) = 2 * (1 / F(i) + 1)
    bimp(j) = -1
  Next j
Next i
cc = (l(1) / (alpha1 * sdx(1) * 0.01)) 'lamda/(alpha*dx)
aimp(1) = 1 + cc
bimp(1) = -cc
cc = (l(schichtanzahl) / (alphaa * sdx(schichtanzahl) * 0.01)) 'lamda/(alpha*dx) +
Q/alphaa
maxv = indexendv(schichtanzahl - w)
cimp(maxv - 1) = -cc 'bhcc
aimp(maxv) = 1 + cc ' --
```

'jetzt innere Übergänge

```
For j = 1 To schichtanzahl - w - 1
dimp(indexendv(j)) = 0
dimp(indexanfv(j + 1)) = 0
If (ra(j + 1) = 0) Then ra(j + 1) = r(j) / 1000
cimp(indexendv(j) - 1) = -ra(j + 1) / (r(j))
cimp(indexanfv(j + 1) - 1) = -1
aimp(indexendv(j)) = 1 + ra(j + 1) / (r(j))
aimp(indexanfv(j + 1)) = 1 + ra(j + 1) / (r(j + 1))
bimp(indexendv(j)) = -1
bimp(indexanfv(j + 1)) = -ra(j + 1) / (r(j + 1))
Next j
```

' alle Initialisierungen abgeschlossen

.....

For n = 1 To zeitschritte

' Einlesen der neuen Randbedingungen!

```
If ((n Mod Randbedingungsintervall) = 0) Then
zeitzähler = zeitzähler + 1
If konstante_Randbedingungen_innen <> Falsch Then GoTo 77
    tempinnen = Sheets("Randbedingungen").Cells(zeitzähler + 7, 8)
    alphai = Sheets("Randbedingungen").Cells(zeitzähler + 7, 7)
    Strahlungsenergie_i = Sheets("Randbedingungen").Cells(zeitzähler + 7, 10)
77
If konstante_Randbedingungen_Außen <> Falsch Then GoTo 88
    tempausssen = Sheets("Randbedingungen").Cells(zeitzähler + 7, 22)
    alphaa = Sheets("Randbedingungen").Cells(zeitzähler + 7, 21)
    Strahlungsenergie_a = Sheets("Randbedingungen").Cells(zeitzähler + 7, 24)
88
End If
```

' berechnung der inneren temperaturwerte

```

For i = 1 To schichtanzahl - w
  FF = F(i)
  bb = b(i)
  iend = indexendv(i) - 1
  For j = indexanfv(i) + 1 To iend
    tnv(j) = FF * (tov(j + 1) + tov(j - 1)) - bb * tov(j) ' explizite Methode mit virtuelle
Schicht
    tntwint(j) = (tntwint(j) - (tntwint(j + 1) + tntwint(j - 1)) / 2) * Exp(-2 * delta_t *
lcrxx(i)) + (tntwint(j + 1) + totwint(j - 1)) / 2
    ' tntwint(j-1) enthält schon neuen Temperaturwert (außer j=2)
    ' das ergibt nach Johannsen bessere Ergebnisse
  Next j
Next i
' alle nicht rand und nicht übergangstemperaturen berechnet

' erste Randtemperatur explizit untnd twint
cc = (l(1) / (alpha1 * sdx(1) * 0.01)) 'lamda/(alpha*dx)
maxv = indexendv(schichtanzahl - w)
If kapazitiveKorrektur <> 1 Then
tnv(1) = (tnv(2) * cc + tempinnen + as_zahl_i * Strahlungsenergie_i / alpha1) /
(1# + cc)
tntwint(1) = (tntwint(2) * cc + tempinnen + as_zahl_i * Strahlungsenergie_i /
alpha1) / (1# + cc)
' letzte Randtemperatur explizit und twin
cc = (l(schichtanzahl) / (alphaa * sdx(schichtanzahl) * 0.01))
tnv(maxv) = (tnv(maxv - 1) * cc + tempausen + as_zahl_a *
Strahlungsenergie_a / alphaa) / (1# + cc)
tntwint(maxv) = (tntwint(maxv - 1) * cc + tempausen + as_zahl_a *
Strahlungsenergie_a / alphaa) / (1# + cc)
Else
' von hier kapazitive Korrektur der Randtemperaturen
' nur für tnv und twint !!
sigma = 0.00000005669

```

epsilon = 0.8

' erste Randtemperatur

If Keramik = 1 Then

fa = 0# ' ohne Übergänge

strahlunginnen = sigma * epsilon * (293# ^ 4 - (tov(1) + 273) ^ 4) - 1.92 * 293 *
(tov(1) + 273 - 293#) ^ 0.25

strahlungausen = sigma * epsilon * (1273# ^ 4 - (tov(maxv) + 273) ^ 4)

tempinnen = 0 ' keine weiteren Einflüsse

tempausen = 0

Else

fa = 1# ' mit Übergänge

strahlunginnen = as_zahl_i * Strahlungsenergie_i

strahlungausen = as_zahl_a * Strahlungsenergie_a

End If

rschicht = sdx(1) * 0.01 / l(1)

ralpha = 1# / alphas

rc = 2# * delta_t_berechnung / (Cells(3, 5) * Cells(3, 9) * sdx(1) * 0.01)

tnv(1) = (tov(1) / rc + tnv(2) / rschicht + fa * tempinnen / ralpha + strahlunginnen) /
(1# / rschicht + 1# / rc + fa * 1# / ralpha)

tntwint(1) = (totwint(1) / rc + tntwint(2) / rschicht + fa * tempinnen / ralpha +
strahlunginnen) / (1# / rschicht + 1# / rc + fa * 1# / ralpha)

' letzte Randtemperatur

rschicht = sdx(schichtanzahl) * 0.01 / l(schichtanzahl)

ralpha = 1# / alphas

rc = 2# * delta_t_berechnung / (rhoausen * caussen * sdxausen * 0.01)

tnv(maxv) = (tov(maxv) / rc + tnv(maxv - 1) / rschicht + fa * tempausen / ralpha
+ strahlungausen) / (1# / rschicht + 1# / rc + fa * 1# / ralpha)

tntwint(maxv) = (totwint(maxv) / rc + tntwint(maxv - 1) / rschicht + fa *
tempausen / ralpha + strahlungausen) / (1# / rschicht + 1# / rc + fa * 1# /
ralpha)

' bis hier kapazitive Korrektur

End If

' jetzt die inneren Übergänge explizit und twint

For j = 1 To schichtanzahl - w - 1

$$\text{tnv}(\text{indexendv}(j)) = \text{tnv}(\text{indexendv}(j) - 1) + (r(j) * (\text{tnv}(\text{indexanfv}(j + 1) + 1) - \text{tnv}(\text{indexendv}(j) - 1))) / (r(j) + r(j + 1) + \text{ra}(j + 1))$$

$$\text{tnv}(\text{indexanfv}(j + 1)) = \text{tnv}(\text{indexanfv}(j + 1) + 1) - (r(j + 1) * (\text{tnv}(\text{indexanfv}(j + 1) + 1) - \text{tnv}(\text{indexendv}(j) - 1))) / (r(j) + r(j + 1) + \text{ra}(j + 1))$$

$$\text{tntwint}(\text{indexendv}(j)) = \text{tntwint}(\text{indexendv}(j) - 1) + (r(j) * (\text{tntwint}(\text{indexanfv}(j + 1) + 1) - \text{tntwint}(\text{indexendv}(j) - 1))) / (r(j) + r(j + 1) + \text{ra}(j + 1))$$

$$\text{tntwint}(\text{indexanfv}(j + 1)) = \text{tntwint}(\text{indexanfv}(j + 1) + 1) - (r(j + 1) * (\text{tntwint}(\text{indexanfv}(j + 1) + 1) - \text{tntwint}(\text{indexendv}(j) - 1))) / (r(j) + r(j + 1) + \text{ra}(j + 1))$$

Next j

' jetzt implizit

' Füllen der Felder

' erst mal innere Feldelemente

For i = 1 To schichtanzahl - w

FF = F(i) ' Fourier-Faktor

iend = indexendv(i) - 1

For j = indexanfv(i) + 1 To iend

$$\text{dimp}(j) = -(\text{timp}(j - 1) + 2 * (1 / \text{FF} - 1) * \text{timp}(j) + \text{timp}(j + 1))$$

Next j

Next i

' danach linker Rand

$$\text{dimp}(1) = -(\text{tempinnen} - \text{Strahlungsenergie}_i / \text{alpha}_i)$$

' jetzt rechter rand

$$\text{dimp}(\text{maxv}) = -(\text{tempaussen} + \text{Strahlungsenergie}_a / \text{alpha}_a)$$

' alle Anfangsmatrixwerte berechnet

' jetzt los Schwarz Seite 47 ff

$$\text{mimp}(1) = \text{aimp}(1)$$

For i = 1 To maxv - 1

$$\text{limp}(i) = \text{cimp}(i) / \text{mimp}(i)$$

$$\text{mimp}(i + 1) = \text{aimp}(i + 1) - \text{limp}(i) * \text{bimp}(i)$$

Next i

```
timp(1) = dimp(1)
For i = 2 To maxv
timp(i) = dimp(i) - limp(i - 1) * timp(i - 1)
Next i
timp(maxv) = -timp(maxv) / mimp(maxv)
For i = maxv - 1 To 1 Step -1
timp(i) = -(timp(i) + bimp(i) * timp(i + 1)) / mimp(i)
Next i
' implizit fertig!!!
' alle neuen Temperaturen berechnet

'Werte ins told-Feld für Neuberechnung übertragen
For i = 1 To indexendv(schichtanzahl - w)
    tov(i) = tnv(i)
    totwint(i) = tntwint(i)
Next i

'Berechnen der Verteilung der Berechneten Werte in tnv für die Ausgabe auf die
fesgelegte Anzahl von Werten
If (((n Mod Ausgabeintervall) = 0) Or (n = CLng(zeitschritte))) Then 'bh
.....

fakkor = 0
pixel = 1
For j = 1 To schichtanzahl - w
    fak = s_Anzeige(j) / s_Berechnung(j)
    fakint = 0
    For i = 1 To fak / 2
        fakint = fakint + 1
        Ausgabe_tnv(pixel) = tnv(indexanfv(j))
        Ausgabe_ttwint(pixel) = tntwint(indexanfv(j))
        Ausgabe_timp(pixel) = timp(indexanfv(j))
        pixel = pixel + 1
    Next i
```

```
fakkor = fakkor + fak / 2 - fakint
For k = 1 To s_Berechnung(j) - 1   'indexanfv(j) + 1 To indexendv(j) - 1
i = 1
fakint = 0
Do While (i < (fakkor + fak))
fakint = fakint + 1
  Ausgabe_tnv(pixel) = tnv(indexanfv(j) + k)
  Ausgabe_ttwint(pixel) = tntwint(indexanfv(j) + k)
  Ausgabe_timp(pixel) = timp(indexanfv(j) + k)
  pixel = pixel + 1
  i = i + 1
Loop
fakkor = fakkor + fak - fakint
Next k
i = 1
fakint = 0
Do While (i < (fakkor + fak / 2))
fakint = fakint + 1
Ausgabe_tnv(pixel) = tnv(indexendv(j))
Ausgabe_ttwint(pixel) = tntwint(indexendv(j))
Ausgabe_timp(pixel) = timp(indexendv(j))
pixel = pixel + 1
i = i + 1
Loop
fakkor = fakkor + fak / 2 - fakint
Next j
End If
```

.....

'Animierte Ausgabe?

If Animation = Falsch Then GoTo 10000

If ((n Mod Ausgabeintervall) = 0 Or n = CLng(zeitschritte)) Then

```
tani = tani + dT
trelativ = trelativ + dT
Cells(27, 16) = trelativ
Cells(29, 15) = tani
Cells(29, 16) = n
  For i = 1 To summe_Anzeige_dx
    Sheets("Ausgabewerte").Cells(6, i + 4) = Ausgabe_tnv(i)
    Sheets("Ausgabewerte").Cells(5, i + 4) = Ausgabe_timp(i)
  Sheets("Ausgabewerte").Cells(4, i + 4) = Ausgabe_ttwint(i)
  Next i
```

'Fügt eine notwendige Pause ein das Excel das Diagramm erzeugen kann

```
Dim Pausenlänge, Start, Gesamtdauer
```

```
  Pausenlänge = 1 ' Dauer festlegen.
```

```
  Start = Timer ' Anfangszeit setzen.
```

```
  Do While Timer < Start + Pausenlänge
```

```
    DoEvents ' Steuerung an andere Prozesse
```

```
    ' abgeben.
```

```
  Loop
```

```
End If
```

```
10000
```

' Ausgabe in Ausgabewerte

```
If Ausgabewerte = Falsch Then GoTo 1000000
```

```
If ((n Mod Ausgabeintervall) = 0 Or n = CLng(zeitschritte)) Then
```

```
  zähler = zähler + 1
```

```
  T = T + dT
```

```
  Sheets("Ausgabewerte").Cells(29 + zähler, 3) = T
```

```
  Cells(29, 16) = n
```

```
  For i = 1 To summe_Anzeige_dx
```

```
    Sheets("Ausgabewerte").Cells(29 + zähler, i + 4) = Ausgabe_tnv(i)
```

```
    Sheets("Ausgabewerte").Cells(5, i + 4) = Ausgabe_timp(i)
```

```
  Sheets("Ausgabewerte").Cells(4, i + 4) = Ausgabe_ttwint(i)
```

Next i

'erstmal nur ani ausgabe später mit in ausgabeblatt übernehmen

qtest_i = l(1) * ((tnv(1) - tnv(2)) / (sdx(1) / 100))

Sheets("Ausgabewerte").Cells(29 + zähler, 1) = qtest_i 'q(0)

summe_q_i = summe_q_i + qtest_i * Sheets("Ausgabewerte").Cells(20, 2)

q(maxv) = alphaa * -(tnv(maxv) - tempausen) + as_zahl_a *
Strahlungsenergie_a

qtest_a = l(schichtanzahl) * ((tnv(maxv) - tnv(maxv - 1)) / (sdx(schichtanzahl) /
100))

Sheets("Ausgabewerte").Cells(29 + zähler, 2) = qtest_a 'q(maxv)

summe_q_a = summe_q_a + qtest_a * Sheets("Ausgabewerte").Cells(20, 2)

End If

1000000

Next n

'letzte Ausgabe

Sheets("Ausgabewerte").[A27] = summe_q_i

Sheets("Ausgabewerte").[B27] = summe_q_a

Cells(29, 16) = n '

Cells(27, 18) = Time '

For i = 1 To summe_Anzeige_dx

 Sheets("Ausgabewerte").Cells(6, i + 4) = Ausgabe_tnv(i)

 Sheets("Ausgabewerte").Cells(5, i + 4) = Ausgabe_timp(i)

 Sheets("Ausgabewerte").Cells(4, i + 4) = Ausgabe_ttwint(i)

Next i

GoTo ende

abbruchBehandlung:

```
If Err = 18 Then
```

```
    MsgBox "Sie haben den Vorgang abgebrochen."
```

```
End If
```

```
ende:
```

```
End Sub
```

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

In [57] wird ein gut geeignetes und ausgezeichnet erläutertes System von Formeln angegeben, welches hier übernommen¹ wird. Mit Hilfe dieser Formeln kann in einer Funktion weniger Größen, die auftreffende Sonnenstrahlungsenergie auf eine beliebig orientierte Fläche berechnet werden. Es ist jedoch darauf zu achten, dass der Einfluss der Verschattung (Verhinderung des Auftreffens von Strahlungsenergien durch „Fremdkörper“) manuell berücksichtigt werden muss!

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

Bei dieser Berechnung werden verschiedene Einflussfaktoren vernachlässigt. Diese sind Unregelmäßigkeiten im Zusammenhang mit Schaltjahren, Änderung der Deklination während eines Tages, Präzisionsbewegung der Erdachse sowie Störeinflüsse anderer Planeten. Die fallweise Abweichung von einigen Minuten beim Sonnenstand ist auf die Vereinfachungen der Berechnung zurückzuführen. Im Weiteren ist zu beachten, dass der ganze Formelapparat auf den Mittelpunkt der Sonne bezogen ist. Aus diesem Grund erfolgt der Strahlungsintensitätsverlauf beim Sonnenaufgang nicht kontinuierlich, sondern sprunghaft. Diese Näherungen sind für bauphysikalische Zwecke aber ausreichend.

¹ Der gefälligen Lesbarkeit wegen wurden einige grammatische und orthographische Fehler korrigiert. Aus themenspezifischen Gründen wurde einige Absätze wenig verändert. Vgl. [54]

Theorie der Sonneneinstrahlung

von Prof.M. Trawnika / A.Wirz

Einführung

Bei der Sonne handelt es sich um eine autonome Energiequelle (Fixstern), die kontinuierlich eine konstante Strahlungsmenge abstrahlt. Energielieferant ist der im Inneren der Sonne, bei sehr hohen Temperaturen (~15Mio K) ablaufende Fusionsprozess. Die Oberflächentemperatur der Sonne beträgt ungefähr 5600K, wobei die gasförmige Sonnenhülle annähernd als schwarzer Strahler betrachtet werden kann.

Laut heutigen Berechnungen wird die Sonne in etwa fünf Milliarden Jahren verglüht sein.

Die Sonnenstrahlung hat also, neben dem sichtbaren Licht, eine langwellige Komponente im Infrarotwellenbereich. In diesen Teil fallen 50% der Strahlungsenergie. Im weitem hat die Sonnenstrahlung noch eine kurzwellige Komponente (Ultraviolett- und Röntgenstrahlung).

Die aussen auf die Atmosphäre gelangende Sonnenstrahlung erreicht nur zum Teil die Erdoberfläche. Je nach Zusammensetzung der Luftschichten (Bewölkung, Verschmutzung) werden unterschiedliche Anteile der Strahlung reflektiert, absorbiert oder durchgelassen. Die Aufteilung ist noch sehr stark abhängig vom Wellenbereich. Da die Luftzusammensetzung je nach Ort und Zeit stark differiert, ist eine exakte Beschreibung sehr schwierig. Aus diesem Grund beruhen die meisten Ansätze zur Beschreibung der Strahlungsaufteilung auf empirischen Modellen.

In der Bauphysik haben sich folgende Strahlungsbegriffe eingebürgert.

Direktstrahlung : Der Strahlungsanteil, der auf direktem Weg die Erdoberfläche erreicht. Die Zeit, während welcher die Direktstrahlung den Wert von 200W/m^2 überschreitet, wird als Sonnenscheindauer bezeichnet.

Reflexionsstrahlung : Die Reflexionsstrahlung entsteht durch die Reflektion der direkten Strahlung an Objekten (Erdoberfläche, Gebäude). Das Reflexionsvermögen ist stark von der Oberflächenbeschaffenheit des Körpers abhängig(Albedowert).

Himmelsstrahlung : Die Himmelsstrahlung ist die kurzwellige Strahlung, die an Dunst und Wolken reflektiert wird.

Atmosphärische Direktstrahlung : Die absorbierte Strahlungsmenge erwärmt die Luftschichten. Diese strahlen nun ihrerseits langwellige Strahlung ab. Es handelt sich um die Eigenstrahlung der Atmosphäre. Diese ist von der Sonnenstrahlung unabhängig, denn auch die Erde strahlt Wärme ab, die zum Teil von der Atmosphäre absorbiert wird.

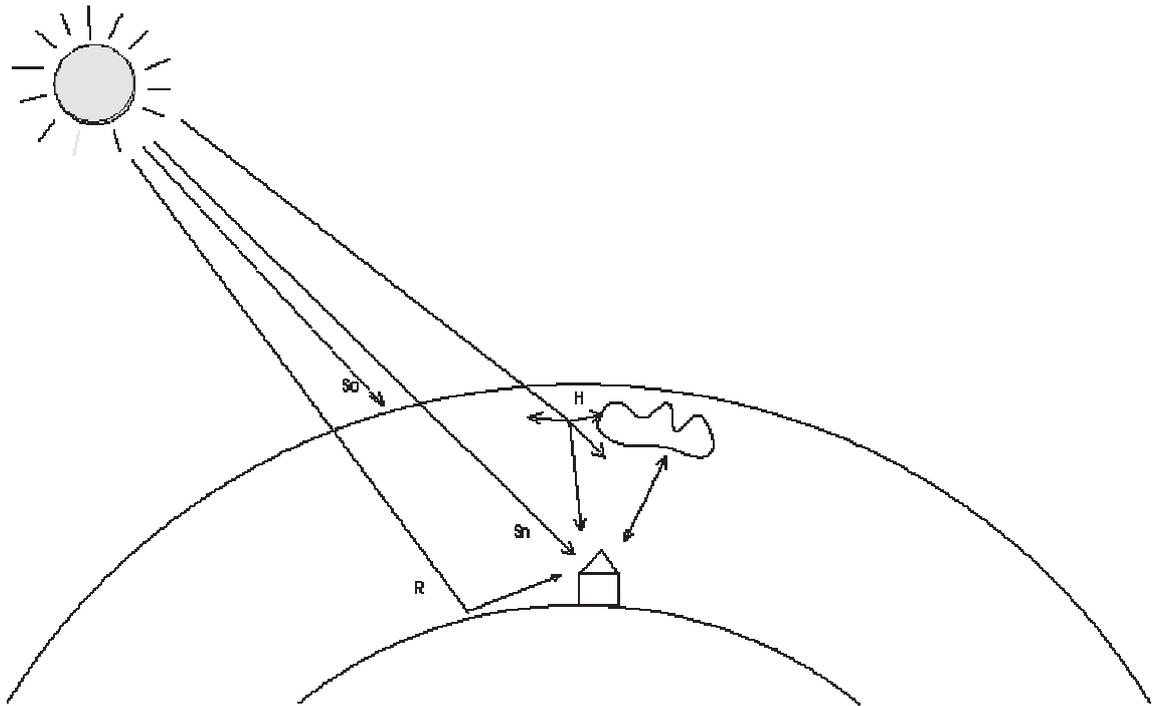
Bei den weiteren Betrachtungen wird diese Strahlungsart vernachlässigt.

Globalstrahlung: Direkt- + Reflexions- + Himmelstrahlung, die kurzwellige Gesamtstrahlung auf eine Fläche

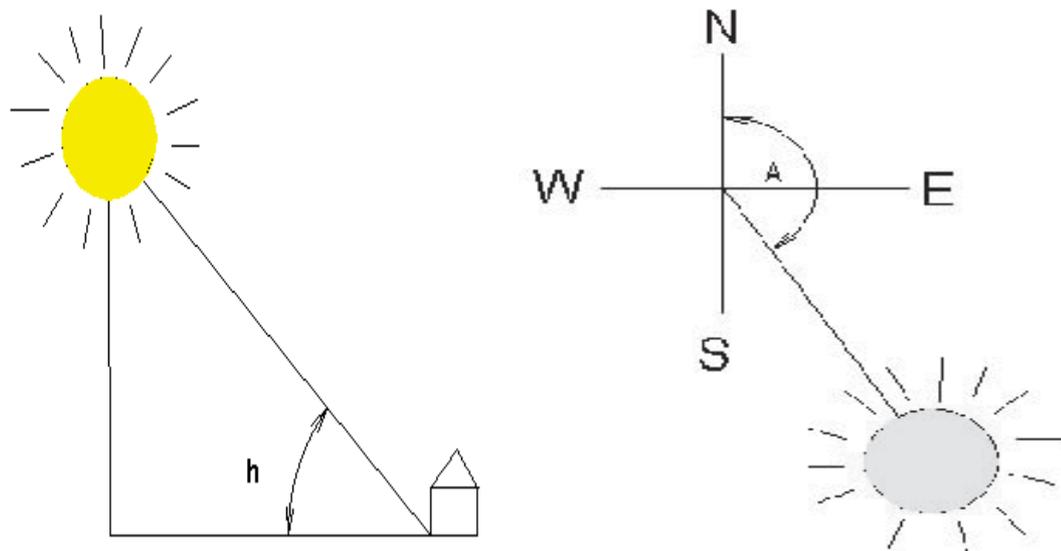
Diffusstrahlung: Reflexions- + Himmelsstrahlung, kurzwellige Strahlung, die auf indirektem Weg auf eine Fläche gelangt

Geometrie Sonne-Erde

Da sich die Erde auf einer elipsenförmigen Bahn um die Sonne bewegt und die Erdachse gegenüber der Ebene, die die Erdumlaufbahn bildet, um 23.45° geneigt ist, verändern sich die Sonnenposition und die Strahlungsintensität, von einem Punkt der Erde aus gesehen, im Laufe einer Sonneumrundung.



Berechnung der Sonnenhöhe und des Sonnenazimutes



Sonnenhöhe h Sonnenazimut A_s

Die Erde bewegt sich auf einer Ellipse um die Sonne (Keplersche Gesetze). Diese Eigenschaft beeinflusst die Sonnenhöhe und den Sonnenazimut. Diese Größen beschreiben den Tagesverlauf der Sonne am Horizont.

Zur Berechnung dieser müssen noch verschiedene Einflussgrößen bestimmt werden.

Eklptikale Länge der Erde; Man versteht darunter den Winkel, den die Verbindung Sonne-Erde mit der Richtung zum Frühlingspunkt einschließt. Der Frühlingspunkt ist jener Punkt am Himmelsgewölbe, in dem die Sonne von der Erde aus gesehen zum Zeitpunkt der Frühlings Tag- und Nachtgleiche (21. März) erscheint. Die eklptikale Länge φ berechnet sich:

$$\varphi = a \cdot (d - d_0) + b \cdot \sin[a \cdot (d - d_0)] + c$$

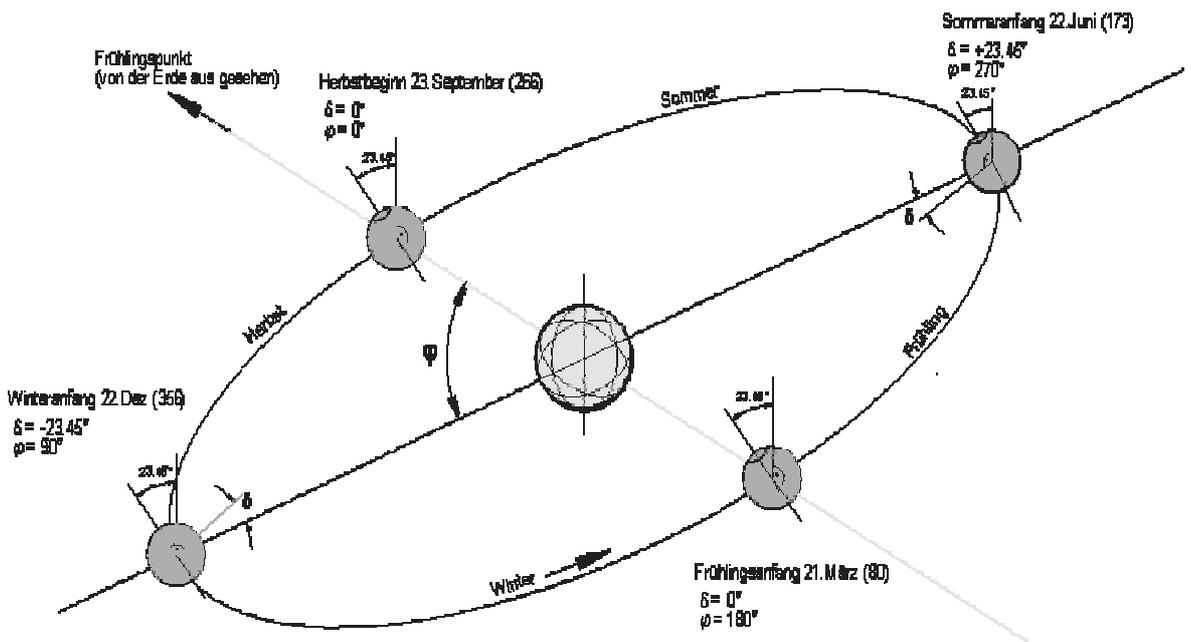
Die Faktoren a , b , c , d_0 sind unter der Annahme einer numerischen Exzentrizität von $e = 0.0167$ Konstanten. Die Herleitung erfolgt in [1]. Als Arbeitsgleichung dient die folgende Formel.

Variablen

φ = Winkel zum Frühlingspunkt

d = Jahrestag (1. Jan =1, Jahr = 365Tage)

$$\varphi = 0.98630 \cdot (d - 2.8749) + 1.9137 \cdot \sin[0.98630 \cdot (d - 2.8749)] + 102.06 \quad \{1\}$$



Deklination

Der Winkel der Verbindung Erde-Sonne zur Ellipseebene der Erdumlaufbahn wird auch Deklination genannt. Als Randbedingung dieser Berechnung dient der Frühlingspunkt. Zum Zeitpunkt der Sommersonnenwende am 21/22 Juni erreicht die Sonne, auf der Nordhalbkugel ihren höchsten Stand. Zu diesem Zeitpunkt erreicht die Deklination mit 23.45° ihren Maximalwert.

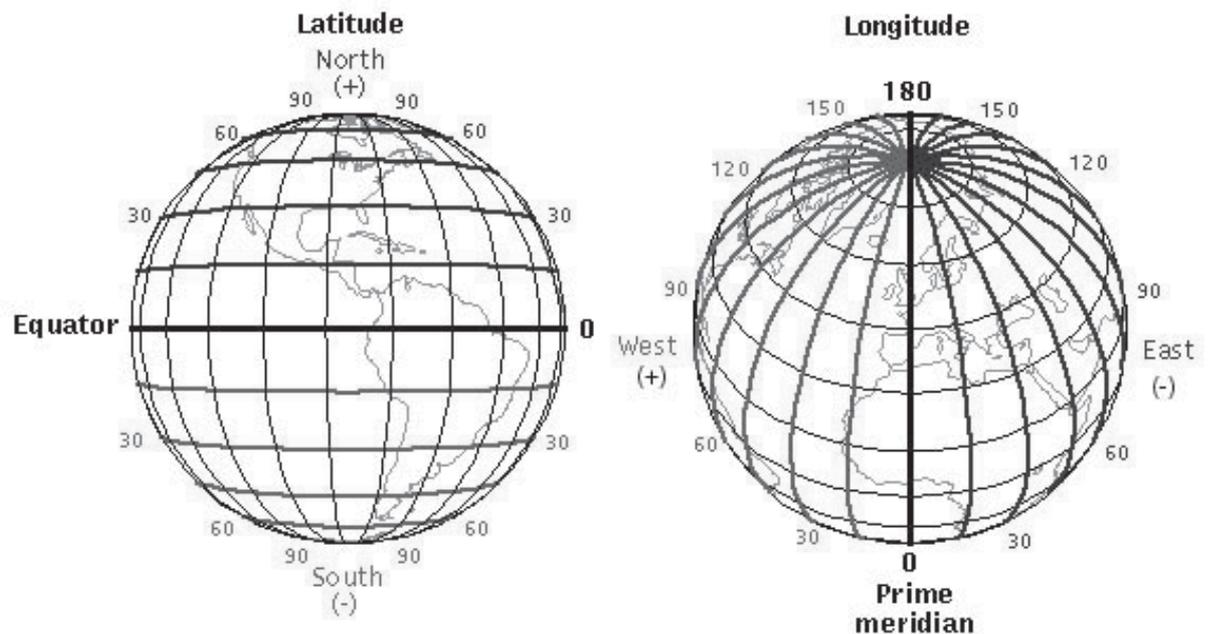
Variablen:

δ = Deklination

$$\sin(\delta) = -\sin 23.45^\circ \cdot \sin(\varphi) = -0.3979 \cdot \sin(\varphi) \quad \{2\}$$

Bei dieser Betrachtung wird die Sonnendeklination während eines ganzen Tages als konstant angenommen, im weiteren werden auch die Einflüsse von Schaltjahren nicht berücksichtigt. Nach [1] beträgt dieser Einfluss im Maximum 0.5° und kann aus diesem Grund bei der Betrachtung von bauphysikalischen Zwecken vernachlässigt werden.

Um die Sonnenintensität oder die Beschattung an einem bestimmten Ort der Erde zu einer bestimmten Tageszeit zu berechnen, ist es notwendig, Sonnenazimut und Sonnenhöhe im jeweiligen lokalen Koordinatensystem zu kennen. Zunächst muss aber noch die wahre Ortszeit berechnet werden. Diese Unterscheidung zwischen wahrer und der mittleren Ortszeit ist notwendig, um die variable Bahngeschwindigkeit und die damit verbundene unterschiedliche Länge der Sonnentage zu berücksichtigen. Die Bestimmung von z beruht auf einer empirischen Auswertung von Messwerten.



Bei Sommerzeit muss die lokale Ortszeit um eine Stunde zurückgesetzt werden.

$$\text{Sommerzeit} \Rightarrow \text{lokale_Ortszeit} = \text{lokale_Ortszeit} - 1$$

Die wahre Ortszeit errechnet sich nach den Gleichungen {3} und {4}:

Variablen:

d = fortlaufende Nummer des Tages (Beginn 1. Januar = 1)

t = Wahre Ortszeit [Stunden]

t_z = lokale Ortszeit [Stunden]

z = Zeitgleichung [Stunden]

l = geographische Länge des Ortes [Grad]

l_0 = geographische Länge des Bezugsmeridians (zur GMT-Zeit; Mitteleuropa - 15°) [Grad]

t = Umrechnungswinkel [Grad]

w = Stundenwinkel [Grad]

b = geographische Breite des Ortes [Grad]

$$\tau = \frac{360}{365} * d$$

$$z = 0.008 * \cos(\tau) - 0.122 * \sin(\tau) - 0.052 * \cos(2 * \tau) - 0.157 * \sin(2 * \tau) - 0.001 * \cos(3 * \tau) - 0.005 * \sin(3 * \tau) \quad \{3\}$$

$$t = t_z + z + \frac{\lambda_0 - \lambda}{15} \quad \{4\}$$

Für die weitere Berechnung wird noch der Stundenwinkel benötigt. Dieser kann über den Zusammenhang zwischen Kreis und Tagstunden errechnet werden.

$$360^\circ / 24h = 15$$

$$w = 15 * t \quad \{5\}$$

Durch eine Koordinatentransformation für den Einheitsvektor in der Richtung der Sonne ergeben sich die Berechnungen der Sonnenhöhe und des Sonnenazimutes.

h = Sonnenhöhe

$$\sin(h) = -\cos(\delta) * \cos(\beta) * \cos(w) + \sin(\delta) * \sin(\beta) \quad \{6\}$$

Der Wertebereich liegt zwischen 0 und 90 Grad .

A_s = Sonnenazimut [Grad]

$$\sin(A_s) = \frac{\cos(\delta) * \sin(w)}{\cos(h)} \quad \{7\}$$

Der Wertebereich liegt zwischen 0 und 360°. Da der Arcsin aber nur zwischen $\pm 90^\circ$ bestimmt ist, muss eine quadrantenweise Fallunterscheidung durchgeführt werden. Zu dieser Fallunterscheidung muss der Sonnenazimut ein zweites Mal berechnet werden und zwar zu einem Zeitpunkt $w = w + 0.001$, der resultierende Sonnenazimut wird A_1 genannt.

1. Quadrant $A_s > 0$ und $A_{s1} > A_s \Rightarrow A_s = \text{Sonnenazimut}$

2. Quadrant $A_s > 0$ und $A_{s1} < A_s \Rightarrow A_s = (180 - \text{Abs}(\text{Sonnenazimut}))$

3. Quadrant $A_S < 0$ und $A_{S1} < A_S \Rightarrow A_S = (180 + \text{Abs}(\text{Sonnenazimut}))$

4. Quadrant $A_S < 0$ und $A_{S1} > A_S \Rightarrow A_S = (360 - \text{Abs}(\text{Sonnenazimut}))$

Sonneneinstrahlung

Extraterrestrische Direktstrahlungsintensität

Unter extraterrestrischer Direktstrahlungsintensität versteht man die Strahlung, welche außen auf die Atmosphäre auftrifft.

Wegen dem variablen Abstand Erde-Sonne kann nicht ein konstanter Sonneneinstrahlungswert angegeben werden.

Mit Hilfe des in Gleichung {1} berechneten Winkels zum Frühlingspunkt kann die extraterrestrische Strahlungsintensität eines bestimmten Tages berechnet werden.

Variabelenerklärung

ε = numerische Exzentrizität der Erdumlaufbahn = 0.0167

I_0 = Solarkonstante = 1352 W/m^2

j = Winkel zum Frühlingspunkt gem. {1}

$$I = I_0 \left[1 - \varepsilon \cdot \cos(\varphi + 77.94^\circ) \right]^2 \quad \{8\}$$

Die Strahlungsintensitätsschwankung beträgt $\pm 3.34\%$ und kann somit in den meisten Fällen vernachlässigt werden.

$$I = 1352 \pm 45 \text{ W/m}^2.$$

Direkt- und horizontale Diffusstrahlung

Die extraterrestrische Strahlung schwächt sich beim Durchgang durch die Atmosphäre durch Streuung und Absorption ab. Aus diesem Grund gelangt nur ein Teil der Strahlung auf direktem Weg zur Erde. Dieser Anteil wird Direktstrahlung genannt. Vom Rest erreicht nur ein Teil die Erdoberfläche in Form von sogenannter diffuser Strahlung. Die diffuse Strahlung setzt sich aus der Himmelsstrahlung und der Reflexionsstrahlung zusammen, die letzteren beiden entstehen durch die Streuung und die Absorption des Sonnenlichtes in der Atmosphäre (Wolken). Die Aufteilung der Strahlung in Direkt- und Diffusstrahlung ist von der Trübung der Atmosphäre abhängig. In der Tabelle 1 sind übliche Werte aufgeführt. Der nachfolgend dargestellte Formelapparat erlaubt es, die Aufteilung der Strahlung für wolkenlosen Himmel zu berechnen.

Variabelenerklärung

h = Sonnenhöhenwinkel [Grad]

B = Trübungsfaktor nach Schüpp (Tabelle 1)

D_H = Diffuse Strahlung auf eine horizontale Fläche [W/m^2]

I_N = Direktstrahlung normal [W/m^2]

$$D_H = -215 * B^2 * \sin(h)^2 * -282 * B * \sin(h)^2 - 81.2 * \sin(h)^2 - 1182 * B^2 * \sin(h) + 1425 * B * \sin(h) + 104 * \sin(h) + 317 * B^2 - 8 * B + 4.3 \quad \{9\}$$

$$I_N = -13637 * B^2 * \sin(h)^2 + 8745 * B * \sin(h)^2 - 1724 * \sin(h)^2 + 9492 * B^2 * \sin(h) - 8120 * B * \sin(h) + 2524 * \sin(h) + 4864 * B^2 - 2071 * B + 192 \quad \{10\}$$

Berechnung der Einstrahlung auf eine beliebig orientierte Fläche

Direktstrahlung auf eine beliebig orientierte Fläche.

Der Einstrahlungswinkel ist der Winkel zwischen den Sonnenstrahlen und dem Normalenvektor, welcher die betrachtete Fläche repräsentiert. Die Fläche ist um den Winkel s gegenüber der Horizontalen geneigt und die Flächennormale weist in eine bestimmte Himmelsrichtung, wobei definitionsgemäß Nord = 0° und Ost 90° ist.

$$\begin{aligned}
\cos(\Theta) &= \sin(\delta) * \sin(\beta) * \cos(\alpha) \\
&+ \sin(\delta) * \cos(\beta) * \sin(\alpha) * \cos(A_W) \\
&- \cos(\delta) * \cos(\beta) * \cos(\alpha) * \cos(\varpi) \\
&+ \cos(\delta) * \sin(\beta) * \sin(\alpha) * \cos(A_W) * \cos(\varpi) \\
&+ \cos(\delta) * \sin(\alpha) * \sin(A_W) * \sin(\varpi) \quad \{11\}
\end{aligned}$$

Die einfallende Direktstrahlung kann nach der folgenden Gleichung berechnet werden.

$$I = I_N * \cos(\Theta) \quad \{13\}$$

Diffusstrahlung auf eine beliebig orientierte Fläche.

Bemerkung

Der nachfolgende Formelapparat stellt einen einfachen Ansatz zur Berechnung der Diffusstrahlung auf geneigte Flächen dar. In dieser Berechnung wird unter anderem von einer einheitlichen Strahlung aus allen Himmelsrichtungen ausgegangen, diese Vereinfachung stimmt für horizontale Flächen mit genügender Genauigkeit. Für eine genauere Berechnung bei stärker geneigten Flächen gibt es andere Formelapparate. Die Berechnung wird aber sehr aufwendig und ist als Handberechnungsmethode nicht sinnvoll. Beispiel dieser Berechnung findet sich SIA D088. => Excel_Tools

Wie bereits erwähnt, teilt sich die Diffusstrahlung in zwei Teile, in die Himmels- und die Reflektionsstrahlung.

Himmelsstrahlung

Man kann sich eine Halbkugel über der betrachteten Fläche vorstellen, welche diese gleichmäßig bestrahlt. Diese Annahme gilt strenggenommen nicht, ist aber weitgehend erfüllt.

In dem verwendeten Modell wird von keiner Horizontüberhöhung ausgegangen (keine Berge oder nahe Gebäude). Diese Annahme ist zu kontrollieren, die Berechnung mit Horizontüberhöhung wird in [1] ausführlich beschrieben. Wird die betrachtete Fläche nun um den Winkel s gegenüber der horizontalen gekippt, sieht die Fläche nur noch einen Teil der Himmelshalbkugel. Durch Integration über den Raumwinkel erhält man den folgenden geometrischen Zusammenhang:

$$R_D = \frac{(1 + \cos(\alpha))}{2} \quad \{14\}$$

Die einfallende Himmelsstrahlung lautet wie folgt

$$H = D_H * R_D = D_H * \frac{(1 + \cos(\alpha))}{2} \quad \{15\}$$

Reflektionsstrahlung

Zur Berechnung der reflektierenden Strahlung kann die folgende Überlegung angestellt werden. Der Winkel, unter welchem die Fläche die Erdoberfläche sieht ist s . Der von der Fläche aus nicht sichtbare Teil ist demgemäss

$$\frac{(1 - \cos(\alpha))}{2} = 1 - R_D \quad \{16\}$$

Liegt die Fläche parallel zur Erdoberfläche ($\alpha = 0$) wird der $\cos(\alpha) = 1$ und somit die Reflektionsstrahlung = 0.

Die Erdoberfläche reflektiert die auftreffende Globalstrahlung je nach Oberflächenbeschaffenheit, dieser Reflektionskoeffizient wird auch Albedo Koeffizient genannt. Werte können der Tabelle 2 entnommen werden.

Die Reflektionsstrahlung kann nun wie folgt beschrieben werden:

$$R = (I_N + D_H) * \rho * \frac{(1 - \cos(\alpha))}{2} \quad \{17\}$$

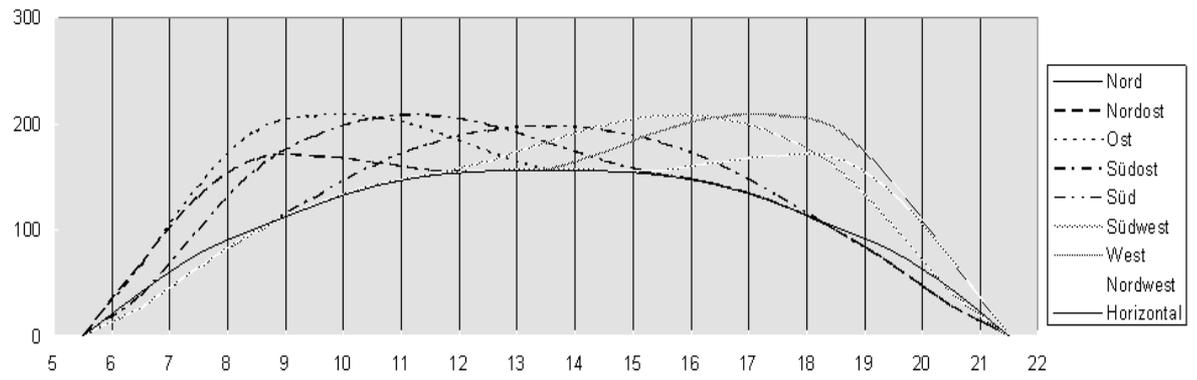
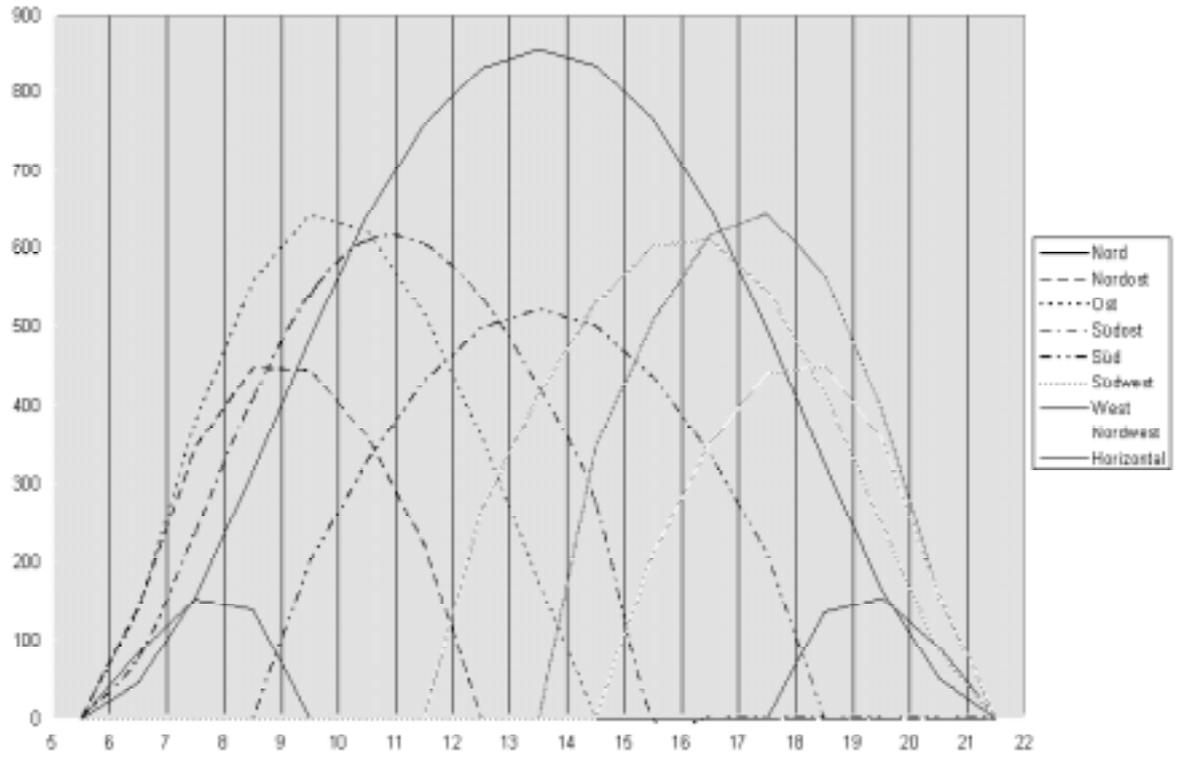
Globalstrahlung auf eine beliebig orientierte Fläche

Unter Globalstrahlung versteht man die gesamte auf eine Fläche fallende Strahlung. Die Globalstrahlung setzt sich aus der Direkt- der Himmelsstrahlung und der Reflektionsstrahlung zusammen.

Die Totale auf eine Fläche auftreffende Strahlung beträgt also

$$G_{TOT} = I + H + R = I_N * \cos(\Theta) + D_H * \frac{(1 + \cos(\alpha))}{2} + (I_N + D_H) * \rho * \frac{(1 - \cos(\alpha))}{2} \quad \{18\}$$

Diagramme zur Illustration der Direkt- und Diffusenstrahlung für Luzern am 23.Juni.



Trübung	B
Klare Luft im Winter	0.05
Landluft bei schönem Wetter	0.1
Stadtluft bei schönem Wetter	0.15
Luft bei starkem Dunstgehalt	0.2
Sehr dunstige Luft, schwüler Sommertag	0.25

Tabelle 1 Schüppsche Trübungskoeffizienten Daten aus [3]

Albedowert zur Bestimmung der Bodenreflektion	r
Oberfläche trocken	0.20
Oberfläche feucht	0.25
Oberfläche nass	0.30
Oberfläche gefroren, ohne Schnee	0.25
Oberfläche eisbedeckt, ohne Schnee	0.30
Schnee, weniger als die Hälfte des Bodens	0.40
Schnee, mehr als die Hälfte des Bodens	0.50
Schnee, ganzer Boden	0.70
Wasseroberfläche bei 40 - 50° Sonnenhöhe	0.07-0.10
Acker, Wiese	0.10-0.20
Wald	0.05-0.10
Stadt, Siedlung	0.10-0.30
Schwarzer Körper, totale Absorption	0

Tabelle 2 Albedowerte Daten aus [3]

[1] Gesundheitsingenieur 97 1976 Heft 12

[2] Sonnenenergie, A.Goetzberger/V.Witter, Teuber Studienbücher 1986

[3] Kühlleistungsbedarf von Gebäuden, SIA D088

Wichtig ! Bei allen Berechnungen müssen die Winkel in Altgrad eingesetzt werden

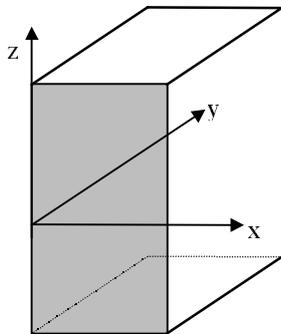
Anhang D) Mathematische Herleitung des gewählten expliziten Differenzenverfahrens aus [54]

1-dimensionale Probleme:

Als Ansatz der Herleitung dient die dreidimensionale Wärmeleitungsgleichung:

$$(1) \quad \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\lambda}{\rho c} \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right)$$

“
”



Da die Temperatur in der (y,z)-Ebene als konstant angenommen wird, ergibt sich für die ebene Wand:

$$\frac{\partial T}{\partial y} = \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} = \frac{\partial T}{\partial z} = \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} = 0$$

Dadurch reduziert sich das Problem des Wärmedurchgangs auf die Lösung der eindimensionalen Wärmeleitungsgleichung

$$(2) \quad \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\lambda}{\rho c} \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} \quad (\text{Poissongleichung})$$

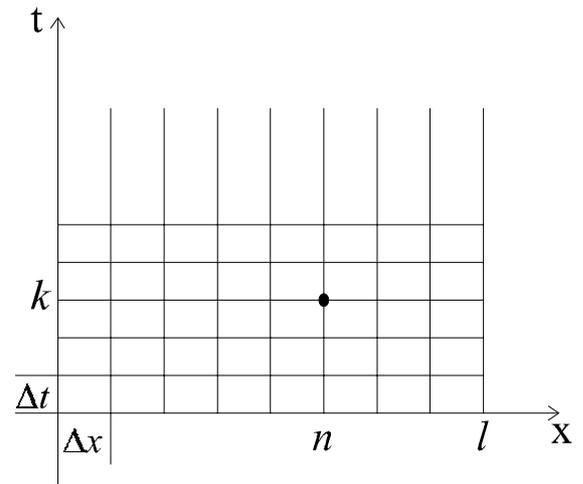
Tabelle 2

Allgemein beruht das Differenzenverfahren für partielle Differentialgleichungen auf dem Ersetzen der Differentialquotienten ($\frac{\partial T}{\partial t}$, $\frac{\partial T}{\partial x}$, $\frac{\partial^2 T}{\partial x^2}$, etc.) durch die entsprechenden Differenzenquotienten:

$$\frac{\partial f(x,y,z)}{\partial x} = \lim_{\substack{\Delta x \rightarrow 0 \\ \Delta x > 0}} \underbrace{\frac{f(x + \Delta x, y, z) - f(x, y, z)}{\Delta x}}_{\text{Vorwärtsdifferenz}} = \lim_{\substack{\Delta x \rightarrow 0 \\ \Delta x > 0}} \underbrace{\frac{f(x, y, z) - f(x - \Delta x, y, z)}{\Delta x}}_{\text{Rückwärtsdifferenz}}$$

Tabelle 3: Diskretisierung:

Die numerische Berechnung erfordert eine Diskretisierung des zu berechnenden Elementes, hier der Wand. Hierzu wird die Wand der Dicke d in l gleiche Teile der Länge Δx eingeteilt. Ebenso wird ein diskreter Zeitschritt Δt eingeführt. Dadurch ergibt sich die Situation rechts.



Die Funktion $T(x, t)$ wird bei diesem Verfahren nur noch an den Punkten $(n\Delta x, k\Delta t)$ für $n = 1..l$ und $k = 0 \dots$ ausgewertet. Durch die Konvention: $T_{n,k} := T(n\Delta x, k\Delta t)$ folgt bei der Ersetzung der Differentialquotienten durch die Differenzenquotienten:

$$(3) \quad \frac{\partial T(n\Delta x, k\Delta t)}{\partial t} = \frac{T(n\Delta x, k\Delta t + \Delta t) - T(n\Delta x, k\Delta t)}{\Delta t} = \frac{T_{n,k+1} - T_{n,k}}{\Delta t}$$

$$(4) \quad \frac{\partial T(n\Delta x, k\Delta t)}{\partial x} = \frac{T(n\Delta x + \Delta x, k\Delta t) - T(n\Delta x, k\Delta t)}{\Delta x} = \frac{T_{n+1,k} - T_{n,k}}{\Delta x}$$

Zweimaliges Ersetzen des Differentialquotienten durch den Differenzenquotienten (zuerst Vorwärtsdifferenz, dann Rückwärtsdifferenz) ergibt folgenden Ausdruck:

(5)

$$\begin{aligned} \frac{\partial^2 T(n\Delta x, k\Delta t)}{\partial x^2} &= \frac{1}{\Delta x} \left(\frac{T(n\Delta x + \Delta x, k\Delta t) - T(n\Delta x, k\Delta t)}{\Delta x} - \frac{T(n\Delta x, k\Delta t) - T(n\Delta x - \Delta x, k\Delta t)}{\Delta x} \right) \\ &= \frac{1}{\Delta x^2} (T_{n+1,k} + T_{n-1,k} - 2T_{n,k}) \end{aligned}$$

(3) und (5) in (2) ergeben:

$$(6) \quad \frac{T_{n,k+1} - T_{n,k}}{\Delta t} = \frac{\lambda}{c\rho} \frac{1}{\Delta x^2} (T_{n+1,k} + T_{n-1,k} - 2T_{n,k})$$

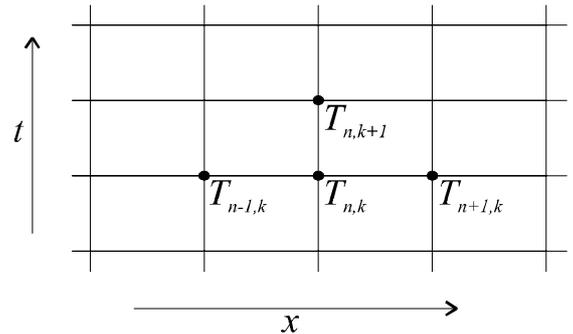
In dieser Gleichung sind vier Auswertungen von T zum Zeitschritt k und eine Auswertung zum Zeitschritt $k+1$ enthalten. Durch Umformen erhält man folgende Rechenvorschrift:

7)

$$T_{n,k+1} = \frac{\lambda}{c\rho} \frac{\Delta t}{\Delta x^2} (T_{n+1,k} + T_{n-1,k} - 2T_{n,k}) + T_{n,k}$$

Abbildung 39: Zeitpunkt k+1

Das heißt, daß sich bei gegebenen Werten für T zum Zeitpunkt k die Werte von T zum Zeitpunkt $k+1$ berechnen lassen.



Ausnahme bilden die Randwerte des Rechengebietes ($n = 1, l$). Für sie müssen weitere Randbedingungen bekannt sein. Anhand der Randbedingungen und einem gegebenen Startzustand für $t = 0$ lassen sich also alle Werte $T_{n,k}$ berechnen.

Anhang E) Stoffwerte

Beispiele für die Strahlungszahl aus [21]

Stoff und Oberflächenzustand	Strahlungszahl
	[W/[K⁴*m²]
absolut schwarzer Körper	5,77
Metalle:	
Silber, poliert	0,12 bis 0,17
Kupfer, poliert	0,17
Aluminium, walzblank	0,23
Nickel, poliert	0,26
Eisen, abgeschmiegelt	1,4
Eisen mit Gußhaut	5,2
Eisen, stark verrostet	4,9
Stoffe aller Art:	
Asbestzement	5,6
Dachpappe	5,4
Gips	5,2
Glas	5,4
Holz	5,4
Papier	5,4
Porzellan	5,4
Reifbelag	5,7
Ziegelstein, Mörtel, Putz	5,4
Anstriche:	
Aluminiumbronzeanstrich	1,2 bis 2,3
Emaillack, schwarz	5,2
Spirituslack, schwarz	4,8
Heizkörperlack	5,4
beliebte Lacke, Ölfarben und dgl.	4,9 bis 5,5

Durchschnittswerte für die spezifische Wärmekapazität c in [J/kgK] einiger Stoffe und Rechenwerte nach DIN 4108 Teil 4 nach [22]

Stoff	Wert	Rechenwert
	nach [4]	DIN 4108
Anorganische Bau- und Dämmstoffe		1000
Beton	921	-
Gasbeton	1047	-
Glas, Glasfaser	795-880	-
Gips	837	-
Schlackenwolle	753	-
Holz, Holzwerkstoffe	1357-1800	2100
Pflanzl. und textile Fasern	-	1300
Kork	1675	-
Papier, Pappe	1340	-
Schaumstoffe	1885	1500
Kunststoffe	-	1500
Acrylglas	1465	-
Polycarbonat	1214	-
Polyester	1507	-
Polyamid	1717	-
Kautschuk, Bitumen	2303	-
Aluminium	921	800
Sonstige Metalle	-	400
Eisen, Stahl	461	-
Cr-Ni-Stahl	477	-
Kupfer, Zink	377	-
Zinn	234	-
Blei	130	-
Luft	1005	1000
Wasser	4187	4200
Eis $_ + 0 \text{ } ^\circ\text{C}$	2115	-

Wert für das Emissionsverhältnis e bei Temperaturen bis 100°C und das Absorptionsverhältnis A von Sonnenstrahlung für verschiedene Baumaterialien aus [22]

Baustoff und/oder Oberflächenbeschaffenheit	e	A [%]
Aluminium, matt	0.055	52
Aluminium, poliert	0.039 - 0.057	26
Faserzement, weiß	0.960	30
Faserzement, hellgrau (neu)	0.960	50
Faserzement, hellgrau (alt)	0.960	70
Faserzement, ziegelrot	0.960	73
Faserzement, rostbraun	0.960	90
Faserzement, dunkelgrau	0.960	94
Beton, glatt grau	0.620	55
Betondachstein - Faserzement		
Bitumendachbahn	0.910	88
Glas s = 4,5 mm	0.940	4
Glas s = 7,0 mm	0.940	8
Holz, naturfarben	0.70-0.90	59
Kupfer	0.770	64
Naturstein, hell, geschliffen	0.400	35
Naturstein, dunkel, geschliffen	0.400	50
Schiefer	0.870	90
Stahl, blank	0.128	45
Stahl, verzinkt	0.280	64
Tonziegel, rot	0.930	72
Tonziegel, hellbraun	0.930	55
Tonziegel, hell glasiert	0.930	26
Wasser	0.910	-
Reif	0.970	
Eis	0.625 - 0.910	

Stoffwerte aus [6]

Die Einheit für c muß $[J/(kg K)]$ heißen! (Druckfehler in DIN)

Stoffwerte aus [2]**Sonnen-Strahlungsabsorption
verschiedener Stoffe**

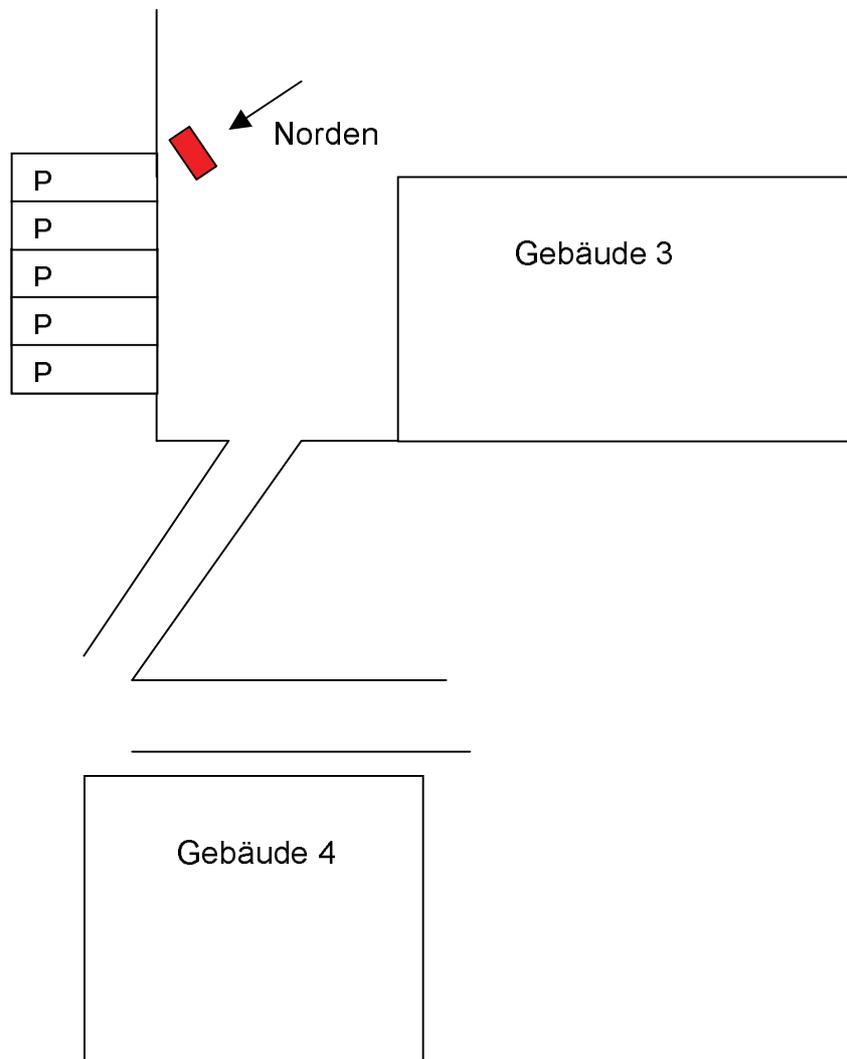
	[%]
Farbanstrich, aluminiumfarbig (Zeppelin)	20
weißer Lackanstrich auf Holz	21
Farbanstrich, weiß (Lithopone)	26
Aluminiumbronze	54
Farbanstrich, braun, grün	79
Farbanstrich, schwarz, schwarzes Papier	94
Kupfer, poliert	18
Kupfer, matt	64
Aluminium, roh	63
Zinkblech o. ä., neu	64
Bleiblech, alt	79
galvanisiertes Eisen, schmutzig	94
Alufolie, glänzend	34
Papier, zitronengelb	47
Papier, rot, grün	52-57
Papier, kobaltblau	66
Dachpappe, grün, braun	85-90
Gußasphalt, alt	88
Beton und Mörtel	ca. 60
Asbestzementplatten, naturfarbig, neu	42
Asbestzementplatten, 1 Jahr alt	71
Schieferplatten	90
Holz	35
weiße Keramikplatten	18
Ziegelstein, rot	56
Dachziegel, rot	43
Linoleum	85

1 Richtwert für die Wärmespeicherung von Luft, Werkstoffen und Wasser im Temperaturbereich von etwa 0 bis 100°C

	Wh/kg kWh/m ² K	
Luft	0,3	0,4
Glaswolle	0,23	10
Styropor	0,41	8
Schlackenwolle	0,23	11
Holzfasерplatten (200 kg/m ³)	0,37	74
Korkstein, expand. und impr. (230 kg/ml)	0,38	87
Kork (200 kg/m ³)	0,47	76
Korkstein, natur (200 kg/m ³)	0,49	98
Torfplatten (300 kg /M ³)	0,52	157
Holz (Fichte) (600 kg/m ³)	0,58	348
Gasbeton, Bimsbeton o. A. (800 kg/m ³)	0,28	224
Schlacke	0,21	314
Holz (Eiche) (800 kg /m ³)	0,58	464
Sand, lufttrocken	0,23	358
Blei	0,036	410
Ziegelmauerwerk (1600 kg/m ³)	0,26	416
Kalkmörtel (1800 kg/M ³)	0,28	504
Gummi	0,43	465
Zementmörtel (2000 kg/m ³)	0,28	560
Bitumen	0,47	517
Eis (916 kg/m ³)	0,58	531
Asphalt	0,3	630
Steinzeug, Keramik	0,26	530
Gips	0,23	580
Tafelglas	0,23	575
Beton	0,28	668
dichte Natursteine (3100kg/m ³)	0,25	775
Aluminium	0,25	690
Zink	0,11	744
Eisen	0,13	1006
Kupfer	0,12	1047
Wasser	1,16	1163

Temperaturstrahlungszahl verschiedener Oberflächen
[W/(m²K⁴)]

blanke helle Metalle	0,09.....0,41
Aluminium, poliert	0,35
Aluminium, roh oder oxidiert	0,5
Schiefer	5
Stahl, verzinkt, verstaubt	2,5 (blank 1,5)
Kupfer, schwarz oxydiert	4
hellgrauer Marmor, poliert	4,9
Stahlblech mit Walzhaut	4,5
Aluminiumlack	2,5
weiße Kacheln, glasiert	5
Eichenholz, gehobelt	5,1
Dachpappe	5,1
Eis	3,6-5,2
Wasser, allseitige Strahlung	5,3
Wasser, senkrechte Strahlung	5,5
Reif	5,5
Gips	5,2
Bausteine und Putze	5,3
glasiertes Porzellan	5,4
Quarz, geschmolzen, rau	5,4
glattes Glas	5,3
rauher Asbestschiefer	5,5
Öl	5,4
Papier	5,5
beliebige Farben	5,3
absolut schwarzer Körper	5,77

Anhang F) Lageplan (-Skizze) der Versuchswand**Abbildung 1 Lageplan (-Skizze) der Versuchswand (bzgl. Punkt 7)**

Gelände der:
FHTW Fachbereich 2 in Blankenburg
Blankenburger Pflasterweg 102
13 129 Berlin

P = Parkplatz

Anhang G) Inhalt der beiliegenden CD***Im Hauptverzeichnis der CD-ROM:*****DynaTherm2000.xls** (Offizielles Programm DynaTherm)

Readme.htm (Inhalt ist diese Seite)

Bedienungsanleitung.doc

Im Ordner Versuchs- und Wetterdaten:

Temperaturen vom 14-1-2000_24-1-2000.XLS

Versuchsdaten vom 14.01.2000 bis zum 24.01.2000

Temperaturen vom 2-2-2000_8-2-2000.XLS

Versuchsdaten vom 02.02.2000 bis zum 08.02.2000

Im Ordner misc:

DynaTherm2000.zip (gepackte Datei; passt auf eine Diskette)

DynaTherm2000c.xls (Tabellenblätter sind mit Kennwort geschützt)

DynaTest2000.xls (Testprogramm für Vergleich in Punkt 6)

Im Ordner misc\Office 2000 version:

DynaTherm2000s.xls

(Diese Version wurde mit meinem Namen signiert, so dass hier die in Excel 2000 neu hinzugekommene Funktion „signierte Makros immer annehmen“ genutzt werden kann und die lästige „Makro-Abfrage“ beim Aufruf von DynaTherm entfällt.)

Systemvoraussetzungen

Computersystem mit voll funktionsfähig installiertem Microsoft Excel 97 oder höher.

Die Bildschirmausgabe wurde für 17-Zoll-Farbmonitore mit einer Auflösung von 1024 x 768 Bildpunkten optimiert. Für die Druckerausgabe kann ein gängiger DIN A4 Drucker verwendet werden.

Getestete Konfigurationen:

Prozessor	Mhz	RAM	Monitor	Drucker	Betriebssystem	Excel	
PC- Pentium	120	64	17 Zoll		Windows 98	97	
PC- AMDK6III	450	196	22 Zoll	Canon BJC 240	Windows 98b	2000	*
PC- Celeron	400	128	19 Zoll		Windows 98	97	

*Die komplette Programmierung erfolgte auf diesem System

	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 Qs 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

Literaturverzeichnis

[n]

- 1 Alois, Jurnik
Temperaturamplitudendämpfung von Baukonstruktionen
Forschungsbericht , IRB Verlag
1987 Wien
- 2 Bobran, Hans Werner; Bobran, Ingrid
Handbuch der Bauphysik
Vieweg Verlag, Braunschweig
1990
- 3 Bunte, D. Prof. Dr.
Zum karbonatisierungsbedingten Verlust der Dauerhaftigkeit von
Außenbauteilen aus Stahlbeton
Dissertation: Fachbereich für Bauingenieur- und Vermessungswesen
der Technischen Universität Carolo-Wilhelmina zu Braunschweig
1993
- 4 Cammerer, J.S.
Tabellarium aller wichtigen Größen für den Wärme- und Kälteschutz.
11 Auflage, Rheihold & Mahla AG
1973
- 5 Davidescu, A. und Zerbrasca, V.
Die thermische Stabilität stark bestrahlter Gebäude im Sommer
LKT 6, H.4,S. 190-197
- 6 DIN Deutsche Institut für Normung e.V.
DIN Taschenbuch 158, Wärmeschutz 1
Bauwerksplanung, Wärmeschutz, Wärmebedarf
6. Auflage, Berlin
1998
- 7 Ehm, Herbert
Was bringt die Energieeinsparungsverordnung 2000?
Die Bauphysik, Heft 6 1999; Ernst&Sohn
1999
- 8 Franke, H. Dipl.Ing.
Über die Temperaturverteilung in dünnen Betonkonstruktionen,
insbesondere in zweischichtigen Betonwänden infolge der
Extremalwerte der Lufttemperatur und der Sonneneinstrahlung
Fortschritt - Berichte, VDI-Zeitung, Reihe 4, Nr.12,
Düsseldorf,
1968 Dezember

- 9 Franke, H. Dipl.Ing.
Temperaturverteilung und Wärmefluß in mehrschichtigen Wänden bei instationären Umgebungslufttemperatur und Sonnenbestrahlung
Die Bautechnik, 7/1970 und 8/1970
1970
- 10 Gertis, K; Hauser, G
Instationärer Wärmeschutz
Heft 103, Berichte aus der Bauforschung; Berlin
1975
- 11 Gertis, K; Johann Reiß, Christian Wetzel, Herbert Sinnesbichler
Sind neue Fassadenentwicklungen bauphysikalisch sinnvoll? Teil 1 u. Teil 2
Heft 1 und Heft 2, Die Bauphysik; Ernst&Sohn
1999
- 12 Gertis, K;
Energieeinsparung im Altbau – Solartechnik fragwürdig!
Heft 105, Die Bauphysik; Ernst&Sohn
1999
- 13 Gertis, K
Belüftete Wandkonstruktionen
Heft 72, Berichte aus der Bauforschung; Ernst&Sohn München, Berlin
1972
- 14 Günter P. Marker Dr.-Ing. und Sander H. Dr.-Ing.
Berechnung der Temperaturverteilung in Betonbauteilen infolge klimatischer Einflüsse
Beton + Fertigteiltechnik, Heft 1/1976 und Heft 12/1976
1987
- 15 Brosius, Gerhard, Brosius Felix
Excel 2000 Professionell
Addison – Wesley, München
1999
- 16 Hampfler, H.:
Berechnung von Temperatur-, Feuchte- und Verschiebungsfeldern in erhärtenden Betonbauteilen nach der Methode der finiten Elemente.
Heft 395, der Schriftenreihe des Deutschen Ausschusses für Stahlbeton; Berlin
1988
- 17 Heynert, P; Bauerfeld, W.L.
Die Behandlung instationärer Wärmeleitprobleme in Räumen mit Hilfe der Methode der digitalen Simulation
Heft 10, S.292; Gesundheits- Ingenieur 93
1972

- 18 Herbert Schuh,
Differenzenverfahren zum Berechnen von Temperatur-
Ausgleichsvorgängen bei eindimensionaler Wärmeströmung in
einfachen zusammengesetzten Körpern
VDI Forschungsheft 459 Ausgabe B Band 23; Düsseldorf VDI Verlag
GmbH
1957
- 19 Johannsen, K.:
Ermittlung von Temperaturen und Wärmeströmen in beliebig
geschichteten ebenen, zylindrischen und kugelförmigen Wänden bei
nicht stationären Verhältnissen nach der Methode der finiten Elemente.
Die Bautechnik, H. 3, 5. 80-89,
1970.
- 20 Koch, H.A.
Bestimmung des thermischen Verhaltens von Schichtwänden. Kritische
Betrachtungen über die praktische Verwendung der Heindl-Methode.
Bautechnik 48, Heft 1, S.25-30
1970
- 21 Liersch, Klaus W.:
Belüftete Dach- und Wandkonstruktionen
Band1: Vorhangfassaden
Bauverlag GmbH, Wiesbaden Berlin
1981
- 22 Liersch, Klaus W.:
Belüftete Dach- und Wandkonstruktionen
Band3: Dächer
Bauverlag GmbH, Wiesbaden Berlin
1986
- 23 Liersch, Klaus W.:
Basic-Programme für den baulichen Wärme- und Feuchteschutz
Werner Verlag, Düsseldorf
1988
- 24 Köhne, H.
Digitales Beukenmodell mit nicht konstanten Koeffizienten – eine
Matrixmethode zur Lösung nichtlinearer Ausgleichsvorgänge.
Wärme und Stoffübertragung 3, S.243-246
1970
- 25 Nadler, Norbert
Kombinierte Außentemperatur mit langwelligen Reflexionen an der
terrestrischen Umgebung
Heft 6; Gesundheitsingenieur; Oldenburg Industrieverlag
1997

- 26 Nehring, G.
Über den Wärmefluß durch Außenwände und Dächer in klimatisierte Räume infolge der periodischen Tagesgänge der bestimmenden meteorologischen Elemente
Dissertation: Fakultät für Maschinenwesen der Technischen Universität Berlin
1961
- 27 Raiß, Wilhelm
Heiz und Klimatechnik
Erster Band
15. neubearbeitete Auflage, Springer Verlag Berlin Heidelberg New York
1970
- 28 Recknagel, Prof.Dr. A
Physik – Schwingungen und Wellen
Verlag Technik, Berlin
1958
- 29 Schwarz, Dr.-Ing. B.
Die Wärme- und Stoffübertragung an Außenwandoberflächen
Berichte aus der Bauforschung, Heft 79
1972
- 30 Schwarz, H.R.
Numerische Methoden
B. G. Teubner Verlag, Stuttgart
1997
- 31 Schneider, Klaus Jürgen
Bautabellen für Ingenieure
11. Auflage, Werner-Verlag, Düsseldorf
1994
- 32 Staniszewski, B.; Suski, J.
The solution of unsteady heat conduction problems in composite walls via the Monte-Carlo-Method
IIR-Kongress in Lüttich, Bericht Nr.19
1969
- 33 Stoffel Alexander
Finite Elemente und Wärmeleitung
VCH Verlags- AG, Basel
1992
- 34 Walter F. Cammerer
Wärme und Kälteschutz im Bauwesen und in der Industrie
Springer Verlag, Berlin Heidelberg - Germany
1995

- 35 Verein Deutscher Ingenieure
VDI – Wärmeatlas
Springer Verlag, Berlin Heidelberg
1997
- 36 J.P. Holman
Heat Transfer - 8th Edition
Mc Graw-Hill Companies USA
1990

Web links (letzte Überprüfung 01.03.2000)

- 51 Astronomische Zeitmessung
http://www.maa.mhn.de/Scholar/dt_times.html
- 52 Bemerkungen zum Schatten - Calculator
<http://www.windpower.dk/de/tour/env/shadow/guide.htm>
- 53 ENBI 180
<http://www.peterer.ch/ENBI/enbi180.htm>
- 54 Energiemanagement in Gebäuden
<http://www.re.e-technik.uni-kassel.de/re/vorlesung/em/Startseite/Startseite.html>
- 55 Lehrstuhl für Nukleare und Neue Energiesysteme - Ruhr-Universität Bochum
<http://www.nes.ruhr-uni-bochum.de/for/sunorb.html>
- 56 Sonnen - Applet
http://mgw.dinet.de/physik/Sonnen_Applet/Sonnen_Applet.html
- 57 Sonneneinstrahlung (Prof.M.Trawnika / A.Wirz)
<http://www.ztl.ch/abteil/hlk/projekte/sonnenst/sonnenst.htm>
- 58 Sonnenstands-Berechnung Rechnen Sie hier aus wann die Sonne auf- und untergeht
<http://cactus2000.virtualave.net/german/sonne/index.htm>
- 59 Temperaturfeldberechnungen mit MSC.NASTRAN für Windows
<http://www.fem.de/thermal.htm>
- 60 Wärmedurchgangsberechnung Software
http://www.softguide.de/prog_w/pw_0052.htm

weitere Infos, Kontakt und Dokumente unter:

<http://dynatherm.blogspot.com/>

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