

ISSN 0366-1296

Forschungsbericht 53

BUNDESANSTALT FÜR
MATERIALPRÜFUNG (BAM)

BERLIN

**Bemessung und Optimierung beheizbarer
Straßen- und Brückenbeläge**

von Rolf Günter Rohrmann und Reinald Rudolphi

Oktober 1978

68 Seiten, 144 Bilder, 9 Tabellen

Die vorliegende Arbeit wurde aus Mitteln
des ERP-Sondervermögens zur Förderung der
wirtschaftsdienlichen Forschung in Berlin
unterstützt.

ERP 2306

Herausgegeben von der
Bundesanstalt für Materialprüfung (BAM)
Unter den Eichen 87, 1000 Berlin 45
Telefon (030) 8104-1
Telex 01-83 261 bamb d

Vorwort

Für die bei der Realisierung der vorliegenden Arbeit wertvollen Diskussionen und Hinweise sei hier Herrn Dr.-Ing. E. J. Vater gedankt.

Hilfreiche Unterstützung, vor allem bei Ausführung der experimentellen Arbeiten, wurde von Herrn Dr. rer. nat. B. Böttcher gewährt.

Ein besonderer Dank gilt Herrn S. Lindemann für seine Hilfe bei der Vorbereitung und Ausführung der numerischen Rechnungen.

Inhaltsverzeichnis

	Seite
1. Einleitung	1
2. Überblick über den Stand der Erkenntnisse auf dem Gebiet der beheizbaren Beläge	1
3. Das Modell der Freiflächenheizung	3
4. Ermittlung des Temperaturfeldes	4
4.1 Berechnungsgrundlagen	4
4.2 Rechenmethoden	5
4.3 Rechenprogramm	6
4.31 Theoretische Grundlagen	6
4.32 Beschreibung des Rechenprogramms	9
4.4 Überprüfung des Rechenprogramms	10
5. Wärmeübergang an den Rändern	11
6. Meteorologische Grundlagen	13
7. Rechenmodellfindung	15
7.1 Erstellung technischer Modelle	15
7.11 Straßenbeläge	16
7.12 Brückenmodelle	17
7.2 Heizleiterabstand	17
7.3 Rechenmodell	18
8. Rechenannahmen	19
9. Überprüfung der Rechenannahmen am Experiment	20
10. Rechenergebnisse	23
10.1 Darstellungsarten	23
10.2 Untersuchungsergebnisse	24
10.21 Straßenmodelle	25
10.211 Variation des Heizleiterabstandes	25
10.212 Variation der Heizleiterüberdeckung	31
10.213 Einfluß der Strahlung	37
10.22 Brückenmodelle	40
10.221 Variation des Heizleiterabstandes	40
10.222 Variation der Heizleitertiefe	43
10.23 Einfluß von Wärmedämmschichten	46
10.231 Grundlagen	46
10.232 Modellfindung	47
10.2321 Straßenmodelle	47

10.2322	Brückenmodelle	48
10.233	Rechenergebnisse	48
10.2331	Straßenmodelle	48
10.2332	Brückenmodelle	53
10.24	Abkühlverhalten verschiedener Straßenaufbauten	55
10.25	Einfluß eines endlichen Heizleiters	59
11.	Zusammenfassung	62
	Anhang	
12.	Wirtschaftliche Betrachtung bezüglich der Wahl des elektrischen Versorgungsnetzes	63
	Literaturverzeichnis	66

Zeichenerklärung

Hier sollen die benutzten Formelzeichen erklärt werden, soweit ihre Bedeutung nicht aus dem erklärenden Text hervorgeht.

U	innere Energie des betrachteten Systems
\dot{Q}_a	von außen zugeführter Wärmestrom
A_s	Formänderungsarbeit
D	Dissipationsarbeit
$\dot{I}_{O,O}$	durch Strahlung entstandener Wärmestrom zwischen Festkörpern
$\dot{I}_{G,O}$	durch Strahlung entstandener Wärmestrom zwischen einer festen Oberfläche und einem Gaskörper
A	Fläche des wärmeübertragenden materiellen Körpers
\dot{Q}	Anteil von \dot{Q}_a , der nicht durch Wärmeleitung zugeführt wird
\dot{Q}_v	Wärmestrom zwischen Oberfläche und Umgebung infolge konvektiver Wärmeübertragung
Q	Wärmemenge infolge Heizung
T	Temperatur in °C
T_{Bo}	Oberflächentemperatur fester Körper
T_{At}	Temperatur der direkten Umgebungsluft
$\underline{\dot{q}}$	Wärmestromvektor
\dot{q}''	auf die Masseneinheit bezogener äußerer Wärmestrom, der nicht durch Wärmeleitung zugeführt wird
\dot{q}_B	Wärmestrom durch die Berandung des betrachteten Gebietes
\dot{i}_s	Wärmestromdichte infolge schwarzer Strahlung
\dot{i}	Wärmestromdichte infolge grauer Strahlung
ϵ_G	Emissions- bzw. Absorptionsfaktor von Gas bzw. Luft
ϵ_o	Emissions- bzw. Absorptionsfaktor einer festen Oberfläche
l	Heizleiterlänge
∇	Nabla-Operator $\frac{\partial}{\partial s_i}$
\cdot	zeitliche Ableitung einer Größe

1. Einleitung

Die Motivation für eine eingehendere Beschäftigung mit dem Objekt "Beheizbarer Belag" waren häufiger wiederkehrende Schadensursachen, für deren Begutachtung auch Mitarbeiter der Bundesanstalt für Materialprüfung (BAM) herangezogen wurden. Die Schäden ergaben sich im wesentlichen infolge Rißbildung im Belagsmaterial. Durch eindringendes Oberflächenwasser kam es dann u.a. zu Korrosionserscheinungen am elektrisch betriebenen Heizsystem mit nachfolgendem, meist partiellem Ausfall der Heizung. Ausfälle sind auch infolge mechanischer Überbeanspruchung der Belagskonstruktion festgestellt worden. Andere Schadensursachen wurden durch unsachgemäße Verlegung der Heizsysteme hervorgerufen, so daß sich zum einen eine partielle Überhitzung des Belages ergab, zum anderen der Forderung nach Schnee- und Eisfreiheit nicht nachgekommen werden konnte. Ein weiterer Kritikpunkt waren die hohen Betriebskosten beim Betreiben von Freiflächenheizungen.

Einsatzmöglichkeiten von derartigen Heizungen sind im wesentlichen die Verkehrsbereiche, deren mikroklimatische Verhältnisse im Rahmen einer allgemeinen Wetteranalyse nicht zu prognostizieren sind, wie es z.B. bei Autobahnbrücken oder allgemein bei Übergängen in Fußgängerbereichen der Fall ist. Aber auch für Bereiche mit plötzlich wechselnden Oberflächenverhältnissen, wie Tunnellein- und -ausfahrten, U-Bahnzugängen etc., werden beheizbare Beläge eingesetzt. Weiterhin wird deren Verwendung als Alternative zu den üblichen Methoden des Winterdienstes diskutiert – vor allem dort, wo etwa Streusalze nicht vorhersehbare Schäden verursachen können, oder auch in Bereichen mit größeren Sicherheitsrisiken wie auf Flughäfen, um die laufenden Betriebs- und Investitionskosten zu senken.

Bei einer Klassifizierung praktisch realisierbarer Systeme ist einmal nach dem Energieträger zu unterscheiden. Zum anderen wird hinsichtlich der Wirkung in Speicherheizungen und Oberflächenheizungen eingeteilt. Die nachfolgende Untersuchung der thermodynamischen Vorgänge in beheizten Verkehrsbelägen soll bei der Entscheidung für das eine oder andere System behilflich sein. Wegen der größeren Aktualität sind hier nur elektrisch betriebene Heizungen betrachtet worden.

Durch Umfragen bei den Herstellern von Freiflächenheizsystemen wurde klar, daß die Einflüsse der geometrischen Parameter auf die Temperaturentwicklung im Belag, wie etwa die Verlegungstiefe im Belag oder die Abstände der überwiegend mäanderförmig verlegten Heizkabel, häufig nur intuitiv bekannt sind. Dabei ermöglicht ein veränderter Heizleiterabstand bei gleicher spezifischer Wärmebelastung des Belages sofort auch konstruktive Veränderungen, z.B. im Heizleiteraufbau oder bei den Anschlüssen an das elektrische Netz. Die daraus resultierenden ökonomischen Konsequenzen wären abzuschätzen. In dieser Arbeit werden daher systematische Untersuchungen über den Einfluß dieser geometrischen Parameter auf die Temperatur- und Wärmestromverteilung in beheizbaren Belägen angestellt. Wegen der unterschiedlichen Untergrundverhältnisse sind dabei die Beläge in erdverlegten Straßenaufbauten und die auf Brückenkonstruktionen getrennt behandelt worden. Das Motiv war, den Einfluß des Untergrundes abzuschätzen. Aus Zeitgründen konnten auch nur Stahlbrücken betrachtet werden. Die Konstruktion der Beläge wurde den gültigen Vorschriften, erarbeitet und vorgeschlagen von der Forschungsgesellschaft für das Straßenwesen und erlassen vom Bundesminister für Verkehr, angepaßt.

Als Variation der Werkstoffparameter wurden in diesem Zusammenhang alternativ Zementbeton-, Kunstharz- und bituminöse Beläge untersucht.

Bei der Betrachtung des Einflusses der Heizleitertiefe auf die Wirkung der Heizung fällt automatisch der Blick auf den Anteil der investierten Heizenergie, die ungenutzt im Untergrund verschwindet. Aus diesem Grund wurde hier, gewissermaßen als Diskussionsbeitrag, der Einfluß von verschiedenen Wärmedämmschichten im Belagsaufbau bei ausgesuchten, festen geometrischen Verhältnissen untersucht. Dabei sollen die angeführten Beispiele keinen Anspruch auf Allgemeingültigkeit haben, sondern sich als Motivation für weitere Überlegungen zu diesem Problem verstehen. Ein weiterer Untersuchungspunkt ist der Einfluß des Heizleiteraufbaus mit seinen geometrischen und materiellen Eigenschaften auf die Temperaturentwicklung. Aus diesem Grund wurde eine ausgesuchte Menge von verschiedenen, auf dem deutschen Markt befindlichen Heizleitertypen auf ihre thermodynamischen Eigenschaften untersucht. In diesem Zusammenhang ist noch zu sagen, daß neben den Heizsystemen mit ausgeprägten Heizleiterabständen auch das Modell der Flächenheizung, einer Heizmatte, betrachtet wurde.

Da die Untersuchung der eben genannten Einflüsse auf experimentellem Weg einen großen Zeit- und Kostenaufwand verursachen würde, wurde hier ein theoretisches Modell entworfen, und die anstehenden Fragen mit Hilfe eines Rechenprogrammes geklärt. Hierbei handelt es sich um ein Programm, welches die ebenen, instationären Temperatur- und Wärmestromverteilungen in der betrachteten Struktur simuliert. Die Rechenergebnisse sind dann mittels eines Plotterprogramms unmittelbar graphisch dargestellt worden.

2. Überblick über den Stand der Erkenntnisse auf dem Gebiet der beheizbaren Beläge

In diesem Zusammenhang soll eine Auswahl von Veröffentlichungen vorgestellt werden, in denen versucht wird, ein möglichst optimales Freiflächenheizsystem zu entwickeln. Mit dieser kurzen Zusammenstellung soll ein Überblick geschaffen werden, um den eigenen Arbeitsbereich abgrenzen zu können. Die weiter unten erwähnte Befragung von Herstellerfirmen beheizbarer Beläge soll einen Beitrag zur Klärung des aktuellen technologischen Stands auf diesem Gebiet leisten.

a) Literatur

Die Arbeit von *Behr* [29] stellt eine Erfahrungssammlung über die Handhabung von Straßenheizungen im europäischen Bereich bis etwa 1968 dar. Im Auftrage des Bundesministers für Verkehr sind dort im wesentlichen wirtschaftliche Gesichtspunkte betrachtet worden und Analysen der anfallenden Bau-, Betriebs- und Unterhaltungskosten sowie der Reparaturanfälligkeit verschiedener Systeme erstellt worden. Bei den Betriebskosten diskutiert *Behr* u.a. die verschiedenen Möglichkeiten der Stromversorgung im Zusammenhang mit dem Problem der hohen Grundgebühren. Die beiden Möglichkeiten Oberflächenheizung und Speicherheizung werden im Zusammenhang mit dem Problem der Temperaturregelung erwähnt. Außerdem werden Vorschläge für den Einbau von Wärmedämmschichten unterhalb des Heizsystems erwähnt.

Williams [39] hat sich im Auftrage des National Research Council of Canada u.a. mit den Verhältnissen des Wärmeübergangs zwischen der Oberfläche beheizbarer Beläge und der atmosphärischen Umgebung beschäftigt. Neben der Gegenüberstellung von Ergebnissen anderer Forscher macht er An-

gaben über die Bestimmung des Wärmeübergangskoeffizienten unter Berücksichtigung von erzwungener Konvektion und Strahlung. Zwecks genauerer Erfassung der notwendigen Heizleistung bei der Forderung nach Schnee- und Eisfreiheit wird hier versucht, die einzelnen Anteile am Gesamtwärmeverlust klarer zu beschreiben.

In der Arbeit von *Wahl* [35] werden Fragen nach dem Aufbau und der Lage von Heizleitern im Belag gestellt. Anhand von Heizversuchen auf einer Beton-Autobahnbrücke wurde dort versucht, die Zusammenhänge zwischen Heizleitertiefe und dem thermischen Verhalten des Belages zu untersuchen. Angaben über Meßergebnisse sind in [35] nicht gemacht worden. Statt dessen werden konstruktive Vorschläge zur Senkung der Fertigungs- und Betriebskosten von Heizsystemen gemacht.

Bei *Kast* [31] werden unter Berücksichtigung aller im System vorhandenen Wärmeübertragungsmöglichkeiten analytische Rechnungen angestellt. Dabei steht die Frage "welche Wirkung sich an der Belagsoberfläche nach welcher Zeit unter vorgegebenen Voraussetzungen einstellt" im Vordergrund. Der Einfluß der Schichtdicke wird lediglich unter bereits bekannten Gesichtspunkten erwähnt. Nach Betrachtung der Wärmeströme, die ungenutzt in den Untergrund fließen, wird von *Kast* die Bedeutung eines wärmedämmenden Untergrundes beschrieben. Die durchgeführten Rechnungen beschränken sich auf eindimensionale Verhältnisse und bezüglich der stofflichen Umgebung auf einen zweischichtigen Aufbau des Belages.

Eine der umfangreichsten Arbeiten zu Detailproblemen beim System beheizbarer Belag wird von *Williamson* [30] [32] vorgelegt. Einige der wesentlichsten Punkte sind dabei, ähnlich wie in [39], die Ermittlung der Wärmeübertragungsverhältnisse von der Belagsoberfläche an die Atmosphäre. Dabei werden u.a. auch die unterschiedlichen Verhältnisse bei Straßen auf Erdplanum und denen auf Hochstraßen oder Brücken gezeigt; ebenso wird der Einfluß von feuchten Oberflächen untersucht. Bei der Berechnung der Mindestheizleistung jedoch werden die Wärmeverluste in den Untergrund nur überschläglich abgeschätzt. Der Einfluß der Abkühlung der Oberfläche nach beendeter Erwärmung wird unter dem Gesichtspunkt eines günstigen Energieangebotes in den Nachtstunden betrachtet. Die Auswirkungen der Heizleitertiefe werden zwar erwähnt, aber deren Beschreibung erfolgt nicht exakt genug und schon gar nicht unter dem Gesichtspunkt eines inhomogenen Temperaturfeldes an der Oberfläche.

Weise [28] beschäftigt sich mit der Wirkung von Bodenheizungen, deren Energieträger Warmluft ist. Die Angaben zur notwendigen Heizleistung und den damit verbundenen Betriebskosten bei verschiedenen Systemen (Oberflächen- oder Speicherheizung) müssen hier jedoch bezweifelt werden. Die Angaben zur notwendigen Heizleistung für definierte Bedingungen beruhen auf recht groben Abschätzungen. Die angegebenen Berechnungen zum Temperaturfeld innerhalb des Belages beruhen auf einer Dipoltheorie mit der Belagsoberfläche als Symmetrieachse. Darüber hinaus werden für dieses Verfahren lineare Verhältnisse vorausgesetzt, wie sie z.B. bei einem Schichtenaufbau schon nicht mehr der Fall sind. Außerdem muß hier eine konstante Belagstemperatur von 0°C angenommen werden. Diese Methode eignet sich also, wie auch *Böttcher* [34] schreibt, höchstens für die Untersuchung der Temperaturverhältnisse in unmittelbarer Nähe der Heizleiter. Bezüglich einer optimalen Heizleitertiefe in Hinsicht auf größtmögliche Wärmeabgabe vom Heizleiter an die Um-

gebung soll in diesem Zusammenhang auf eine Arbeit von *Elgetti* [26] verwiesen werden, der jedoch stationäre Verhältnisse für seine Untersuchungen voraussetzt. In [34] beschreibt *Böttcher* ein Verfahren, das qualitativ auch Temperaturunterschiede an der Belagsoberfläche infolge diskreter Linienheizer beschreiben kann und somit ebene Temperaturfelder darstellt. Der schwache Punkt der Methode ist jedoch, daß die Wärmeverluste durch Konvektion und Abstrahlung nur abschätzungsweise berücksichtigt werden können bzw. nicht betrachtet werden. Die Notwendigkeit, ein ebenes Temperaturfeld beschreiben zu müssen, ergab sich bei der Beurteilung eines Schadens, der durch lokale Überhitzung des Heizbelages hervorgerufen war.

Ein konstruktiv neuartiges Heizsystem wird von *Strube* in [27] vorgestellt. Dabei handelt es sich um Heizmatten, die aus elektrisch leitenden, rußbeschichteten Kunststoffolien bestehen. Der Vorteil einer derartigen Heizung ist das sich aufbauende homogene Temperaturfeld mit niedrigen Betriebstemperaturen, so daß die oben beschriebenen Probleme vermieden werden können. Schwierigkeiten gibt es jedoch infolge einer Minderung der Verbundfestigkeit des Belagaufbaus.

Um die Verlustwärme infolge Leitung in den Untergrund zu vermindern, hat *Eisenmann* die in [71] beschriebenen Heizversuche mit einer zusätzlichen Wärmedämmschicht unterhalb der Heizebene unternommen. Im Vergleich mit einem ungedämmten Aufbau wird die erzielte Wirkung beschrieben. Nachteil dieser wie jeder experimentellen Untersuchung ist die geringe Anzahl von möglichen Belagsaufbauvarianten. Damit gilt das Ergebnis nur für das eine Randwertproblem und hat somit eine beschränkte Aussagefähigkeit. Zum Schluß soll noch auf die von der AGI [37] herausgegebene Arbeitsunterlage hingewiesen werden, die in allgemeiner Form auf die Möglichkeiten und die Probleme beim Einbau und der Benutzung von Freiflächenheizungen hinweist.

Nach dieser Darstellung wird erkennbar, daß die überwiegende Anzahl von Arbeiten sich mit der Erfassung des Gesamtwärmeverlustes zwecks Bestimmung der Heizleistung beschäftigen. Darüber hinausgehende Untersuchungen wie z.B. eine genaue Analyse der instationären Temperaturfelder erfordern natürlich einen größeren mathematischen Aufwand.

b) Befragung von Herstellerfirmen

Um einen aktuellen Überblick über den gegenwärtigen technologischen Stand von Freiflächenheizsystemen und deren Einsatz zu bekommen, wurde 20 Hersteller- und Verarbeiterfirmen ein Katalog mit Fragen zugeschickt. Dreizehn Antworten waren positiv. Diese sollen im folgenden zusammengefaßt wiedergegeben werden:

1) Aufbau und Wirkungsweise von Freiflächenheizsystemen:

Häufigster Energieträger ist elektrischer Strom. Überwiegend werden noch diskrete Systeme benutzt, d.h. Heizkabel, die mäanderförmig verlegt werden. Die Heizmatte befindet sich im Versuchsstadium. Von einer bestimmten Mindestgröße an wird der Einsatz der Heizung von einem Regelsystem kontrolliert. Dabei wird die Notwendigkeit zum Heizen von sogenannten Glatteiswarngeräten festgestellt, die je nach Konstruktion auf die Meßgrößen Boden- und Lufttemperatur sowie Oberflächenfeuchte reagieren. Andere sind in der Lage, durch zusätzliches Messen der Luftfeuchtigkeit den Einsatzzeitpunkt der Heizung vorzubestimmen.

Um hohe Anschlußgebühren für große Gesamtleistungen zu

vermeiden, wird die "Intervallheizung" eingesetzt, so daß immer nur ein bestimmter Bereich der gesamten Fläche wechselweise im Heizeinsatz ist. Für verschiedene benötigte Heizleistungen, z.B. zum Halten einer konstanten Bodentemperatur, wird der Strom über eine Stern-Dreieck-Schaltung zugeführt.

2) Verwendete Belagsmaterialien

Aus Gründen eines kontinuierlichen Arbeitsverlaufes beim Bau von Verkehrswegen kommen als Überdeckungsmaterialien der Heizelemente überwiegend die Baustoffe in Frage, die zum übrigen Aufbau ebenfalls benutzt werden, wie z.B. Beton oder Gußasphalt. Dabei sollte darauf geachtet werden, daß die Wärmeausdehnungszahlen von Heizleiter und Umgebungsmaterial etwa gleich sind. Bei Oberflächenheizungen mit geringer Überdeckungstiefe werden Fahrbahnbeläge auf Kunstharzbasis erstellt. Diese haben den Vorteil, daß sie neben einer hohen Abriebfestigkeit und weiteren guten mechanischen Festigkeiten aufgrund ihrer geringen Masse eine kleine Eigenbelastung, z.B. auf Brücken, darstellen.

3) Geometrische Daten zur Heizleiterverlegung

Die Antworten zu diesem Komplex zeigen, daß bei den Herstellern zu der Frage nach günstigster Heizleiteranordnung noch erhebliche Unsicherheiten bestehen. Bei den Abständen zwischen je zwei Heizdrähten wurde ein Spektrum von 2,5 bis 16,5 cm festgestellt. Die Einbautiefe wurde je nach Belagsmaterial zwischen 0,8 cm und 10 cm angegeben.

4) Technische Ausführung der Heizleiter und deren Heizleistung

Der Aufbau der verschiedenen Heizleitermodelle zeigt keine Einheitlichkeit. Je nach Einbettungsmaterial wird versucht, die Heizkabel selbst mehr oder weniger mechanisch flexibel zu halten, um die Wirkung unterschiedlicher Wärmeausdehnungen in der Umgebung des Heizdrahtes auszugleichen. Die elektrische Isolierung des stromführenden Drahtes wird entweder durch klassische Nichtleiter, wie z.B. Magnesiumoxid, oder aber durch Kunststoffe realisiert. Die Anforderungen an die mechanische Belastbarkeit des Heizleiters werden von den Herstellerfirmen anscheinend unterschiedlich gestellt. Während einige Produkte mit aufwendigen, korrosionsgeschützten Stahlummantelungen angeboten werden, ist bei anderen wiederum ein mechanischer Schutz gar nicht vorgesehen. Die Temperaturbelastbarkeit der Materialien im Betriebszustand ist bei allen Ausführungen ausreichend gewährleistet. Die elektrischen Widerstände der Heizdrähte, die die Anschlußkonstruktion an das elektrische Netz und die Heizleistung beeinflussen, lagen bei den untersuchten Beispielen zwischen 0,01 und 50 Ω/m . Die Außendurchmesser der Heizleiter deckten den Bereich von 4 bis 11 mm ab. Die Heizleistung der Systeme wurde überwiegend mit 300 W/m² angegeben.

5) Vorhandene Probleme

Die hier genannten Probleme sollen nur stichwortartig aufgeführt werden:

- Gefahr der thermischen Zerstörung des Belagsmaterials durch zu große spezifische Heizleistungen
- Gefahr eines Erdschlusses und damit verbundener partieller Ausfall durch bereits geringfügige Verletzung der Isolierhülle infolge Einwirkung chemischer Substanzen aus Ablagerungen aus dem Belag oder von außerhalb

- Wärmespannungen im Belag infolge von zu großen Heizleiterabständen
- Abnahme des elektrischen Isolierwiderstandes durch Fehler an Heizleitungen oder Muffen
- Probleme infolge mangelhafter Ausführung von Fugen im Belag
- Abnahme der Scherfestigkeit des gesamten Belagaufbaus bei eingebauter Heizmatte
- Widerstandsänderung der Heizkabel infolge Druckbelastung des Belages beim Einbau und Betrieb, damit verbundene Verminderung der Heizleistung im Laufe der Zeit um bis zu 40 %
- Korrodierende Kontakte durch eindringendes Salzwasser
- Erhöhte Belastung im Belag infolge zu unterschiedlicher Wärmeausdehnungskoeffizienten von Heizleiter und Umgebungsmaterial, Rißbildung
- Schlechte Einschalt Effektivität infolge ungenügender Regelsysteme.

6) Kosten für Einbau und Betrieb

Angaben konnten nur für den Einbau der Systeme gemacht werden. Für die Lieferung und Verlegung der Heizelemente (ohne Trag- und Verschleißschicht) werden z. Zt. wohl Quadratmeterpreise zwischen 40,- DM und 100,- DM verlangt. Die Differenzen ergeben sich aus der Verschiedenheit der Fahrbahndecken und des Installationsaufwandes. Für die Betriebskosten geht man bei Wirtschaftlichkeitsberechnungen von etwa 200 Stunden Heizzeit pro Jahr aus. Bezüglich der spezifischen Energiekosten wird auf Abschnitt 12 verwiesen.

Mit dieser Zusammenstellung soll zum einen ein Überblick über bereits bearbeitete Problemstellungen im Bereich der beheizbaren Beläge geschaffen werden, zum anderen durch Aufzeigen noch offener Probleme das Feld für weitere Untersuchungen genauer umrissen werden.

3. Das Modell der Freiflächenheizung

Soll ein technisches System optimiert werden, stellen sich zuerst die Fragen:

- In welcher Hinsicht soll das System optimiert werden,
- was soll unter dem System verstanden werden?

In bezug auf das System "Beheizbare Beläge" wird die zweite Frage durch die Angabe eines systemtechnischen Modells beantwortet, mit dem die Realität möglichst gut nachgebildet wird. Dieses Modell (Bild 3.1) zeigt neben der Angabe

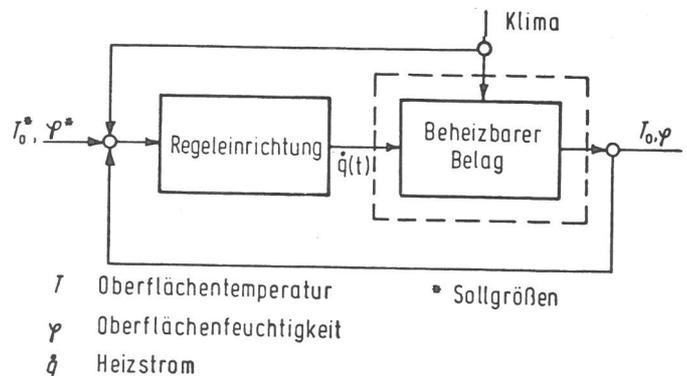


Bild 3.1
Systemtechnisches Modell einer Freiflächenheizung

der Einzelkomponenten auch deren Wirkung aufeinander. Dabei wird davon ausgegangen, daß die Wirkung der Komponente "Beheizbarer Belag" sich durch die Größen "Oberflächentemperatur und -feuchtigkeit" (T_O, φ) beschreiben läßt. Sie wird beeinflusst durch die jeweiligen Anfangsbedingungen, die Störgröße "Klima" und die Steuergröße "Heizstrom". Die Aufgabe des Reglers ist es nun, eine Anzahl von definierten (T_O^*, φ^*)-Zuständen auszuschließen; nämlich die, unter denen sich Glatteis, Reifglätte oder eine Schneedecke etablieren könnten. Das in Bild 3.1 dargestellte Wirkungsprinzip stellt im Sinne der Regelungstechnik eine Regelung mit Störgrößenaufschaltung dar. Es wird also vorausgesetzt, daß zum Ausschließen von bestimmten (T_O^*, φ^*)-Zuständen die Veränderung der klimatischen Zustände vom Regler von vornherein mitberücksichtigt wird. Praktisch wird dies durch die in Abschnitt 2. b) erwähnten Glatteiswarngeräte realisiert.

Zur ersten Frage kann gesagt werden, daß das Gesamtsystem auf einen optimalen Betriebskostenaufwand hin gestaltet werden soll. Nebenbedingung ist die Forderung nach einer geringen Reparaturanfälligkeit. Der Begriff "Optimierung" bezeichnet nun eine Verfahrensweise, mit der für ein gegebenes Problem die bestmögliche Lösung zu finden ist. Wenn gleich dabei das betrachtete Gesamtsystem im jeweils definierten Sinne einen Extremwert erreicht, handelt es sich lediglich stets um einen Kompromiß unter den in die Betrachtung einzubeziehenden verschiedenen und sich teilweise widersprechenden Gesichtspunkten. Der optimale Systemzustand ist im allgemeinen dadurch gekennzeichnet, daß die Einzelkomponenten den für sie allein erstrebenswerten Extremwert nicht erreichen.

Die wichtigste Voraussetzung zur systematischen Ermittlung eines Optimalzustandes ist die vollständige, eindeutige und algorithmische Beschreibung des Verhaltens der Systemkomponenten sowie deren Wirkung aufeinander. Es müssen also bekannt sein

1. Übertragungsverhalten der Regeleinrichtung
2. Übertragungsverhalten des beheizbaren Belages
3. Wirkung des Klimas auf den Zustand (T_O, φ) des Belages
4. Einfluß der Größe und der Zeitveränderlichkeit des Heizstromes auf (T_O, φ) des Belages.

Das Übertragungsverhalten des Reglers wird i.a. dem Verhalten der übrigen Regelstrecke in einem zu definierenden Sinne angepaßt. Unter der Wirkung des Klimas auf den Belag soll hier die analytische Beschreibung der Wärmeübertragungsverhältnisse unter dem Einfluß von Wärmestrahlung und -leitung mit Konvektion verstanden werden. Dazu gehört u.a. die Beantwortung der Fragen nach dem Einfluß der geometrischen Verhältnisse, der Oberflächenbeschaffenheit, der Windgeschwindigkeit usw. auf den Wärmeübergang sowie die zahlenmäßige Bestimmung von Emissions- und Absorptionsverhalten der beteiligten Körper. Dieser Teil der Analyse ist im wesentlichen in den in Abschnitt 2 genannten Arbeiten vollzogen worden und soll deshalb hier als abgeschlossen gelten.

Der Einfluß des Heizstromes ist sicherlich mit der Untersuchung des Übertragungsverhaltens des Belages zu verknüpfen, soll in dieser Arbeit jedoch nicht weiter betrachtet werden. Hier wird die Beschränkung soweit geführt, daß für vorgegebene Einflüsse aus den Anfangsbedingungen, dem Heizstrom und dem Klima das Verhalten des Belages beobachtet wird (siehe Bild 3.1, gestrichelter Bereich). Damit wird klar, daß das Ergebnis hier nicht eine Optimierung im oben genannten Sinne sein wird.

Betrachtet man die Komponente "Belag" etwas differenzierter, so ist zu erkennen, daß deren Wirkung sicherlich abhängen wird von

- a) dem Aufbau des Belages (verwendete Materialien) und den Randbedingungen,
- b) der geometrischen Anordnung der Heizleiter, ihrem stofflichen Aufbau und ihrer geometrischen Gestalt.

Diese Einflüsse werden sich im weiteren in den zu variierenden Systemparametern wiederfinden. Damit soll ein Beitrag zur vollständigen Analyse des Gesamtsystems geleistet werden.

Es muß noch erwähnt werden, daß hier nur die thermodynamischen Effekte betrachtet werden. Eine Übertragung der Ergebnisse auf die praktische Anwendung wird sicherlich nur nach einer Überprüfung des zugehörigen mechanischen Verhaltens des Systems möglich sein.

4. Ermittlung des Temperaturfeldes

4.1 Berechnungsgrundlagen

Das Übertragungsverhalten der Systemkomponente "Beheizbarer Belag" kann beispielsweise beschrieben werden durch die Entwicklung der instationären Temperaturfelder infolge der dem System zu- und abgeführten Wärme.

Unter Temperaturfeld $T(\underline{x})$ soll die Gesamtheit aller der Temperaturen verstanden werden, die jedem materiellen Punkt des betrachteten Bereiches zu einem festen Zeitpunkt zugeordnet werden können.

Der thermodynamische Zustand eines materiellen Körpers muß einmal dem ersten Hauptsatz der Thermodynamik genügen

$$\dot{U} = \dot{Q}_a + \dot{A}_s \quad (4.1)$$

der eine Bilanzgleichung für die Energie darstellt, und dem zweiten Hauptsatz,

$$\dot{\underline{q}} \cdot \underline{\nabla} T \leq 0 \quad (4.2)$$

$$D \geq 0 \quad (4.3)$$

der Aussagen über die Richtung des Wärmeflusses bzw. der Dissipationsleistung macht. Unter der Voraussetzung, daß sich die thermodynamischen Zustandsänderungen derart vollziehen, daß der Einfluß der Konfiguration der materiellen Elemente auf die Temperaturverteilung zu vernachlässigen ist, wird aus Gl. (4.1)

$$\dot{U} = \dot{Q}_a = \dot{q}'' - \frac{\underline{\nabla} \cdot \dot{\underline{q}}}{\rho} = c \dot{T} \quad (4.4)$$

mit c als spezifischer Wärme.

Dabei ist \dot{q}'' die spezifische eingeprägte Wärmemenge und $\dot{\underline{q}}$ der im betrachteten Bereich vorhandene Wärmeflußvektor. Um den zweiten Hauptsatz Gl. (4.2) zu befriedigen, wird der *Fouriersche Ansatz* eingeführt

$$\dot{\underline{q}} = -\lambda \underline{\nabla} T \quad (4.5)$$

Dieser besagt, daß der Wärmefluß $|\dot{\underline{q}}|$ in einem System durch ein thermisches Ungleichgewicht hervorgerufen wird. Sein Betrag ist proportional der Temperaturdifferenz zwischen zwei betrachteten materiellen Punkten. Der Proportionalitätsfaktor λ wird Wärmeleitfähigkeit genannt und ist im allgemeinen abhängig von der Temperatur.

Aus Gl. (4.4) mit (4.5) erhält man dann

$$c \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\nabla \cdot (\lambda \nabla T)}{\rho} + \dot{q}'' \quad (4.6)$$

bzw.

$$c \rho \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla \cdot (\lambda \nabla T) + \dot{Q}, \quad (4.7)$$

die *Fouriersche* Differentialgleichung für die Wärmeleitung. Sie ist für anisotrope Körper nichtlinear. Mit $\dot{q}'' = \frac{Q}{\rho}$ werden alle spezifischen Wärmemengen erfaßt, die nicht durch Leitung, sondern etwa aus Strahlung, chemischer Reaktion oder anderen inneren Wärmequellen dem Körper zugeführt werden. Ist es möglich, Gl. (4.7) zu lösen, so ist das allgemeine Lösungsfeld noch den speziellen Anfangs- und Randbedingungen anzupassen. Erst dann wird ein vorliegendes Problem mathematisch exakt beschrieben werden. Für die Vorgabe von Randzuständen unterscheidet man drei Möglichkeiten:

1. Es wird ein im allgemeinen instationärer Temperaturzustand $T_B(t)$ am Rand des betrachteten Bereiches vorgeschrieben. Sonderfall davon ist z.B. die Vorgabe eines isothermen Randes.
2. Es wird der Wärmefluß durch den Rand des Bereiches vorgeschrieben. Über die Beziehung

$$\dot{q}_B(t) = -\lambda \nabla T(t)$$

liegt damit das Temperaturgefälle am Rand fest. Diese Bedingung wird beispielsweise benutzt, wenn ein Prozeß mit adiabatischer Zustandsänderung beschrieben werden soll, oder wenn der Phasenwechsel eines Mediums am Rand mitberücksichtigt wird.

3. Es werden die Bedingungen formuliert, mit denen der Wärmeaustausch mit der Umgebung durch den Rand beschrieben werden soll. Die Menge der ausgetauschten Wärmeenergie hängt ab vom Energiezustand des betrachteten Bereiches und seiner Umgebung. Die Ermittlung der Gesetzmäßigkeiten des Wärmeüberganges ist häufig ein recht komplizierter Prozeß, weil die speziellen geometrischen und stofflichen Voraussetzungen am Rand jeweils eine Rolle spielen. Die einfachsten Ansätze in dieser Richtung stammen von *Newton* für die Wärmeleitung und von *Boltzmann* für den Wärmeaustausch zwischen festen Körpern durch Strahlung.

4.2 Rechenmethoden

Die in Gl. (4.7) entwickelte partielle Differentialgleichung beschreibt das allgemeine Wärmeleitungsproblem, wobei der Wärmetransport durch Diffusion hierbei nicht berücksichtigt wird. Das Problem liegt nun darin, die angegebene Gleichung zu lösen und dann auf konkrete Problemstellungen anzuwenden. Da es in der Mathematik bislang keine allgemeine Theorie zur Lösung von partiellen Differentialgleichungen gibt, ist man gezwungen, entweder Gl. (4.7) auf lösbare Spezialfälle einzuschränken, Näherungslösungen zu suchen oder diskrete Approximationsverfahren zu benutzen. Im folgenden sollen kurz die zur Zeit gebräuchlichen Verfahren vorgestellt werden.

1. Analytische Beschreibung

Als Lösung erhält man hier eine Feldfunktion für die Temperatur in Abhängigkeit von der Zeit. Derartige Lö-

sungen sind aber sehr schwierig und bislang auch nur für eindimensionale, axial- oder kugelsymmetrische Probleme und unter zusätzlicher Einschränkung der Randbedingungen und der stofflichen Eigenschaften des betrachteten Bereichs möglich. Die instationären Rechnungen, beschrieben in Abschnitt 1, sind in diesem Zusammenhang zu sehen. Eine weitere Vereinfachung von Gl. (4.7) liegt darin, daß man nur den eingeschwungenen Zustand betrachtet und sich mit der Angabe der stationären Temperaturfelder zufrieden gibt. Unter der Annahme homogener Materialverteilung und unter Ausschluß von inneren Wärmequellen führt (4.7) dann auf die lösbare *Laplace-Gleichung*. Damit können jedoch keine Vorgänge wie z.B. beim Aufheizen oder Abkühlen einer Struktur beschrieben werden.

2. Näherungsverfahren

Die Lösungen nach diesen Verfahren enthalten ebenfalls analytische Ausdrücke. Sie werden jedoch dadurch gewonnen, daß das Lösen der Differentialgleichung durch das Lösen eines adäquaten Variationsproblem ersetzt wird. Für den gesuchten Ausdruck wird ein globaler Näherungsansatz für das betrachtete Gebiet gemacht. Damit ist es aber sehr schwierig, die geometrische Konfiguration des Randes sowie die physikalischen Randbedingungen zu erfassen.

3. Finite-Element-Verfahren

Bei dieser Methode geht man auf die Idee der Näherungsverfahren zurück. Durch eine gedankliche Unterteilung der gesamten Struktur in Teilstrukturen ist es dann möglich, Näherungsansätze für diese Teilbereiche zu machen. Der Vorteil ist eine sehr viel bessere Erfassung der Randbereiche und derer Übergangsbedingungen. Voraussetzung hierfür ist jedoch, daß das in Gl. (4.7) beschriebene Anfangsrandwertproblem auf ein Randwertproblem für diskrete Zeitschritte zurückgeführt wird und die dann so erhaltene Differentialgleichung als Variationsausdruck umformuliert wird. Dabei lassen sich auch die nichtlinearen Glieder in (4.7) näherungsweise erfassen (siehe z.B. [6], [23]). Das Ergebnis ist jedoch kein analytischer Ausdruck, vielmehr werden der diskretisierten Struktur in jedem Zeitschritt Zahlenwerte zugeordnet. Diese Rechnungen werden mit Hilfe von Digitalrechnern ausgeführt. Gegenüber den unten angeführten Verfahren hat die Finite-Element-Methode den Vorteil, komplizierte geometrische Randbedingungen sehr viel besser nachzubilden, da eine Beschränkung auf eine bestimmte Gestalt der Einzelemente nicht erforderlich ist. Außerdem zeigt dieses Verfahren nicht die beim Differenzenverfahren zu beobachtenden Instabilitäten im Rechenvorgang.

4. Differenzenverfahren

Ausgehend von Gl. (4.7) werden bei dieser Methode die Differentialausdrücke durch endliche Differenzen für die Zeit und den Ort ersetzt. Gedanklich wird wieder der zu berechnenden Struktur ein Raster aufgeprägt. Die Temperaturen eines bestimmten Punktes ergeben sich als Linearkombination der Temperaturen der Umgebungspunkte. Die Ergebnisse sind wiederum zeitlich aufeinanderfolgende Zahlenwerte, die den Knotenpunkten des gedachten Rasters zugeordnet werden.

Diese Verfahren gestattende Berücksichtigung nichtlinearer Wärmeübergangsbedingungen und komplizierter Strahlungsrandbedingungen sowie temperaturabhängiger

Kennwerte. Gegenüber Finite-Element-Methoden eignen sie sich vorzugsweise für einfachere geometrische Randbedingungen und haben den Vorzug kürzerer Rechenzeiten. Weitere Einzelheiten in [21].

5. Verfahren der Elementarbilanzen

Hierbei wird der betreffende Bereich ebenfalls in Elementarbereiche eingeteilt. Die Berechnungsformeln ergeben sich durch Anwendung des *Fourierschen* und des *Newton-Gesetzes* auf die einzelnen Elementarbereiche. Nach Bilanzierung der Wärmeströme ergibt sich ein algebraisches Gleichungssystem, das für die Knotentemperaturen in jedem Zeitschritt zu lösen ist. Zeit- und temperaturabhängige Stoffwerte können in die Rechnung miteinbezogen werden.

6. Analogieverfahren

Die Grundlage dieses Verfahrens beruht auf der Übereinstimmung der Differentialgleichung der Wärmeleitung und der eines idealisierten "Kabels", bestehend aus elektrischen Widerständen und Kondensatoren. Die Wärmeleitwiderstände werden also durch elektrische Widerstände ersetzt, die Wärmespeicherung durch elektrische Speicherung in Kondensatoren. Praktisch wird dann das idealisierte Kabel durch eine Ersatzschaltung ersetzt, die Größen der elektrischen Elemente werden durch die vorliegenden thermodynamischen Stoffwerte determiniert. Mit Hilfe derartiger R-C-Ketten ist es nun möglich, ein- und mehrdimensionale Wärmeleitzustände etwa auf dem Analogrechner nachzubilden. Durch Spannungsmessungen an bestimmten Knotenpunkten des elektrischen Gitters, die den Knotenpunkten der in 3., 4. und 5. beschriebenen Verfahren entsprechen, kann ein kontinuierlicher Temperaturverlauf beobachtet werden. Der zeitliche Verlauf der Ströme an diesen Punkten entspricht den Wärmeströmen. Bezüglich der Randbedingungen sowie temperaturabhängiger Stoffwerte gibt es eigentlich keine Schwierigkeiten. Dieses Verfahren wurde zuerst von *Beuken* (siehe [8]) vorgestellt und ist inzwischen bei vielen Untersuchungen, z.B. [7], erfolgreich benutzt worden.

4.3 Rechenprogramm

Nach Einschätzung der spezifischen Schwierigkeiten der eben genannten Verfahren wurde für die hier angestrebten Untersuchungen ein Rechenverfahren eingesetzt, das die Vorteile des Differenzenverfahrens und des der Elementarbilanzen verknüpft. Außerdem wurde es als ausreichend erkannt, die Verhältnisse in beheizbaren Belägen durch ein ebenes Wärmeleitproblem nachzubilden. Der Rechenmehraufwand für eine räumliche Behandlung läßt sich nicht mit den dadurch erzielten weiteren Informationen in Einklang bringen. Stattdessen wurde das im folgenden beschriebene Rechenprogramm so ausgestattet, daß alle in diesem Rahmen erdenkbaren physikalischen Verhältnisse nachgebildet werden können. Neben den in Abschnitt 4.1 beschriebenen Randbedingungen wird somit auch der Einfluß direkter Sonneneinstrahlung sowie beliebig verteilter Wärmequellen berücksichtigt. Ebenso ist die Vorgabe temperaturabhängiger Stoffwerte sowie zeitabhängiger Randbedingungen möglich. Phasenänderung der beteiligten Stoffe im betrachteten Bereich sowie am Rand und Simulation eines einfachen Reglers zum Ein- und Ausschalten der Heizung, je nach Konstellation der aktuellen Systemgrößen, sind berücksichtigt. Das Programm benutzt allgemeine Dreieckselemente, mit denen praktisch jede zwei-

dimensionale Struktur annäherbar ist. Somit kommt es gegenüber rechteckigem Raster mit relativ wenig Knotenpunkten aus. Das wiederum hat einen relativ geringen Speicherbedarf zur Folge, was insbesondere für kleinere Rechner ein wesentlicher Gesichtspunkt ist.

Im weiteren werden jetzt die theoretischen Grundlagen des Verfahrens sowie deren praktische Realisierung im Programm beschrieben.

4.31 Theoretische Grundlagen

Die Endliche-Differenz-Methoden (finite-difference-methods) sind approximativ in dem Sinne, daß Ableitungen in einem Punkt durch Differenzenquotienten über ein kleines Intervall angenähert werden. Ausgangspunkt für die Ableitung einer Differenzgleichung ist die Energiebilanz am Volumenelement, d.h. die Summe der dem Volumenelement zugeführten und im Volumenelement erzeugten Wärmeströme wird dazu verwendet, um das Volumenelement m in der Zeitdifferenz Δt um $T'_m - T_m$ zu erwärmen. Die Gleichung lautet

$$\sum_i \dot{Q}_{im} + \dot{Q}_m = \frac{V \rho c (T'_m - T_m)}{\Delta t} \quad (4.8)$$

bzw.

$$\frac{\Delta T}{\Delta t} = \frac{1}{V \rho c} (\sum_i \dot{Q}_{im} + \dot{Q}_m)$$

Dabei ist

- \dot{Q}_{im} vom Nachbarelement i dem Volumenelement m zufließender Wärmestrom,
- \dot{Q}_m im Volumenelement erzeugter Wärmestrom,
- V Volumen des Elements,
- ρ Dichte des Elements,
- c spezifische Wärmekapazität des Elements,
- T_m Schwerpunkts- bzw. Knotentemperatur des Elements,
- T'_m Knotentemperatur des Elements nach der Zeitdifferenz Δt .

Im Fall der endlichen Differenzenverfahren überdeckt man das Integrationsgebiet üblicherweise mit einem rechtwinkligen Gitternetz aus äquidistanten Linien, die parallel zu den Koordinatenachsen laufen. Die Verhältnisse seien im folgenden an *Bild 4.1* verdeutlicht. Jedes der gezeichneten quaderförmigen Volumenelemente, die bei der Unterteilung des Integrationsgebietes mit einem rechtwinkligen Gitternetz entstehen, habe der Einfachheit halber gleiche Abmessungen und gleiches Material, außerdem werde keine Wärme im Volumenelement m entwickelt, d.h. $\dot{Q}_m = 0$. Dann erhält man für den instationären Fall unter Beachtung von

$$\dot{Q} = kA (T_i - T_m) \quad (4.9)$$

mit

$$k = \frac{1}{\sum \frac{1}{\alpha} + \sum \frac{s}{\lambda}}, \quad (4.10)$$

wobei

- k Wärmedurchgangskoeffizient,
- A die vom Wärmestrom durchströmte Fläche,
- s Weglänge von Knoten- zu Knotenpunkt,

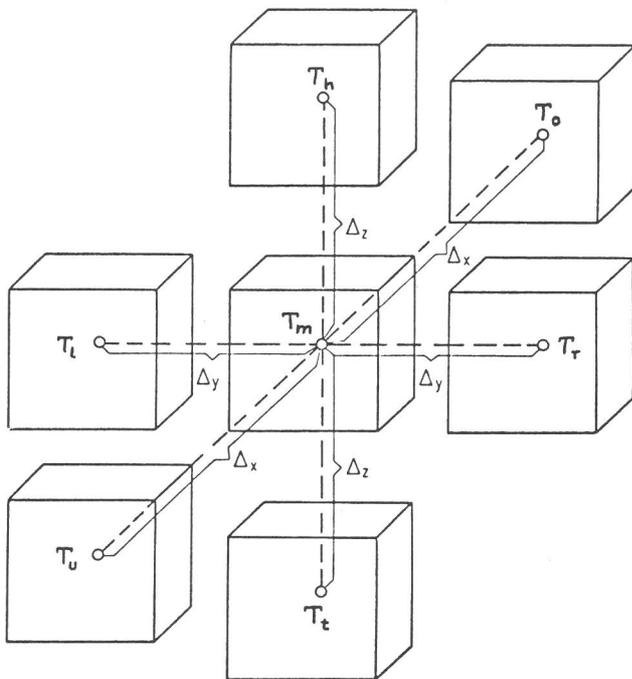


Bild 4.1
Unterteilung eines Integrationsgebietes mit einem rechtwinkligen Gitternetz in quaderförmige Volumenelemente

λ Wärmeleitfähigkeit,
 α Wärmeübergangskoeffizient,

auf das mittlere Element m bezogen, bei Beschränkung auf reine Wärmeleitvorgänge, folgende Differenzgleichung:

$$\lambda \frac{\Delta y \Delta z}{\Delta x} (T_o - T_m) + \lambda \frac{\Delta y \Delta z}{\Delta x} (T_u - T_m) + \lambda \frac{\Delta x \Delta z}{\Delta y} (T_l - T_m) + \lambda \frac{\Delta x \Delta z}{\Delta y} (T_r - T_m) + \lambda \frac{\Delta x \Delta y}{\Delta z} (T_h - T_m) + \lambda \frac{\Delta x \Delta y}{\Delta z} (T_t - T_m) = \Delta x \Delta y \Delta z c \rho \frac{T'_m - T_m}{\Delta t} \quad (4.11)$$

Hierbei bedeuten die Indizes

- m Mitte,
- o oben,
- u unten,
- l links,
- r rechts,
- h hoch und
- t tief.

Dividiert man in Gleichung (4.11) beide Seiten durch $\Delta x \Delta y \Delta z$, so erhält man

$$\lambda \frac{T_o - T_m}{\Delta x} - \lambda \frac{T_m - T_u}{\Delta x} + \lambda \frac{T_l - T_m}{\Delta y} - \lambda \frac{T_m - T_r}{\Delta y} + \lambda \frac{T_h - T_m}{\Delta z} - \lambda \frac{T_m - T_t}{\Delta z} = c \rho \frac{T'_m - T_m}{\Delta t} \quad (4.12)$$

Mit der eindimensionalen Differenzenformel [17, 16]

$$h^2 u_1'' = U_o - 2U_1 + U_2, \quad (4.13)$$

die man durch Taylor-Entwicklung der Ordinaten U_o und U_2 von U_1 aus gewinnt, erhält man aus (4.12) wieder Gleichung (4.8). Bei einem Würfelgitter der Kantenlänge enthält der Fehler nach [16] nur Glieder 4. und höherer Potenz in h , d.h. es gilt im dreidimensionalen Falle:

$$T_o + T_u + T_l + T_r + T_h + T_t - 6 T_m = h^2 \Delta T + \text{Glieder 4. Ordnung.} \quad (4.14)$$

Im zweidimensionalen Falle ($h = k$) hat man

$$T_o + T_u + T_l + T_r - 4 T_m = h^2 \Delta T + \text{Glieder 4. Ordnung,} \quad (4.15)$$

bei ungleichen Abständen bei rechtem Winkel ergibt sich jedoch nur ein finiter Ausdruck 3. Ordnung für ΔT , d.h. der Fehler enthält Glieder 3. und höherer Potenz in h . Hier soll jedoch kein rechtwinkliges Gitternetz zur Überdeckung des Integrationsgebietes herangezogen werden, sondern ein für zweidimensionale Problemstellungen als optimal anzusehendes Netzwerk aus allgemeinen Dreieckselementen. Hierbei wird als einzige Einschränkung im Dreieckselement gefordert, daß kein Winkel größer als 90° ist (gilt nur für Dreieckselemente mit Wärmeleitung). Der dem Knotenpunkt m von den Elementen i zufließende Wärmestrom ergibt sich dabei nach Gleichung (4.9) zu

$$\sum_i \dot{Q}_{im} = \sum_i k A (T_i - T_m) \quad (4.16)$$

wobei die Werte kA bei Dreieckselementen entsprechend [12] nach Bild 4.2 errechnet werden. Aus Bild 4.2 ist auch

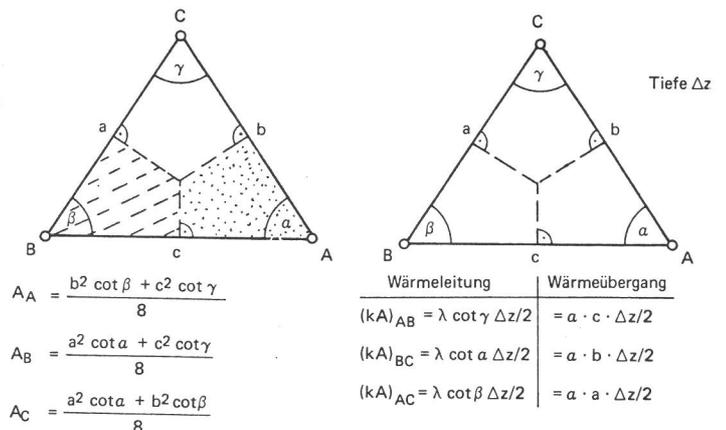


Bild 4.2

Berechnung der den Knotenpunkten zugeordneten Flächen A und der den einzelnen Knotenpunkten infolge Wärmeleitung bzw. Wärmeübergang zufließenden Wärmeströme $\dot{Q} = kA (T_i - T_j)$ nach [12]

die Berechnung der den Knotenpunkten zugeordneten Flächen A zu ersehen [12], die bei jedem Knotenpunkt bei verschiedenen Dreieckselementen unterschiedlichen Materials zu der Gesamtwärmeleitfähigkeit

$$V \rho c = \sum_i A_i \rho_i c_i \Delta z \text{ mit} \quad (4.17)$$

$$\Delta z = 1$$

führt. Hierbei wird angenommen, daß die Temperatur des Knotens im gesamten, dem Knotenpunkt zugeordneten Bereich, der sich in der Regel auf Flächenanteile mehrerer Dreiecks-

elemente unterschiedlicher Materialeigenschaften erstreckt, gleich ist.

Infolge Wärmestromeinspeisung (Heizleistung z.B. bei beheizten Fahrbahnbelägen oder freiwerdender Leistung infolge chemischer Reaktion oder Phasenumwandlung) fließen dem Knoten zusätzliche Wärmeströme zu.

Randeffekte

Ist die Dreieckseite \overline{AB} einer Wärmeübertragung durch Konvektion oder Strahlung ausgesetzt, so fließen den Knotenpunkten A und B jeweils folgende Einzelwärmeströme zu, und zwar im Fall des konvektiven Wärmeübergangs

$$\begin{aligned} \dot{Q}_A &= A \alpha (T_i - T_a) & \text{bzw.} \\ \dot{Q}_B &= A \alpha (T_i - T_B) \end{aligned} \quad (4.18)$$

mit $A = (c/2) \Delta z$.

Im Fall der Wärmeübertragung zwischen der umgebenden Atmosphäre und der Oberfläche eines Körpers gilt entsprechend Abschnitt 5

$$\dot{Q}_A = A \varphi C_s \epsilon_{Bo} \left[\epsilon_{At} \left(\frac{T_i + 273}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_A + 273}{100} \right)^4 \right] \quad (4.20)$$

mit

\dot{Q}_A Knoten A zufließender Wärmestrom infolge Strahlung,

A Körperoberfläche nach (4.19),

φ Einstrahlzahl,

C_s Strahlungskonstante der schwarzen Oberfläche,
 $C_s = 5,77 \text{ W}/(\text{m}^2 \text{ K}^4)$,

ϵ_{At} Emissionsgrad der Atmosphäre,

ϵ_{Bo} Emissionsgrad der Körperoberfläche,

T_i Außenlufttemperatur,

T_A Oberflächentemperatur des Körpers beim Knoten A.

Phasenänderung

Bei quaderförmigen Rechteckelementen wurden bereits Phasenumwandlungen, d.h. Änderungen des Aggregatzustandes, von [13] rechnerisch erfaßt, bei Dreieckselementen unter Benutzung von endlichen Differenzenverfahren jedoch noch nicht. Der Grund dafür ist darin zu sehen, daß bei Dreieckselementen

- der jedem Knoten zugeordnete Bereich aus Teilbereichen, die bei Umwandlungstemperatur den Aggregatzustand ändern und solchen, bei denen das nicht der Fall ist, zusammengesetzt sein kann,
- die geometrischen Verhältnisse bei der Berechnung der dem Knoten zufließenden Teilströme wesentlich komplizierter sind und somit
- der rechentechnische Aufwand erheblich höher als bei rechteckigen Rastern ist.

Die etwa bei der Verdampfung des in Baustoffen vorhandenen Wassergehalts oder beim Gefrieren oder Schmelzen (Eisbildung, Wirkungsweise beheizbarer Fahrbahnbeläge) auftretenden Verhältnisse seien im folgenden anhand von *Bild 4.3*,

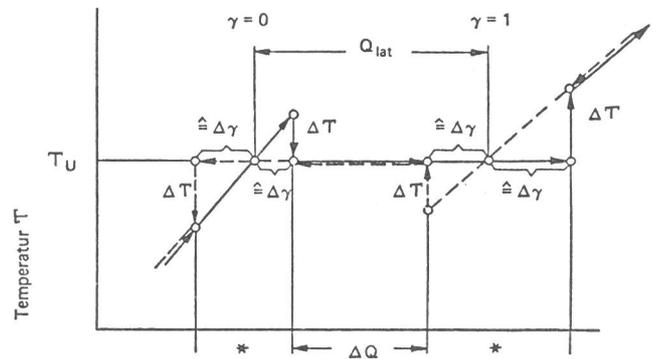


Bild 4.3

Qualitativer Verlauf einer Änderung des Aggregatzustandes in dem einem Knotenpunkt zugeordneten Bereich nebst Angabe der in den mit * gekennzeichneten Gebieten vorzunehmenden Korrekturen $\Delta\gamma$ bzw. ΔT nach [13]

vgl. [13], im Prinzip erläutert. Danach wird bei Erreichen der Umwandlungstemperatur T_U die Elementtemperatur (Knotentemperatur) solange konstant gehalten, bis die gesamte Elementmasse den Aggregatzustand geändert hat. Nach einem Vorschlag von [13] wird hierzu die Wärmekapazität des dem Knoten zugeordneten Bereichs bei der Integration des Differenzen-Gleichungssystems einfach sehr groß gemacht. Dies soll hier nicht erfolgen, sondern vielmehr der entsprechende Knoten nach Erreichen bzw. Unter- oder Überschreiten der Umwandlungstemperatur besser auf T_U gesetzt und solange von der Integration ausgenommen werden, bis die Umwandlung vollzogen ist. Hierzu muß dem Knoten die gesamte Umwandlungswärmemenge (latente Wärmemenge) bei Verdampfung

$$Q_{lat} = V \rho r \frac{p}{100} = m r \frac{p}{100} \quad (4.21)$$

V Volumen des Baustoffs,

ρ Rohdichte des Baustoffs,

r Verdampfungswärme,

m Masse,

p Wassergehalt in %,

zugeführt werden. Wird dem Knoten der Wärmestrom \dot{Q}_{ges} in der Zeitdifferenz Δt zugeführt, so gilt für das Phasenumwandlungsverhältnis

$$\gamma(t + \Delta t) = \gamma(t) + \dot{Q}_{ges} \Delta t / Q_{lat} \quad (4.22)$$

Dabei ist

$$\gamma = \frac{\overline{m}}{m} = \frac{m_{Phase,1}}{m_{Phase,0}} \quad (4.23)$$

d.h. γ entspricht dem Verhältnis der (bereits umgewandelten) Masse höherer Energie zur Gesamtmasse. Bei Durchlaufen der Zustände $\gamma = 0$ und $\gamma = 1$, die ja nur zufällig mit dem Ende einer Zeitschrittweite h zusammentreffen, muß eine entsprechende Korrektur vorgenommen werden. Eine Überschreitung von $\gamma = 0$ oder $\gamma = 1$ um $\Delta\gamma$ muß in eine Temperaturänderung ΔT bzw. eine Überschreitung der Umwandlungstemperatur T_U um ΔT in einen entsprechenden Zuwachs des Phasenumwandlungsverhältnisses $\Delta\gamma$ umgerechnet werden. Bei den in Bild 4.3 mit * gekennzeichneten Phasen gilt

$$|\Delta T_{m,c}| = |\Delta \gamma Q_{lat}| \quad \text{mit} \quad (4.24)$$

$$\Delta T = T - T_U \quad (4.25)$$

und $\Delta \gamma = \gamma$ für $\gamma < 0$ bzw.
 $\Delta \gamma = \gamma - 1$ für $\gamma > 1$ (4.26)

Bild 4.3 gibt eine Vorstellung vom Ablauf eines Verdampfungsvorganges (ausgezogene Linie von links unten nach rechts oben) oder z.B. eines Gefriervorganges (strichlinierte Linie von rechts oben nach links unten) sowie des Vorzeichens der vorzunehmenden Korrekturen.

Lösen der Differenzgleichungen

Stellt man nun entsprechend Gleichung (4.8) für jeden Knotenpunkt eine endliche Differenzgleichung auf, so erhält man für n Knotenpunkte ein System von n Differenzgleichungen, wobei für Knotenpunkte mit Temperatur-Randbedingungen keine Differenzgleichung aufgestellt wird. Dieses System von Gleichungen, das zur Beschreibung der Temperaturverteilung dient, kann nun schrittweise integriert werden, z.B. mit dem Runge-Kutta-Verfahren vierter Ordnung [16]. Es wird hier wegen seiner hohen Genauigkeit und seiner einfachen Struktur verwendet. Es lautet für Systeme von Differentialgleichungen 1. Ordnung, die durch ihr diskretes Analogon ersetzt wurden,

$$T_{n+1} = T_n + h F(T_n, h) \quad (4.27)$$

mit

$$F(T, h) = \frac{1}{6} (\underline{k}_1 + 2\underline{k}_2 + 2\underline{k}_3 + \underline{k}_4) \quad (4.28)$$

$$\begin{aligned} \underline{k}_1 &= f(T) \\ \underline{k}_2 &= f(T + 0,5 h \underline{k}_1) \\ \underline{k}_3 &= f(T + 0,5 h \underline{k}_2) \\ \underline{k}_4 &= f(T + h \underline{k}_3) \\ T_0 &= \underline{g} \end{aligned} \quad (4.30)$$

Die Einzelkomponenten k_i des Vektors k werden aus Gleichung (4.8) zu

$$k_i = (\Delta T / \Delta t)_i \quad (4.31)$$

ermittelt.

Das angewandte Verfahren ist ein explizites Einschrittverfahren, d.h. alle unbekanntes Temperaturen zum Zeitpunkt t_{n+1} werden durch bekannte Temperaturen zum Zeitpunkt t_n ausgedrückt. Es müssen nun bei den 4 auszuführenden Zwischenrechnungen zur Ermittlung der Vektoren \underline{k} jeweils alle temperatur- und zeitabhängigen Funktionswerte, z.B. die Werte der Wärmeleitfähigkeit λ , der spezifischen Wärmekapazität c , der Rohdichte ρ der einzelnen Materialien, der Randtemperatur usw. errechnet werden. Die Interpolation der Funktionen erfolgt über eine kubische Spline-Interpolation nach [15], da hier neben einer sehr glatten Interpolation die Koeffizienten der zur Interpolation von n Punkten verwendeten $n-1$ Stützpolynome nur einmal errechnet zu werden brauchen.

Zur Schrittsteuerung, d.h. Festlegung der Zeitschrittweite h , wird ausgenutzt, daß nach Collatz [18] die Vektoren $h\underline{k}_3$ und $h\underline{k}_2$ etwa gleich sein sollten. Das führt zu der Forderung

$$h|\underline{k}_3 - \underline{k}_2| \leq \Delta T \quad (4.32)$$

die für jede Vektorkomponenten erfüllt sein muß, sonst wird die Schrittweite h verkleinert.

4.32 Beschreibung des Rechenprogramms

Ein stark vereinfachtes Flußdiagramm zeigt Bild 4.4. Durch die Benutzung der sehr flexiblen Dreieckselemente, die auch örtliche Verfeinerungen des Rasters zulassen [19], ist das zeitabhängige Temperaturfeld einer jeden zweidimensionalen Konstruktion leicht errechenbar. Das zu integrierende Gebiet kann mehrfach berandet sein. Das Programm kommt wegen der Benutzung der Dreieckselemente mit relativ wenigen Knotenpunkten aus.

Bei der Dateneingabe legt sich das Programm eine Liste aller Funktionen, sei es der Materialkennlinien, Randbedingungen, Funktionen für den konvektiven oder strahlungsbedingten Wärmeübergang usw. an, wobei sofort die zur späteren Interpolation erforderlichen vier Spline-Koeffizienten je Wertepaar errechnet und weggespeichert werden. Alle Funktionen werden durch Kennziffern näher spezifiziert, sonst aber formal gleich behandelt.

Die Integration des Gleichungssystems muß mit einer Anfangsschrittweite, die vorzugeben ist, von $-$ vgl. [12] $-$

$$h \leq \Delta T = \frac{\Sigma (A \rho c)}{\Sigma (k A)} \Delta z \quad (4.33)$$

beginnen, wobei bei der Errechnung von Gleichung (4.33) die Gleichung (4.17) und Bild 4.2 zu beachten sind. Um bei falscher Schrittweite einen Abbruch der Rechnung infolge bei zu hohen oder zu niedrigen Temperaturen nicht mehr definierten Kennlinien zu vermeiden, werden bei dem Programm die Funktionen nicht extrapoliert, sondern die jeweiligen Extremwerte der Funktion zur Rechnung benutzt, bis die Integration stabil verläuft. Dauernd wiederkehrende Extrapolationen infolge nicht ausreichend weit vorgegebener Funktionen werden angezeigt, führen jedoch nicht zum Abbruch der Rechnung.

Die Ausgabe der Ergebnisse erfolgt in vorgegebenen Zeitabständen

- numerisch,
- durch ein Folgeprogramm auf einem Plotter in Kurvenform für ausgewählte Knoten, wobei Knotentemperaturen als Funktion der Zeit dargestellt werden, oder
- als auf dem Schnelldrucker ausgegebene, maßstäbliche Isothermendarstellung. Hierbei sind auch Teilgebiete der Konstruktion ausgebbar.

Zur Isothermendarstellung werden den Buchstaben des Alphabets automatisch entsprechend den Temperatur-Extremwerten des ausgewählten Gebietes zum vorliegenden Zeitpunkt Temperaturbereiche zugewiesen. Dann wird nach Maßgabe der in jedem Dreieckselement (mit Material) enthaltenen Einzelpunkte (lineare Interpolation innerhalb des Dreiecksgebiets) eine n Zeilen (n Zeilenvorschübe auf dem Schnelldrucker) und m Spalten (m Spaltenvorschübe auf dem Schnelldrucker) enthaltende Matrix mit den Temperaturwerten entsprechenden Zeichen des Alphabets oder Zwischenräumen belegt. Auch hier können mehrfach berandete Gebiete auftreten. Durch die Isothermenzeichnung ist außerdem eine Kontrolle möglich, ob allen Dreieckselementen tatsächlich entsprechende Material-Funktionen zugewiesen wurden (sonst erscheint ein dreieckiges Leerfeld). Weitere Informationen über das eben beschriebene Rechenprogramm sind der Dissertationsschrift von Rudolphi [21] zu entnehmen. Dort ist ebenfalls das gesamte Rechenprogramm mit all

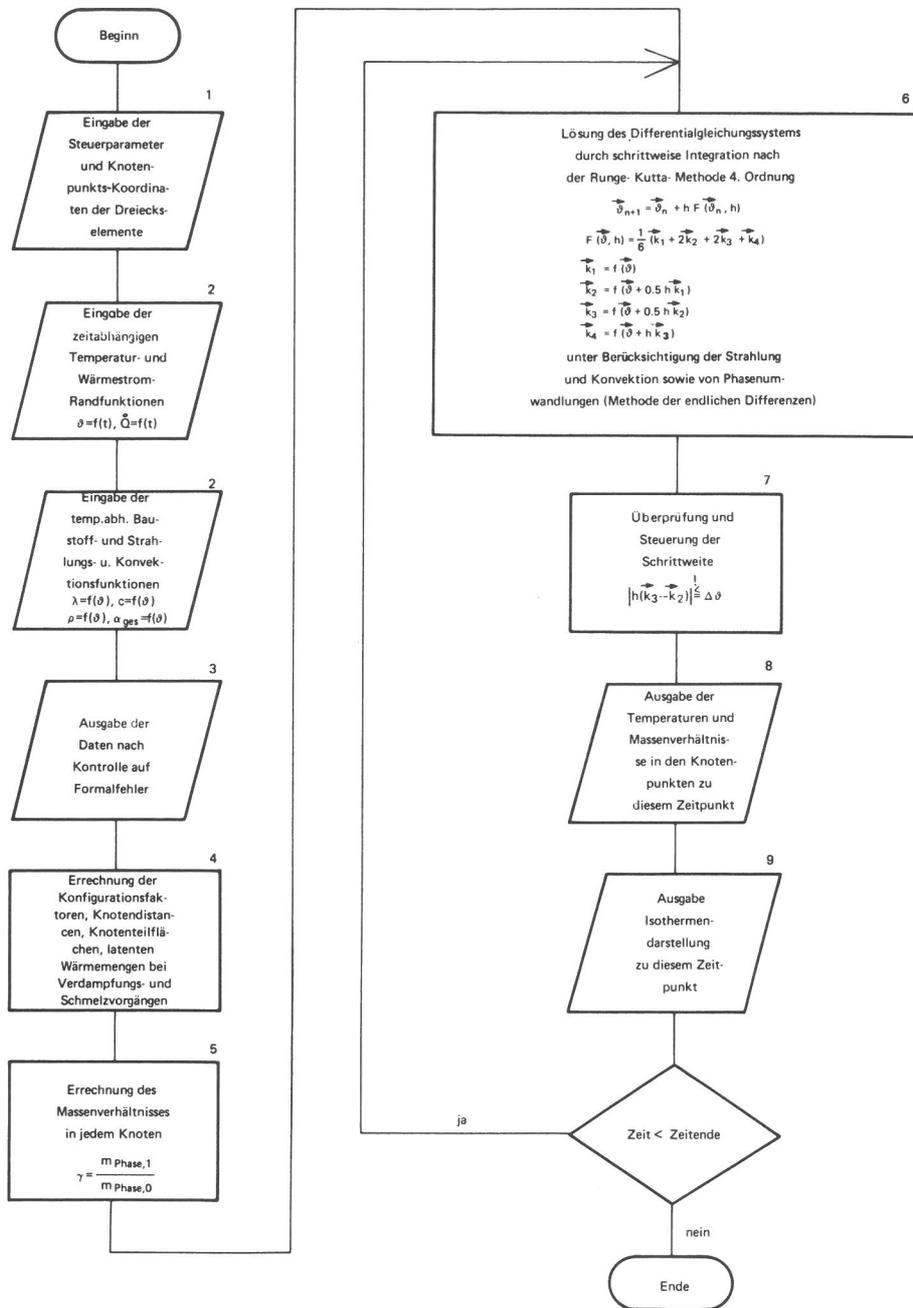


Bild 4.4
 Flußdiagramm nach [21] eines nach der Endliche-Differenzen-Methode arbeitenden, zweidimensionalen, instationären Rechenprogramms. Es benutzt allgemeine Dreieckselemente, berücksichtigt nichtlineare Strahlungsrandbedingungen, temperaturabhängige Materialkennwerte, zeitabhängige Temperaturrandbedingungen. Wärmequellen und Phasenumwandlungen bei Änderung der Kennlinien. Eine maßstäbliche Isothermendarstellung, auch von Teilgebieten, ist auf dem Schnelldrucker ausgebaut.
 Hier $\vartheta \hat{=} T$

seinen einzelnen Rechenabläufen und Beispielen aus dem Brandschutz abgedruckt.

4.4 Überprüfung des Rechenprogramms

Zur Überprüfung der Funktionsfähigkeit und Genauigkeit des Programms wurde eine Fülle von Testrechnungen vorgenommen. Dabei wurde auch der Einfluß verschiedener Unterteilungsmöglichkeiten des betrachteten Bereiches untersucht. Als Beispiel soll hier die Berechnung eines dreiseitig

beflammten 12 cm x 24 cm – Stahlbetonbalkens ohne und mit Berücksichtigung des Feuchtigkeitsgehalts unter Brandbeanspruchung [78] gebracht werden. Es handelt sich hierbei um Messungen und – und was sehr selten ist – unter genauer Angabe der verwendeten Kennwerte ausgeführte Rechnungen, die veröffentlicht wurden [79, 80]. Die Rechnungen erfolgten mit einem einfachen Differenzenverfahren unter Zugrundelegung eines quadratischen Rasters unbekannter Rasterlänge (vermutlich 1 cm). Unter Ausnutzung der Symmetrieverhältnisse wurden daher für das vorliegende Programm zwei verschiedene Rasterungen, eine grob und ungleichmäßig geteilte und eine quadratisch geteilte Rasterung entsprechend Bild 4.5 gewählt.

An der Unter- und Seitenfläche wurden jeweils unterschiedliche Wärmeübergangsverhältnisse infolge Konvektion und Strahlung, an der Oberseite nur ein konvektiver Wärmeübergang angenommen. Die genauen sonstigen Kennwerte sind der o.a. Literatur zu entnehmen. Das Ergebnis der Berechnung ohne Berücksichtigung der Feuchtigkeit bei grobem

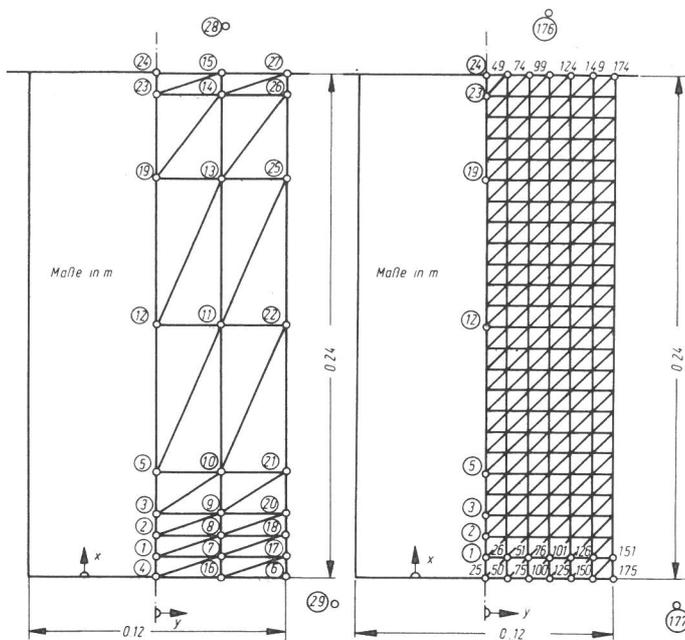


Bild 4.5
Aufteilung eines dreiseitig unter Normbrandbedingungen beflamten 12 cm x 24 cm großen Stahlbetonbalkens in Dreieckselemente zur Überprüfung des vorliegenden Rechenprogramms. Entsprechende Meß- und Rechenwerte liegen bei [80] vor. Links grobe Rasterung, rechts quadratisches Raster.

und quadratischen Raster zeigt **Bild 4.6** eine entsprechende Gegenüberstellung mit Messungen und Rechnungen nach [80], **Tabelle 4.1**.

Aus **Bild 4.6** ist ersichtlich, daß eine grobe Unterteilung ohne Berücksichtigung der Feuchtigkeit vollkommen ausreicht, aus **Tabelle 4.1**, daß die mit dem quadratischen Raster erhaltenen Meßergebnisse bis auf Meßstelle 23 nach 90 Minuten gut mit den Messungen und Rechnungen von [80] übereinstimmen.

Zeitdauer in min		Meßstellen in der Symmetrieachse, Temperatur in °C						
		1	2	3	5	12	19	23
30	Meßwert	503	363	305	218	168	147	118
	Rechenw.	518	389	300	205	129	129	105
	Grobe Unt.	514	386	295	185	135	130	115
	Quadr. Raster	517	392	305	203	131	126	108
60	Meßwert	739	629	584	487	384	326	289
	Rechenw.	745	655	584	484	363	334	274
	Grobe Unt.	743	642	561	448	357	334	276
	Quadr. Raster	750	653	576	471	356	329	266
90	Meßwert	847	784	753	671	550	471	437
	Rechenw.	868	808	747	668	547	495	416
	Grobe Unt.	870	796	733	640	539	494	393
	Quadr. Raster	875	805	746	659	541	487	378

Tabelle 4.1
Vergleich von Meß- und Rechenwerten nach [80] mit Rechenergebnissen unter Benutzung des vorliegenden Programms mit Dreieckselementen an einem dreiseitig beflamten 12 cm x 24 cm-Stahlbetonbalken ohne Berücksichtigung des Feuchtigkeitsgehaltes

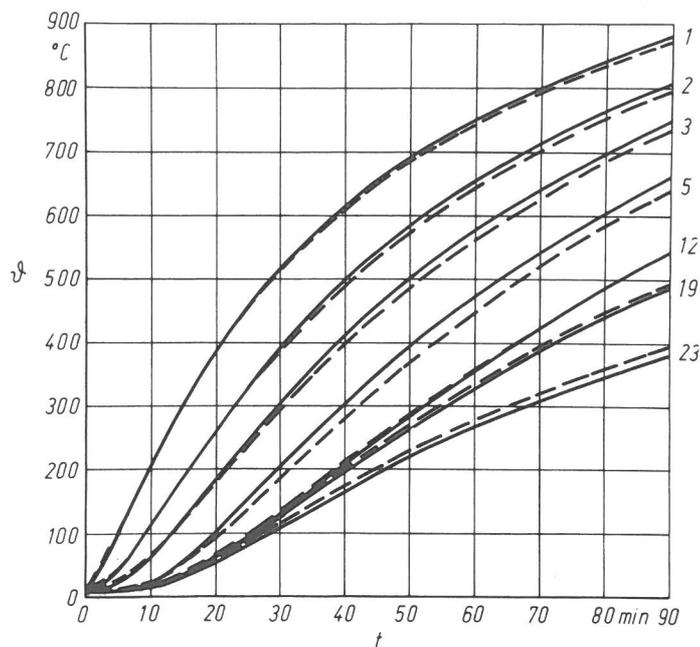


Bild 4.6
Vergleich von Rechnungen mit grober Rasterung und quadratischem Raster nach **Bild 4.5** unter Benutzung von Dreieckselementen ohne Berücksichtigung des Feuchtigkeitsgehaltes an einem 12 cm x 24 cm-Stahlbetonbalken [80]

5. Wärmeübergang an den Rändern

In diesem Abschnitt sollen jetzt die in 4.1 beschriebenen Randbedingungen zur allgemeinen Lösung der Wärmeleitungsgleichung (4.7) im Sinne einer Wärmebilanz an den Rändern des Integrationsbereiches physikalisch interpretiert werden. Dabei wird vorerst nur der Rand betrachtet, der mit der umgebenden Atmosphäre im Wärmeaustausch steht.

1. Wärmeübertragung durch Leitung

Dieser physikalische Vorgang wird dadurch erklärt, daß sich ein thermodynamisches Gleichgewicht nicht lokal begrenzt ausbilden kann; das heißt, unterschiedliche Energieniveaus in einem materiellen Körper gleichen sich aus. Da die Temperatur als mittlere kinetische Energie der Streubewegung der Teilchen definiert ist, wird also im Sinne einer mikroskopischen Betrachtung Gleichgewicht durch Impulstransport der Teilchen erzeugt. Diese Art der Wärmeübertragung ist in festen Körpern zu beobachten und wird beschrieben durch das *Fouriersche Wärmeleitgesetz* (4.5) mit der Stoffkonstanten λ .

2. Wärmeübertragung durch Konvektion

Diese Art der Wärmeübertragung ist der unter 1. genannten ähnlich. Der Unterschied besteht darin, daß sich die Bewegung der Teilchen nicht um eine Ruhelage herum vollzieht, sondern daß hierbei endliche Strecken von den Teilchen im Raum zurückgelegt werden. Dies ist natürlich nur in Gasen oder Flüssigkeiten möglich. Eine Überlagerung mit der Übertragung durch Leitung ist möglich. Die Intensität des Wärmeaustausches zwischen einer festen Oberfläche und einem Gas beispielsweise ist noch abhängig vom Bewegungszustand des Gases, d.h. vom Charakter der Grenzschicht an der Oberfläche. Entsprechend ist auch die mathematische Beschreibung. Geht man davon aus, daß eine laminare Grenz-

schicht vorhanden ist, beschreibt der *Newtonsche* Ansatz den Wärmefluß ausreichend gut:

$$\dot{Q}_v = A \alpha (T_{Bo} - T_{At}) \quad (5.1)$$

Die übertragene Wärmemenge ist proportional der Temperaturdifferenz zwischen Oberfläche und Gas. Der Faktor α wird Wärmeübergangskoeffizient genannt und enthält die charakteristischen Einflüsse wie Gasgeschwindigkeit, Oberflächenrauigkeit und -feuchtigkeit, Temperaturniveau usw. Dieser Faktor ist nur experimentell zu ermitteln. Bei turbulenter Strömung wird die Beschreibung des Wärmeübergangs wesentlich komplizierter. Umfangreiche Forschungsarbeiten sind in diesem Fall angestellt worden, beziehen sich jedoch meist auf Spezialfälle [3, 4]. Hier soll vereinfacht angenommen werden, daß Gl. (5.1) gilt. Für die Berücksichtigung der Gasgeschwindigkeit v wird in erster Näherung folgender Ansatz gemacht

$$\alpha = \alpha_0 + av, \quad (5.2)$$

wobei α_0 der Koeffizient bei ruhendem Gas ist. Die Ermittlung des Faktors a führt in der Literatur zu recht unterschiedlichen Werten. Da der Bezug auf die Gasgeschwindigkeit in der Grenzschicht praktisch unrealistisch ist, geht hier also noch der Einfluß des Geschwindigkeitsprofils über der Oberfläche mit ein. Dieses Profil wird im allgemeinen durch ein Potenzgesetz folgender Art beschrieben,

$$\frac{v_2}{v_1} = \left(\frac{h_2}{h_1} \right)^\beta, \quad (5.3)$$

wobei den entsprechenden Abständen über der Oberfläche ihre Geschwindigkeit zugeordnet wird. Der Exponent β hängt dabei von den örtlichen Gegebenheiten, wie z.B. Oberflächenrauigkeit, ab. *Williams* [39] hat ihn für die Höhen $h_2 = 2$ m und $h_1 = 1$ m in der Umgebung eines freien Feldes mit $\beta = 1/7$ ermittelt. Die in der Literatur angegebenen Werte für a enthalten jedoch in den seltensten Fällen Angaben über die Höhe, in welcher die Geschwindigkeit v anzunehmen ist. Die Untersuchung von *Williams* an freien Oberflächen am Erdboden unter Feldbedingungen ergaben, daß zusätzlich die Größe und die charakteristischen Abmessungen einer betrachteten Fläche einen Einfluß auf den Wert des Faktors a haben. So sind sicher die zum Teil bemerkenswerten Unterschiede bei den vorzufindenden Wärmeübergangskoeffizienten zu erklären. Zur Veranschaulichung betrachte man *Tabelle 5.1*, die Werte sowohl aus Freifeldmessungen als auch aus Laboruntersuchungen enthält. Die Werte von α_0 haben die Einheit $W/m^2 K$.

	Schmidt [1]	1) Williams [39]	2) Williamson [32]	3) Zichner [52]	4) Cammerer [81]	5) Chapman (s. [39])
α_0	10,3	1,9	7,0	4,8	5,3	12,0
a	0,29	1,46	0,7	3,4	3,6	3,04

Tabelle 5.1
Angabe der Größen α_0 und a entsprechend Gl. (5.2)

- 1) v [m/s] in 15 m Höhe über Erdboden
- 2) keine Aussage über Ort der Windgeschwindigkeit
- 3) Platte allseitig frei, keine Aussage über Ort der Windgeschwindigkeit
- 4) bezogen auf ebene Wände
- 5) Freifeldmessung, keine weitere Aussagen

Eine weitere Komplizierung der Wärmeübertragungsverhältnisse ergibt sich, wenn das an einen festen Körper angrenzende flüssige oder gasförmige Medium in der Begrenzungsfläche seinen Aggregatzustand ändert, wie es bei Kondensation und Verdampfung der Fall ist.

3. Wärmeübertragung durch Strahlung

Grundsätzlich unterschiedlich zu den eben beschriebenen Vorgängen ist die Wärmeübertragung durch Strahlung, da für diesen Vorgang keine materiellen Träger notwendig sind. Aufgrund des elektromagnetischen Charakters wird die Wärmestrahlung durch die Theorie der Elektrodynamik und der Quantenelektrodynamik erklärt. Bezüglich des Gesamtspektrums der elektromagnetischen Strahlung ist Wärmestrahlung in den Wellenlängenbereich $\lambda = 0,8 \cdot 10^{-6}$ bis $0,8 \cdot 10^{-3}$ m einzuordnen. Nach der von *Planck* und *Wien* entwickelten Theorie hängt die Intensität der Strahlung eines schwarzen Körpers im Spektrum nur von dessen absoluter Temperatur ab. Der technisch interessante Teil der Wärmestrahlung ist zu unterteilen in kurzwellige Strahlung, erzeugt durch die Sonne, und in langwellige Strahlung, den Eigenanteil jedes Körpers. Diese Unterteilung ist deshalb wichtig, weil die Bereitschaft materieller Körper, Wärmestrahlung aufzunehmen, abhängig ist von deren Wellenlänge. Der Anteil der Strahlungsenergie im kurzwelligen Bereich läßt sich nach *Nehring* [47] relativ genau errechnen in Abhängigkeit des Sonnenabstandes, der jeweiligen geographischen Breite, des Normalluftdruckes und des Trübungsfaktors der Atmosphäre.

Im langwelligen Bereich gibt es zwischen strahlenden festen Körpern und gasförmigen Medien noch charakteristische Unterschiede. Während bei festen Körpern ein kontinuierliches Emissions- bzw. Absorptionsspektrum vorzufinden ist, strahlen Gase nur in bestimmten Banden. Die Strahlungsintensität hängt dabei im wesentlichen vom anteilmäßigen Gehalt an Kohlenstoff und Wasserstoff im Gas ab.

Festkörperstrahlung

Die als Festkörperstrahlung abgestrahlte Wärmemenge eines schwarzen festen Körpers wird beschrieben durch das *Boltzmannsche* Gesetz

$$\dot{i}_s = C_s \left(\frac{T + 273}{100} \right)^4 \quad (5.4)$$

mit dem konstanten Faktor $C_s = 5,77 W/m^2 K^4$. Technische Oberflächen haben zwar nicht das Absorptionsverhalten schwarzer Körper, jedoch eine ähnliche Spektralverteilung der Strahlungsenergie, so daß hier für Gl. (5.4) nun gilt

$$\dot{i} = \epsilon C_s \left(\frac{T + 273}{100} \right)^4 \quad (5.5)$$

Dabei ist ϵ der Emissionskoeffizient der jeweiligen Oberfläche. Das 2. *Kirchhoffsche* Gesetz stellt dann die Gleichheit von Absorptions- und Emissionskoeffizient bei gleicher Temperatur fest. Die Strahlungsintensität in einer von der Normale eines Oberflächenelementes abweichenden Richtung wird durch das *Lambertsche* Cosinusetz beschrieben

$$\dot{i}_\varphi = \dot{i}_n \cos \varphi \quad (5.6)$$

Hierin ist φ der Winkel zwischen Flächennormale und Strahlungsrichtung. Stehen zwei Flächen fester Körper im Strahlungsaustausch, so kann nach [2], [20] der ausgetauschte Wärmestrom beschrieben werden durch

$$\dot{i}_{O,O} = C_s \epsilon_1 \epsilon_2 \left[\left(\frac{T_1 + 273}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_2 + 273}{100} \right)^4 \right] \quad *$$

$$* \frac{1}{\pi A_1 A_2} \int \int \frac{\cos \varphi_1 \cos \varphi_2}{s^2} dA_1 dA_2 \quad (5.7)$$

Die Auswertung des Integrals in (5.7) für beliebig zueinander stehende Flächen ist relativ schwierig. Es wird daher in der folgenden Untersuchung für Brücken vereinfacht angenommen, daß deren Unterseiten mit der darunterliegenden Erdoberfläche parallel liegen.

Gasstrahlung

Aufgrund von Messungen wurde festgestellt, daß die von einem Gas ausgestrahlte Wärmemenge etwa proportional der 3. Potenz der Gastemperatur ist. Um jedoch eine gewisse Identität mit der Beschreibung der Festkörperstrahlung zu erzielen, wird der Wärmestrom zwischen Gas und fester Oberfläche nach [20] folgendermaßen beschrieben

$$\dot{i}_{G,O} \cong A C_s \frac{1 + \epsilon_0}{2} \left[\epsilon_G \left(\frac{T_G + 273}{100} \right)^4 - A_v \left(\frac{T_O + 273}{100} \right)^4 \right] \quad (5.8)$$

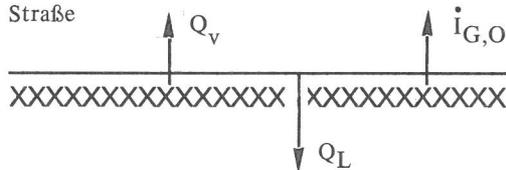
A_v = Absorptionskoeffizient des Gases.

Bei der Betrachtung des Wärmeaustauschs zwischen einem festen Körper und der freien Atmosphäre wird der umgebenden Luft unterstellt, daß sie die vom Körper emittierte Wärme vollständig absorbiert, d.h. sie ist bezüglich der Absorption ein schwarzer Körper mit $A_v = 1$. Die Emissionszahlen der Atmosphäre sind aufgrund des geringen CO_2 -Gehaltes nun lediglich abhängig vom Partialdruck des Wasserdampfes. *Nehring* [47] zeigt, daß infolge geringer Schwankungen des Wasserdampfdruckes in der Atmosphäre für den deutschen Bereich mit einem konstanten Emissionsfaktor ϵ_G gerechnet werden kann. Somit folgt aus (5.8)

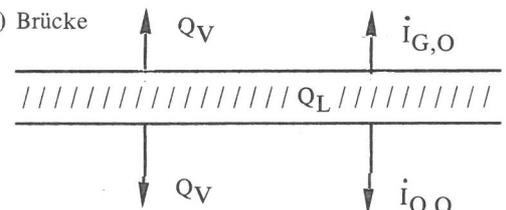
$$\dot{i}_{G,O} \cong A C_s \frac{1 + \epsilon_0}{2} \left[\epsilon_G \left(\frac{T_G + 273}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_O + 273}{100} \right)^4 \right] \quad (5.9)$$

Bei der folgenden Rechnung werden im Sinne einer Wärmebilanz an den Rändern zur Umgebung die folgenden Anteile berücksichtigt:

a) Straße



b) Brücke



Q_V = Wärmemenge infolge Konvektion

Q_L = Wärmemenge infolge Leitung

$\dot{i}_{G,O}$ = Wärmemenge infolge Strahlung: Oberfläche-Atmosphäre

$\dot{i}_{O,O}$ = Wärmemenge infolge Strahlung: Oberfläche-Untergrund

6. Meteorologische Grundlagen

Das Ziel ist es nun, mit der Lösung der Differentialgleichung (4.7) Aussagen zu treffen, die einen möglichst allgemeingültigen Charakter haben. Entsprechend sind die Randbedingungen anzunehmen. Wie in Abschnitt 5. dargestellt, beeinflussen die klimatologischen Umstände über den Wärmeübergang den thermodynamischen Zustand des betrachteten Bereichs. Um die in Abschnitt 8 beschriebenen Rechenannahmen zu motivieren, sollen jetzt hier die meteorologischen Einflüsse kurz vorgestellt werden, die etwa für den deutschen Raum Gültigkeit haben.

1. Sonnenstrahlung

Wie *Nehring* [47] zeigt, ist es prinzipiell möglich, die Menge der eingestrahlten Wärmeenergie im kurzwelligen Bereich mathematisch zu erfassen. Dabei ist jedoch zu berücksichtigen, daß die von der Sonne emittierte Wärmeenergie je nach Bewölkungsgrad und Trübungsgrad der Atmosphäre von Wolken und Atmosphäre zu bestimmten Anteilen reflektiert und absorbiert wird. Weitere Teile gelangen nach Streuung in der Atmosphäre als diffuse Strahlung auf die Erde. Während der Anteil der vom Erdboden absorbierten Direktstrahlung wesentlich von der Himmelsrichtung und von der Neigung der jeweiligen Oberfläche abhängt, kann gezeigt werden [52], daß dies bei der diffusen Himmelsstrahlung in dem Maße nicht der Fall ist. *Zichner* [52] gibt Berechnungsformeln zur quantitativen Erfassung der eingestrahlten kurzwelligen Anteile der Wärmeenergie an. Er macht auch deutlich, daß eine errechnete Himmelsstrahlung nur erste Anhaltswerte geben kann.

Da in der Literatur keine gesammelten Meßwerte der Einstrahlung im Winter gefunden wurde, wird aufgrund von Einzelaufzeichnungen (Meteorologisches Institut der FU Berlin) an "normalen trüben Wintertagen" im weiteren der Einfluß der kurzwelligen Strahlung auf die Wärmebilanz an der Oberfläche der betrachteten Bereiche vernachlässigt.

2. Luft

Die Jahreslufttemperaturen zeigen einen wellenförmigen Zeitverlauf, wobei das Minimum etwa im Januar liegt. Extreme in Deutschland gemessene Temperaturen liegen nach [52] bei etwa $-30^\circ C$. Übliche Monatsmittel im Winter liegen nach Auskunft des Met. Inst. der FU Berlin bei etwa $-2^\circ C$. Die üblichen Schwankungen des Tagesganges um den Tagesmittelwert liegen je nach geographischer Lage in Deutschland etwa bei $\pm 2^\circ C$ bis $\pm 5^\circ C$.

Die durchschnittlichen gemessenen Windgeschwindigkeiten in verschiedenen Städten zeigen ein sogenanntes geographisches Nord-Süd-Gefälle auf. Die Jahresmittel liegen dabei zwischen 1,8 m/s und 5,5 m/s. Das Januarmittel aller in *Bild 6.1* angegebenen Städte liegt bei etwa 4 m/s.

Wie bereits ausgeführt, hängt die Fähigkeit der Luft, Wärmestrahlung im langwelligen Bereich zu emittieren, wesentlich vom Druck des Wasserdampfes in der Atmosphäre ab (*siehe Bild 6.2*). *Nehring* [47] zeigt, daß die Schwankungen des Tagesganges unerheblich sind. Auch die geographische Lage und der Einfluß der jeweiligen Höhenlage können (bis etwa 1500 m N.N.) vernachlässigt werden. Die Schwankungen des Dampfdruckes im Jahresgang sind in *Bild 6.3* dargestellt. Für die Rechnung ist daraus ein Wert von $P_d = 5$ Torr angenommen worden, der die winterlichen Verhältnisse im Mittel recht gut erfaßt.

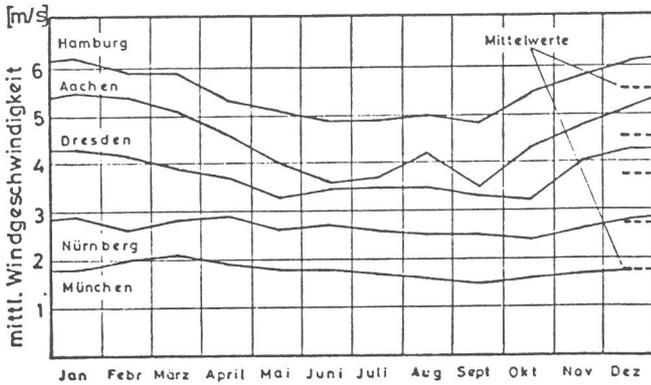


Bild 6.1
Mittlere monatliche Windgeschwindigkeiten in verschiedenen Städten nach [52]

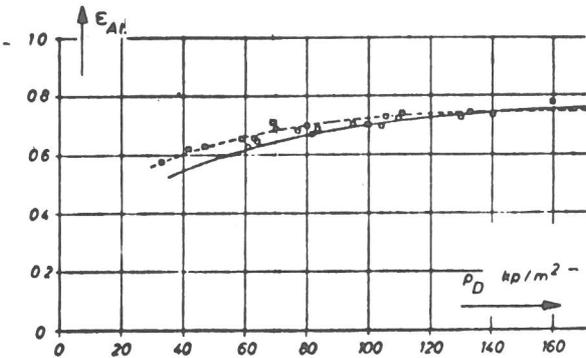


Bild 6.2
Emissionszahlen der Atmosphäre nach [31]

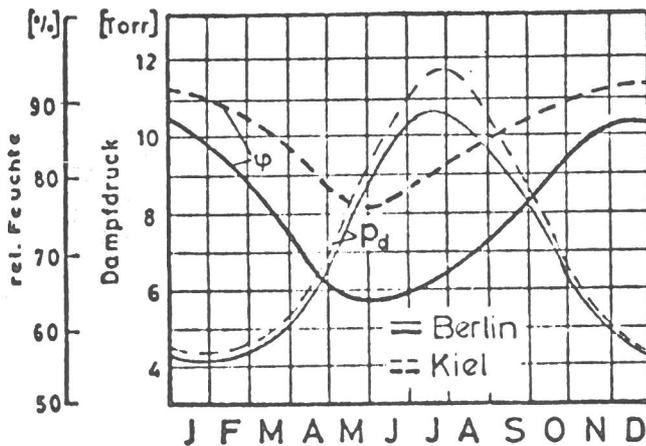


Bild 6.3
Jahresgang des Dampfdruckes p_D und der relativen Feuchte nach [52]

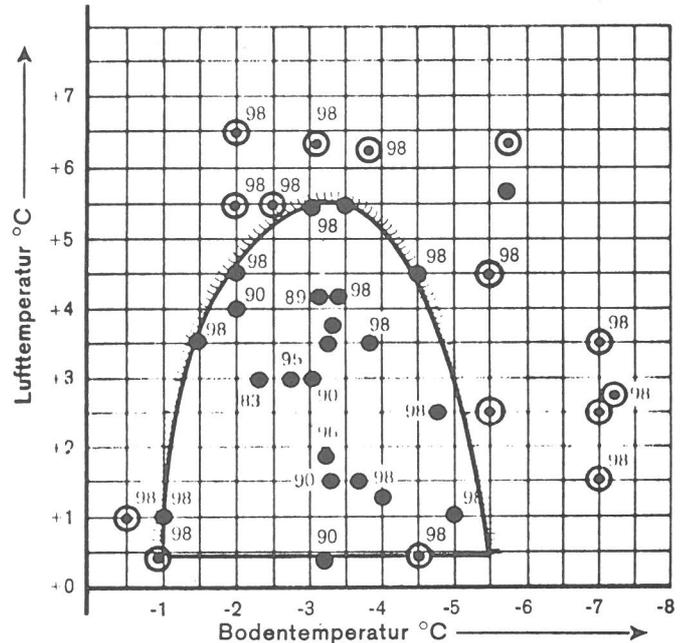
3. Glatteisbildung, Schneefall

Hier soll unter Glatteis nur diejenige Eisbildung verstanden werden, die nicht durch Schneefälle oder heruntergefallene Reifbildungen verursacht worden ist. Derartiges Glatteis kann sich unter verschiedenen Umständen bilden:

- a) Eisregen: Die Luftfeuchtigkeit kondensiert und den so gebildeten Regentropfen wird beim Fall durch kältere Luftschichten weitere Wärme entzogen. Die stark unterkühlten Tropfen gefrieren beim Aufprall auf die Erde sofort und bilden an der Oberfläche einen Eisüberzug.

- b) Durch Abkühlung einer nassen Oberfläche oder durch Benetzung einer unterkühlten Oberfläche mit Schmelzwasser, Niederschläge usw. kommt es unmittelbar zur Glatteisbildung. Nach Schneider [46] fallen mehr als 90 % der im Laufe der mikroklimatischen Messungen erfaßten Glatteisfälle in diese Gruppe.

- c) Kondensiert die Feuchtigkeit der unteren Luftschichten über einer unterkühlten Oberfläche, kommt es zu Reifbildungen. Voraussetzung dafür ist nach Koeniger (siehe auch Bild 6.4) eine Unterkühlung des Bodens im Bereich zwischen -1°C und $-5,5^{\circ}\text{C}$. Außerdem müssen die Lufttemperaturen im Bereich zwischen 0°C und $+6^{\circ}\text{C}$ liegen, sowie ein Sättigungsgrad der Luft von $> 85\%$ vorhanden sein.



- Glatteisbildung
 - ⊙ Schneebildung (Reif in Schnee übergehend)
- Die Zahlen geben die relative Luftfeuchtigkeit an

Bild 6.4
Grenzen der Glatteisbildung

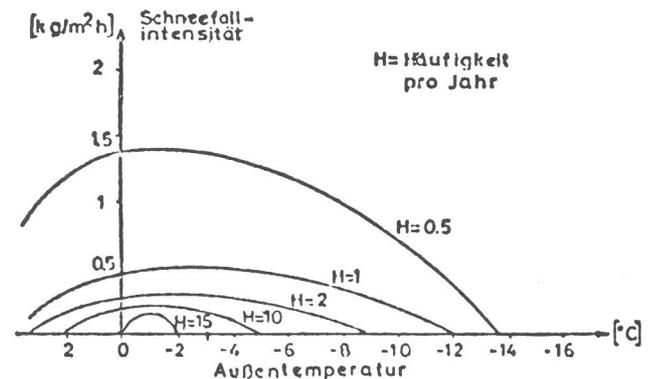


Bild 6.5
Häufigkeit der Schneefallintensitäten in Abhängigkeit von der Außentemperatur nach [31]

Bei Schneefall hängt die maximal anfallende Schneemenge ebenfalls von der Lufttemperatur ab. Dabei ist in Bild 6.5 jedoch noch nichts über die jeweilige Dichte des Schnees gesagt. Weise [28] zeigt auf, daß die durchschnittliche Temperatur während der Schneefallzeiten in Berlin in den vergangenen 70 Jahren etwa $-2,3^{\circ}\text{C}$ betrug.

Zusammenfassend kann man erkennen, daß der Temperatur-

bereich der Luft, der mit größerer Wahrscheinlichkeit das Auftreten von Schnee und Glatteis bedingt, nach oben und unten begrenzt ist. Er liegt etwa zwischen $-6^{\circ}\text{C} \geq T_L \geq +6^{\circ}\text{C}$.

4. Bodentemperatur

Da es für die Rechnung notwendig ist, das Integrationsgebiet zu begrenzen, und außerdem die Vorgabe eines Anfangstemperaturfeldes erforderlich ist, sollen hier Aussagen über die natürliche Temperaturentwicklung im Erdboden gemacht werden. *Dusch* [23] zeigt in seinen Berechnungen über die Eindringung der Kälte in einen Straßenkörper auf, daß sich der Einfluß von Schwankungen der Lufttemperatur auf die Bodentemperatur in erster Näherung wie eine gedämpfte Schwingung beschreiben läßt. Dabei wird der Dämpfungsanteil durch eine Exponentialfunktion beschrieben; Dämpfungsparameter sind die Tiefe, Temperaturleitzahl des Bodens und die Wellenlänge der Schwankungen. Durch die eintretende Phasenverschiebung zwischen der Luft- und Bodentemperatur kommt es dazu, daß das Temperaturmaximum des Bodens in einer Tiefe ≥ 5 m erst im Winter erreicht wird. Das zeigen auch die Messungen des Meteorologischen Observatoriums in Potsdam (siehe Tabelle 6.1). Die Schwankungen betragen im Jahresmittel in den vier ausgesuchten Jahren für

6 m Tiefe $9,92^{\circ}\text{C} \pm 1,97^{\circ}\text{C}$
 12 m Tiefe $9,82^{\circ}\text{C} \pm 0,36^{\circ}\text{C}$.

Die Temperaturen der oberen Bereiche schwanken entsprechend stärker. Die für die späteren Rechnungen benutzte Anfangstemperaturverteilung (siehe Bild 8.1) berücksichtigt diese Tatsache. Die Werte für die oberen Bereiche sind aus einer Temperaturmittlung der Monate November bis Februar des Jahres 1953, gemessen im Observatorium Potsdam, entstanden.

Monat	Messungen aus dem Jahre					
	1925		1940		1952	
	6 m	12 m	6 m	12 m	6 m	12 m
Jan.	10,04	9,59	10,51	10,28	11,0	10,37
Febr.	9,23	9,62	9,42	10,27	10,13	10,40
März	8,59	9,58	8,49	10,20	9,25	10,35
April	8,10	9,49	7,47	10,02	8,60	10,23
Mai	9,03	9,38	7,27	9,80	8,56	10,09
Juni	8,65	9,23	7,88	9,58	9,18	9,93
Juli	9,64	9,14	8,99	9,40	9,99	9,82
Aug.	10,67	9,16	10,25	9,32	11,03	9,80
Sept.	11,56	9,25	11,13	9,38	11,91	9,81
Okt.	11,89	9,38	11,49	9,49	12,30	9,97
Nov.	11,72	9,56	11,40	9,66	12,07	10,10
Dez.	11,09	9,74	10,81	9,83	11,45	10,22

Tabelle 6.1
 Jahrgang der Erdbodentemperaturen in 6 m und 12 m Tiefe, gemessen im Meteorologischen Hauptobservatorium Potsdam

7. Rechenmodellfindung

7.1 Erstellung technischer Modelle

Die Ermittlung des Übertragungsverhaltens der Systemkomponenten "Beheizbarer Belag" setzt voraus, daß jetzt der Auf-

bau des Belages spezifiziert wird. Obwohl eigentlich nur der thermodynamische Zustand in den oberen Bereichen des Belages interessiert, ist es natürlich sinnvoll, die weitere Umgebung so weit mitzubetrachten, wie diese einen möglichen Einfluß hat. Das heißt, daß bei einem Belag auf dem Erdboden sowohl der Straßenunterbau als auch der darunterliegende Boden bis zu einer gewissen Tiefe mitberücksichtigt wird. Dadurch hat man zugleich den Vorteil, für den unteren Rand des Bereiches eine sinnvolle thermische Randbedingung angeben zu können, die nicht von irgenwelchen Momentanzuständen abhängt. Die Auswahl der im folgenden betrachteten Modelle geschah derart, daß nur die für die Praxis relevanten Bauweisen berücksichtigt wurden. Als zusätzliche Variante wird zwischen Belägen auf dem Erdboden und solchen auf Brücken unterschieden, um somit den Einfluß des Unterbaus auf die Wirkung an der Oberfläche herauszufinden. Dabei konnten aus Zeitgründen leider nur Brückenkonstruktionen aus Stahl betrachtet werden. Jedoch ist der Einfluß einer Beton-Brückenkonstruktion durch diese beiden Fälle eingegrenzt.

Entgegen den in Abschnitt 2 aufgeführten Arbeiten wird jetzt der Aufbau der Beläge so realistisch wie möglich nachgebildet, so daß die Rechenergebnisse entsprechend den jeweiligen praktischen Gegebenheiten katalogähnlich zur Verfügung stehen. Das bedingt natürlich, daß bei der Konstruktion der Modelle die einzelnen Schichten im Belagsaufbau auch praktischen Anforderungen gerecht werden. Dadurch wird es notwendig, Vorschläge und Vorschriften im Rahmen von Standardbauweisen zugrunde zu legen. Im einzelnen werden dabei die Literaturstellen [58, 59, 60, 61] benutzt. Da der Belagsaufbau je nach Verkehrsbeanspruchung unterschiedlich dimensioniert wird, wird hier im Sinne von [58] eine "starke Verkehrsbelastung" (50000 - 100000 Kfz pro Doppelspur in 24 h oder über 500 - 1000 LKW mit über 5 to Nutzlast täglich) angenommen.

Während die Unterkonstruktion bei Brückenbelägen durch den Brückenaufbau festgelegt ist, wird es bei Straßenbelägen notwendig, diesbezüglich weitere Annahmen zu treffen. So ist hier vorausgesetzt, daß die Straßenbeläge auf einem Untergrund von erdfeuchtem Sand aufgebracht sind. Dabei soll dessen Oberbereich noch durch Zementverfestigung verbessert worden sein.

Die einzelnen Untersuchungspunkte bezüglich des Übertragungsverhaltens sind wie folgt beschrieben

Einfluß auf das Übertragungsverhalten von	bei				
	Straßenbelägen			Brückenbelägen	
	Bituminöser Aufbau	Zement-Beton-Aufbau	Kunstharz-aufbau	Bituminöser Aufbau	Kunstharz-aufbau
Heizleitertiefe (II)	10.212	10.212	10.212	10.222	10.222
Heizleiterabstand (I)	10.211	10.211	10.211	10.221	10.221

Tabelle 7.1
 Überblick über die in Abschnitt 10 aufgeführten Parametervariationen

7.11 Straßenbeläge

a) Bituminöse Aufbauten

Ausgehend von den Standardisierungsvorschlägen im bituminösen Straßenbau wird das in *Bild 7.1* dargestellte Modell im folgenden benutzt.

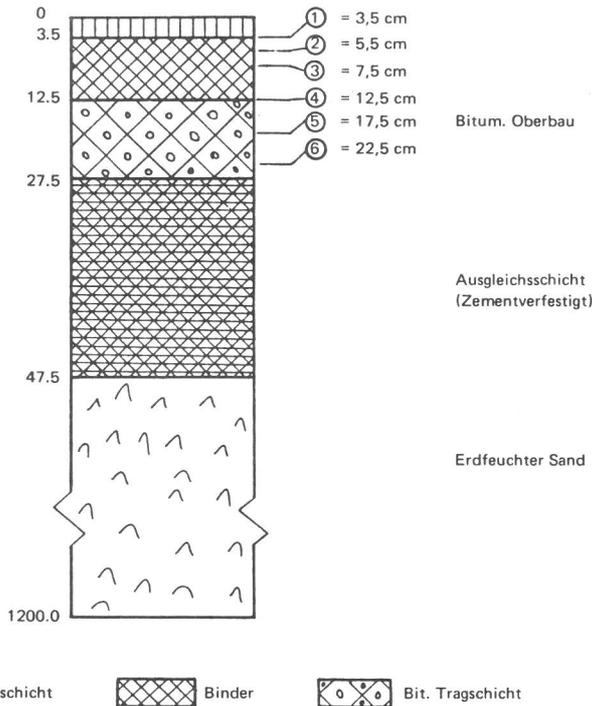


Bild 7.1
Bituminöser Straßenaufbau mit Angabe der Variation der Heizleitertiefe und der Schichtdicken in cm

Prinzipiell ist die Variation der Einbautiefe bituminöser Straßenaufbauten bereits eingeschränkt, und zwar aufgrund der speziellen Aufgaben der einzelnen Schichten des Aufbaus sowie der Einbauverfahren der Straßen sowie der Mischgutzusammensetzung.

Setzt man nun vorerst die Funktion der Heizung als die einer Oberflächenheizung voraus, ergeben sich folgende mögliche bzw. nichtmögliche Einbaulagen, wobei die Auswahl der einzelnen Schichtdicken über der Heizung nach den Erfordernissen der Einbaupraxis erfolgt.

- α) *Deckschicht*: Ein Einbau kommt nicht in Frage, da die Deckschicht als Verschleißschicht konzipiert ist.
- β) *Obere Binderschicht*: Die Mindestschichtdicke, die praktisch noch ausgeführt werden kann, wird überschlägisch mit $t = 2d$ angegeben, wenn d der Durchmesser des Größtkorns ist (siehe [60]). Geht man davon aus, daß i.a. für obere Binderschichten ein Korngrößenbereich 0/11 mm gewählt wird [60], ergibt sich daraus nur eine mögliche Anordnung, und zwar in der Mitte der Schicht.
- γ) *Untere Binderschicht*: Da hierfür i.a. der Korngrößenbereich mit 0/16 mm angegeben wird, ist die Mindestschichtdicke $t = 2d$. Bei einer vorgesehenen Schichtdicke von 5 cm ergibt sich somit keine Möglichkeit eines Einbaus in dieser Schicht.
- δ) *Tragschicht*: Der Korngrößenbereich dieser Schicht wird mit 0/25 – 0/32 mm vorgeschlagen, so daß die kleinstmögliche einbaubare Schichtdicke $t = 5,0$ bis 6,4 cm beträgt. Daher liegt der mögliche Einbaubereich einer Hei-

zung etwa 1,0 – 2,5 cm oberhalb und unterhalb der Mitte der Tragschicht. Weil die Gesamtüberdeckung in diesem Fall etwa 30 cm betragen würde, kann ein Heizungs-system nur im Zusammenhang mit dem Begriff der *Speicherheizung* betrachtet werden.

Weitere Einbaumöglichkeiten sind natürlich in den Trennschichten zwischen jeweils zwei Lagen gegeben. Die Menge aller Einbaumöglichkeiten ist in *Bild 7.1* dargestellt. Werden Heizleitungen verwendet, die nicht durch eine spezielle Um-mantelung so geschützt sind, daß sie den mechanischen Beanspruchungen bei Einbau ausreichend widerstehen können, ist es notwendig, eine spezielle *Bettungsschicht*, z.B. aus Asphalt-Mastix, vorzusehen. Da jedoch im allgemeinen eine derartige Schicht nicht den notwendigen Entwässerungseigenschaften des Straßenaufbaus genügt, ist ein Einbau der Heizung an den Stellen 4 und 5 entsprechend *Bild 7.1* nicht möglich.

b) Zement-Betonaufbauten

Entsprechend den Technischen Vorschriften Beton [61] sollte mit der Voraussetzung "starker" Verkehrsbelastung die Betondecke mit einer Dicke von 20 cm ausgeführt werden. Berücksichtigt man noch die in [61] gemachten Angaben bezüglich des Straßenunterbaus, so ist die Annahme eines Modells, wie in *Bild 7.2* dargestellt, sinnvoll. Eine gute Vergleichbarkeit der Wirkungen mit denen im Modell mit bituminösen Aufbau ist ebenfalls gegeben. Die Lage der Heizung innerhalb des Aufbaus wird wiederum mitbestimmt durch die Möglichkeiten der praktischen Ausführung des Straßenaufbaus. Zum anderen gibt es sicherlich Grenzen einer Minimalüberdeckung der Heizung aus Gründen der thermischen Belastbarkeit der Konstruktion in bezug auf Wärmespannungen. Nach Angaben der AGI [37] sollte die Mindestüberdeckung von 3 bis 4 cm nur dann unterschritten werden, wenn für eine ausreichend gute Wärmeverteilung gesorgt ist.

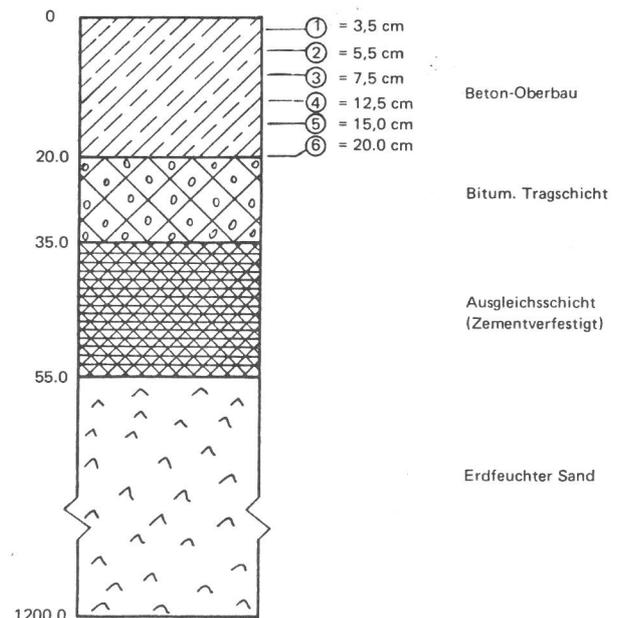


Bild 7.2
Beton-Straßenaufbau mit Angabe der Variation der Heizleitertiefe und der Schichtdicken in cm

c) Aufbauten mit Kunstharzdeckschicht

Um die in b) genannten Schwierigkeiten bezüglich geringer Überdeckung der Heizleiter zu überwinden, ist es möglich,

auf eine Betonkonstruktion eine Deckschicht aufzubringen, die aus einem Kunstharzmörtel besteht. Derartige Mörtel zeichnen sich dadurch aus, daß sie bei geringer Bauhöhe einen großen Widerstand gegenüber mechanischen Beanspruchungen bieten, wie etwa guten Abriebwiderstand. Bei dem folgenden Modell ist daher auf den in Bild 7.3 dargestellten Aufbau eine Kunstharzschicht vorgesehen.

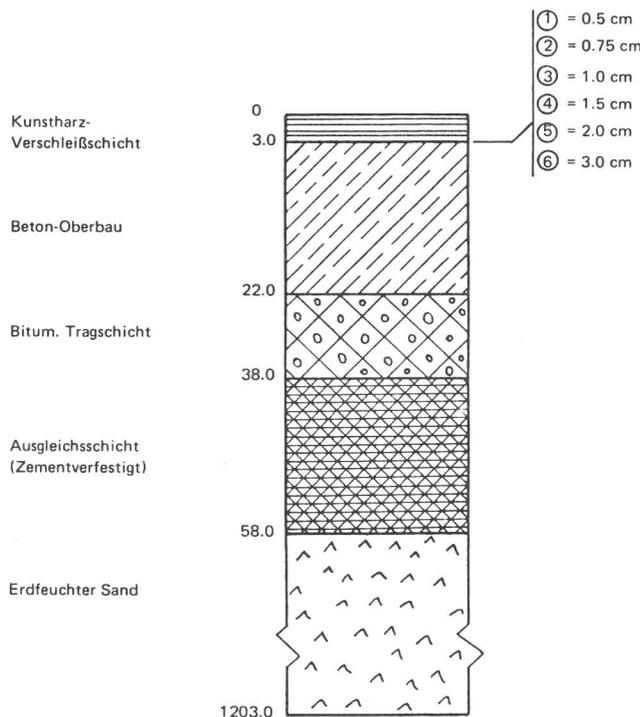


Bild 7.3 Beton-Straßenaufbau mit Kunstharzdeckschicht. Angabe der Variation der Heizleitertiefe und der Schichtdicken in cm

Die Überdeckungshöhe ist nach oben begrenzt. Einmal gibt es Schwierigkeiten beim Aushärtungsprozeß des Materials bei großer Überdeckung, zum anderen werden die Materialkosten unverhältnismäßig hoch. Die untere Grenze der Überdeckungshöhe wird bestimmt durch die gültigen Vorschriften über die Sicherheit gegen mögliche Beschädigungen der Heizleiter von außen und auch durch die Effektivität der Heizung in Bezug auf ein möglichst homogenes Temperaturfeld bei diskreten Heizleitern.

7.12 Brückenbeläge

a) Bituminöse Aufbauten

Um den besonderen Anforderungen bituminöser Beläge auf Stahlbrücken nachzukommen, werden bei der Modellfindung hier die technischen Vorschriften entsprechend dem "Merkblatt für bituminöse Fahrbahnbeläge . . . im Brückenbau" [58] sowie die Vorschläge des AGI [37] zugrunde gelegt.

Bei der Annahme eines größten Korndurchmessers von 10 mm in der Mineralmasse des Gußasphalts kommt man somit zu dem folgenden Modell. Die Annahme einer 2,0 cm dicken Brückenplatte wird auch in statischer Hinsicht als sinnvoll erachtet für eine größere Auswahl von Stahlbrücken. Der Einfluß von Versteifungen, wie Rippen oder Hohlkästen an der Unterseite, auf die Gestaltung der Temperaturfelder im Belag wird hier vernachlässigt. Bei der experimentellen Überprüfung dieser Annahmen in Abschnitt 9 zeigt sich dies als realistische Einschätzung.

b) Belag mit Kunstharzmörtel

Unter den gleichen Annahmen wie in Abschnitt 7.2 a) und 7.1 c) ist es möglich, ein Brückenmodell mit Kunstharzschicht zu erstellen (siehe Bild 7.5). Dabei wird angenommen, daß die Heizung selbst auf einem Schutz- und Haftanstrich verlegt wird. Die totale Überdeckung der Heizleiter ist dann durch die in Bild 7.5 angegebenen Tiefen repräsentiert.

7.2 Heizleiterabstand

Bei der in Abschnitt 2 beschriebenen Umfrage stellte sich heraus, daß bei den Herstellern von Freiflächenheizungen hinsichtlich des zu wählenden Heizleiterabstandes eine Unsicherheit besteht über die Kenntnis des Einflusses der unterschiedlichen Abstände auf die Schnelligkeit der Oberflächenerwärmung. Verbunden damit ist natürlich die Frage nach der thermomechanischen Belastung des Belages infolge inhomogener Temperaturverteilung.

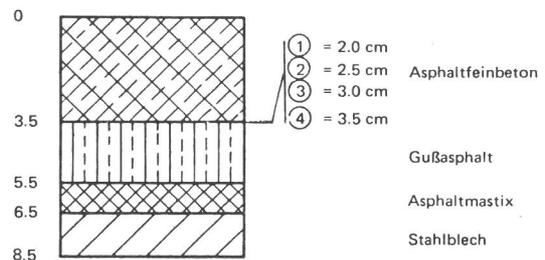


Bild 7.4 Bituminöser Belag auf Stahlbrücke. Angabe der Variation der Heizleitertiefe und der Schichtdicke in cm

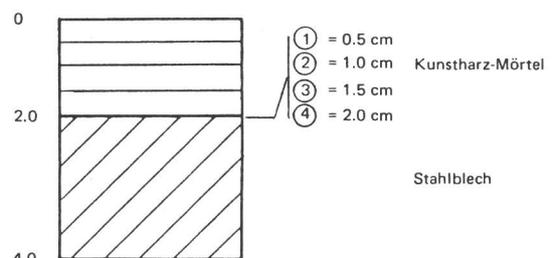


Bild 7.5 Kunstharzbelag auf Stahlbrücke. Angabe der Heizleitertiefe und der Schichtdicken in cm

Geht man von einer konstanten Flächenleistung der Heizung aus, so haben unterschiedliche Abstände natürlich auch einen Einfluß auf den Aufbau des Heizleiters. Kleine Abstände bedingen einen kleineren elektrischen Innenwiderstand. Der jeweils unterschiedlich große Strom bringt Konsequenzen im Isolationsaufwand mit sich. Es müssen auch Fragen der Anschlußkonstruktion an das elektrische Netz sowie Überlegungen über die Größe der verwendeten Spannung in diesem Zusammenhang durchdacht werden. Wegen der verschiedenen Meterleistungen erwärmen sich die Heizkabel unterschiedlich, wodurch bei nicht identischen Wärmeausdehnungen von Heizleiter und Umgebungsmaterial Zwängungsspannungen entstehen. Hier sollen jedoch nur die thermodynamischen Wirkungen der unterschiedlichen Heizleiterabstände untersucht werden. Die im folgenden angenommenen Abstände betragen 0,5 / 2,5 / 5,0 / 8,3 / 12,5 und 16,6 cm. Diese Größen haben sich bei der Auswertung der Firmenzuschriften als in der Praxis übliche Werte ergeben. Der Abstand von 0,5 cm entspricht dem einer vorliegenden Gitterheizmatte. Dabei ist aufgrund des ebenen Rechenmodells angenommen worden,

verlegten Belägen simuliert wird. Die gestrichelten Dreiecke repräsentieren den Wärmeübergang; in Knoten 35 wird die Außentemperatur beschrieben. Die Lage dieses Knotens hat jedoch keinen Einfluß auf das physikalische Geschehen. In Knoten 37 ist die punktförmige Wärmequelle angenommen worden. Die Maßangaben neben den Knoten beziehen sich auf das definierte kartesische Koordinatensystem. Das zugehörige Brückenmodell ist in *Bild 7.8* zu betrachten, dabei ist die Punktquelle jetzt in Knoten 29 zu finden.

Die bei der Wiedergabe der Rechenergebnisse benutzten Punkt- oder Knotennummern beziehen sich dann auf diese Darstellungen.

8. Rechenannahmen

Im folgenden sollen jetzt für die im Abschnitt 10 dargestellten Rechenergebnisse die angenommenen numerischen Größen der Stoffkennwerte und des Wärmeübergangs aufgezählt werden. Anhand von Messungen werden dann in Abschnitt 9 diese Annahmen auf ihre Brauchbarkeit überprüft.

a) Stoffkennwerte

In der Literatur werden für die einzelnen Stoffkennwerte sehr unterschiedliche numerische Angaben gemacht. So stellt z.B. *Kehlbeck* für Beton folgende Schwankungen fest:

spezifische Wärmekapazität	$0,8 \leq c \leq 1,25$ kJ/kgK
Wärmeleitfähigkeit	$0,8 \leq \lambda \leq 2,0$ W/mK
Dichte	$1800 \leq \rho \leq 2500$ kg/m ³

Nach der Untersuchung der Wärmeleitfähigkeit von Asphalten für den bituminösen Oberbau erhält *Kirk* [44] die Werte

$$0,81 \leq \lambda \leq 1,97 \text{ W/mK}$$

Diese Abweichungen sind zurückzuführen auf Unterschiede in der Zusammensetzung der Stoffe, deren Verdichtung, Feuchtigkeitsgrad, Versuchstemperatur usw. Bei der Angabe der entsprechenden Werte werden jedoch über diese Einflüsse i.a. keine Aussagen gemacht.

Für die nachfolgenden Rechnungen sind nach Einschätzung ihrer Brauchbarkeit die in *Tabelle 8.1* aufgeführten Werte den mitangegebenen Literaturstellen entnommen worden.

b) Wärmeübergangszahlen

Entsprechend den Ausführungen in Abschnitt 5 werden jetzt die zur Beschreibung des konvektiven Wärmeübergangs notwendigen Wärmeübergangskoeffizienten festgelegt. Von den in *Tabelle 5.1* zitierten Angaben sind für die auf dem Erdboden verlegten Beläge die Angaben von *Williams* benutzt worden, während die Wärmeübergangsverhältnisse an Brückenbelägen durch die Werte von *Zichner* beschrieben werden.

Zichner konnte damit in seiner Arbeit [52] eine gute Übereinstimmung zwischen Rechen- und Meßergebnissen herstellen. *Williams* trifft durch die Wahl seiner Meßfläche recht gut die geometrischen Verhältnisse, die bei Straßen vorliegen.

Hier soll nun von dem in *Bild 6.1* dargestellten Jahresmittel der Windgeschwindigkeiten $v = 3,7$ m/s ausgegangen werden. Setzt man voraus, daß diese Messungen sich auf die meteorologische Standardhöhe von 10 m beziehen, so errechnet sich die Windgeschwindigkeit in einer Höhe von 8 m nach Gl. (5.3) zu $v = 3,15$ m/s. Diese Höhe wird als eine durchschnittliche Höhe der Fahrbahnoberfläche auf Brückenbauwerken angenommen. Der Wärmeübergangskoeffizient nach *Zichner* beträgt dann $\alpha \approx 18$ W/m² K.

Baustoff	λ [W/mK]	C kJ/kgK	ρ [kg/m ³]	Literatur
Beton	1,5	0,96	2400	[51]
Asphaltoberbau	1,5	0,84	2400	[75]
Asphaltunterbau	1,37	1,0	2590	[44]
Kunstharz	0,90	0,94	1915	1)
Erdfeuchter Sand	1,39	1,05	1900	[81]
Ausgleichsschicht, zementverfestigt	1,74	0,88	2000	[75]
Stahl	46,4	0,48	7900	[81]
Asphaltmastix	0,40	1,0	1500	[51]
Asphaltfeinbeton	1,37	1,0	2590	[67]
Styroporbeton	0,15	1,26	650	[75]
Styrofoam	0,026	3,78	600	2)
Foamglas	0,052	0,84	1350	3)
Wasser	0,58	4,19	1000	[81]
Eis	2,22	2,09	900	[81]

1) Diesen Werten liegen Messungen der MPA Darmstadt sowie der BAM Berlin am Produkt Prodoral E zugrunde. Angegebene Werte sind Mittelwerte aus den Messungen an Mischungsverhältnissen 1:6, 1:3, 1:1.

2) Angaben der Firma Dow Chemical, Frankfurt, sowie aus Messungen der BAM Berlin

3) Angaben der Firma Deutsche Pittsburgh Corning GmbH

Tabelle 8.1

Thermodynamische Stoffkennwerte

Die für Straßen angenommenen Werte von *Williams* beziehen sich auf eine Meßhöhe der Windgeschwindigkeit von 15 m. Unter Zugrundelegung des oben angegebenen Jahresmittels von v ergibt sich hier $\alpha \approx 8$ W/m² K.

Für den Wärmeübergang durch langwellige Strahlung an den äußeren Rändern wird entsprechend Gl. (5.9) der Energieaustausch mit der Atmosphäre berechnet. Dabei wird die Temperatur der Atmosphäre mit der unten beschriebenen Lufttemperatur gleichgesetzt. Für den Wärmeaustausch an der Brückenunterseite wird Festkörperstrahlung im Sinne von Gl. (5.7) zwischen Brückenblech und darunterliegendem Erdboden vorausgesetzt. Der Erdboden soll mit einer Schneedecke überzogen sein. Die Temperatur der Schneedecke wird nach [54] in erster Näherung mit der darüberliegenden Luft gleichgesetzt. Im einzelnen sind die folgenden Absorptions bzw. Emissionsfaktoren benutzt worden.

	ϵ	Literatur
Asphalt	0,92	[11]
Beton	0,88	[9] [2]
Kunstharz	0,89	
Stahl, lackiert	0,95	[11]
Schneedecke, frisch	0,996	[9]
Wasser	0,96	[9]
Atmosphäre	0,70	[31]

Tabelle 8.2

Emissionsfaktoren für langwellige Strahlung

Wie in Abschnitt 6 erwähnt, wird der Einfluß kurzweiliger Einstrahlung vernachlässigt.

c) Lufttemperatur

Bei der Wahl der Außenlufttemperatur ist davon ausgegangen worden, daß die für Glatteisbildung und Schneefall interessanten Temperaturen im Bereich zwischen -6°C und $+6^{\circ}\text{C}$ liegen. Da bei den folgenden Untersuchungen auch die Wirkung extremer Heizleitertiefen beachtet werden soll, ist eine konstante Außentemperatur von -2°C gewählt worden. Damit ist es möglich, die zu simulierende Heizzeit und damit den Rechenaufwand in vernünftigen Grenzen zu halten und doch die entsprechenden Wirkungen beobachten zu können.

d) Anfangstemperaturverteilung und Heizprogramm

Die Lösung der Wärmeleitungsgleichung (4.7) wird wesentlich mitbestimmt durch die Wahl der Anfangsbedingung. Um die alleinige Wirkung der Heizung auf die Temperaturentwicklung im Belag festzustellen, wäre es notwendig, für den betrachteten Integrationsbereich in Bild 7.6 eine Anfangstemperaturverteilung vorzusehen, so daß ohne Heizung zumindest eine adiabatische Zustandsänderung möglich wäre. Bei ausschließlicher Betrachtung der linearen Randbedingungen der Wärmeleitung durch Konvektion am äußeren Rand wäre dies denkbar. Durch die Hinzunahme der Strahlungsrandbedingungen mit den unterschiedlichen Absorptions- und Emissionsfaktoren von Belag und Atmosphäre bzw. Umgebung ist ein derartiger Zustand nicht zu konstruieren. Aber selbst bei einer adiabatischen Zustandsänderung wären immer noch zeitlich veränderliche Wärmeflüsse im Inneren des Bereichs möglich. Diese wären ausschließlich durch ein homogenes Temperaturfeld zu vermeiden. Ein derartiges Feld ist jedoch praktisch unrealistisch, da die Messungen im Erdboden dies widerlegen.

Die Frage nach einer "sinnvollen" Anfangsbedingung könnte folgendermaßen beantwortet werden:

Es ist ein der Realität angepaßtes Temperaturfeld vorzugeben und dies lediglich unter dem Einfluß einer konstanten Außentemperatur bis zu einem stationären Zustand zu beobachten. Dieser stationäre Zustand wäre dann ein sinnvoller Anfangszustand zum Beobachten der Wirkung der eingeprengten Heizenergie.

Dieses Vorgehen wurde in den folgenden Rechnungen nicht gewählt. Einmal ist nicht abzuschätzen, wie lange es dauert, bis der instationäre Vorgang abgeschlossen ist. Zum anderen zeigen die Messungen der Meteorologen, daß ein Zustand konstanter Lufttemperatur über einen längeren Zeitraum hinweg nur ausgesprochen selten zu beobachten ist. Hier wurde für Straßenbeläge ein Vorgehen gewählt, das dem System im Sinne des eben Beschriebenen nur "eine gewisse Chance" zur Stabilisierung gibt. Das heißt, mit einer realistischen Anfangstemperatur (siehe Abschnitt 6) wird nach einem betrachteten Zeitraum von einer Stunde ohne Heizung ein konstanter Heizstrom eingeprengt und dieser Zustand über sechs Stunden hinweg aufrechterhalten. Die so ermittelte Temperaturentwicklung ist dann jedoch als Überlagerung eines Aufheizvorgangs mit dem eines gleichzeitigen Abkühlvorganges zu interpretieren.

Bei der Rechnung mit Brückenbelägen wurde ein homogenes Temperaturfeld vorgegeben, indem im gesamten Bereich des Belages die Temperatur der Außentemperatur gleichgesetzt wurde. Aber auch hier ist die in Abschnitt 10 dargestellte Temperaturentwicklung als eine entsprechende Überlagerung zu verstehen.

e) Heizleistung

Aufgrund der in Abschnitt 2 beschriebenen Ergebnisse aus der Befragung von Herstellern und den aus der Literatur entnommenen überschlägigen Berechnungen wird mit einer Heizleistung von 300 W/m^2 gerechnet. Diese Leistung wird als ausreichend angesehen, um Eis und Schnee an der Belagsoberfläche zu schmelzen. Außerdem ist damit eine genügend kurze Ansprechzeit der Heizung zu erwarten.

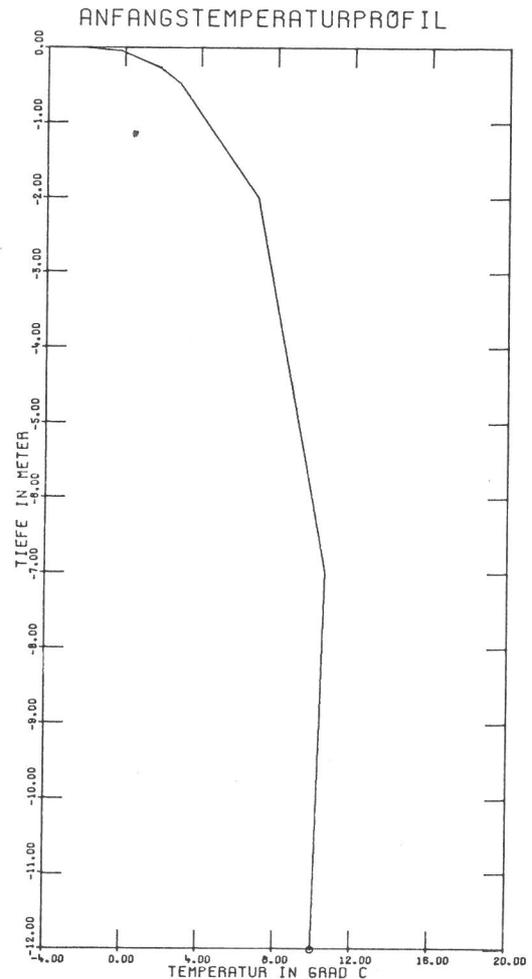


Bild 8.1
Anfangstemperaturverteilung für Rechenmodelle "Straßen"

9. Überprüfung der Rechenannahmen am Experiment

Um die Brauchbarkeit der in Abschnitt 7 dargestellten Rechenmodelle sowie die angenommenen Verhältnisse des Wärmeübergangs zu überprüfen, wurden exemplarisch Kontrollmessungen an konkreten Objekt ausgeführt. Dabei sollten auch die Randeinflüsse auf das Temperaturfeld des endlich begrenzten Objektes überprüft werden. Das Meßobjekt war die mit einem Pylon seilverspannte Fußgängerbrücke über die Bundesallee in Berlin-Wilmersdorf, deren Brückenplatte aus Stahl mit einem 20 mm dicken, beheizbaren Belag aus Teerexoxidharz bedeckt ist. Die Versuche wurden am 1. 4. 1976 von Mitarbeitern der Bundesanstalt für Materialprüfung ausgeführt. Die Heizung selbst besteht aus mäanderförmig verlegten Heizleitern in Brückenlängsrichtung. Die Überdeckungshöhe der Heizleiter beträgt 14,5 mm; der Heizleiterabstand wurde mit 63,0 mm gemessen. Die Heizleistung beträgt 300 W/m^2 .

Das Ziel der Experimente war die Ermittlung der Temperaturen an der Belagsoberfläche sowie an der Brückenunterseite. Um einen Vergleich mit den danach ausgeführten Rechnungen zu erstellen, wurde nach kurzer Einschaltdauer der Heizung die Lage der Heizleiter mit einer Infrarotkamera der AGA-Schweden (siehe auch [35]) lokalisiert. Entsprechend *Bild 9.1* wurden dann Thermoelemente angebracht. Die Temperaturen wurden mit Hilfe von Mehrfachpunkt-schreibern und durch digitale Aufzeichnung registriert. Die Windgeschwindigkeit in 2 m Höhe über Belagsoberfläche wurde mit einem Anemometer gemessen. Der Einfluß der Windgeschwindigkeit auf den Wärmeübergang wurde qualitativ mit Hilfe von installierten Wärmestrommessern erfaßt. Dabei waren die Wärmestrommesser gegen direkte Sonneneinstrahlung abgeschattet.

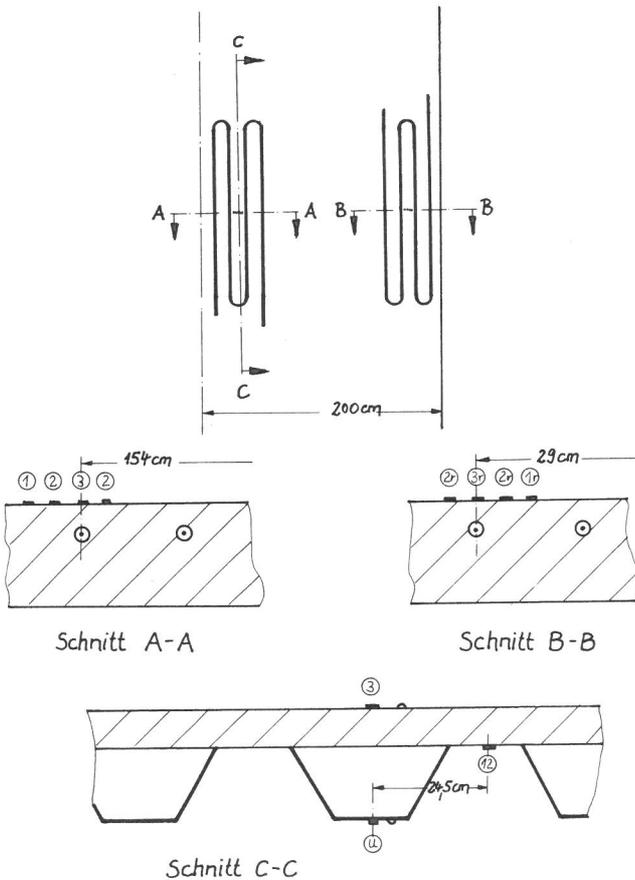


Bild 9.1
Die Lage der Temperatur- und Wärmestrommeßstellen auf der Belagsoberfläche und Brückenunterseite der Fußgängerbrücke Bundesallee

— Temperaturmeßstellen ▲ Wärmestrommeßstellen

Bild 9.4 zeigt den mittleren Verlauf der Außenlufttemperatur. Die Heizzeit im Versuch betrug 96 Minuten. Weitere 35 Minuten lang wurde der Abkühlvorgang beobachtet.

Entsprechend den Ausführungen in Abschnitt 7 ist dann der Brückenquerschnitt mit einem Dreischichtmodell für das Rechenprogramm nachgebildet worden (siehe *Bild 9.3*). Zur Beschreibung des konvektiven Wärmeüberganges an den Rändern wurden die Wärmeübergangszahlen gemäß Abschnitt 8 zu

$$\alpha_{\text{oben}} = 11,6 \text{ W/m}^2 \text{ K}$$

$$\alpha_{\text{unten}} = 5,8 \text{ W/m}^2 \text{ K}$$

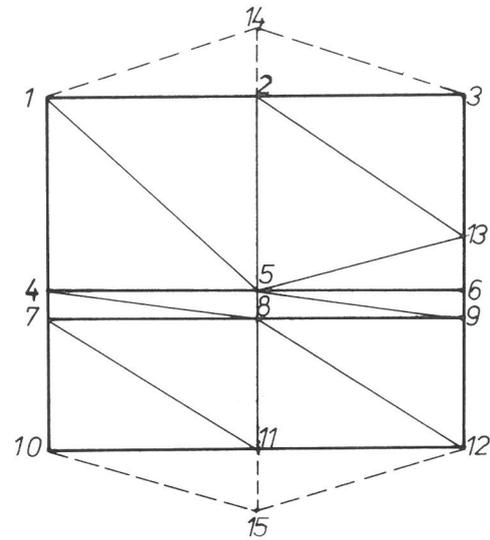


Bild 9.2
Rechenmodell für den beheizbaren Brückenbelag gemäß *Bild 9.3*

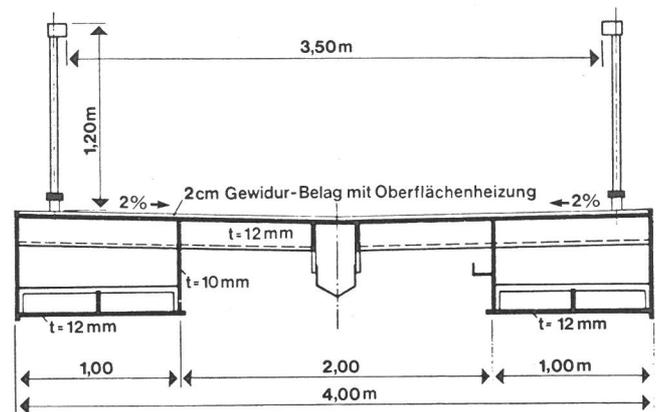


Bild 9.3
Brückenquerschnitt der Fußgängerbrücke Bundesallee

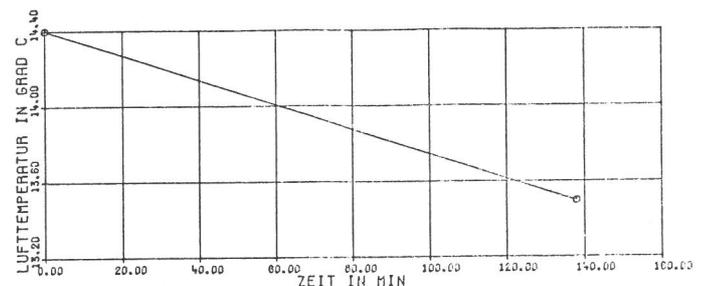


Bild 9.4
Gemessene Lufttemperatur im Versuchszeitraum

gewählt. Diese unterschiedlichen Werte für unten und oben sind im Verhältnis der jeweils gemessenen Wärmeströme angenommen worden.

Da im Meßzeitraum bei zum Teil unbewölktem Himmel die Belagsoberfläche durch Sonneneinstrahlung zusätzlich erwärmt wurde, ist dieser Anteil gemäß *Bild 9.5* bei der Wärmebilanz mitberücksichtigt worden. Die Fähigkeit der Belagsoberfläche, anteilmäßig kurzwellige Wärmestrahlung zu absorbieren, ist durch einen Absorptionsfaktor $A_{V,\text{oben}} = 0,9$ beschrieben. Der von der Umgebung reflektierte und von der Brückenunterseite absorbierte kurzwellige Anteil der in *Bild 9.5* dargestellten Wärmemenge ist gemäß *Zichner* [52]

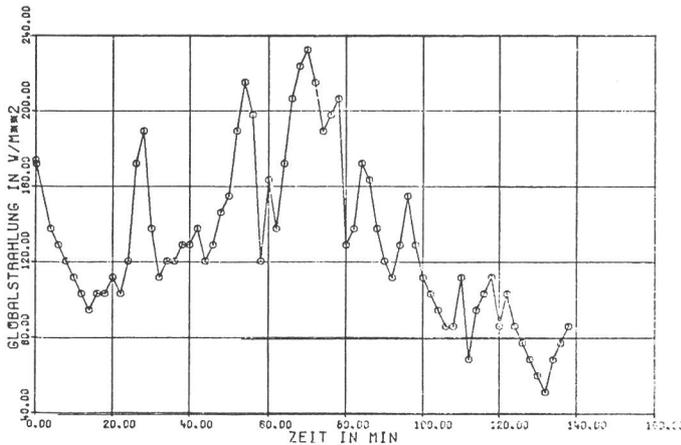


Bild 9.5
Vom Meteorologischen Institut der Freien Universität Berlin registrierte Globalstrahlung im Versuchszeitraum

mit einem Faktor $A_{v,unten}=0,1$ berücksichtigt worden. Entsprechend Abschnitt 5 gehen die Absorptions- und Emissionsfaktoren für langwellige Strahlung folgendermaßen ein.

oben: $\epsilon_{At} = 0,75$ $\epsilon_{Bo} = 0,8$
 unten: $\epsilon_o = 0,99$ $\epsilon_{Bo} = 0,93$

Für die thermodynamischen Stoffkennwerte sind die nachfolgenden Annahmen gemacht worden

	λ [W/mK]	c [kJ/kgK]	ρ [kg/m ³]
Teerexpoxidharz	0,18	1,24	1300
Teerexpoxidharz, verfüllt	0,20	0,88	1890
Stahl	46,4	0,48	7900

Vergleicht man jetzt die gemessenen und gerechneten Werte in Bild 9.8, so stimmen die Ergebnisse an der Brückenunterseite gut überein. Die Temperaturunterschiede zwischen dem wärmsten und kältesten Punkt im Modell sind aufgrund der guten Wärmeleitfähigkeit von Stahl erwartungsgemäß gering. Der entsprechende Vergleich für die Belagsoberseite ergibt, daß die maximalen Unterschiede in Temperaturverlauf etwa 15 % betragen. Eine gewisse Phasenverschiebung zwischen den gerechneten und gemessenen Größen ist wahrscheinlich damit zu erklären, daß der Aufzeichnungsort der betrachteten Globalstrahlung (Meteorologisches Institut der FU Berlin) von der Brücke Bundesallee etwa 8 bis 10 km entfernt ist. Bei wechselnder Bewölkung ist daher der Einfluß der Strahlung an beiden Orten zu gleichen Zeiten nicht identisch. Die Unterschiede vergleichbarer Meßpunkte im Mittenbereich der Brücke und an deren Rand (Bild 9.6 und 9.7) sind so gering, daß die Vernachlässigung des Randeinflusses bei den folgenden Rechnungen berechtigt erscheint.

Weiterhin ist zu berücksichtigen, daß mit den dem Rechenprogramm punktweise vorgegebenen Werten von Funktionen, z.B. Globalstrahlung zu verschiedenen Zeitpunkten, eine kubische Spline-Interpolation vorgenommen wird. Dies wiederum hat zur Folge, daß die schließlich für die Rechnung benutzten Stoffkennwerte infolge starker Welligkeit der Funktion oftmals überhöhte Beträge aufweisen. In diesem Zusammenhang wird auf die Plotterbilder in Abschnitt 10 verwiesen.

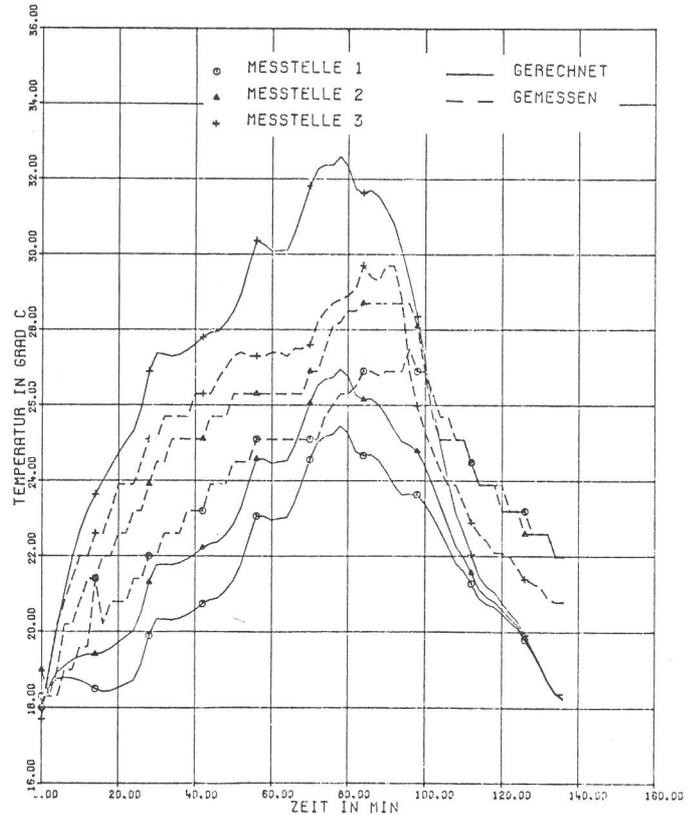


Bild 9.6
Gerechnete und gemessene Oberflächentemperatur im Mittenbereich der Brücke infolge Heizung und Abkühlung

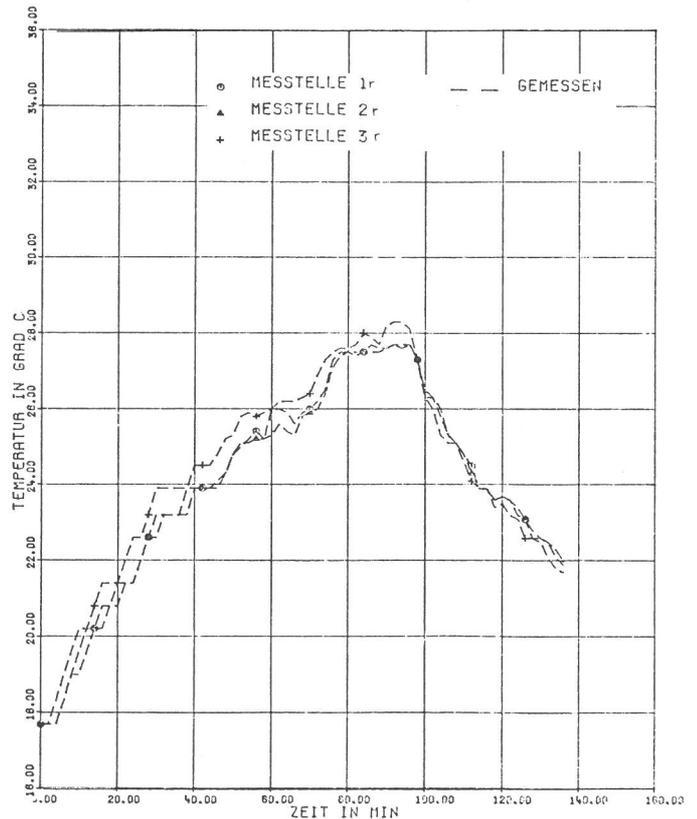


Bild 9.7
Gemessene Oberflächentemperaturen im Außenbereich der Brücke infolge Heizung und Abkühlung

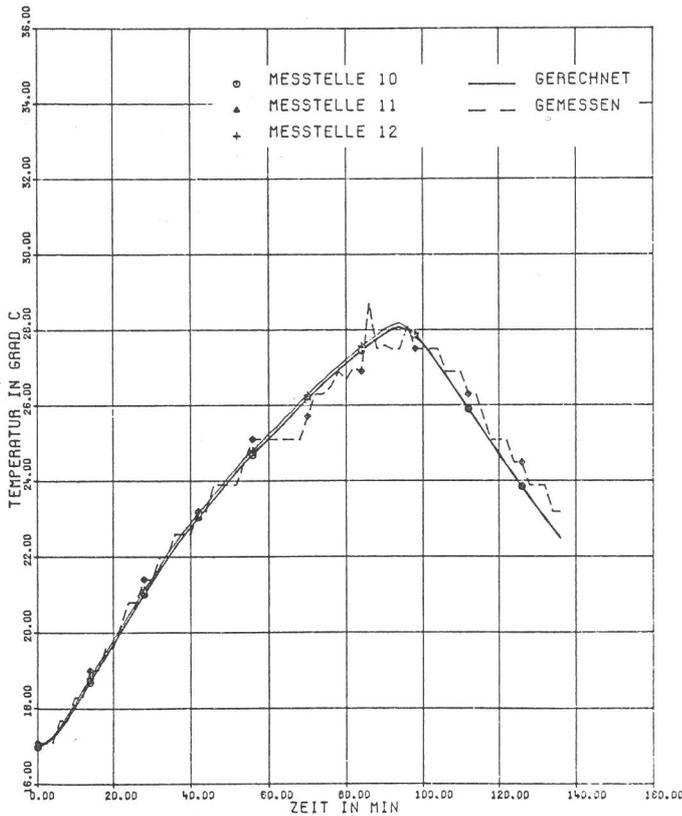


Bild 9.8
Gerechnete und gemessene Temperaturen an der Unterseite der Brückenplatte

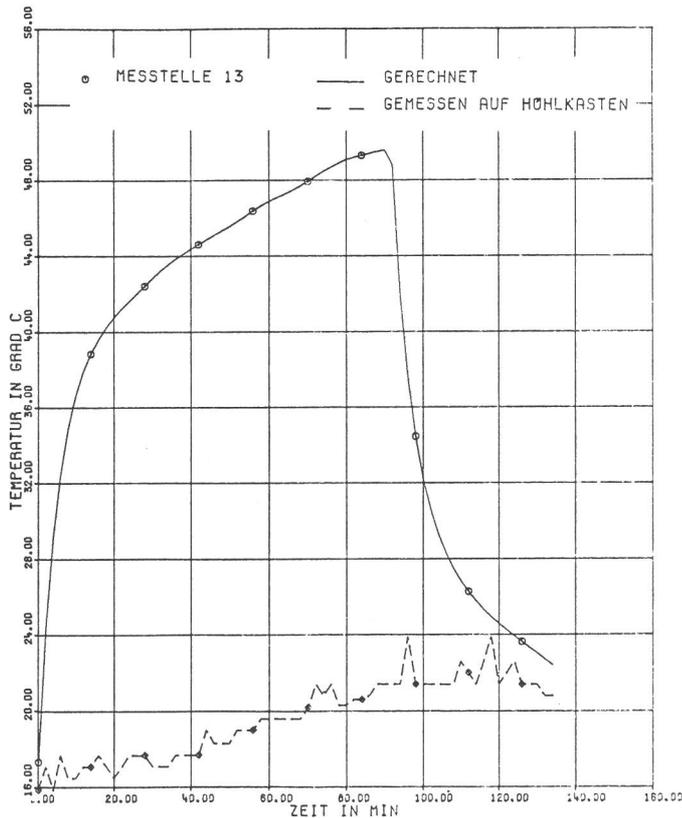


Bild 9.9
Gemessener Temperaturverlauf auf dem Hohlkasten der Brücke
Gerechneter Temperaturverlauf im fiktiven Heizleiter des Rechenmodells nach Bild 9.2

10. Rechenergebnisse

Für die in den vorangegangenen Abschnitten vorbereiteten Rechnungen sollen jetzt die Ergebnisse dargestellt und interpretiert werden. Bezüglich der in den Rechnungen variierten Parameter wird noch einmal auf *Tabelle 7.1* verwiesen. Hier sollen zunächst die Straßen- und Brückenbeläge getrennt betrachtet werden. Über die in *Tabelle 7.1* aufgeführten Variationen hinaus ist dann im weiteren der Einfluß einer Wärmedämmschicht auf die Temperaturentwicklung betrachtet worden. Um einen Eindruck zu bekommen, welchen Anteil die Strahlung am Wärmeübergang hat, sind dafür ebenfalls Rechnungen ausgeführt worden. Zum Schluß werden dann noch die Einflüsse endlich ausgedehnter Heizleiter im Rechenmodell auf die Ergebnisse untersucht.

10.1 Darstellungsarten

Zur Darstellung der Rechenergebnisse sind zwei dafür entwickelte Auswertungsprogramme benutzt worden. Mit dem vorliegenden Plotterprogramm ist es möglich, für eine beliebige Menge von auf Magnetband aufgezeichneten Rechenergebnissen Kurven aufzuzeichnen, die sich für vergleichende Untersuchungen anbieten. Im einzelnen sind folgende Darstellungen gewählt worden:

- Die Temperatur eines Punktes in Abhängigkeit von der Zeit,
- die Temperaturdifferenz zwischen zwei beliebigen Punkten des Rechenmodells in Abhängigkeit von der Zeit,
- die mittlere Wärmestromdichte zwischen zwei Punkten des betrachteten Bereichs über der Zeit. Hier gilt jedoch die Einschränkung, daß die Punkte in einem Bereich gleicher Wärmeleitfähigkeit oder auf dessen Rand liegen müssen. Weiterhin ist es sinnvoll, Punkte zu wählen, die auf einer monotonen Temperatur-Ortskurve $T = T(x)$ liegen, da die Wärmestromdichte durch

$$\dot{q} = -\lambda \frac{\Delta T}{\Delta s} \tag{10.1}$$

approximiert wird. Ebene Verhältnisse sind vorausgesetzt.

- Die Temperaturgeschwindigkeit eines beliebigen Punktes über der Zeit. Die Differentiation wird dabei durch einen mittleren Differenzenquotienten $\left. \frac{\partial T}{\partial t} \right|_{t_i} \approx \frac{T_{i+1} - T_{i-1}}{2\Delta t}$ dargestellt,
- die Entwicklung eines Temperaturprofils über der Zeit. Dabei wird jedem Punkt des Modells, der auf einer beliebig gedachten Kurve liegt, zu vorgegebenen Zeitpunkten seine Temperatur zugeordnet.

Alle Darstellungen außer der des Temperaturprofils sind das Ergebnis einer auf die zugeordneten Wertepaare angewandten Spline-Approximation 3. Grades. Dies hat zur Folge, daß einige Darstellungen ein sogenanntes "Überschwingverhalten" aufzeigen, welches nicht das Resultat aus der Wärmeleitrechnung ist.

Mit dem zweiten Auswertungsprogramm ist es möglich, für einen beliebig vorgebbaren Teilbereich des Integrationsgebietes von Gl. (4.7) ein kontinuierliches Temperaturfeld zu jedem Zeitpunkt darzustellen. Dies wird durch eine lineare Interpolation der Knotentemperaturen in dem vorliegenden Gebiet erreicht. Die Darstellung selbst erfolgt in Form von Isothermen, so daß jedem Ort gleicher Temperatur über den Schnelldrucker derselbe Buchstabe zugeordnet wird.

10.2 Untersuchungsergebnisse

Die Darstellung der Ergebnisse soll noch einmal je nach Modell und Parameter unterschieden werden. Die Interpretation wird unter den Begriffen "Schnelligkeit des Systems, Homogenität der Temperaturfelder, Wärmeverluste und thermomechanische Beanspruchung des Belages" geführt werden. Dabei sollen die einzelnen Ergebnisse als Entscheidungshilfe für zu wählende Parameter oder auch als Hinweise für konstruktive oder ausführungstechnische Überlegungen dienen, wie sie etwa beim Entwurf der Regeleinrichtung notwendig sind. Durch eine Gegenüberstellung der einzelnen Modelle sollen dann die charakteristischen Unterschiede aufgezeigt werden.

Bilder gleicher Darstellung werden mit gleichen arabischen Ziffern gekennzeichnet. Entsprechend Tabelle 7.1 bedeuten

I = Heizleiterabstandsvariation,

II = Heizleitertiefenvariation.

Bild 1: Hier wird der Zusammenhang zwischen der Temperaturentwicklung im Punkt mit der geringsten Oberflächentemperatur und den jeweiligen variierten geometrischen Parametern (Heizleiterabstand bzw. -tiefe) dargestellt. Dieser Punkt ist für die praktische Ermittlung der Temperatur dann der wichtigste, wenn an Heizung und Regeleinrichtung die Forderung nach "Eisfreiheit auf der gesamten Oberfläche" gestellt werden soll. Damit ist gemeint, daß das Übertragungsverhalten des Belages in Bezug auf die Temperatur durch diesen Punkt charakterisiert werden kann.

Bild 2: Mit dieser Darstellung soll deutlich gemacht werden, welchen Einfluß die geometrischen Parameter auf die Homogenität des Temperaturfeldes haben. Stellvertretend dafür ist die Oberflächentemperaturdifferenz zwischen dem wärmsten und dem kältesten Punkt aufgezeichnet worden. In Verbindung mit Bild 1 sind somit Rückschlüsse auf das Temperaturverhalten direkt über dem Heizleiter möglich. Während die Inhomogenität des Temperaturfeldes ein Maß für im Belag vorhandene Wärmespannungen ist, läßt die Angabe der größten Oberflächentemperatur Aussagen über die Konsistenz des Belagsmaterials zu. Dies ist gerade bei oberflächennah verlegten Heizsystemen in Gußasphalt wichtig, um eine mögliche Bewegung der Heizkabel infolge Verkehrsbelastung abschätzen zu können.

Bilder 3 und 4: Um einen Eindruck zu bekommen, welchen Einfluß die Wärmeabgabe der Heizkabel auf die Temperaturentwicklung in den oberen Schichten der betrachteten Modelle hat, ist in diesen Bildern der Verlauf der Temperaturprofile in der Symmetrieebene zwischen den Heizleitern aufgezeichnet worden. Dabei sind jeweils zwei extreme Lagen von Heizleiterabstand oder -tiefe gegenübergestellt. Zur besseren Übersicht sind allerdings nicht die jeweiligen Absoluttemperaturen, sondern die Temperaturdifferenz gegenüber einem Anfangszustand aufgezeichnet worden. Dieser Anfangszustand liegt je nach Angabe entweder 10 Minuten oder sogar nur einige Sekunden vor dem Einsetzen der Heizung.

Damit soll es z.B. möglich sein, den Einfluß der geometrischen Parameter auf die Wärmeverluste sowohl an der Oberfläche als auch in den Untergrund beurteilen zu können. Weiterhin ist die Fläche unter der Tiefen-Temperaturzuwachs-Kurve ein Maß für die gespeicherte Wärmeenergie in den oberen Schichten des Belages. Für die Auslegung einer Intervallheizung ist deren Kenntnis von entscheidender Bedeutung. Diese Bilder sollen auch in Hinblick auf den mög-

lichen Einbau einer Wärmedämmschicht zur Beurteilung der Tiefenlage der Dämmschicht herangezogen werden. Schließlich ist es mit diesen Bildern möglich, im Sinne einer Plattenrechnung implizierte Wärmespannungen abzuschätzen. Die jeweilige gestrichelte Linie in den Bildern gibt Aufschluß über die Lage der Wärmequelle gemäß Bild 7.7 bzw. 7.8.

Bild 5: Gemäß Abschnitt 10.1 ist hier der Differenzenquotient der Temperatur über der Zeit für den Punkt der geringsten Oberflächentemperatur aufgetragen. Dieses Bild soll zur Beurteilung des instationären Heizvorganges in bezug auf seine Schnelligkeit dienen. Die Art der jeweiligen Temperaturentwicklung wird beschrieben durch

$$\frac{\partial T}{\partial t} \begin{cases} > 0 & \text{Aufheizen} \\ < 0 & \text{Abkühlen} \\ = 0 & \text{stationärer Zustand.} \end{cases}$$

Weiterhin ist die Kenntnis des dynamischen Verhaltens des Belages in bezug auf die Anpassung der Reglercharakteristik wichtig. Außerdem ist gemäß Gl. (4.7) die Fläche unter der Temperaturänderung-Zeit-Kurve ein Maß für die in dem Punkt gespeicherte Wärmeenergie, die im Fall eines Abtauvorganges an der Oberfläche als Umwandlungswärme zur Verfügung gestellt werden kann.

Bild 6: Diese Darstellung soll als eine Abschätzung für die in den Untergrund abfließende Wärme verstanden werden. Im Sinne einer Wärmebilanz ist dies der Anteil, der zur Erwärmung der Oberfläche auf jeden Fall *nicht* zur Verfügung steht. Durch die Wahl der angegebenen Punkte, zwischen denen die Wärmestromdichte berechnet wurde, ist somit eine obere Grenze für die Wärmeverluste angegeben. Ein arithmetischer Mittelwert aus diesen Angaben und denen für die kälteste Ebene aus den Bildern 4 und 5 unter Benutzung der angegebenen Stoffkennwerte ist möglich. Hierbei soll noch einmal darauf hingewiesen werden, daß diese Größen unter der Annahme eines ebenen Modells errechnet sind.

Bild 7: Dieses Bild stellt die Wärmestromverhältnisse in horizontaler Richtung dar. Damit sollte untersucht werden, welchen Einfluß die geometrischen Parameter auf den Wärmestrom haben. Die Motivation dafür war, die Wirkung einer gut wärmeleitenden Einbettungsschicht der diskreten Heizleiter auf die Temperatur im kältesten Oberflächenpunkt zu studieren. Diese Untersuchung konnte aus Zeitgründen jedoch nicht stattfinden.

Bild 8: Für die Beläge auf Brücken ist in diesem Bild der Temperaturverlauf an der Brückenunterseite dargestellt. Damit wird ein Eindruck vermittelt, wie notwendig die Bemühungen sind, beheizbare Beläge auf Stahlbrücken mit Wärmedämmschichten zu versehen.

Zusammenfassend soll noch einmal gesagt werden, daß nicht der Anspruch besteht, die folgenden Rechenergebnisse allen Möglichkeiten nach zu interpretieren. Vielmehr sollen die so dargestellten Bilder lediglich die physikalischen Verhältnisse aufzeigen, die sich bei der Variation einzelner Konstruktionsparameter einstellen. Damit wird der Freiraum gelassen, der für die Übertragung der Ergebnisse auf jeweils vorliegende praktische Beläge notwendig ist. Mit den vorn gemachten Voraussetzungen ist diese Übertragbarkeit gewährleistet.

10.21 Straßenmodelle

10.211 Variation des Heizleiterabstandes

a) Modell Asphaltpflaster

Bei dieser Untersuchung ist davon ausgegangen worden, daß die Einflüsse des Heizleiterabstandes sich am deutlichsten bei einer geringen Überdeckungshöhe der Heizung zeigen werden. Aus diesem Grund und wegen der nicht zu realisierenden Berechnung aller möglichen Kombinationen von Abstand und Tiefe ist eine Einbettungstiefe von 3,5 cm gewählt worden. Der Einfluß größerer Heizleitertiefen auf die Abstandsvariation kann beim Vergleich der hier dargestellten Ergebnisse mit denen aus Abschnitt 10.212 erkannt werden. Die Heizzeiten bis zum Erreichen der Temperatur von 0°C erhält man aus der Projektion der Schnittpunkte der Temperaturkurven mit der 0°C-Linie auf die Zeitachse. Sie sind in Bild ASI/0 dargestellt.

Bei Vergleichsrechnungen mit dem gleichen physikalischen Modell, jedoch mit unterschiedlich feiner Diskretisierung des Bereiches, zeigt sich, daß bei einem Modell mit nur 19 Knoten gegenüber einem mit 32 Knoten Abweichungen in den Rechenergebnissen festzustellen waren. Die Temperaturegebnisse des gröber unterteilten Modells waren zu gleichen Zeiten etwa 5 bis 13 % niedriger als die des feineren Modells. Aus rechentechnischen Gründen konnte für das Modell Heizmatte nicht die übliche Unterteilung benutzt werden, sondern nur eine gröbere. Die Verhältnisse der Knotenzahl entsprachen dabei den oben erwähnten Größenordnungen. Aus diesem Grund muß der in Bild ASI/0 dargestellte Verlauf im Sinne der gestrichelten Linie korrigiert werden.

Die Vorgabe einer Zieltemperatur $\geq 0^\circ\text{C}$ ergibt ähnliche nichtlineare Zusammenhänge zwischen Abstand und Heizzeit. Dabei wird der Exponent der Potenzfunktion nicht wesentlich verändert, wie sich aus Bild ASI/5 herauslesen läßt.

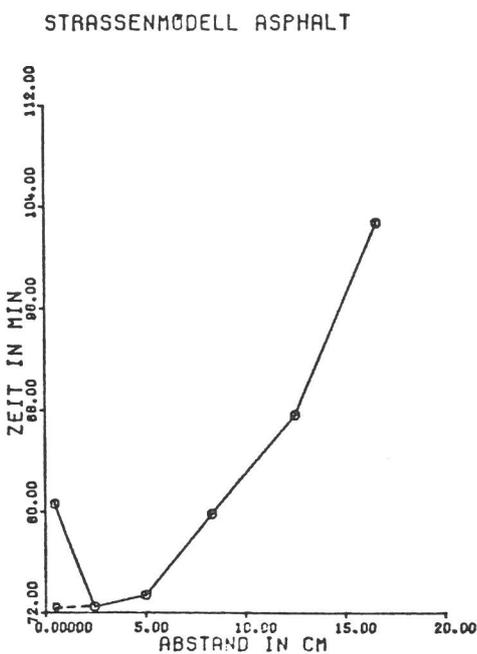


Bild ASI/0

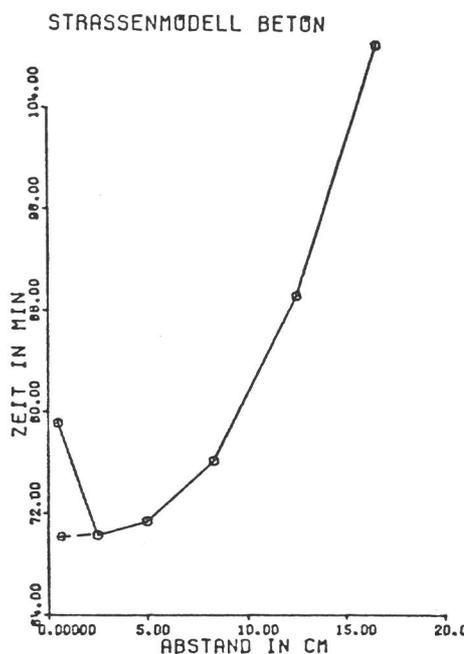


Bild BSI/0

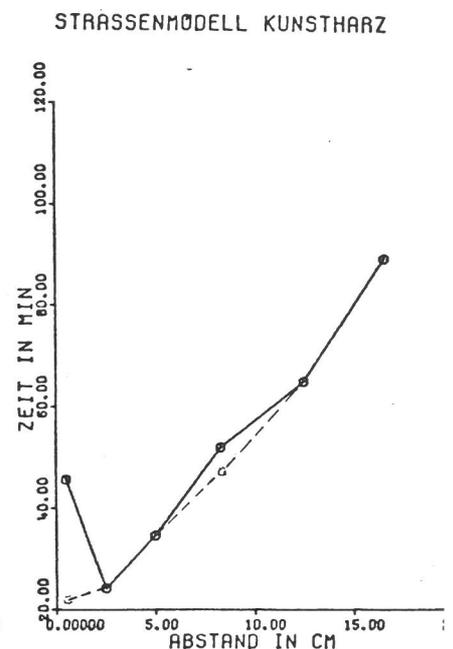
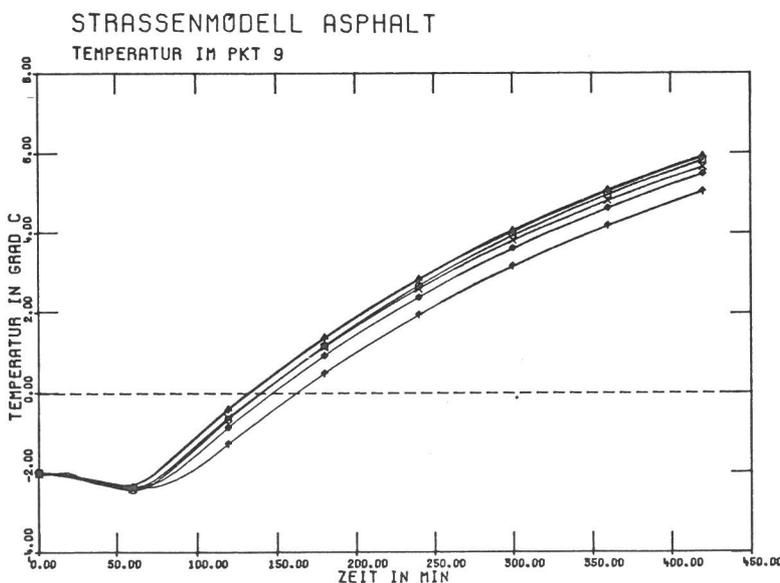


Bild KSI/0

Übertragungsverhalten der verschiedenen Modelle in Abhängigkeit vom Heizleiterabstand

----- korrigierte Werte



HEIZLEITERABSTAND (CM)

- 0.5
- ▲ 2.5
- + 5.0
- × 8.3
- ◆ 12.5
- ⋄ 16.6

Bild ASI/1

Entwicklung der geringsten Oberflächentemperatur

STRASSENMODELL ASPHALT
TEMPERATURDIFFERENZ ZWISCHEN PKT 27 UND 9

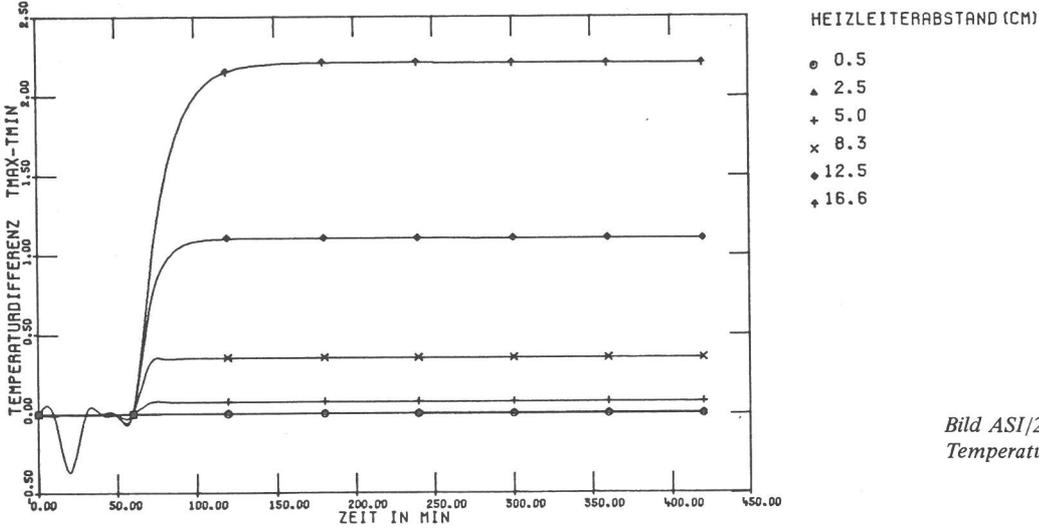
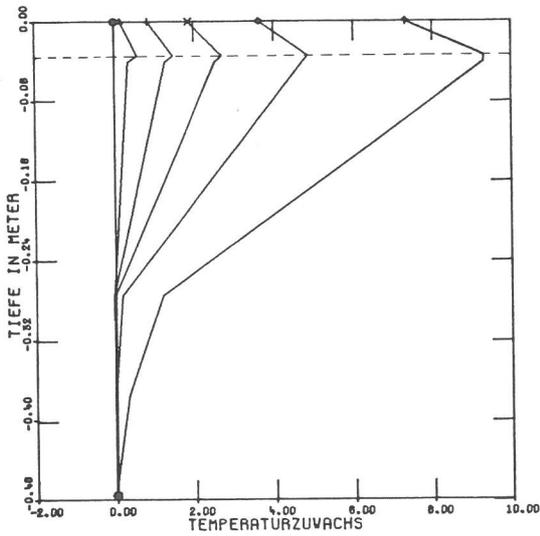


Bild ASI/2
Temperaturdifferenz an der Oberfläche

STRASSENMODELL ASPHALT
HEIZLEITERTIEFE 3.5 CM
HEIZLEITERABSTAND 2.5 CM



STRASSENMODELL ASPHALT
HEIZLEITERTIEFE 3.5 CM
HEIZLEITERABSTAND 16.6 CM

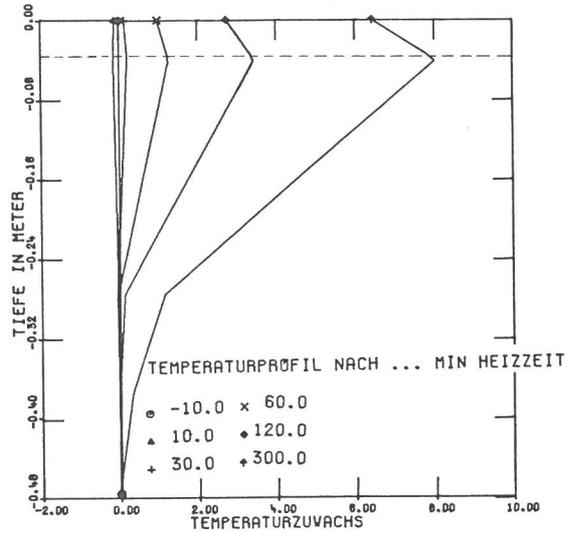


Bild ASI/3 und 4
Entwicklung des Temperaturzuwachses im oberen Bereich des Straßenmodells

----- Heizleiterbene

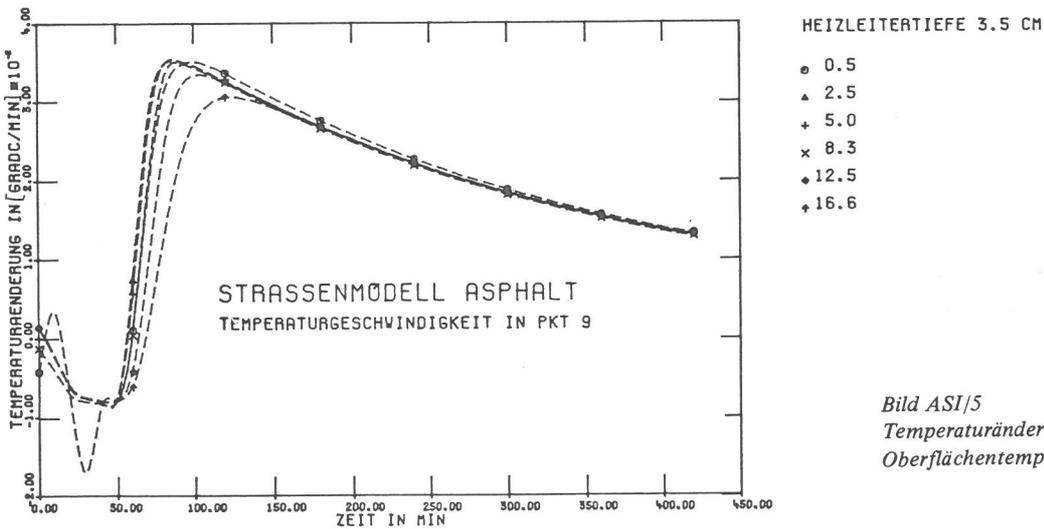


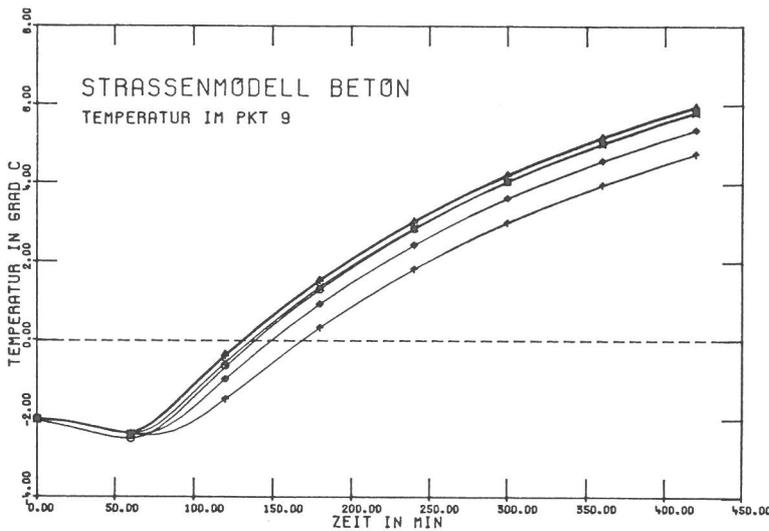
Bild ASI/5
Temperaturänderung im Knoten der geringsten
Oberflächentemperatur

b) Modell Betonabau

Bei diesem Modell wurde ebenfalls mit einer Heizleiterüberdeckung von 3,5 cm gerechnet.

Die Abweichung der Temperatur (Bild BSI/1) des Heizmatenmodells von den übrigen Verläufen während der Abkühl-

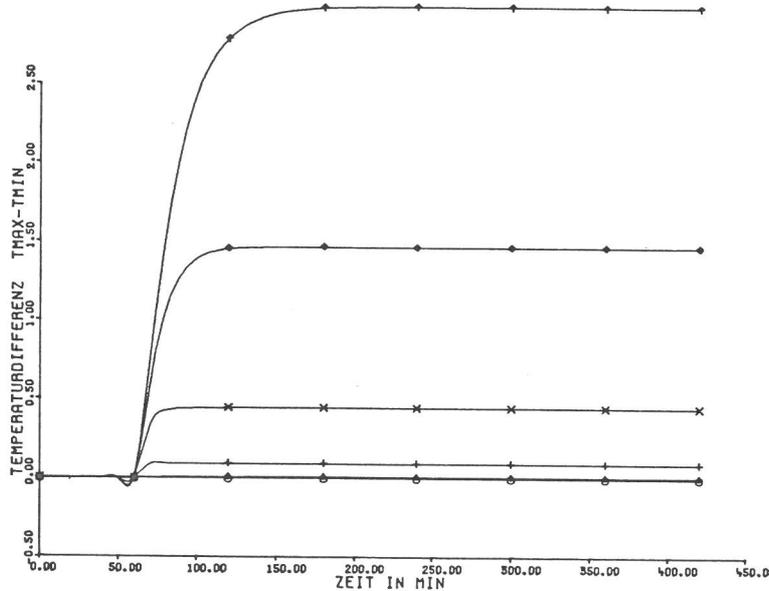
phase ist auf eine nicht ganz korrekte Dateneingabe bei den Anfangsbedingungen zurückzuführen (siehe auch Abschnitt 10.212). Eine negative Wärmestromdichte ist in dem Sinne zu interpretieren, daß ein Wärmetransport von unten nach oben im Belagsaufbau stattfindet. Alle übrigen Ausführungen in 10.211 a) gelten entsprechend.



HEIZLEITERABSTAND (CM)

- 0.5
- ▲ 2.5
- + 5.0
- × 8.3
- ◆ 12.5
- ⋈ 16.6

Bild BSI/1
Entwicklung der geringsten Oberflächentemperatur



STRASSENMODELL BETON
TEMPERATURDIFFERENZ ZWISCHEN PKT 27 UND 9

HEIZLEITERABSTAND (CM)

- 0.5
- ▲ 2.5
- + 5.0
- × 8.3
- ◆ 12.5
- ⋈ 16.6

Bild BSI/2
Temperaturdifferenz an der Oberfläche

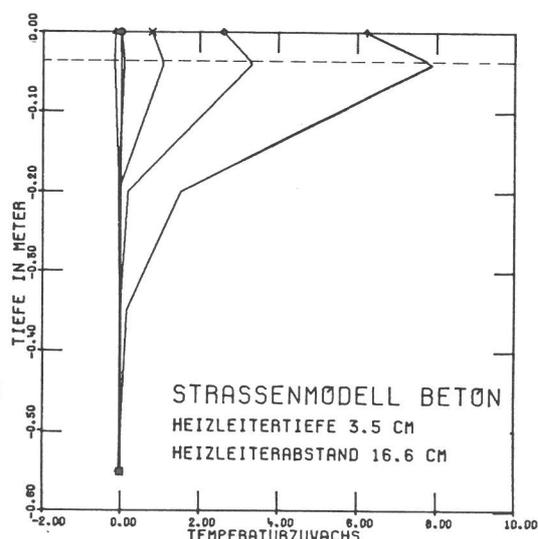
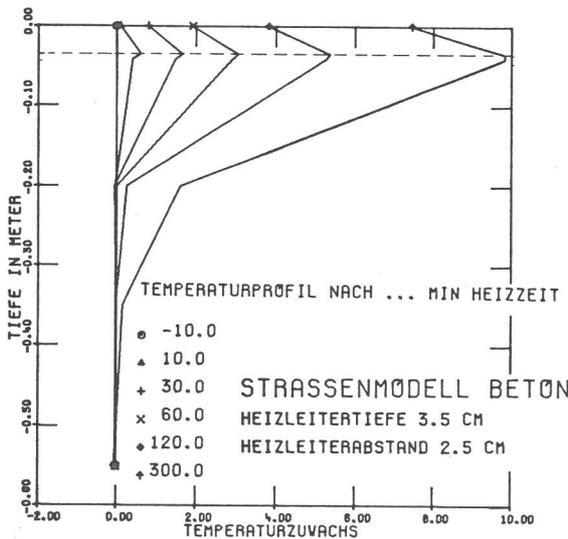


Bild BSI/3 und 4
Entwicklung des Temperaturzuwachses im oberen Bereich des Modells

----- Heizleiterbene

STRASSENMODELL BETON
TEMPERATURGESCHWINDIGKEIT IN PKT 9

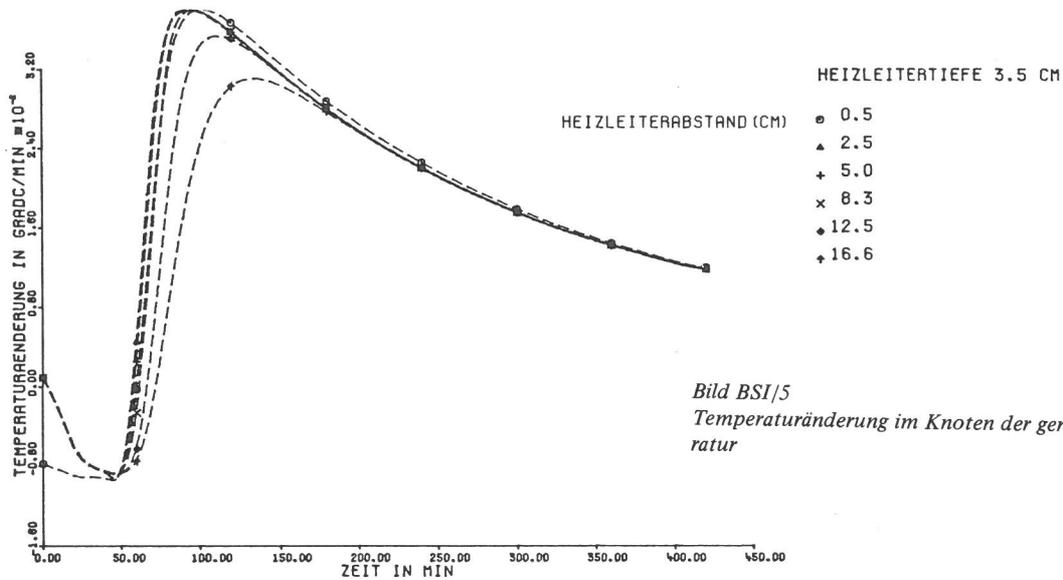


Bild BSI/5
Temperaturänderung im Knoten der geringsten Oberflächentemperatur

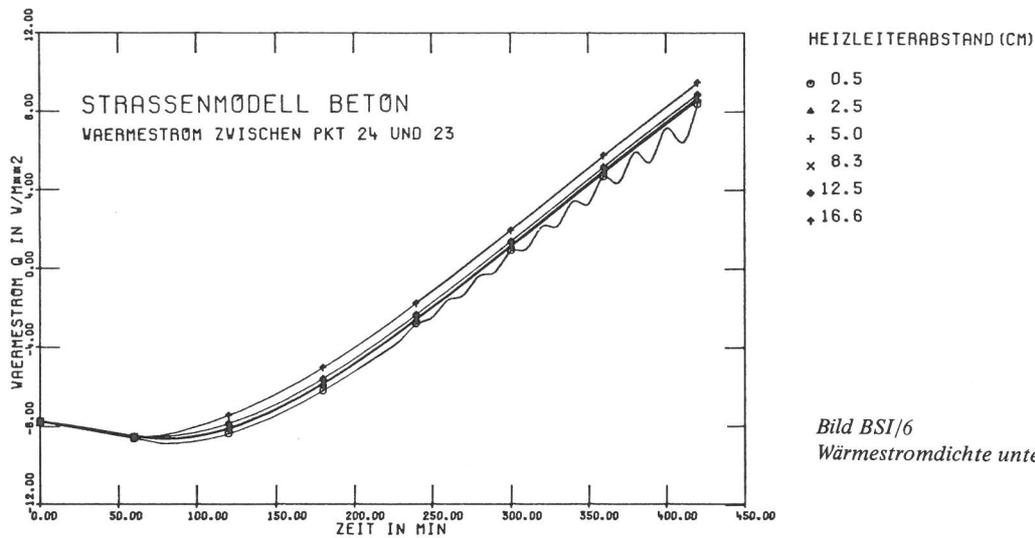


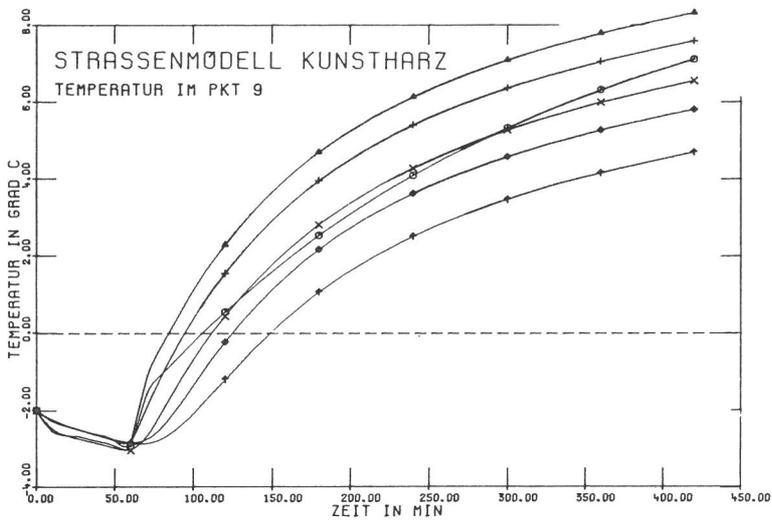
Bild BSI/6
Wärmestromdichte unterhalb der Heizleiterenebene

c) Modell Kunstharzaufbau

Für dieses Modell wurde eine Heizleiterüberdeckung von 1,0 cm gewählt, da diese für die praktische Realisierung am sinnvollsten erscheint.

Die Abweichungen während der Abkühlphase im Bild KSI/1 sind wiederum auf eine ungenaue Vorgabe der Anfangsdaten zurückzuführen. Diese Problematik wird in Abschnitt 10.212 besprochen. Es gilt die korrigierte Darstellung in Bild KSI/0.

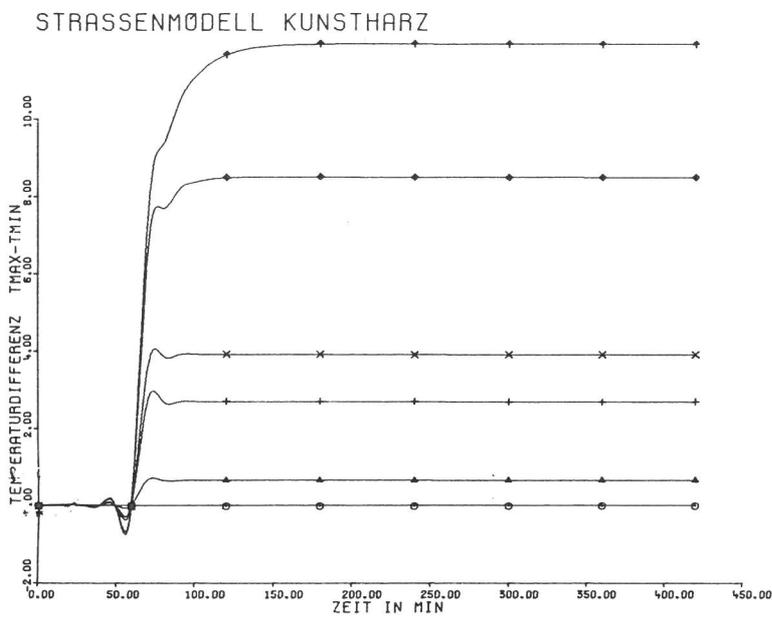
Der Knick im Temperaturverlauf der Heizmatte im Bild KSI/1 konnte nicht eindeutig erklärt werden. Es ist aber denkbar, daß infolge der nichtlinearen Strahlungsrandbedingungen bei der Anwendung des Runge-Kutta-Verfahrens eine geringe numerische Instabilität zu dieser neuen Anfangssteigung geführt hat. Die so korrigierte Darstellung in Bild KSI/0 ist deshalb mit Vorsicht zu betrachten.



HEIZLEITERABSTAND (CM)

- 0.5
- ▲ 2.5
- + 5.0
- × 8.3
- ◆ 12.5
- ♣ 16.6

Bild KSI/1
Entwicklung der geringsten Oberflächentemperatur



HEIZLEITERABSTAND (CM)

- 0.5
- ▲ 2.5
- + 5.0
- × 8.3
- ◆ 12.5
- ♣ 16.6

Bild KSI/2
Temperaturdifferenz an der Oberfläche

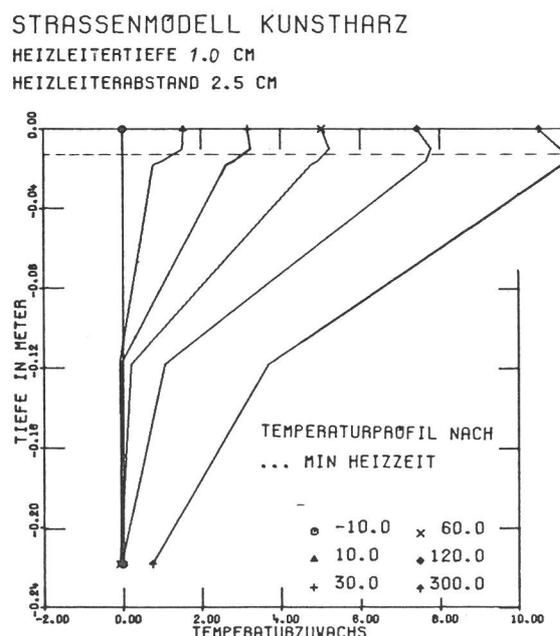
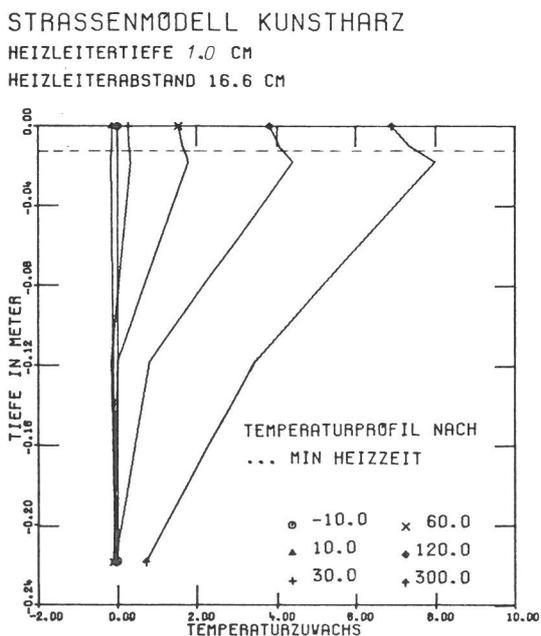


Bild KSI/3
Entwicklung des Temperaturzuwachses im oberen Bereich des Modells

Bild KSI/4

----- Heizleiterenebene

STRASSENMODELL KUNSTHARZ
 TEMPERATURGESCHWINDIGKEIT IN PKT 9

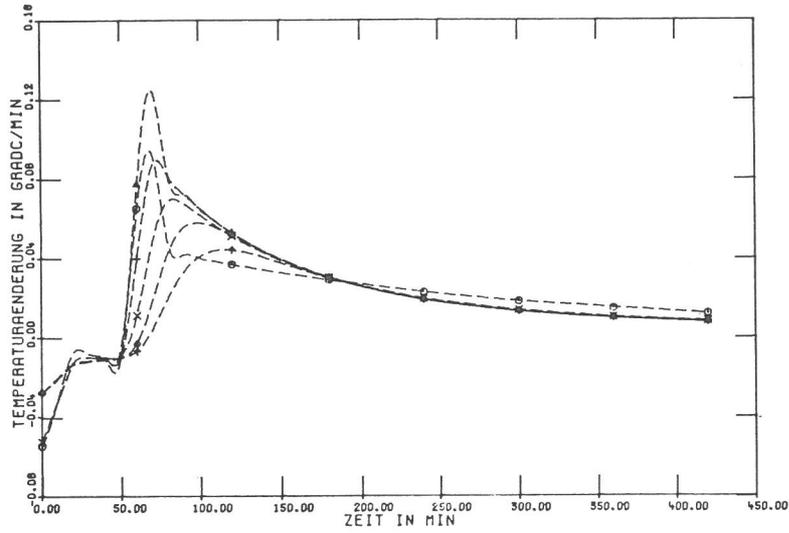


Bild KSI/5
 Temperaturänderung im Knoten der geringsten
 Oberflächentemperatur

STRASSENMODELL KUNSTHARZ
 WÄRMESTROM ZWISCHEN PKT 24 UND 22

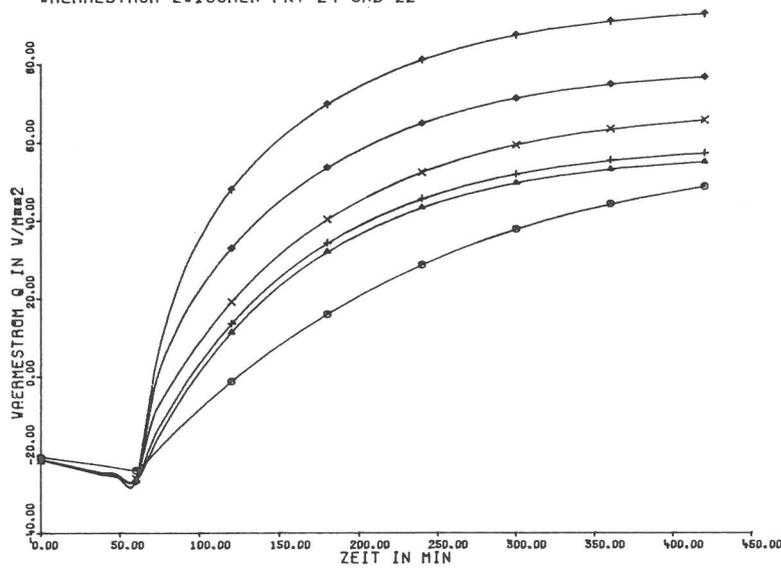


Bild KSI/6
 Wärmestromdichte unterhalb der Heizleiterebene

10.212 Variation der Heizleiterüberdeckung

a) Modell Asphaltpaufbau

Für die Variation der Heizleiterüberdeckung stellte sich wiederum die Frage nach einer sinnvollen Wahl des konstanten Heizleiterabstandes. Hier wurde nach der Häufigkeit der in der Praxis verwendeten Abstände entschieden. Aus den Befragungen (Abschnitt 2) geht hervor, daß die meisten Firmen einen Heizleiterabstand zwischen 6 und 10 cm für üblich halten. Daher wurde für alle Modelle eine Größe von 8,3 cm gewählt. Für die Rechnung wurde vorausgesetzt, daß die Heizleitertiefe keinen Einfluß auf die Anfangstemperaturverteilung haben sollte. Dies hatte jedoch für die Eingabedaten im Rechenprogramm die Konsequenz, daß bei gleicher Funktion den in Bild 7.7 bzw. 7.8 aufgeführten Knoten je nach Tiefenlage eine unterschiedliche Anfangstemperatur

zugeordnet werden mußte. Der in Bild 8.1 dargestellte Anfangstemperaturverlauf für die Straßenmodelle wurde durch ein Polynom 7. Grades interpoliert, welches gerade im oberen Teil des Definitionsbereiches eine starke Welligkeit aufwies. Die Folge war, daß die so ermittelten Anfangstemperaturen je nach Heizleitertiefe unterschiedlich waren. Dies ist sehr gut in den folgenden Bildern 1 zu erkennen. Leider war nicht mehr die Zeit vorhanden, die Rechnungen mit korrigierten Anfangswerten zu wiederholen. Dabei ist zu bedenken, daß auf dem in der BAM vorhandenen Rechner TR 86 für eine Rechnung mit 7 Stunden Realzeit, bei den Straßenmodellen etwa 5 Stunden Rechenzeit benötigt wurden. Der in Bild ASII/0 dargestellte Zusammenhang wurde nun dahingehend korrigiert, daß alle Anfangstemperaturen im Knoten 9 vor Einschalten der Heizzeit den Wert annehmen, der für die Tiefe von 7,5 cm als richtig erkannt wurde. Auf die übrigen Darstellungen hat diese Ungenauigkeit keinen wesentlichen Einfluß.

STRASSENMODELL ASPHALT

STRASSENMODELL BETON

STRASSENMODELL KUNSTHARZ

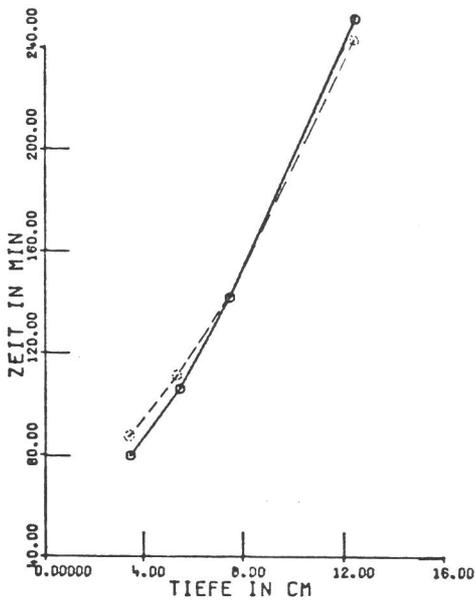


Bild ASII/0

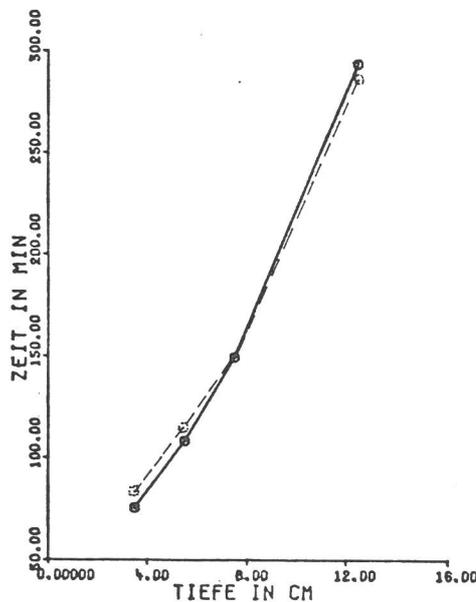


Bild BSII/0

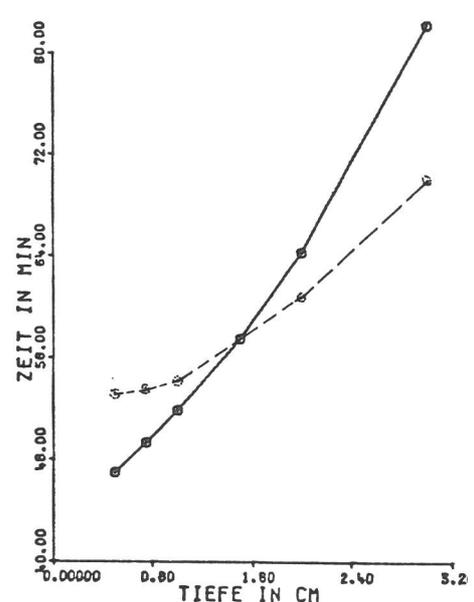


Bild KSII/0

Übertragungsverhalten der verschiedenen Straßenmodelle in Abhängigkeit von der Heizleitertiefe

---- korrigierte Werte

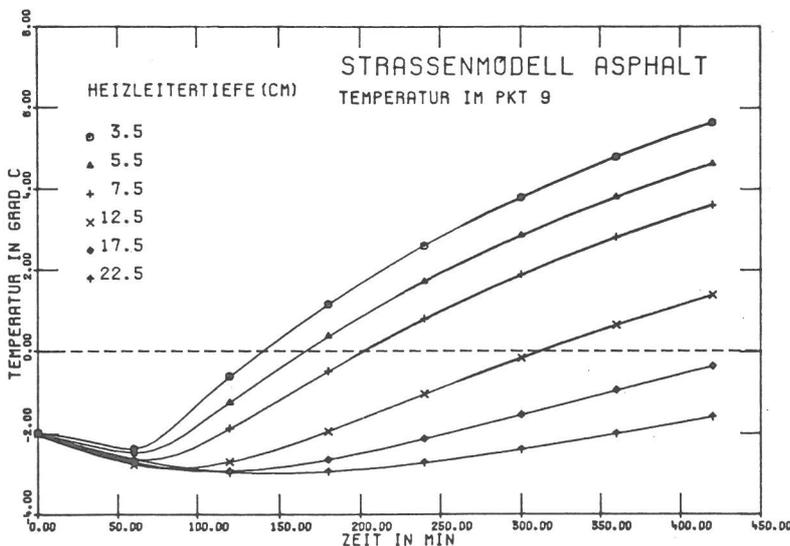


Bild ASII/1

Entwicklung der geringsten Oberflächentemperatur

STRASSENMODELL ASPHALT
TEMPERATURDIFFERENZ ZWISCHEN PKT 27 UND 9

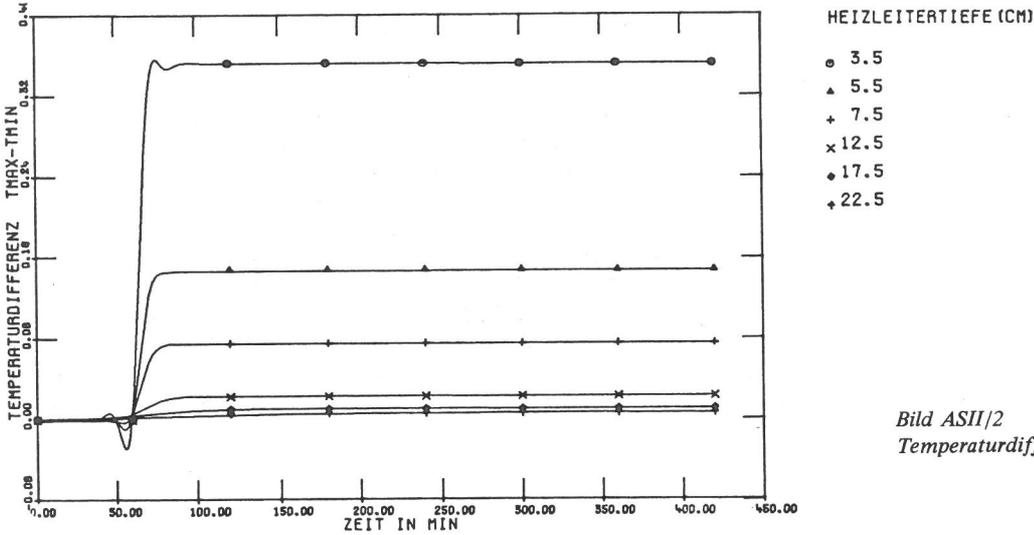


Bild ASII/2
Temperaturdifferenz an der Oberfläche

STRASSENMODELL ASPHALT

HEIZLEITERTIEFE 3.5 CM
HEIZLEITERABSTAND 8.3 CM

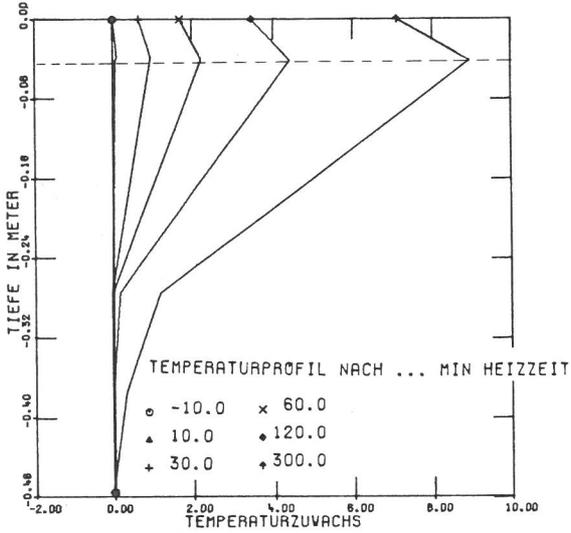


Bild ASII/3
Entwicklung des Temperaturzuwachses im oberen Bereich des Modells

HEIZLEITERTIEFE 22.5 CM
HEIZLEITERABSTAND 8.3 CM

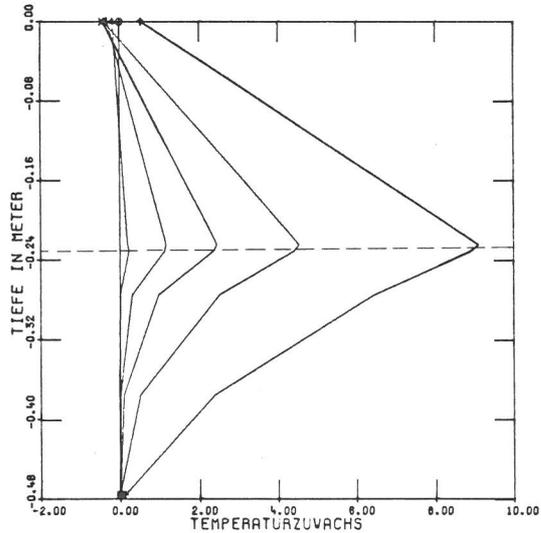


Bild ASII/4

----- Heizleiter Ebene

STRASSENMODELL ASPHALT
TEMPERATURGESCHWINDIGKEIT IN PKT 9

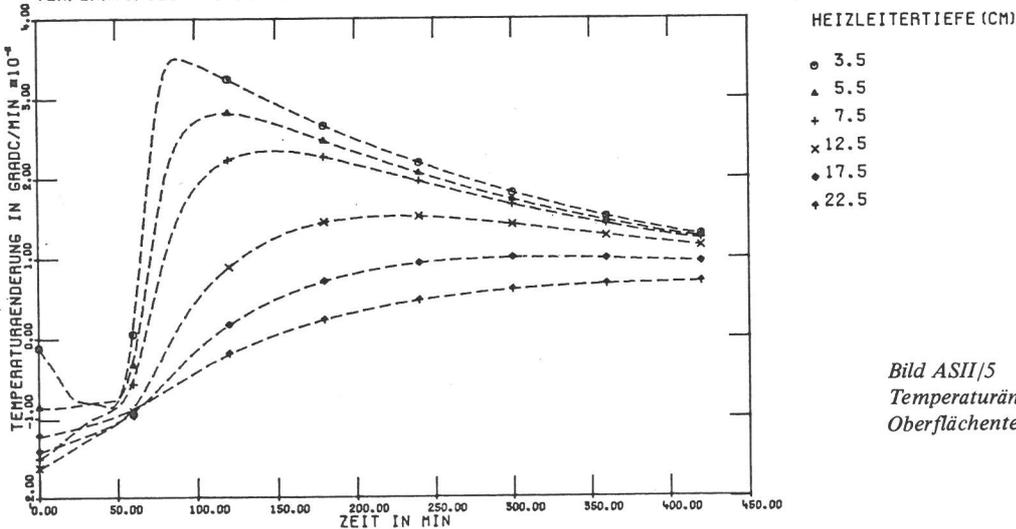
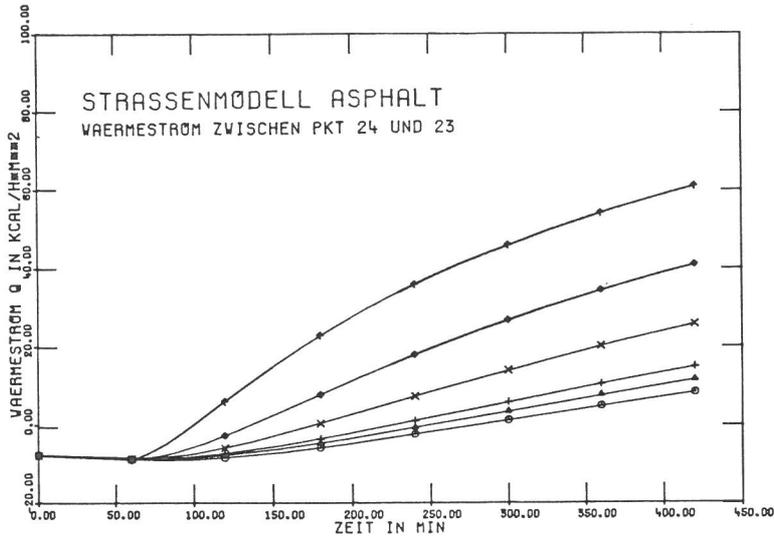


Bild ASII/5
Temperaturänderung im Knoten der geringsten
Oberflächentemperatur



HEIZLEITERTIEFE (CM)

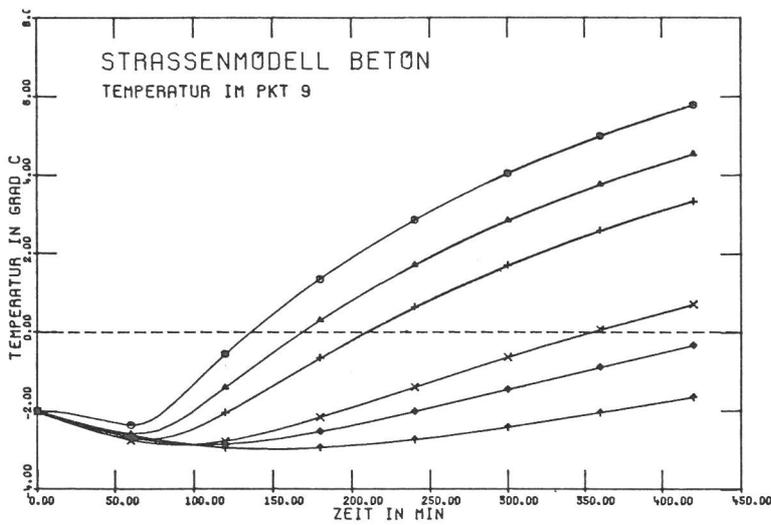
- 3.5
- ▲ 5.5
- + 7.5
- × 12.5
- ◆ 17.5
- ⋈ 22.5

Bild ASII/6
Wärmestromdichte unterhalb der Heizleiterebene

b) Modell Betonaufbau

Der Heizleiterabstand beträgt 8,3 cm. Für die Korrektur der

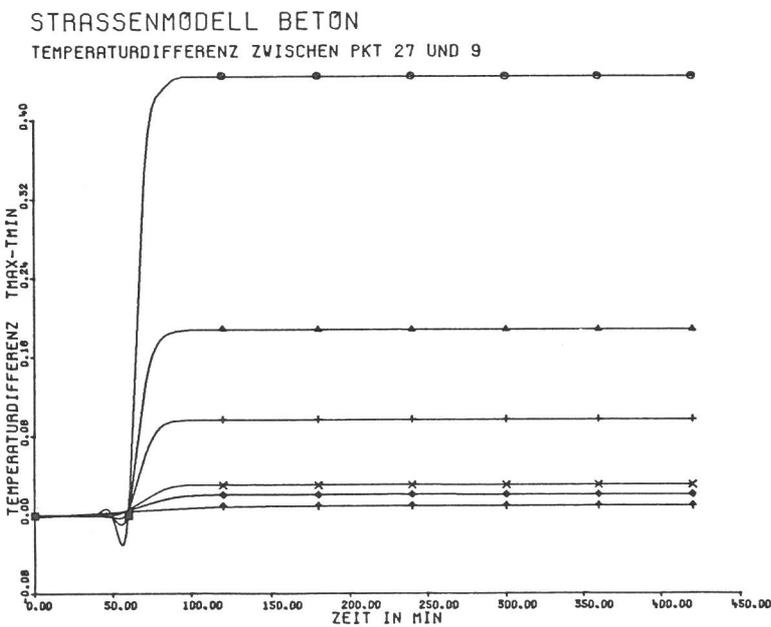
Anfangswerte entsprechend Bild BSII/0 wurde ebenfalls die Tiefe 7,5 cm in Bild BSII/1 zugrunde gelegt.



HEIZLEITERTIEFE (CM)

- 3.5
- ▲ 5.5
- + 7.5
- × 12.5
- ◆ 15.0
- ⋈ 20.0

Bild BSII/1
Entwicklung der geringsten Oberflächentemperatur



HEIZLEITERTIEFE (CM)

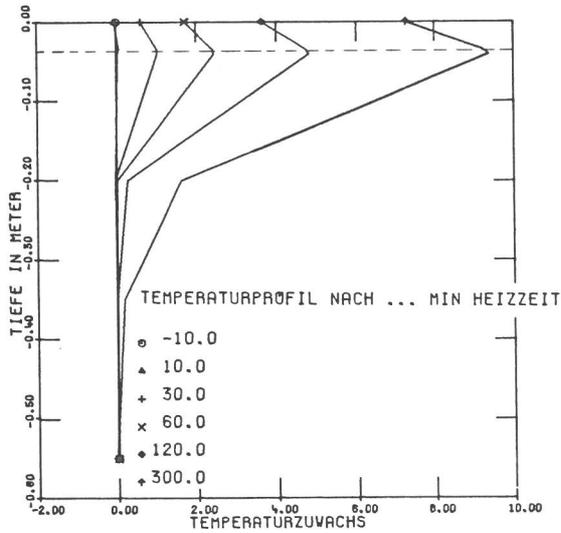
- 3.5
- ▲ 5.5
- + 7.5
- × 12.5
- ◆ 15.0
- ⋈ 20.0

Bild BS II/2
Temperaturdifferenz an der Oberfläche

STRASSENMODELL BETON

HEIZLEITERTIEFE 3.5 CM

HEIZLEITERABSTAND 8.3 CM



HEIZLEITERTIEFE 20.0 CM

HEIZLEITERABSTAND 8.3 CM

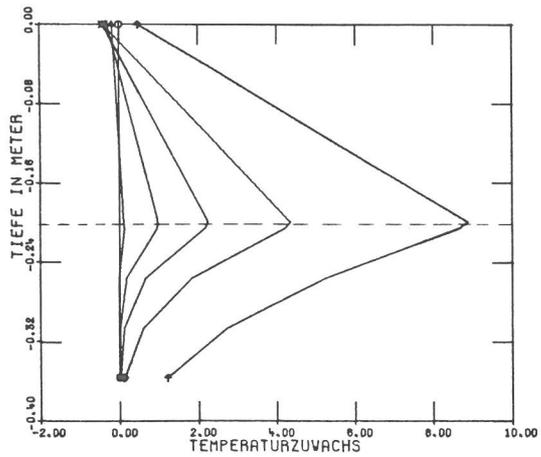


Bild BSII/3

Entwicklung des Temperaturzuwachses im oberen Bereich des Modells

Bild BSII/4

----- Heizleiterebene

STRASSENMODELL BETON

TEMPERATURGESCHWINDIGKEIT IN PKT 9

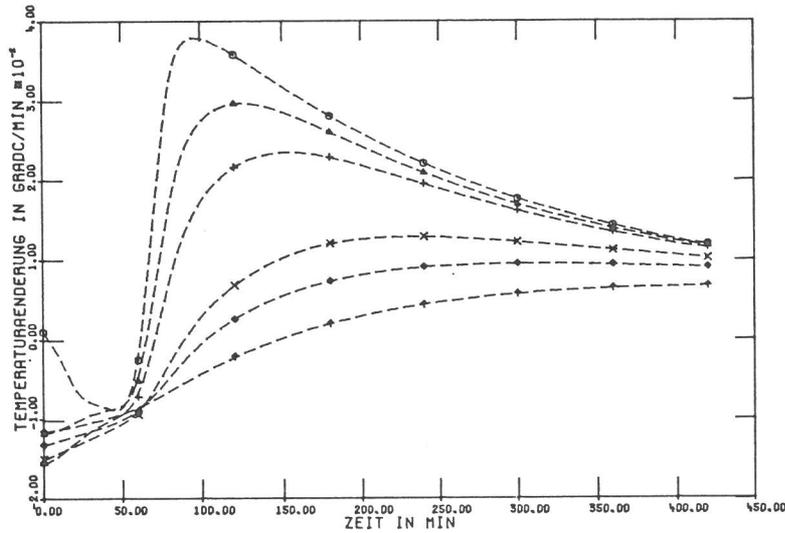


Bild BSII/5

Temperaturänderung im Knoten der geringsten Oberflächentemperatur

STRASSENMODELL BETON

WÄRMESTROM ZWISCHEN PKT 24 UND 23

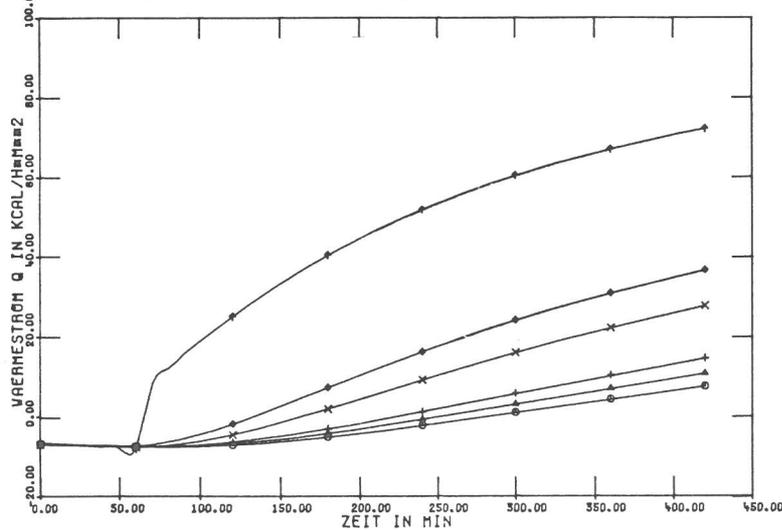


Bild BSII/6

Wärmestromdichte unterhalb der Heizleiterebene

c) Modell Kunstharzaufbau

Für dieses Modell wurde ebenfalls ein Heizleiterabstand von 8,3 cm zugrunde gelegt. Bei der Korrektur der Anfangswerte

entsprechend Bild KSII/0 ist die Temperatur der Tiefe von 1,5 cm zugrunde gelegt worden. Im weiteren gelten die Aussagen von a) dieses Abschnitts.

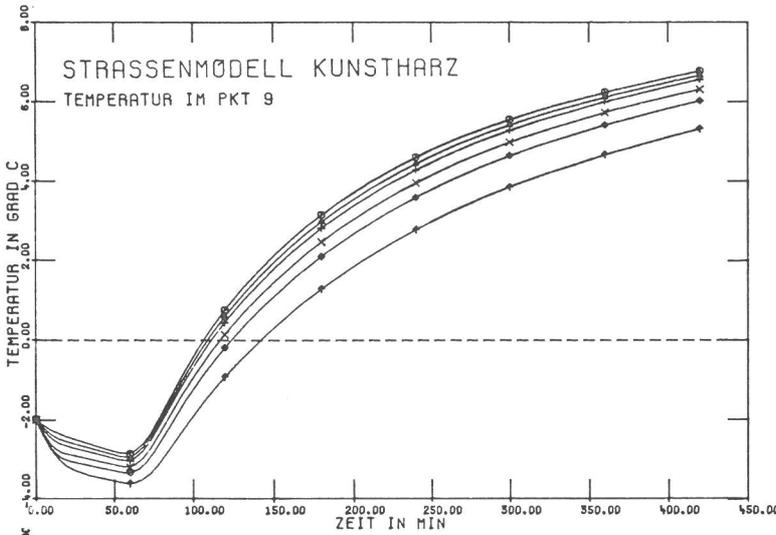


Bild KSII/1
Entwicklung der geringsten Oberflächentemperatur

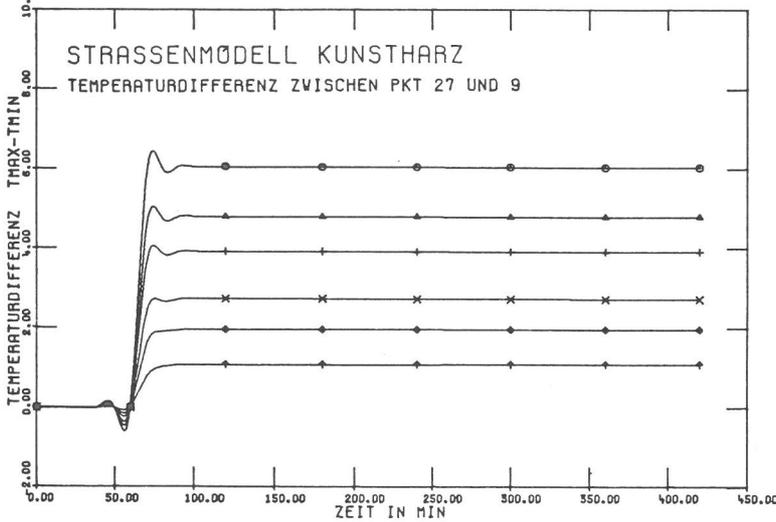


Bild KSII/2
Temperaturdifferenz an der Oberfläche

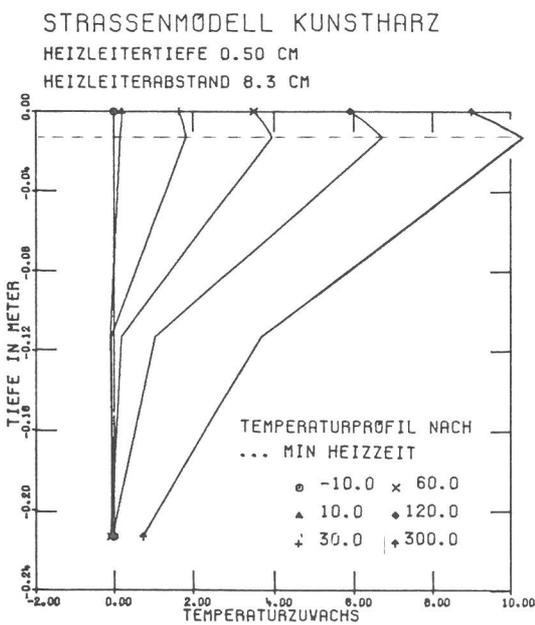


Bild KSII/3

Entwicklung des Temperaturzuwachses im oberen Bereich des Modells

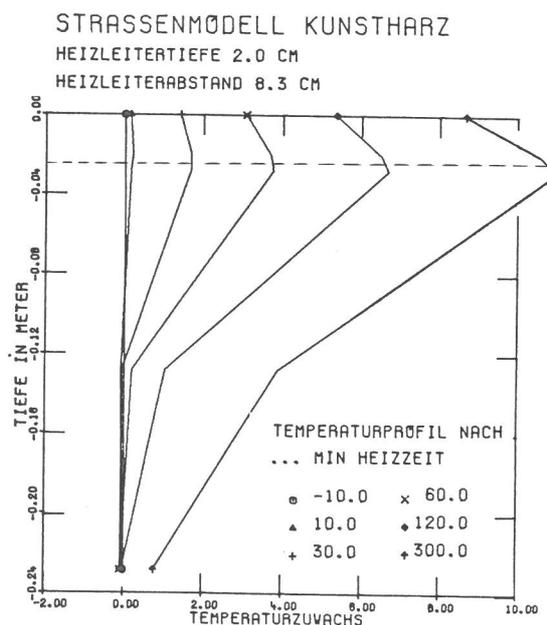


Bild KSII/4

----- Heizleiterenebene

STRASSENMODELL KUNSTHARZ
 TEMPERATURGESCHWINDIGKEIT IN PKT 9

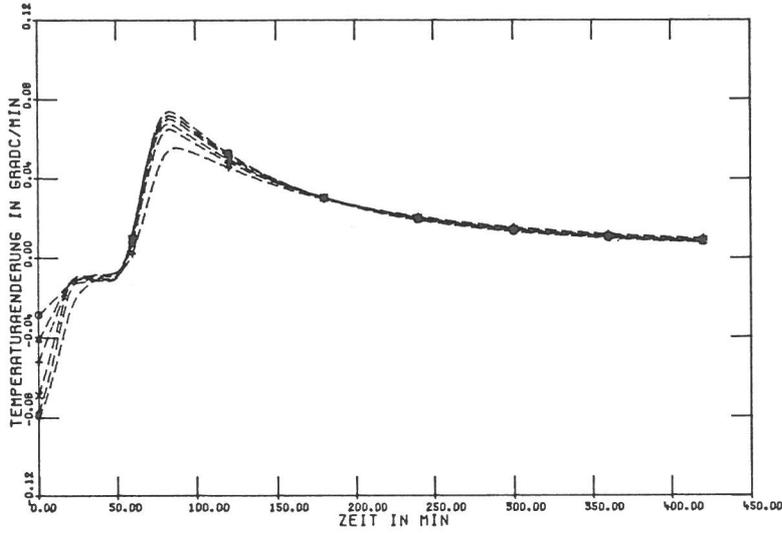


Bild KSII/5
 Temperaturänderung im Knoten der geringsten
 Oberflächentemperatur

STRASSENMODELL KUNSTHARZ
 WÄRMESTROM ZWISCHEN PKT 24 UND 23

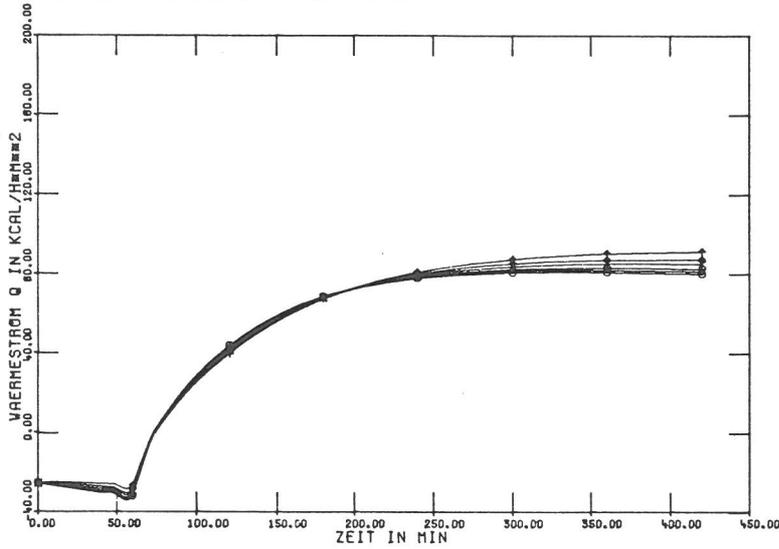


Bild KSII/6
 Wärmestromdichte unterhalb der Heizleiterebene

10.213 Einfluß der Strahlung

Wie in den Bildern . . . /1 zu erkennen ist, sinkt die Oberflächentemperatur der Beläge in der Zeit vor dem Heizbeginn. Dieser Effekt tritt auf, obwohl durch konvektiven Wärmeübergang keine Energie mit der Umgebung ausgetauscht wird. Anhand von Bild 8.1 ist zu sehen, daß aufgrund des positiven Temperaturgradienten sogar ein Wärmefluß vom Untergrund zur Oberfläche hin vorhanden ist. Der Abkühlungseffekt kann also nur durch den Wärmeaustausch infolge langwelliger Strahlung erklärt werden, zumal der Emissionskoeffizient der Oberfläche in jedem Fall größer ist als der der umgebenden Atmosphäre. Kast [31] hat für ähnliche Verhältnisse, wie sie hier vorliegen, errechnet, daß sich thermisches Gleichgewicht im Wärmeübergang erst bei einer Temperaturdifferenz zwischen Oberfläche und Umgebungsluft von etwa 7°C einstellt. Da sich bei größeren Heizleiterabständen lokale Überhitzungen direkt über dem Heizdraht nicht vermeiden lassen, soll hier einmal aufgezeigt werden, wie groß die daraus folgenden Wärmeverluste infolge Strahlung sind. Die Rechnungen wurden ausgeführt mit Heizleiterüberdeckungen von

- 3,5 cm Modell Asphaltaufbau
- 3,5 cm Modell Betonaufbau
- 0,5 cm Modell Kunstharzaufbau.

Die Ergebnisse sind in den folgenden Bildern dargestellt.

Schropp [50] hat Untersuchungen darüber angestellt, wie sich die Farbe bzw. Tönung technischer Oberflächen auf die Temperaturentwicklung auswirkt, wenn man den Einfluß der Sonnenbestrahlung und der nächtlichen Ausstrahlung berücksichtigt. Die Ergebnisse sind:

- Das Absorptionsverhältnis weißer (heller) Oberflächen ist von der Wellenlänge der Strahlung abhängig.
- Die Farbe einer Oberfläche, die bei langwelliger Strahlung ohne Einfluß auf die Absorption ist, wird bei kurzwelliger Strahlung von ausschlaggebender Bedeutung.
- Bei langwelliger Strahlung verhalten sich weiße und schwarze Oberflächen gleich.

Eine mögliche Forderung nach "Aufhellung" der Oberfläche von beheizbaren Belägen würde unter den oben angeführten Aussagen zu nachfolgenden Ergebnissen führen:

- Sommer: Die Aufhellung bietet guten Schutz gegen Sonnenstrahlung am Tag, so daß der Belag weniger stark aufgeheizt wird. Damit könnte eine mögliche Bewegung der Heizung durch "Aufweichen" des Belages vermieden werden. Die nächtlichen Verhältnisse sind uninteressant.
- Winter: Tagsüber verschlechtert die helle Oberfläche das Absorptionsvermögen des Belages gegenüber dem schwarzen Belag bei vorliegender Globalstrahlung. Die Folge ist eine stärkere Auskühlung. Das gilt übrigens auch für das Abschmelzen von Reif: Eine schwarze Oberfläche als Träger für eine Reifschicht garantiert schnelleres Abschmelzen bei kurzwelliger Bestrahlung. Nachts wird das Absorptions- und Emissionsvermögen nicht verändert, so daß eine Farbänderung die nächtliche Ausstrahlung nicht beeinflusst.

Zusammenfassend kann also gesagt werden, daß eine Aufhellung der Oberfläche sich allemal ungünstig auf die Heizkosten auswirkt. Unter diesem Gesichtspunkt haben die Ergebnisse der Rechnungen ohne Strahlung lediglich einen rein theoretischen Aussagewert.

STRASSENMODELL KUNSTHARZ
TEMPERATUR IM PKT 27

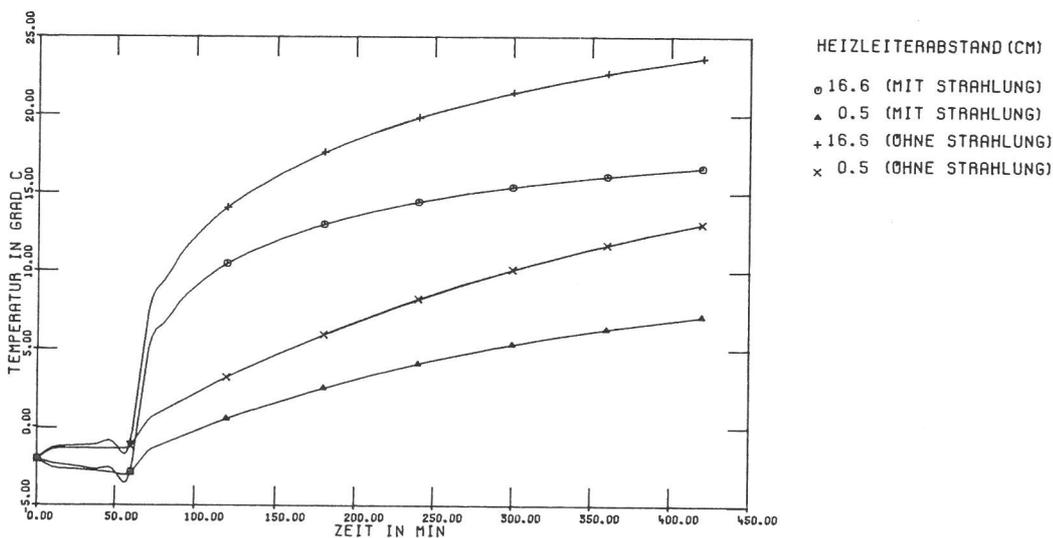
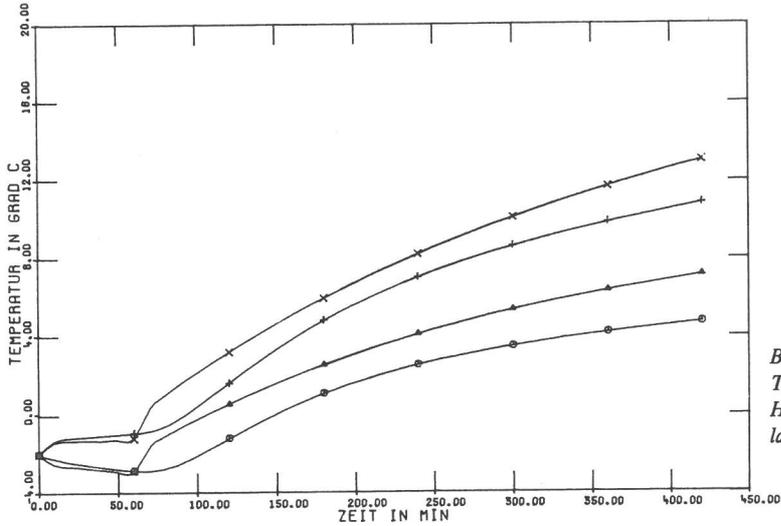


Bild KSS/1*
Temperaturverlauf am wärmsten Oberflächenpunkt für zwei extreme Heizleiterabstände bei Berücksichtigung und Vernachlässigung der langwelligen Strahlung

STRASSENMODELL KUNSTHARZ

TEMPERATUR IM PKT 9



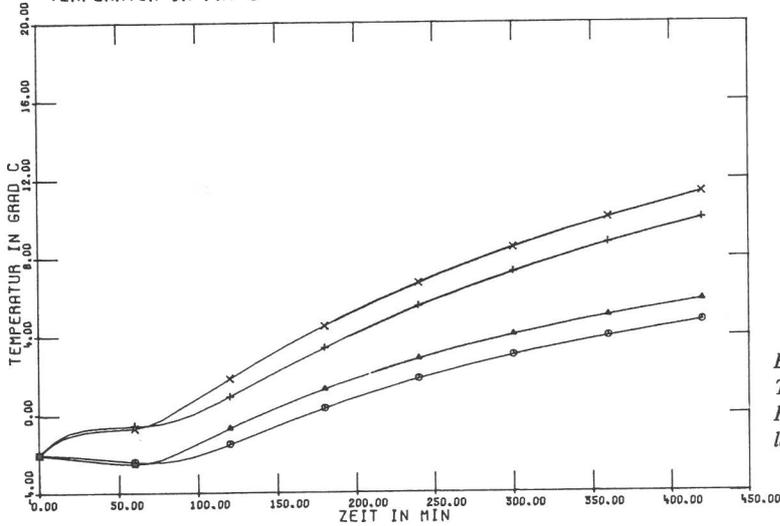
HEIZLEITERABSTAND (CM)

- 16.6 (MIT STRAHLUNG)
- ▲ 0.5 (MIT STRAHLUNG)
- + 16.6 (OHNE STRAHLUNG)
- × 0.5 (OHNE STRAHLUNG)

Bild KSS/1
Temperaturverlauf am kältesten Oberflächenpunkt für zwei extreme Heizleiterabstände bei Berücksichtigung und Vernachlässigung der langwelligen Strahlung

STRASSENMODELL BETON

TEMPERATUR IM PKT 9



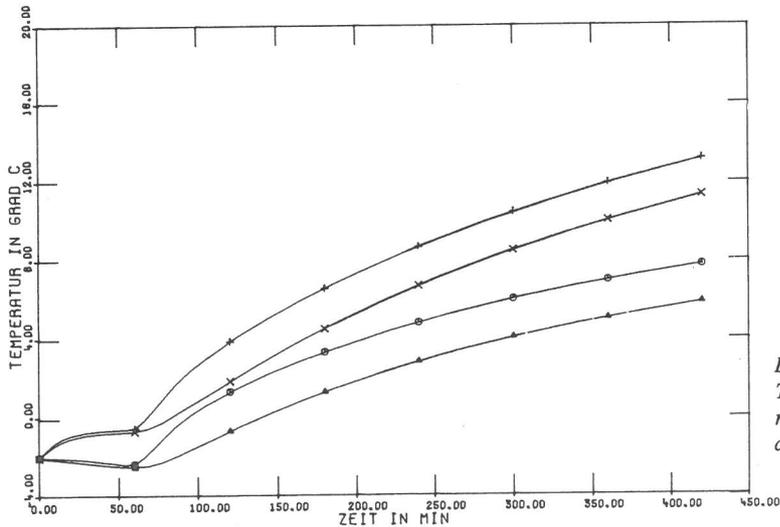
HEIZLEITERABSTAND (CM)

- 16.6 (MIT STRAHLUNG)
- ▲ 0.5 (MIT STRAHLUNG)
- + 16.6 (OHNE STRAHLUNG)
- × 0.5 (OHNE STRAHLUNG)

Bild BSS/1
Temperaturverlauf am kältesten Oberflächenpunkt für zwei extreme Heizleiterabstände bei Berücksichtigung und Vernachlässigung der langwelligen Strahlung

STRASSENMODELL BETON

TEMPERATUR IM PKT 27



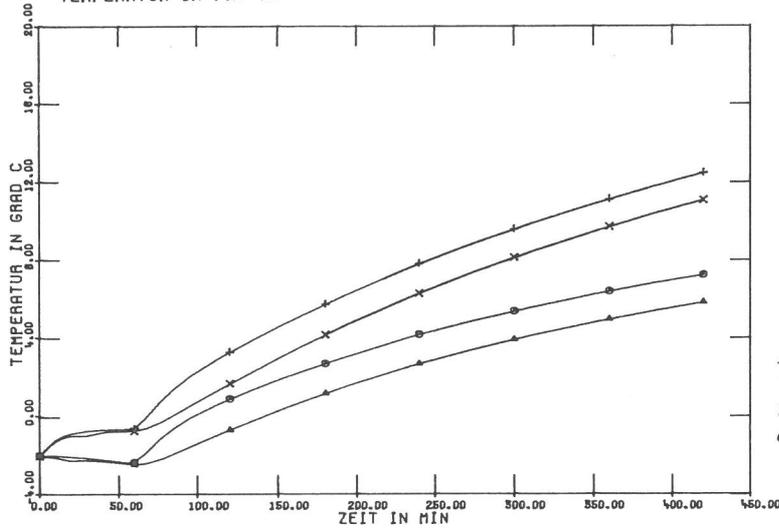
HEIZLEITERABSTAND (CM)

- 16.6 (MIT STRAHLUNG)
- ▲ 0.5 (MIT STRAHLUNG)
- + 16.6 (OHNE STRAHLUNG)
- × 0.5 (OHNE STRAHLUNG)

Bild BSS/1*
Temperaturverlauf am wärmsten Oberflächenpunkt für zwei extreme Heizleiterabstände bei Berücksichtigung und Vernachlässigung der langwelligen Strahlung

STRASSENMODELL ASPHALT

TEMPERATUR IM PKT 27



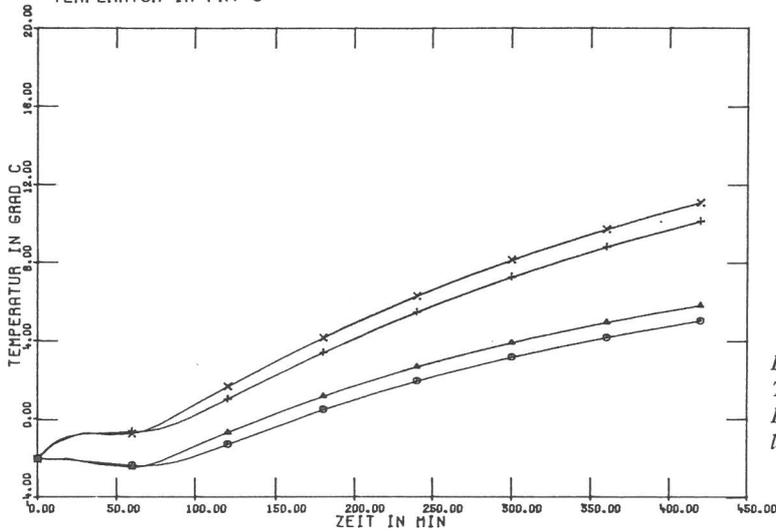
HEIZLEITERABSTAND (CM)

- 16.6 (MIT STRAHLUNG)
- ▲ 0.5 (MIT STRAHLUNG)
- + 16.6 (OHNE STRAHLUNG)
- × 0.5 (OHNE STRAHLUNG)

Bild ASS/1*
Temperaturverlauf am wärmsten Oberflächenpunkt für zwei extreme Heizleiterabstände bei Berücksichtigung und Vernachlässigung der langwelligen Strahlung

STRASSENMODELL ASPHALT

TEMPERATUR IM PKT 9



HEIZLEITERABSTAND (CM)

- 16.6 (MIT STRAHLUNG)
- ▲ 0.5 (MIT STRAHLUNG)
- + 16.6 (OHNE STRAHLUNG)
- × 0.5 (OHNE STRAHLUNG)

Bild ASS/1
Temperaturverlauf am kältesten Oberflächenpunkt für zwei extreme Heizleiterabstände bei Berücksichtigung und Vernachlässigung der langwelligen Strahlung

10.22 Brückenmodelle

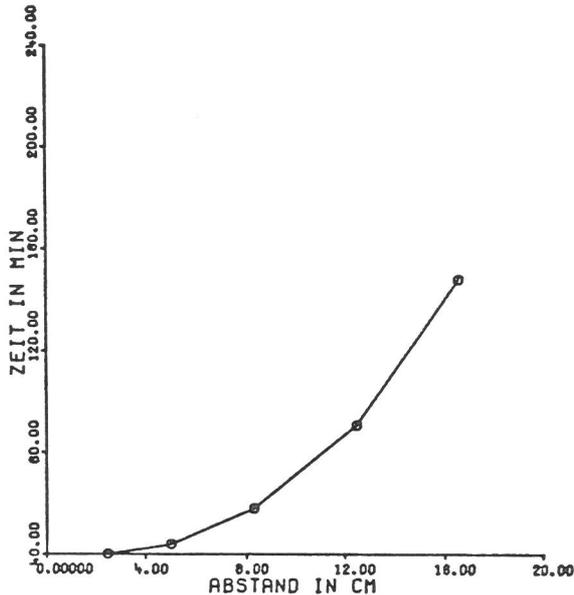
10.221 Variation des Heizleiterabstandes

a) Modell Asphaltaufbau

Wie schon bei den Straßenmodellen werden diese Untersuchungen bei geringster Heizleiterüberdeckung durchgeführt, die hier jedoch 2,0 cm beträgt. Allerdings ist das Heizprogramm jetzt so geändert worden, daß vom Anfang des betrachteten Zeitraums an eine konstante Wärmemenge eingespeist wird.

Zu den Ergebnissen soll bemerkt werden, daß bei diesem Modell ein größerer Wärmeverlust als bei entsprechenden Straßenbelägen feststellbar ist. Das zeigt sich einmal in *Bild ABI/1* durch das starke Abkühlungsverhalten in der Anfangsphase. Zum anderen ist diese Tatsache in *Bild ABI/0* im Vergleich mit *ASI/0* zu erkennen. Der Grund dafür ist sicher die geringere Wärmespeicherung des Brückenaufbaus in der Heizphase. Das langsamere Temperatur-Zeit-Verhalten ist mit durch die Anfangsbedingung bestimmt.

BRUECKENMODELL ASPHALT



BRUECKENMODELL KUNSTHARZ

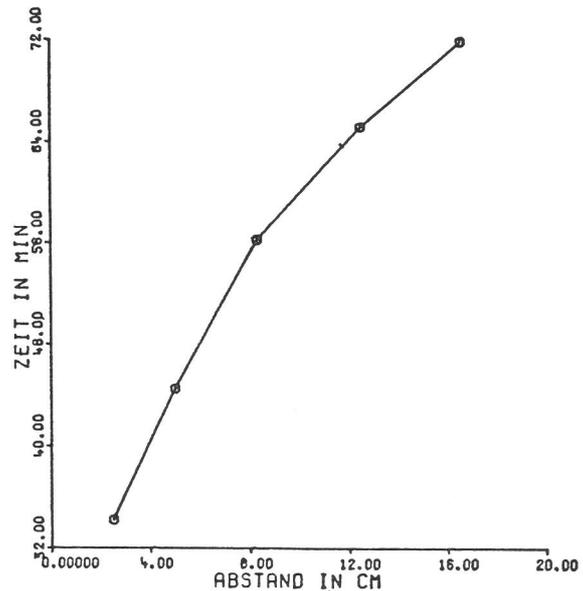


Bild ABI/0

Übertragungsverhalten der verschiedenen Brückenmodelle in Abhängigkeit vom Heizleiterabstand

Bild KBI/0

Übertragungsverhalten der verschiedenen Brückenmodelle in Abhängigkeit vom Heizleiterabstand

BRUECKENMODELL ASPHALT
TEMPERATUR IM PKT 7

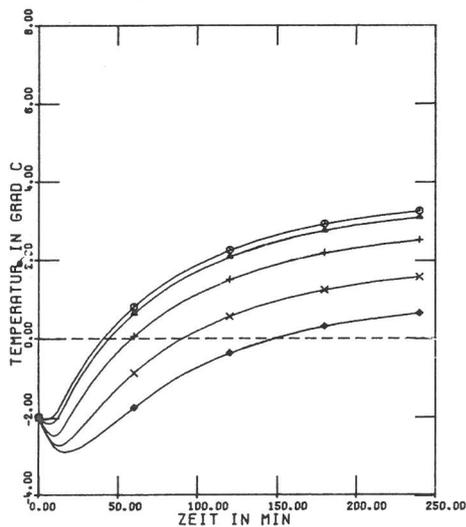


Bild ABI/1

Entwicklung der geringsten Oberflächentemperatur

TEMPERATURDIFFERENZ ZWISCHEN PKT 21 UND 7

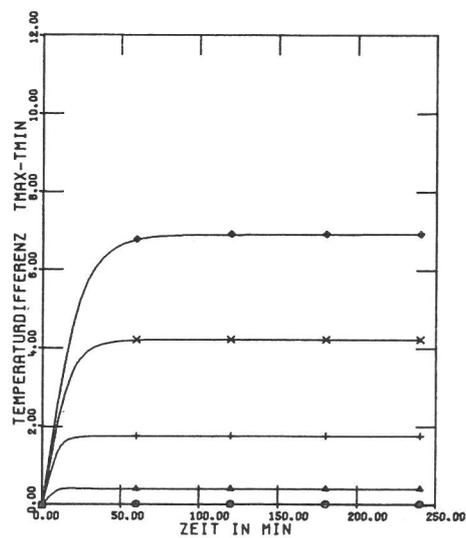


Bild ABI/2

Temperaturdifferenz an der Oberfläche

BRUECKENMODELL ASPHALT

HEIZLEITERABSTAND 16.6 CM
 HEIZLEITERTIEFE 2.0 CM
 TEMPERATURZUWACHS NACH .. MIN

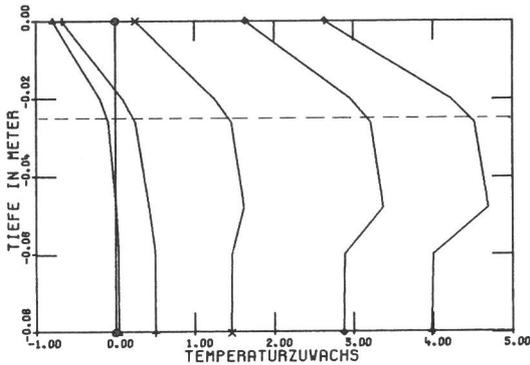


Bild ABI/3
 Entwicklung des Temperaturzuwachses im gesamten Querschnitt des Modells
 ----- Heizleiterenebene

HEIZLEITERABSTAND 2.5 CM
 HEIZLEITERTIEFE 2.0 CM

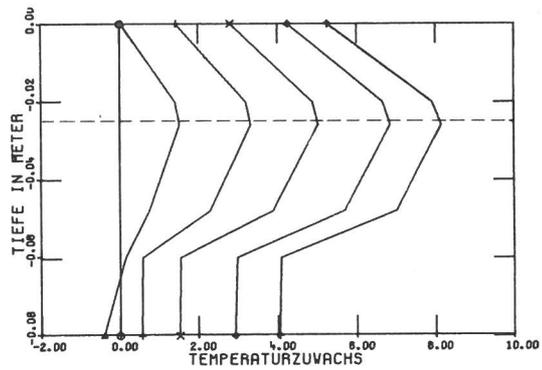


Bild ABI/4
 Entwicklung des Temperaturzuwachses im gesamten Querschnitt des Modells
 ----- Heizleiterenebene

TEMPERATURGESCHWINDIGKEIT IM PKT 7

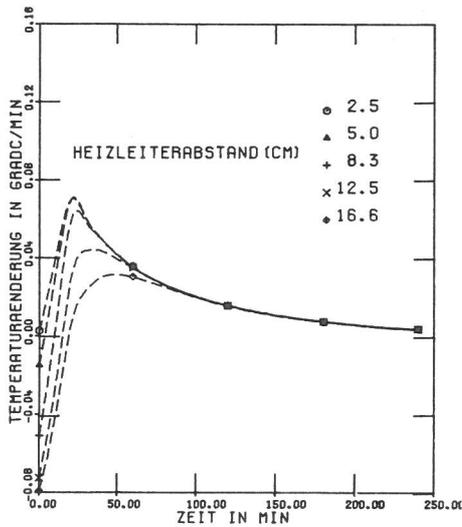


Bild ABI/5
 Temperaturänderung im Knoten der geringsten Oberflächentemperatur

BRUECKENMODELL ASPHALT

WAERMESTROM ZWISCHEN DEM PKT 20 UND 6

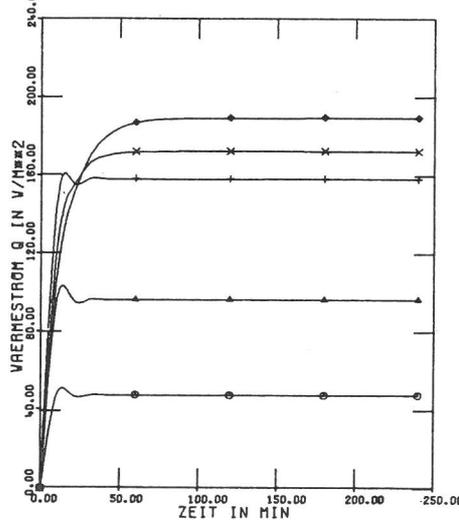


Bild ABI/7
 Wärmequerstromdichte oberhalb der Heizleiterenebene

BRUECKENMODELL ASPHALT

TEMPERATUR IM PKT 1

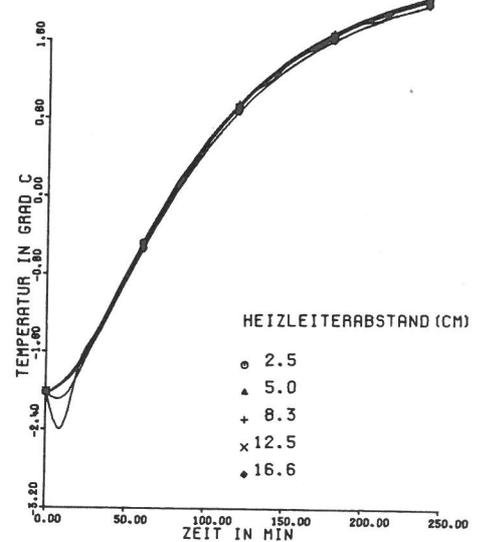


Bild ABI/8
 Temperaturverlauf an der Brückenunterseite

b) Modell Kunstharzaufbau

Entsprechend Abschnitt 10.211 c) wird auch hier mit einer Heizleiterüberdeckung von 1,0 cm gerechnet. Beim Vergleich mit dem Modell Asphaltaufbau ist zu erkennen, daß die geringere Überdeckungshöhe der Heizleiter für die Entwicklung der Oberflächentemperaturen keine Vorteile bringt. Augenfällig ist in diesem Zusammenhang der grundsätzlich andere Charakter der Heizleiterabstand-Zeit-Funktion im Bild KBI/0. Bei Betrachtung der Bilder KBI/1 und KBI/5 ist festzustellen, daß die Temperatur-Zeit-Kurven nach Überschreiten ihres Minimums nahezu identisch sind

und damit unabhängig vom Heizleiterabstand. Die unterschiedlichen Funktionswerte werden lediglich durch unterschiedliche Abkühlgeschwindigkeiten in der ersten Phase hervorgerufen. Von einem gleichen stationären Zustand ausgehend hätte eine Variation des Heizleiterabstandes keinen Einfluß auf das Übertragungsverhalten bezüglich der geringsten Oberflächentemperatur.

Das etwas ungewöhnliche Verhalten der Temperatur an der Brückenunterseite in Bild KBI/8 konnte nicht ausreichend erklärt werden, ist aber wahrscheinlich auf die Schrittweisensteuerung bei der Integration des Differentialgleichungssystems zurückzuführen.

BRUECKENMODELL KUNSTHARZ

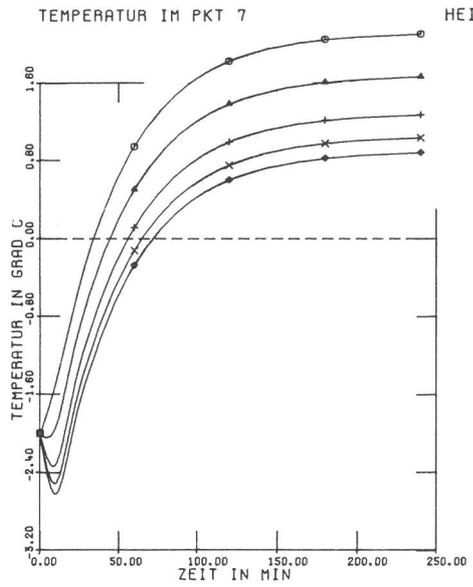


Bild KBI/1
Entwicklung der geringsten Oberflächentemperatur

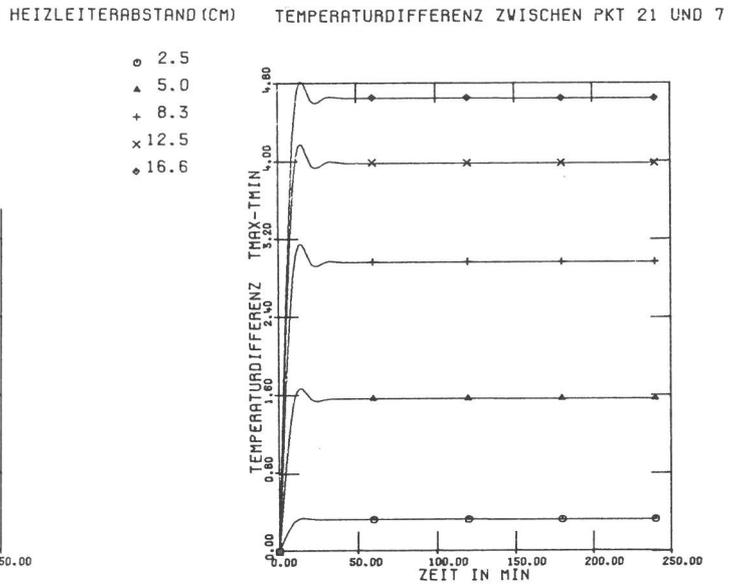


Bild KBI/2
Temperaturdifferenz an der Oberfläche

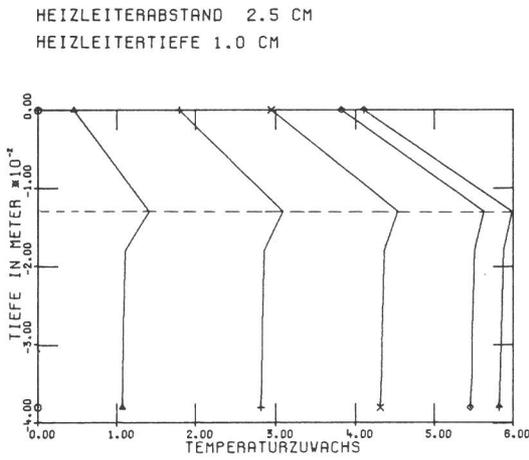


Bild KBI/3
Entwicklung des Temperaturzuwachses im gesamten Querschnitt des Modells

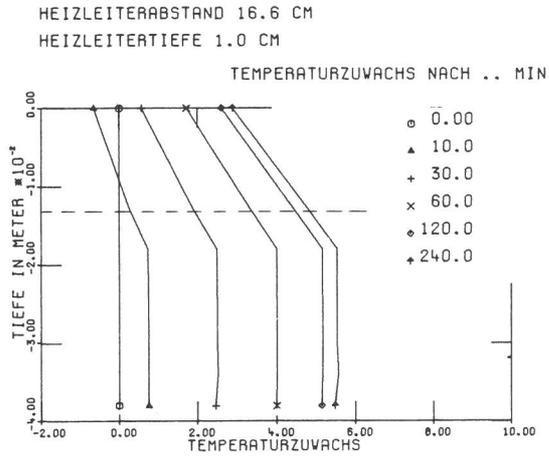


Bild KBI/4
----- Heizlebene

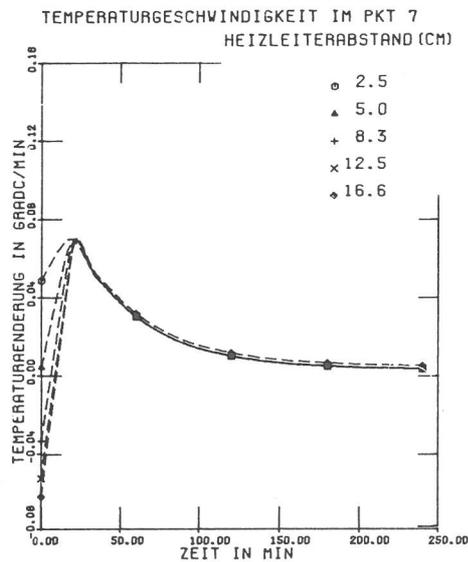


Bild KBI/5
Temperaturänderung im Knoten der geringsten Oberflächentemperatur

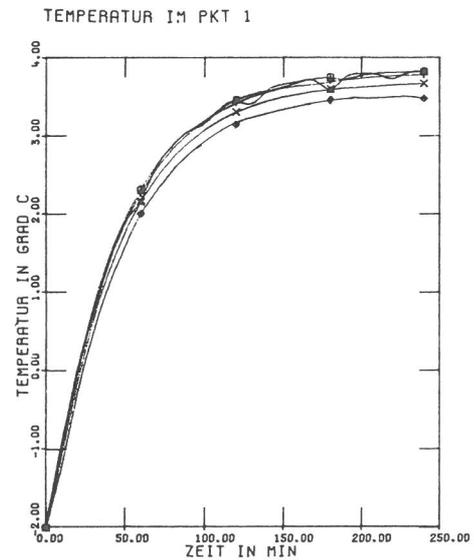


Bild KBI/8
Temperaturverlauf an der Brückenunterseite

10.222 Variation der Heizleitertiefe

a) Modell Asphaltaufbau

Der Heizleiterabstand wurde wie im zugehörigen Straßenmodell zu 8,3 cm gewählt.

Zwischen der Überdeckungstiefe der Heizleiter und dem

daraus resultierenden Zeitverhalten zeigt sich auch hier ein quasi-linearer Zusammenhang. Was die "Schnelligkeit" dieses Systems anbetrifft, so ist durch einen Vergleich von $ABII/0$ und $ASII/0$ zu erkennen, daß trotz verschiedener Untergrundverhältnisse das Verhalten hier dem des Straßenbelages ähnlich ist.

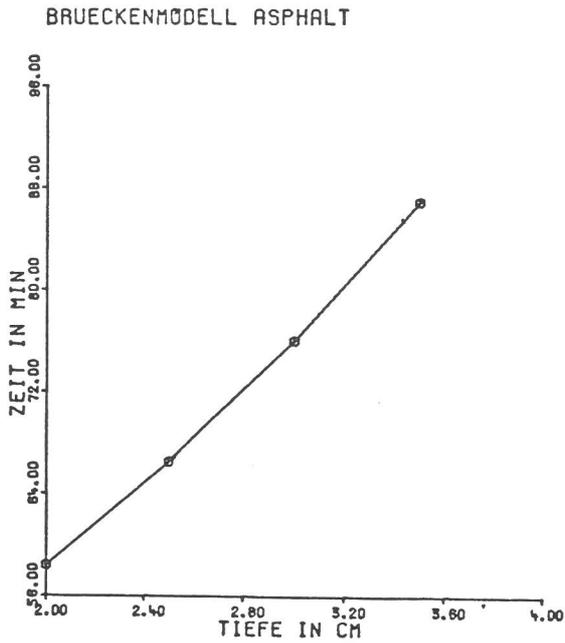


Bild ABII/0
Übertragungsverhalten der verschiedenen Brückenmodelle in Abhängigkeit von der Heizleiterüberdeckung

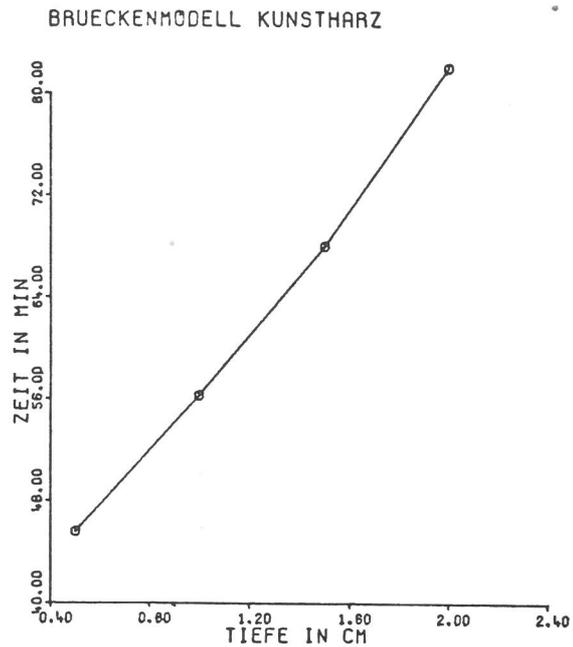


Bild KBII/0
Übertragungsverhalten der verschiedenen Brückenmodelle in Abhängigkeit von der Heizleiterüberdeckung

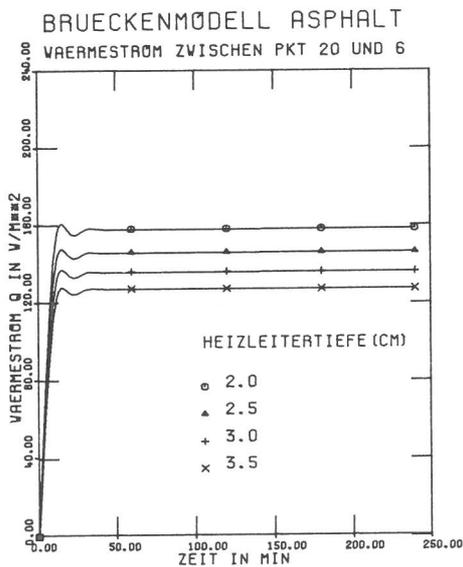


Bild ASII/7
Wärmequerstromdichte oberhalb der Heizleiterebene

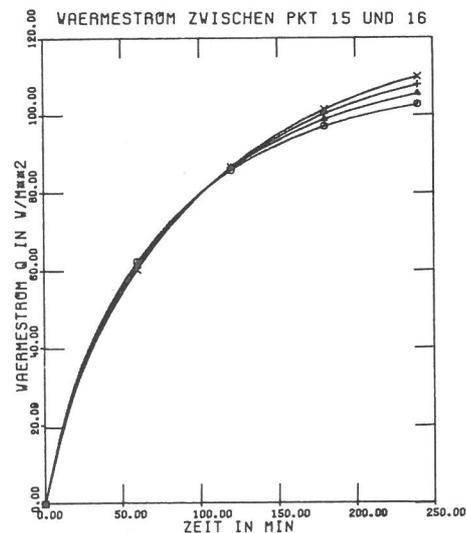


Bild ASII/6
Wärmequerstromdichte unterhalb der Heizleiterebene

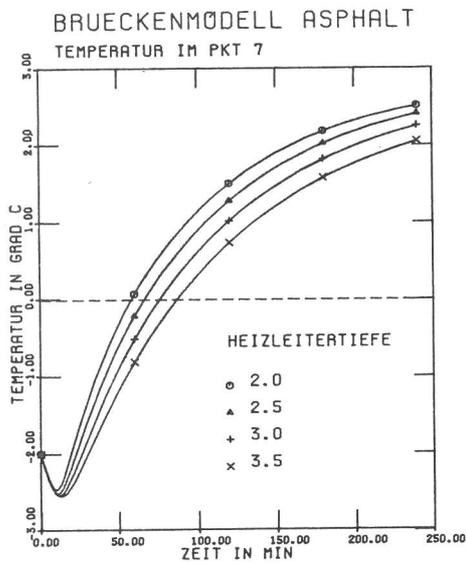


Bild ABII/1
Entwicklung der geringsten Oberflächentemperatur

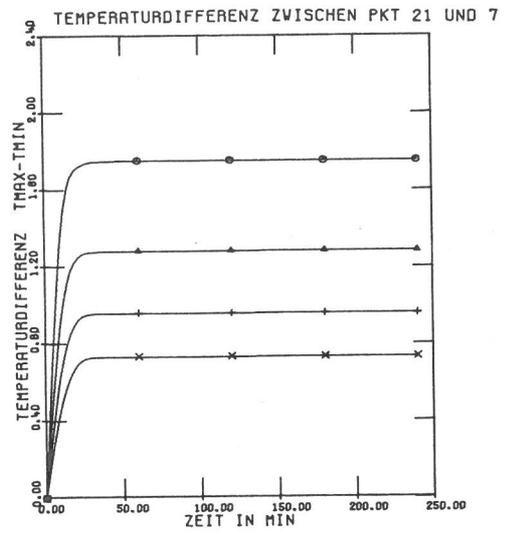


Bild ABII/2
Temperaturdifferenz an der Oberfläche

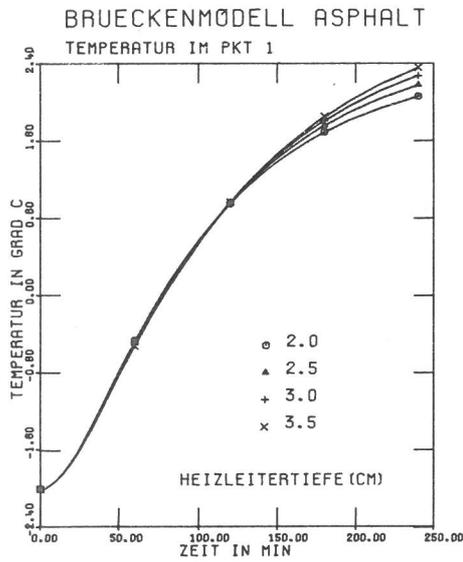


Bild ABII/8
Temperaturverlauf an der Brückenunterseite

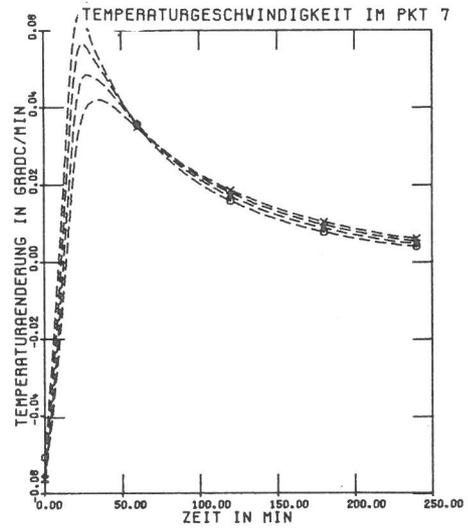


Bild ABII/5
Temperaturänderung im Knoten der geringsten Oberflächentemperatur

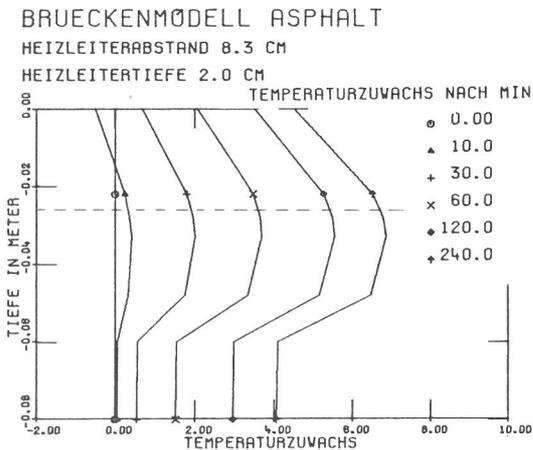


Bild ABII/3
Entwicklung des Temperaturzuwachses im gesamten Querschnitt des Modells

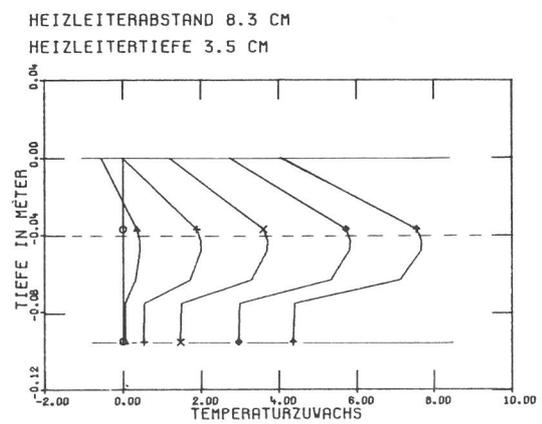


Bild ABII/4

----- Heizleiterbene

b) Modell Kunstharzaufbau
 Die Heizleitertiefe, entsprechend den auf den Bildern angegebenen Werten, wurde auch hier bei einem Abstand von

8,3 cm variiert. Die Abhängigkeit der Heizzeit von der Tiefenlage der Heizkabel ist in *Bild KBII/0* dargestellt. Weitere Aussagen in 10.222 a) gelten entsprechend.

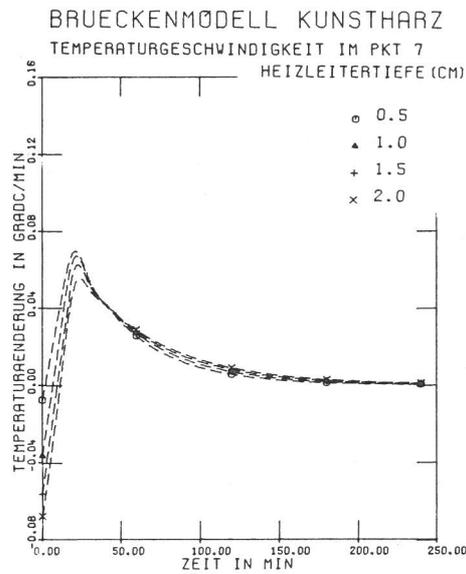


Bild KBII/5
 Temperaturänderung im Knoten der geringsten Oberflächentemperatur

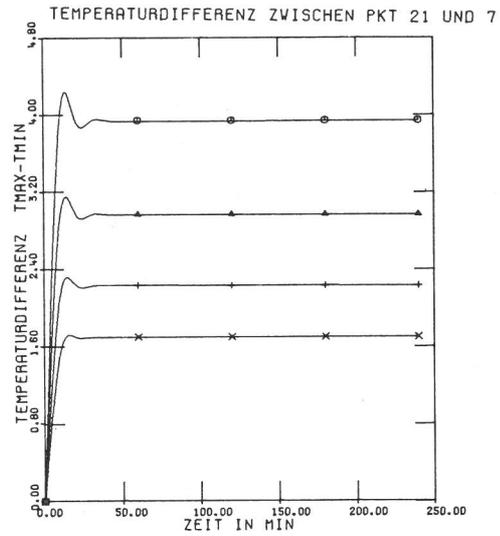


Bild KBII/2
 Temperaturdifferenz an der Oberfläche

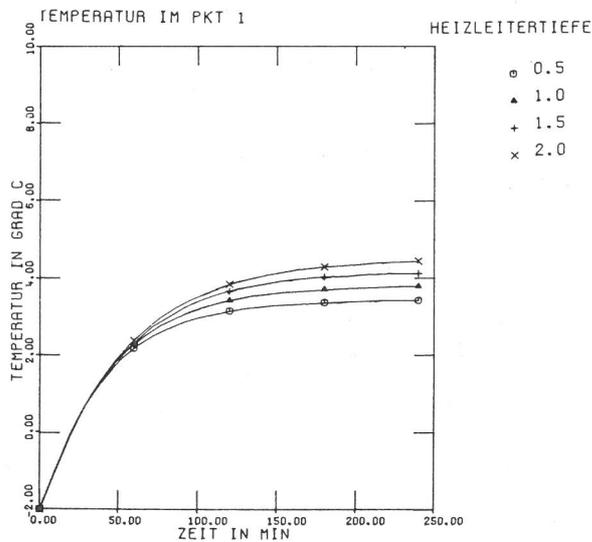


Bild KBII/8
 Temperaturverlauf an der Brückenunterseite

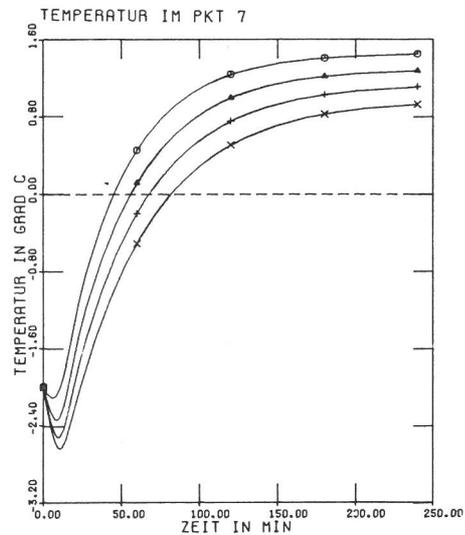


Bild KBII/1
 Entwicklung der geringsten Oberflächentemperatur

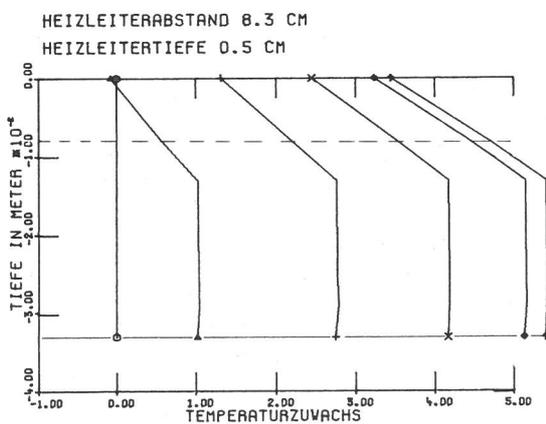


Bild KBII/3
 Entwicklung des Temperaturzuwachses im gesamten Querschnitt des Modells

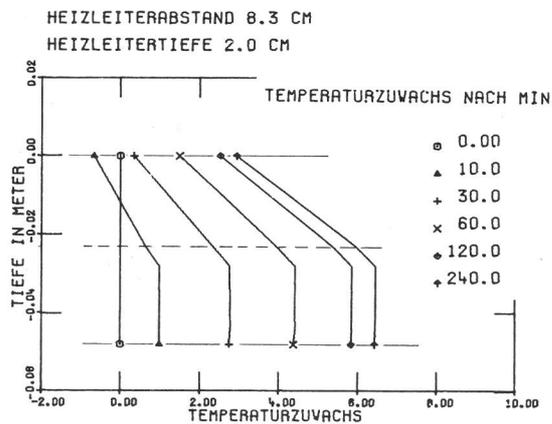


Bild KBII/4
 ----- Heizleiterebene

10.23 Einfluß von Wärmedämmschichten

10.231 Grundlagen

Wie aus den Bildern . . . /6 zu ersehen ist, fließt ein Teil der eingespeisten Wärme ungenutzt in den Untergrund. Es liegt daher nahe, anzunehmen, daß durch den Einbau einer wärmedämmenden Schicht unterhalb der Heizleiterenebene die Effektivität der Heizung erhöht wird. Realisiert man dies, stellt sich durch eine derartige Maßnahme jedoch der Nebeneffekt ein, daß aufgrund der nun unterbundenen Wärmezufuhr aus den wärmeren Schichten des Untergrundes eine schnellere Auskühlung des Bereiches oberhalb der Wärmedämmschicht vonstatten geht (siehe [71]). Somit muß dann die Bodenheizung wieder häufiger in Anspruch genommen werden (siehe auch *Bild 10.1*). Weiterhin ist zu bedenken, daß es bei sommerlichen Verhältnissen zu einem Wärmestau in den oberen Schichten derartiger Straßen- und Brückenkonstruktionen kommt, da die Wärmeableitung nach unten jetzt behindert ist. Es besteht dann vermehrte Gefahr, daß bei nicht verankerten Heizsystemen die Heizleiter unter der Verkehrsbelastung "aufschwimmen" können. Bei winterlichen Verhältnissen stellte *Eisenmann* [71] aufgrund von vergleichenden Heizversuchen fest, daß wegen der weniger starken Auskühlung der Aufbau ohne Dämmschicht trotz seines geringeren Temperaturzuwachses eine

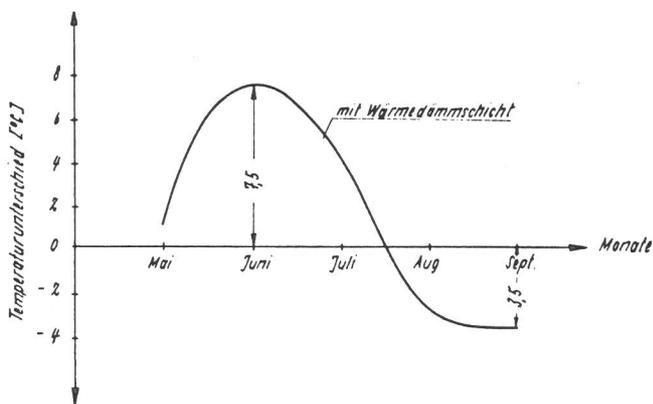


Bild 10.1
Unterschied der mittleren Temperatur (tägl. Größtwert) in Betondecken mit und ohne Wärmedämmschicht
Verlauf der monatlichen Größtwerte nach [71]

vorgegebene Temperatur schneller erreicht. Die Temperaturgeschwindigkeit liegt dabei um etwa 1/3 niedriger als die bei dem System mit Dämmschicht. Eine konstante Belagstemperatur über eine längere Zeit hin zu halten, ist jedoch mit Dämmschicht leichter.

Bezüglich der thermomechanischen Beanspruchungen in beiden Systemen: Bei sommerlichen Verhältnissen wurde in einer Betondecke mit Wärmedämmschicht ein etwa um 30 % geringerer Temperaturgradient gemessen, was eine entsprechend kleine Wölbspannung der Betonplatte zur Folge hatte.

Schließlich wurde festgestellt, daß hinsichtlich der Effektivität einer Heizung der Einbau von Wärmedämmschichten abhängig gemacht werden sollte von den jeweils vorherrschenden Klimaverhältnissen. Als Richtmaß wird angegeben,

daß erst bei einem mittleren Frostindex ≥ 130 Gradtage ein derartiger Einbau ökonomisch sinnvoll ist.

Im Straßenbau werden Wärmedämmschichten hauptsächlich dazu benutzt, die Frosteindringung in den Untergrund zu verhindern und damit die Tragfähigkeit der Straßenkonstruktion im Frühjahr zu gewährleisten. Dementsprechende Anforderungen werden an das Wärmedämmmaterial gestellt. Dazu gehören neben guten thermischen Eigenschaften u.a. auch Forderungen nach ausreichender mechanischer Beständigkeit und geringer Neigung zur Feuchtaufnahme. Letztere Forderung ist insofern wesentlich, als die Wärmedämmfähigkeit mit zunehmendem Feuchtigkeitsgehalt verloren geht.

Wasseraufnahme

Die zur Zeit auf dem Markt erhältlichen Isoliermaterialien sind, neben organischen Stoffen und Mineralien, im wesentlichen expandiertes Glas, Polyurethanschaumstoffe, extrudiertes und blockgeschäumtes Polystyrol. Die Fähigkeit der Wasseraufnahme dieser Stoffe hängt ab von ihrer Zellstruktur. So ist z.B. Untersuchungen von *Oosterbaan* [72] zu entnehmen, daß die Wasseraufnahme bei verschiedenen Versuchsbedingungen am größten ist bei den Polyurethanschaumstoffen und den blockgeschäumten Polystyrolen (siehe *Bild 10.2*). *William* [75] kann zeigen, daß beispielsweise die Isolierfähigkeit von verschiedenen Polystyrolen nach rund 300 Tagen Wasserlagerung um Werte zwischen 24 % bis 35 % gemindert wurde. Extrudierte Polystyrole dagegen zeigten unter gleichen Bedingungen eine derartige Verminderung um nur etwa 8 %. Herstellerangaben von Schaumglas besagen, daß derartige Produkte fast überhaupt keine Wasseraufnahmefähigkeit haben und lediglich einen verschwindenden Prozentsatz Wasser infolge angeschnittener Zellen an der Oberfläche aufnehmen.

Mechanische Eigenschaften

Die Empfehlungen und Vorschriften zum Aufbau verschiedenartiger Straßen- und Brückenbeläge sind im wesentlichen aus praktischen Erfahrungen mit den verwendeten Materialien gewonnen worden. Parameter ist dabei die angenommene Belastung. Das Kriterium zur Beurteilung einer solchen Konstruktion ist hauptsächlich die bleibende Verformung infolge statischer, dynamischer und klimatischer Dauerbelastung. Für den geplanten Einbau einer Wärmedämmschicht in beispielsweise einen Straßenbelag ist über die zu erwartende Veränderung des Verhaltens keine genaue Aussage mangels ausreichender theoretischer Grundlagen möglich. Bezüglich der Auswahl des Dämmmaterials, dessen Abmessungen und Lage in der Schichtenkonstruktion sind deshalb in mechanischer Hinsicht vorerst die Maßstäbe "Druckfestigkeit" und "bleibende Verformung" unter statischen Versuchsbedingungen anzulegen. Dabei ist klar, daß damit ein Verhalten etwa infolge stoßartiger Belastung nicht beurteilt werden kann. Bei der Annahme der Verkehrsbelastung sollen die in [77] angestellten Überlegungen vorausgesetzt werden, aus welchen sich ein mittlerer Kontaktdruck zwischen Rad und Unterlage von etwa $0,7 \text{ N/mm}^2$ ergibt. Die Verteilung dieser Last ist in flexiblen Decken andersartig als im Betonoberbau einer Straße. Hier sollen die Untersuchungen von *Oosterbaan* [74] herangezogen werden, der bei festen Deckenkonstruktionen von einer Druckbelastung des Untergrundes in der Größenordnung von $0,035 \text{ N/mm}^2$ ausgeht. Bei flexiblen Decken sollen die in *Bild 10.3* dargestellten Beziehungen gelten.

EXPANDIERTES GLAS	POLYURETHANSCHAUMSTOFFE			EXTRUDIERTER POLYSTYROLHARTSCHÄUM			BLOCKGESCHÄUMTES POLYSTYROL
	THURANE FR	PU GESPRIKTZT	QX 3851 VERSUCH	STYROFOAM SM	STYROFOAM FR	STYROFOAM HD 300	

Bild 10.2
Wasseraufnahme in Dämmstoffen nach Lagerung in Wasser und Gefrier-Tau-Zyklen nach [72]

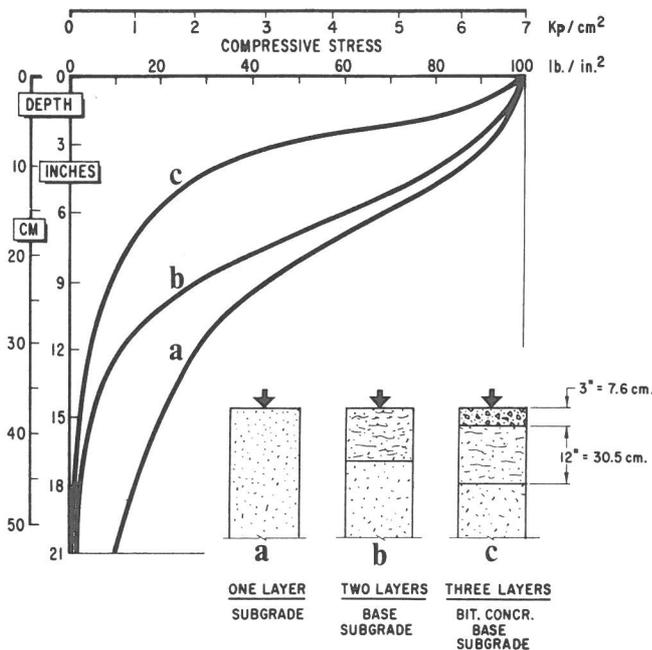
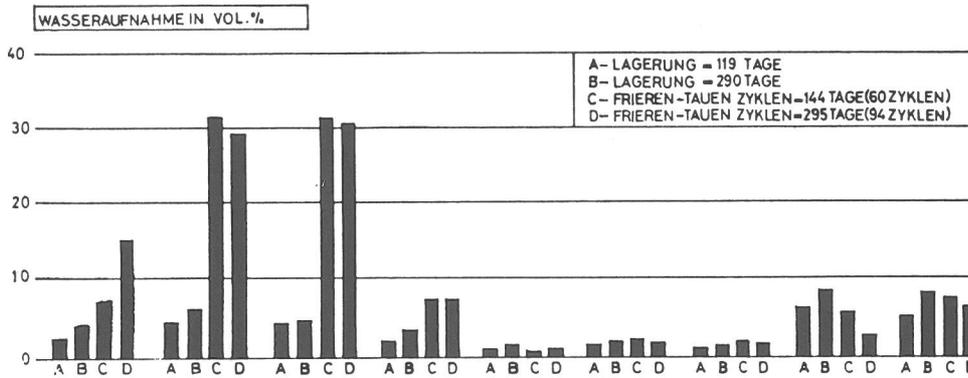


Bild 10.3
Druckspannung in Abhängigkeit von der Tiefe bei flexiblen Straßenaufbauten nach OOSTERBAAN [74]

10.232 Modellfindung

10.2321 Straßenmodelle

Unter den oben genannten Voraussetzungen sollen nun beispielhaft die Einflüsse von drei alternativen Wärmedämmkonstruktionen untersucht werden, die sie auf die thermischen Verhältnisse beim Einsatz einer Bodenheizung ausüben. Folgende Konstruktionen werden angenommen:

Wärmedämmschicht ausgebildet als

- 1) separate Schicht, Material: extrudiertes Polystyrol (Styrofoam HD 300)
- 2) separate Schicht, Material: expandiertes Glas (Foamglas S3)
- 3) Teil der Tragschicht, Material: Styropor-Beton.

Die zugehörigen physikalischen Kennwerte sind in *Tabelle 8.1* aufgeführt.

Die Einbautiefe des Dämmmaterials ist, wie oben angeführt, nicht allein nach thermodynamischen Gesichtspunkten auszuwählen. Vielmehr schränken die Gesichtspunkte "ausreichende mechanische Belastbarkeit der Gesamtkonstruktion" und "Fertigungspraxis" den denkbaren Bereich bereits stark ein. Die folgenden Annahmen sollen nur als eine grobe Abschätzung der Verhältnisse verstanden werden. Eine genauere Untersuchung, vor allem der Festigkeitsbetrachtung, wäre notwendig.

a) Betonoberbau

Nach *Oosterbaan* [74] kann davon ausgegangen werden, daß für den angenommenen Kontaktdruck bei Betondecken die Last innerhalb der Deckschicht so weit verteilt worden ist, daß die Belastung auf die Tragschicht nur noch in der Grö-

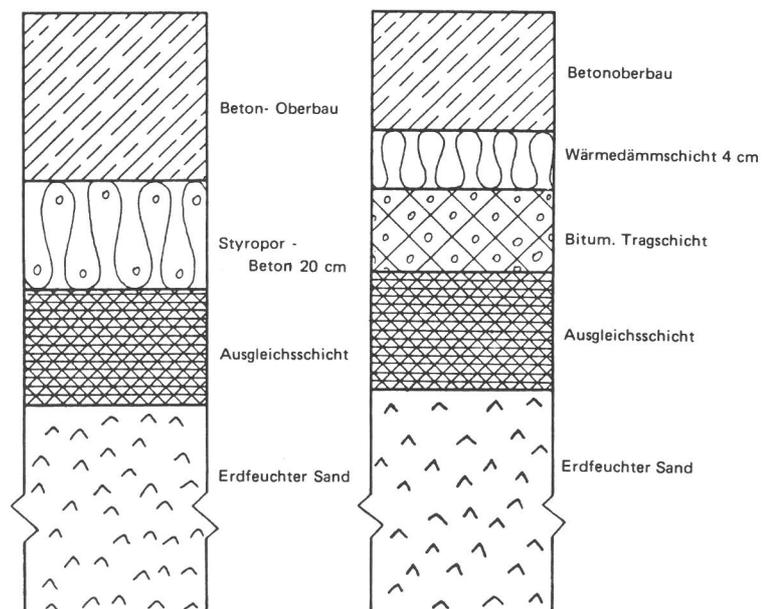


Bild 10.4
Straßenmodell "Betonaufbau" mit tragender und nichttragender Wärmedämmschicht

Benennung von $0,035 \text{ N/mm}^2$ liegt. Bei den angegebenen Druckfestigkeiten für Styrofoam und Foamglas scheint es daher angemessen, diese Dämmmaterialien direkt unter der Deckschicht zu placieren. Beim Einsatz von Styropor-Beton ist es nach [75] möglich, die bituminös gebundene Tragschicht ganz oder teilweise durch eine tragfähige Wärmedämmschicht zu ersetzen. Entsprechend einem Vorschlag von *Apostolopoulos* [75] wird jetzt die Tragschicht im Grundmodell (Bild 7.2) durch eine verstärkte Wärmedämmschicht ersetzt (siehe Bild 10.4). Nach *Schneiders* Untersuchungen in [76] kann man bei folgenden Verhältnissen der Schichtdicken von äquivalenter Wärmedämmung sprechen: Hartschaum: Styroporbeton = 1:5 bis 1:6. Die Plattendicken von Styrofoam und Foamglas werden deshalb mit 4 cm angenommen. Somit ergeben sich dann die in Bild 10.4 dargestellten Modelle.

b) Bituminöser Oberbau

In Bild 10.3 ist die Verteilung der äußeren Belastung über der Tiefe aufgetragen. Um einen Ermüdungsbruch der Wärmedämmplatten infolge ständiger Überbelastung zu vermeiden, soll jetzt hier, ebenso wie bei der Betondecke, eine maximale Belastung von $0,035 \text{ N/mm}^2$ zugelassen werden. Diese Annahme hat sich durch experimentelle Untersuchungen an dem genannten Polystyrol als sinnvoll erwiesen (siehe [74]). Nach Bild 7.1 ist damit der Bereich zum Placieren einer Dämmplatte auf den Bereich unter der bituminösen Tragschicht eingeschränkt. Dies scheint auch in bezug auf den Arbeitsablauf zum Aufbringen der einzelnen bituminösen Schichten sinnvoll, wenn man die thermische Belastung durch das heiße Mischgut und die Belastung beim Verdichten des Asphalttes berücksichtigt. Eine Variation der Tiefenlage der Dämmschicht ist denkbar, setzt jedoch zur Beurteilung eine ausreichende Kenntnis des Stoffverhaltens aller beteiligten Materialien sowie eine genauere Analyse des Deformationsverhaltens der gesamten Konstruktion voraus. Ebenso wären Untersuchungen notwendig, die aufzeigen, wie stark sich ein vorgegebener Deformationsvorgang auf die Wärmedämmeigenschaften auswirkt.

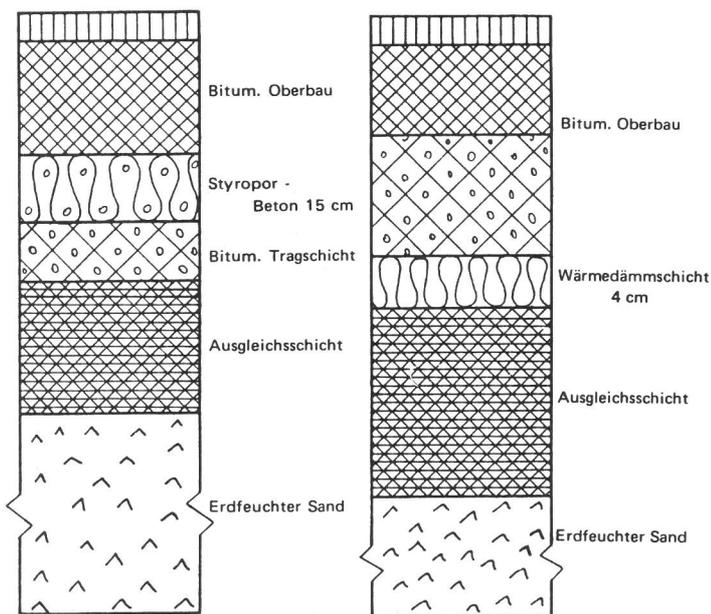


Bild 10.5
Bituminöser Straßenaufbau mit tragender und nichttragender Wärmedämmschicht

Die Verwendung des Styroporbetons soll jetzt derart geschehen, daß die bituminöse Tragschicht zu einem Teil durch die tragende Dämmschicht ersetzt wird, zum anderen Teil erhalten bleibt. Die Verhältnisse der Schichtdicken bei äquivalentem Tragverhalten gibt *Eisenmann* an mit: Bituminöse Tragschicht: Styroporbeton = 1:2 bis 1:4.

In Bild 10.5 sind die Straßenmodelle gezeigt, an denen nach Einbau verschiedener Wärmedämmschichten erneut die Temperaturentwicklung infolge Heizung beobachtet wurde.

10.2322 Brückenmodell

Für den Einbau von Wärmedämmschichten in Stahl-Brückenbelägen sollen zunächst die in 10.2321 angestellten Überlegungen zur mechanischen Belastbarkeit der Beläge außer acht gelassen werden. Dabei wird vorausgesetzt, daß die im folgenden angegebenen Konstruktionen aus statischer Sicht sinnvoll sind, was bei Fußgängerbrücken sicherlich der Fall ist. Entsprechende Überlegungen sollen für die Einbaupraxis gelten. Entsprechend dem Bild 7.4 in Abschnitt 7 wird nun lediglich für das Modell "Asphaltaufbau" zwischen den Schichten Asphaltmastix und Gußasphalt eine 4 cm dicke Wärmedämmschicht aus Foamglas eingebaut (siehe Bild 10.6).

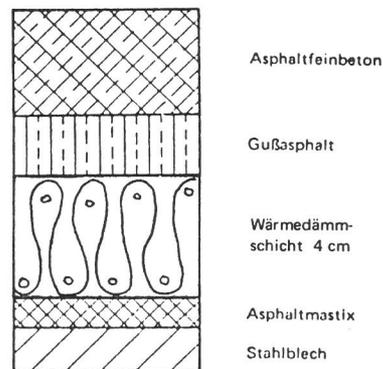


Bild 10.6
Brückenmodell "Asphaltaufbau" mit nichttragender Wärmedämmschicht

10.233 Rechenergebnisse

Um überhaupt eine Vergleichbarkeit der Ergebnisse der Rechnungen mit und ohne Wärmedämmschicht herstellen zu können, ist für alle Modelle die in Abschnitt 8 besprochene Anfangstemperaturverteilung vorausgesetzt worden.

Die in den folgenden Darstellungen angegebenen Knotennummern beziehen sich auf die Grundmodelle von Bild 7.7 und Bild 7.8. Wie schon im letzten Abschnitt werden die Ergebnisse nur insoweit kommentiert, als es für das Verständnis des Dargestellten erforderlich ist.

10.2331 Straßenmodelle

a) Asphaltaufbau

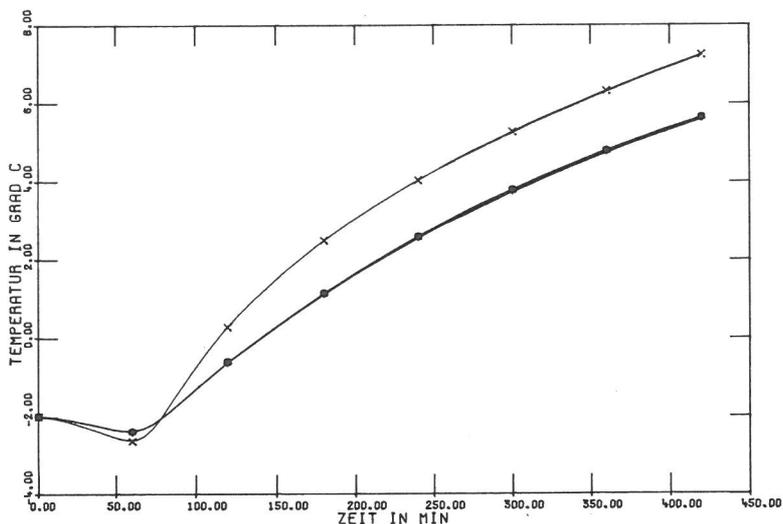
Bild ASW/1, 2, 5: Es ist deutlich zu erkennen, daß lediglich die Wärmedämmschicht aus Styroporbeton eine merkliche Veränderung des Systemenverhaltens bewirkt. Auch die von *Eisenmann* beschriebene stärkere Auskühlung der Belagsoberfläche wird hier wiedergegeben.

Bild ASW/6: Ein direkter Vergleich der hier dargestellten Wärmestromdichten ist nicht möglich. Zwar sind bei allen Modellen die Heizleitertiefe von 3,5 cm und der Heizleiterabstand von 8,3 cm gleich, doch liegen die entsprechenden Punkte 23 und 24 in unterschiedlichen Tiefen unter der Oberfläche. Durch die Vorgabe eines für alle Modelle gleichen Anfangstemperaturprofils sind natürlich die Wärmestromverhältnisse bei entsprechenden Tiefenlagen unterschiedlich. Wiederum gemeinsam ist den Ergebnissen jedoch, daß die maximale Wärmestromdichte in dem Bereich direkt unter bzw. um den bituminösen Oberbau unterhalb der Heizung auftritt. Zur besseren Einschätzung der Ergeb-

nisse sollen die folgenden Angaben zur Lage der entsprechenden Knoten dienen:

Modell	Tiefenlage der Punkte [cm]		Wärmestromdichte in
	23	24	
□	37,5	27,5	Bituminöse Tragschicht
▲	31,5	27,5	Foamglas
+	31,5	27,5	Styrofoam
X	27,5	12,5	Styroporbeton

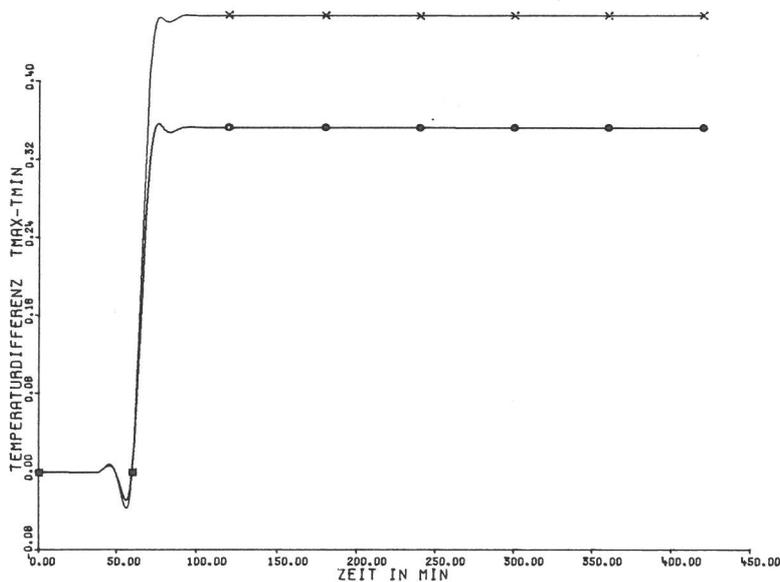
STRASSENMODELL ASPHALT MIT WAERMEDAEMMSCHICHT
TEMPERATUR IM PKT 9



AUFBAU •
 ○ OHNE WDS
 ▲ FOAMGLAS
 + STYROFOAM
 X STYROPORBETON

Bild ASW/1
Entwicklung der geringsten Oberflächentemperatur

STRASSENMODELL ASPHALT MIT WAERMEDAEMMSCHICHT



AUFBAU •
 ○ OHNE WDS
 ▲ FOAMGLAS
 + STYROFOAM
 X STYROPORBETON

Bild ASW/2
Temperaturdifferenz an der Oberfläche

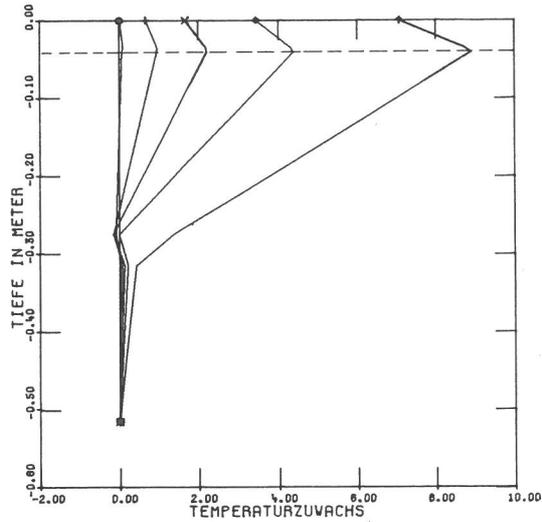
STRASSENMODELL ASPHALT MIT WAERMEDAEMMSCHICHT

VDS • 4 CM STYROFOAM

HEIZLEITER • ABSTAND 8.3 CM/TIEFE 3.5 CM

TEMPERATURPROFIL NACH ... MIN HEIZZEIT

○ -10.0 + 30.0 ◆ 120.0
 ▲ 10.0 × 60.0 † 300.0



VDS • 15 CM STYROPORBETON

HEIZLEITER • ABSTAND 8.3 CM/TIEFE 3.5 CM

TEMPERATURPROFIL NACH ... MIN HEIZZEIT

○ -10.0 + 30.0 ◆ 120.0
 ▲ 10.0 × 60.0 † 300.0

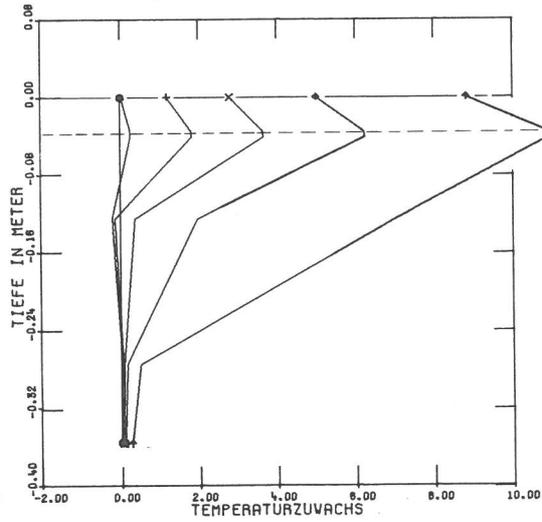


Bild ASW/3

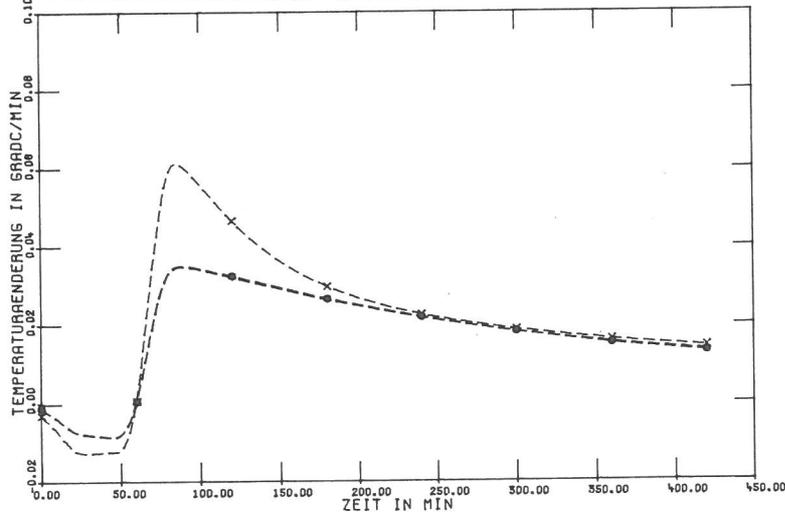
Entwicklung des Temperaturzuwachses im oberen Bereich des Modells

Bild ASW/4

----- Heizleiterebene

STRASSENMODELL ASPHALT MIT WAERMEDAEMMSCHICHT

TEMPERATURGESCHWINDIGKEIT IN PKT 9



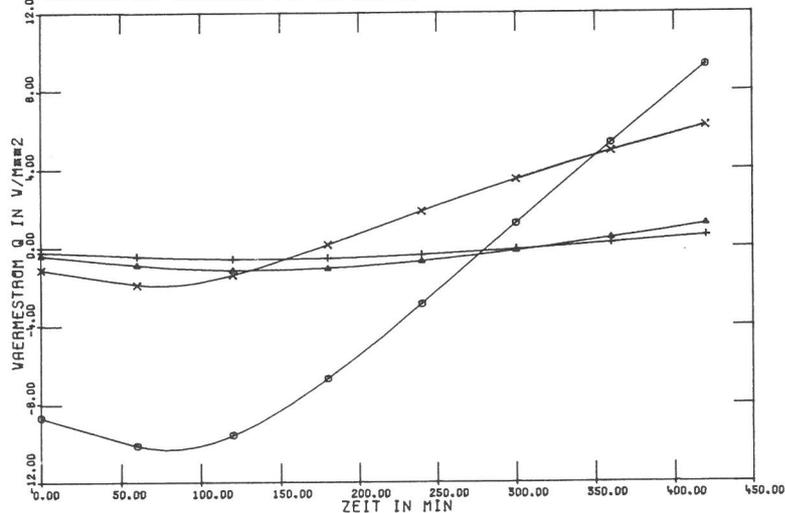
AUFBAU •
 ○ OHNE VDS
 ▲ FOAMGLAS
 + STYROFOAM
 × STYROPORBETON

Bild ASW/5

Temperaturänderung im Knoten der geringsten Oberflächentemperatur

STRASSENMODELL ASPHALT MIT WAERMEDAEMMSCHICHT

WAERMESTRÖM ZWISCHEN PKT 23 UND 24



AUFBAU •
 ○ OHNE VDS
 ▲ FOAMGLAS
 + STYROFOAM
 × STYROPORBETON

Bild ASW/6

Wärmestromdichte unterhalb der Heizleiterebene

b) Betonaufbau

Für diese Modelle gilt das unter a) Gesagte ebenfalls. Die Wärmestromdichten in *Bild BSW/6* wurden errechnet in

Modell	Tiefenlage der Punkte [cm]		Wärmestromdichte in
	23	24	
□	35,0	20,0	Bituminöser Oberbau
▲	23,0	20,0	Foamglas
+	23,0	20,0	Styrofoam
X	40,0	20,0	Styroporbeton

Hier ist allgemein erkennbar, daß die Wärmedämmschichten nahezu keinen Einfluß auf den thermodynamischen Zustand im oberen Belagsaufbau haben.

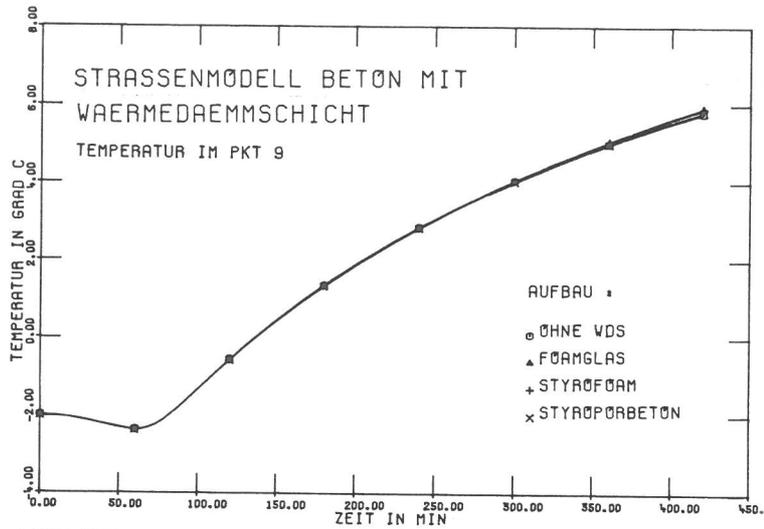


Bild BSW/1
Entwicklung der geringsten Oberflächentemperatur

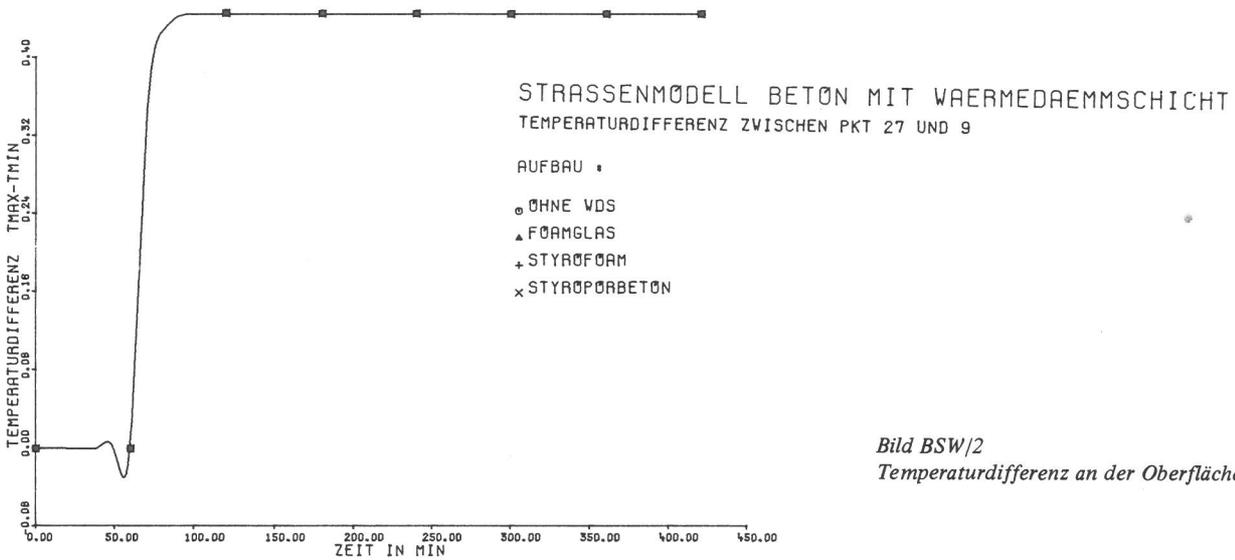


Bild BSW/2
Temperaturdifferenz an der Oberfläche

STRASSENMODELL BETON MIT WAERMEDAEMMSCHICHT

VDS = 15 CM STYROPORBETON
HEIZLEITER = ABSTAND 0.3 CM/TIEFE 3.5 CM

VDS = 4 CM STYROPORBETON
HEIZLEITER = ABSTAND 0.3 CM/TIEFE 3.5 CM

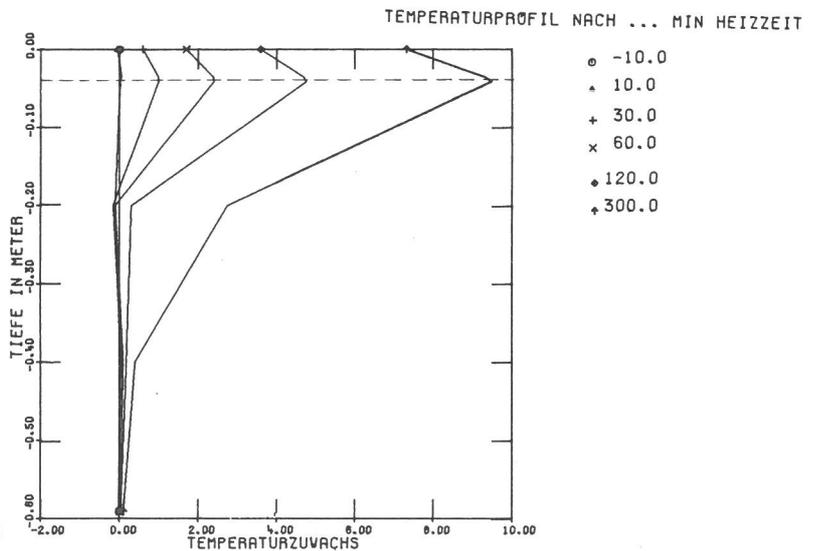
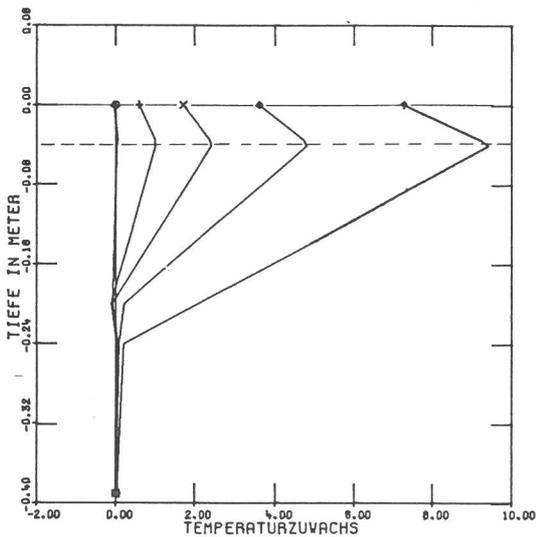
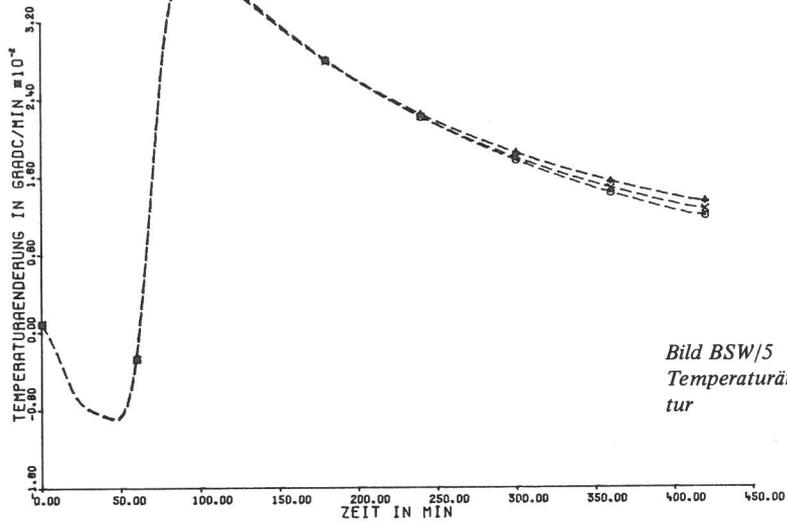


Bild BSW/3
Entwicklung des Temperaturzuwachses im oberen Bereich des Modells

Bild BSW/4

----- Heizleiterenebene

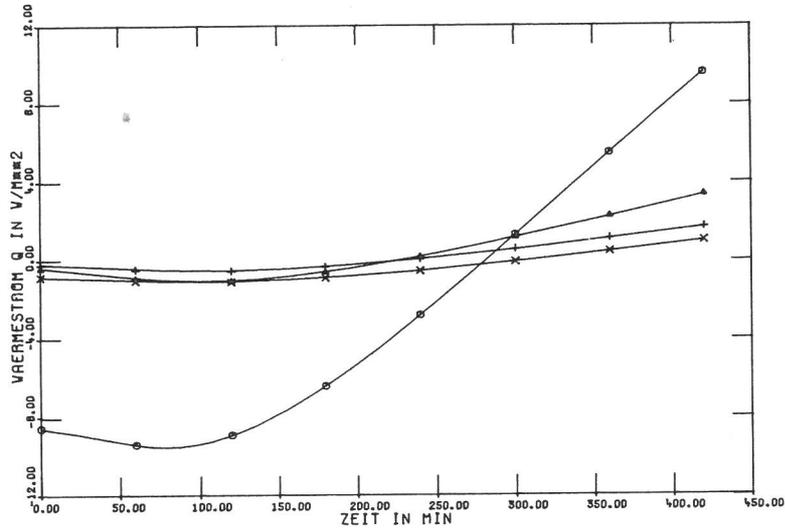
STRASSENMODELL BETON MIT WAERMEDAEMMSCHICHT
 TEMPERATURGESCHWINDIGKEIT IN PKT 9



- AUFBAU :
- OHNE VDS
 - ▲ FOAMGLAS
 - + STYROFOAM
 - x STYROPORBETON

Bild BSW/5
 Temperaturänderung im Knoten der geringsten Oberflächentemperatur

STRASSENMODELL BETON MIT WAERMEDAEMMSCHICHT
 WAERMESTROM ZWISCHEN PKT 23 UND 24



- AUFBAU :
- OHNE VDS
 - ▲ FOAMGLAS
 - + STYROFOAM
 - x STYROPORBETON

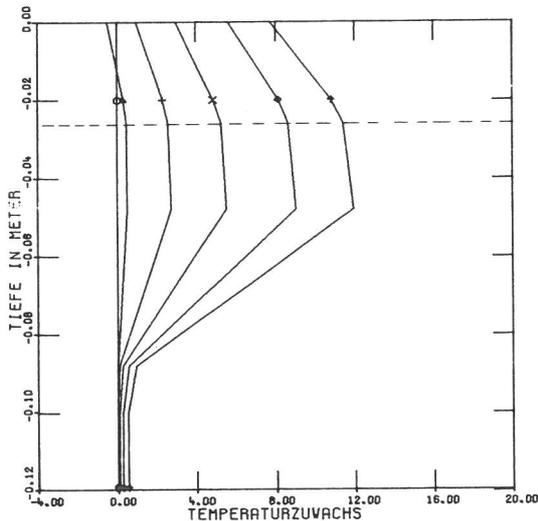
Bild BSW/6
 Wärmestromdichte unterhalb
 der Heizleiterebene

10.2332 Brückenmodell

Entgegen den Ergebnissen der Straßenmodellrechnungen zeigt sich bei den Brücken ein gravierender Einfluss der Wärmedämmschicht auf die Temperaturentwicklung im Belag und in der Brückenkonstruktion. Man erkennt genau, daß dies auf einen deutlich geringeren Wärmefluß in die Brük-

kenkonstruktion zurückzuführen ist. Bei einer stationären Belags-Oberflächentemperatur von 2°C verringern sich durch die Wärmedämmschicht die maximalen Wärmeverluste nach unten um rund 60 %. Dieses Beispiel macht deutlich, daß bei der Planung von beheizbaren Belägen auf Stahlbrücken eine Wärmedämmschicht im Belagsaufbau auf jeden Fall vorgesehen werden sollte.

BRUECKENMODELL ASPHALT MIT WDS
 WDS • 4 CM FOAMGLAS
 HEIZLEITER • ABSTAND 8.3 CM/TIEFE 2.0 CM



TEMPERATURZUWACHS NACH MIN

- 0.00
- ▲ 10.0
- + 30.0
- × 60.0
- ◆ 120.0
- ⋈ 240.0

Bild ABW/3
 Entwicklung des Temperaturzuwachses im gesamten Querschnitt des Modells
 ----- Heizleiterebene

BRUECKENMODELL ASPHALT MIT WDS
 TEMPERATURGESCHWINDIGKEIT IM PKT 7

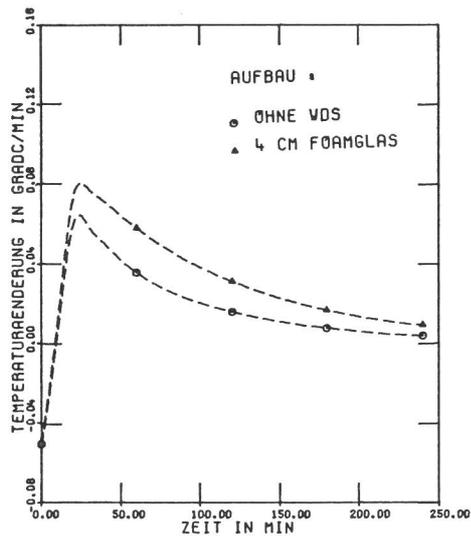


Bild ABW/1
 Entwicklung der geringsten Oberflächentemperatur

TEMPERATUR IM PKT 7

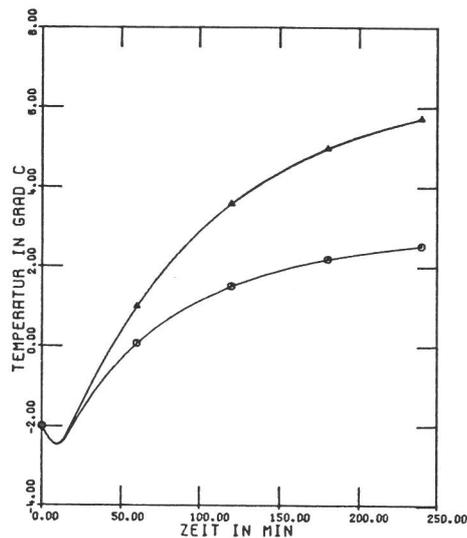


Bild ABW/5
 Temperaturänderung im Knoten der geringsten Oberflächentemperatur

BRUECKENMODELL ASPHALT MIT WDS

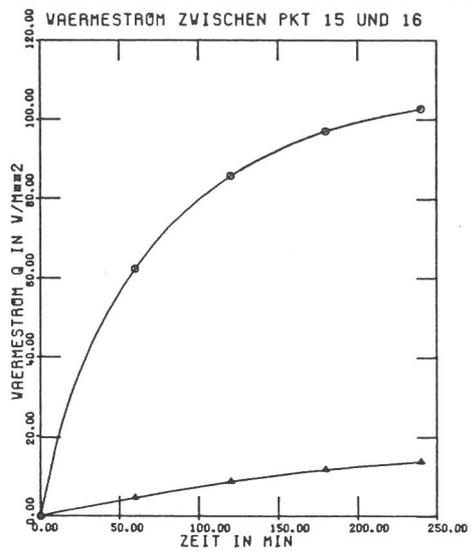


Bild ABW/6
Wärmestromdichte unterhalb der Heizleiterebene

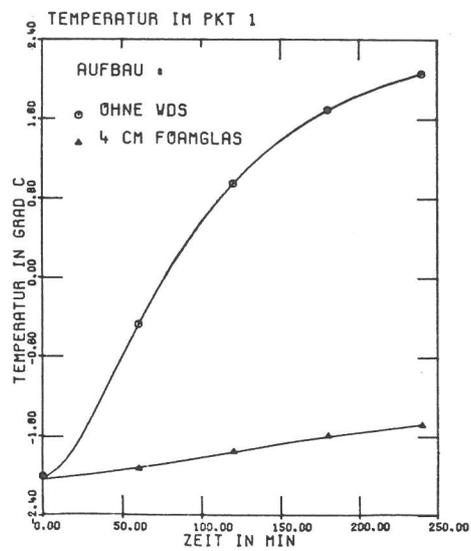


Bild ABW/8
Temperaturverlauf an der Brückenunterseite

10.24 Abkühlverhalten verschiedener Straßenaufbauten

Für den Betrieb einer Freiflächenheizung reicht es nicht aus, das Übertragungsverhalten des Belages nur in der Heizphase zu kennen. Selbst bei stationärem Großraumklima werden sich die mikroklimatischen Verhältnisse derart ändern, daß ein Betrieb der Heizung über einen längeren Zeitraum nicht dauernd notwendig ist. Der gesamte Heizvorgang wird schließlich aus mehr oder weniger regelmäßigen Zyklen bestehen, wobei sich die Aufheiz- und Abkühlvorgänge im Belag abwechseln. Aus diesem Grund ist es wichtig, auch das Übertragungsverhalten des Belages in der Abkühlphase zu kennen, um durch ein rechtzeitiges Einschalten der Heizung einen optimalen Energieverbrauch zu gewährleisten. Dies wird noch einsichtiger, wenn man versucht, den Betrieb einer Intervallheizung optimal zu organisieren. Hierbei darf der Aufheizvorgang des einen Teils der Oberfläche nur so lange erfolgen, wie der andere Teil nicht unter eine vorgegebene Temperatur abgesunken ist.

Die folgenden Rechenergebnisse sollen dazu beitragen, diese aufgeworfenen Fragen sicherer zu beantworten. Die Rechenmodelle dabei sind die in den letzten Abschnitten vorgestellten Modelle. Konkret soll in diesem Zusammenhang der Einfluß der Heizleitertiefe und der der Wärmedämmschicht auf das Abkühlverhalten untersucht werden. Die Ergebnisse zeigen einmal das Verhalten des charakteristischen Oberflächenpunktes mit der geringsten Temperatur, zum anderen werden durch die Bilder . . . /3 Aussagen über das Wärmepotential innerhalb des Belages gemacht. Die Rechnungen sind so ausgeführt worden, daß die vorn gemachten Voraussetzungen identisch übernommen wurden, jedoch jetzt mit $\dot{q} = 0$. Für die Anfangstemperaturverteilung ist der Endzustand der entsprechenden Modelle nach 6 Stunden Heizzeit angenommen worden (siehe Abschnitt 10.21).

a) Modell Asphaltaufbau

Aus Bild ASK/1 ist zu erkennen, daß entsprechend dem Aufheizverhalten auch die Abkühlgeschwindigkeit des Modells mit Styroporbeton wieder größer ist. Damit werden die Messungen von Eisenmann [71] bestätigt. Das Verhalten des Modells bei einer Heizleiterüberdeckung von 12,5 cm entspricht schon dem eines Speicherheizsystems mit einer sehr viel größeren Zeitkonstanten.

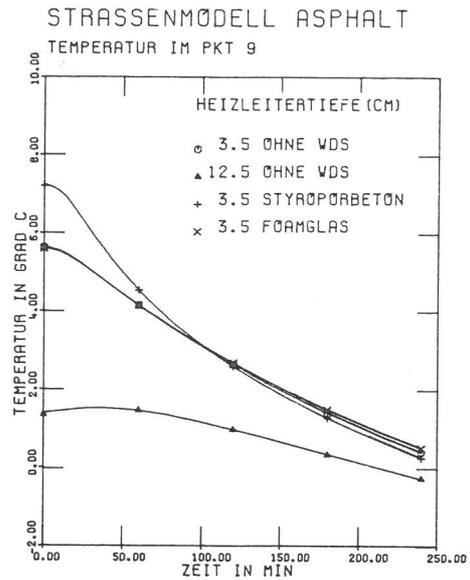


Bild ASK/1
Entwicklung der geringsten Oberflächentemperatur

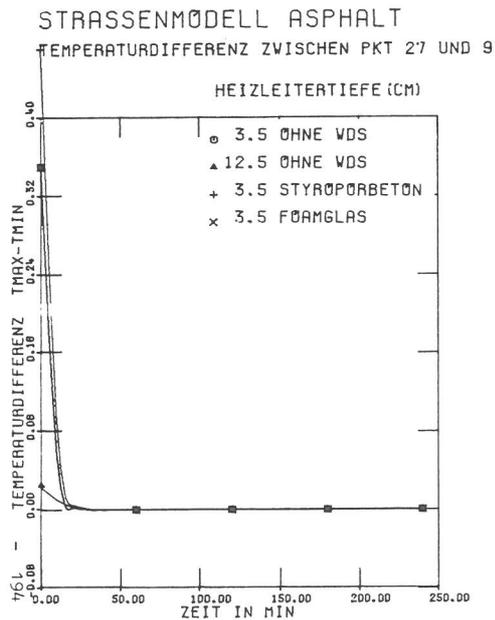


Bild ASK/2
Temperaturdifferenz an der Oberfläche

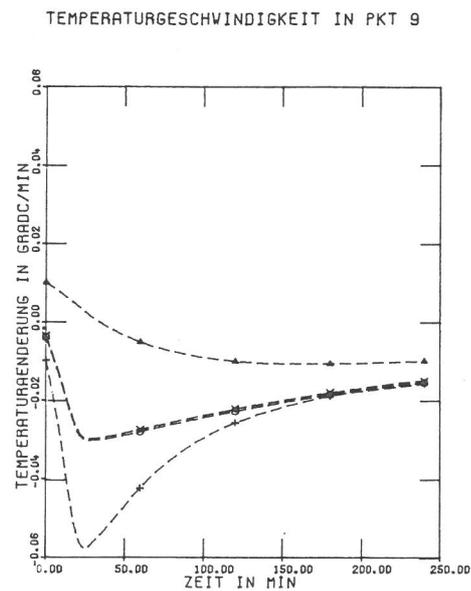


Bild ASK/5
Temperaturänderung im Knoten der geringsten Oberflächentemperatur

STRASSENMODELL ASPHALT

VDS : OHNE

HEIZLEITER : ABSTAND 8.3 CM/TIEFE 3.5 CM

TEMPERATURPROFIL NACH ... MIN HEIZZEIT

○ 0.00 × 60.0
 ▲ 10.0 ◆ 120.0
 + 30.0 † 240.0

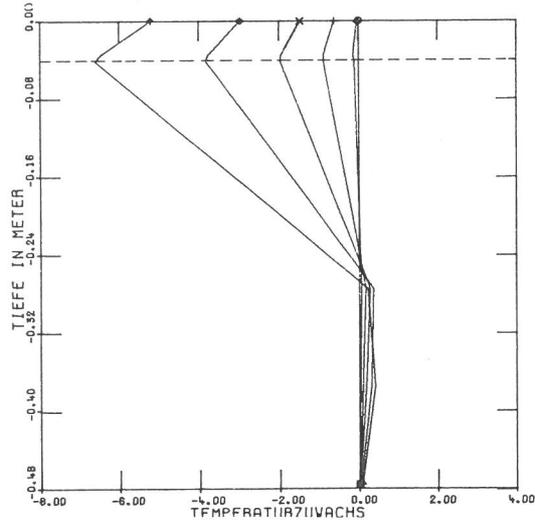


Bild ASK/3.1
 Entwicklung des Temperaturzuwachses im oberen Bereich des Modells
 ----- Heizleiterebene

STRASSENMODELL ASPHALT

VDS : OHNE

HEIZLEITER : ABSTAND 8.3 CM/TIEFE 12.5 CM

TEMPERATURPROFIL NACH ... MIN HEIZZEIT

○ 0.00 × 60.0
 ▲ 10.0 ◆ 120.0
 + 30.0 † 240.0

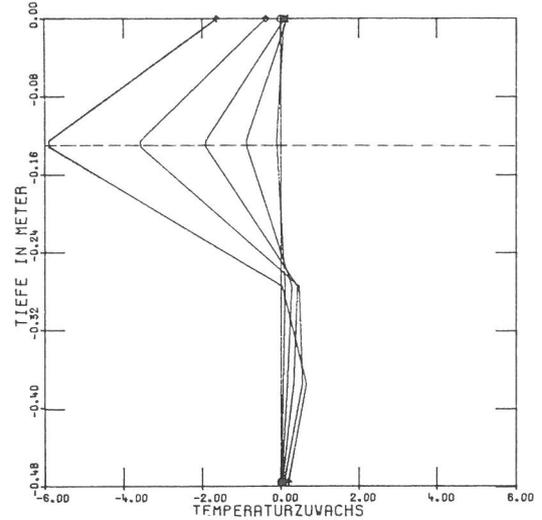


Bild ASK/3.2
 Entwicklung des Temperaturzuwachses im oberen Bereich des Modells
 ----- Heizleiterebene

STRASSENMODELL ASPHALT

VDS : 4 CM FORMGLAS

HEIZLEITER : ABSTAND 8.3 CM/TIEFE 3.5 CM

TEMPERATURPROFIL NACH ... MIN HEIZZEIT

○ 0.00 × 60.0
 ▲ 10.0 ◆ 120.0
 + 30.0 † 240.0

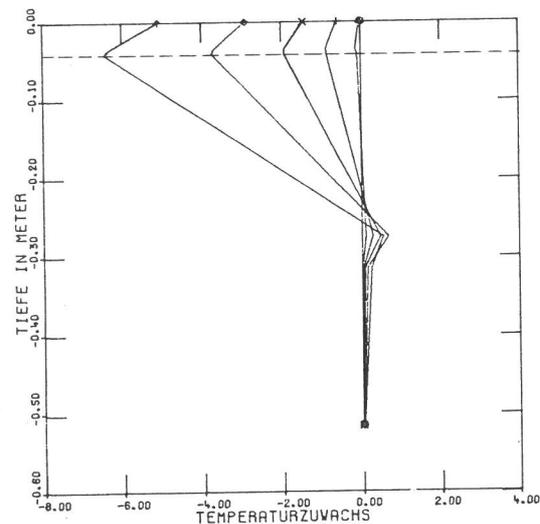


Bild ASK/3.3
 Entwicklung des Temperaturzuwachses im oberen Bereich des Modells
 ----- Heizleiterebene

STRASSENMODELL ASPHALT

VDS : 15 CM STYROPORBETON

HEIZLEITER : ABSTAND 8.3 CM/TIEFE 3.5 CM

TEMPERATURPROFIL NACH ... MIN HEIZZEIT

○ 0.00 × 60.0
 ▲ 10.0 ◆ 120.0
 + 30.0 † 240.0

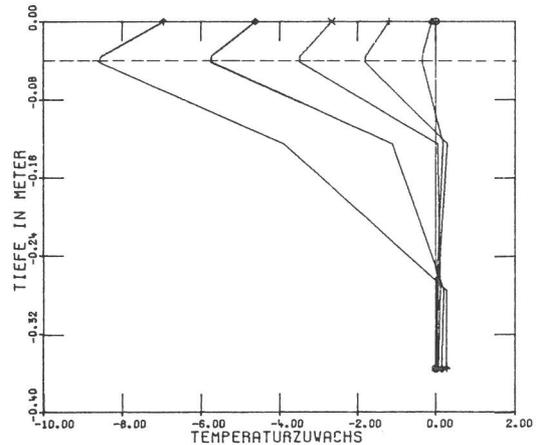


Bild ASK/3.4
 Entwicklung des Temperaturzuwachses im oberen Bereich des Modells
 ----- Heizleiterebene

b) Modell Betonaufbau

Hier zeigt sich im wesentlichen, daß der Einfluß der Wärmedämmschicht auf das Abkühlverhalten an der Oberfläche

nicht ausschlaggebend ist. Änderungen im Systemverhalten werden vielmehr durch eine größere Überdeckungstiefe verursacht.

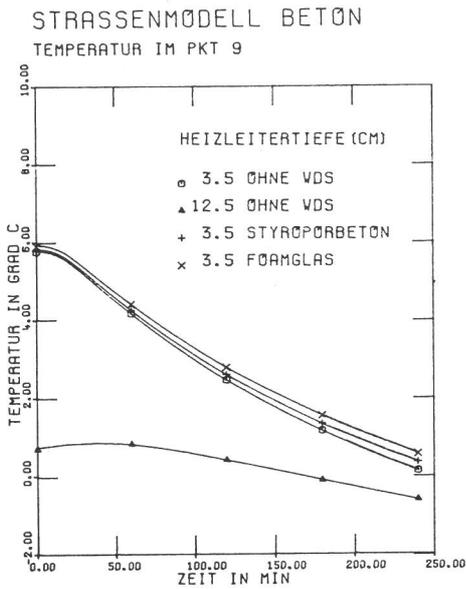


Bild BSK/1
Entwicklung der geringsten Oberflächentemperatur

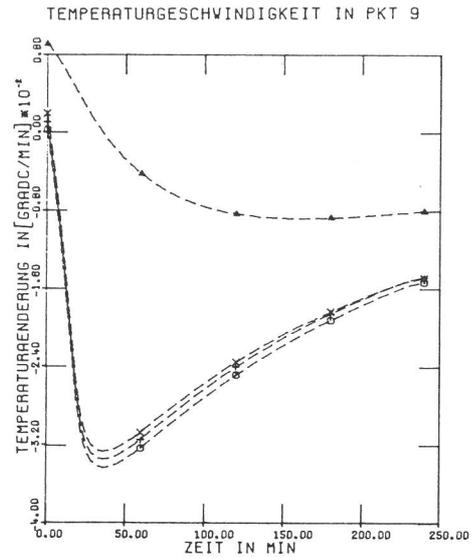


Bild BSK/5
Temperaturänderung im Knoten der geringsten Oberflächentemperatur

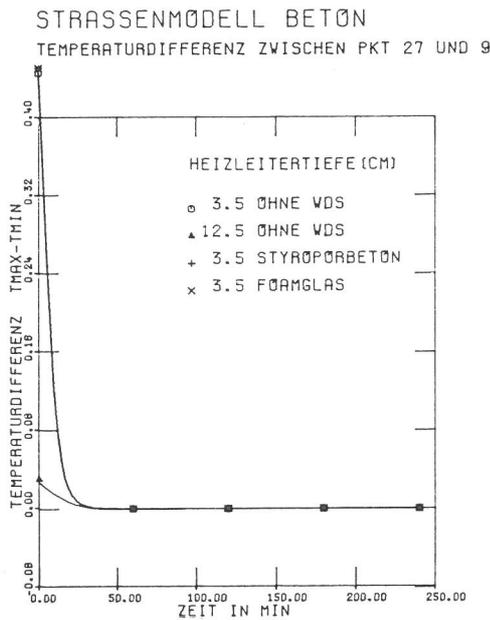


Bild BSK/2
Temperaturdifferenz an der Oberfläche

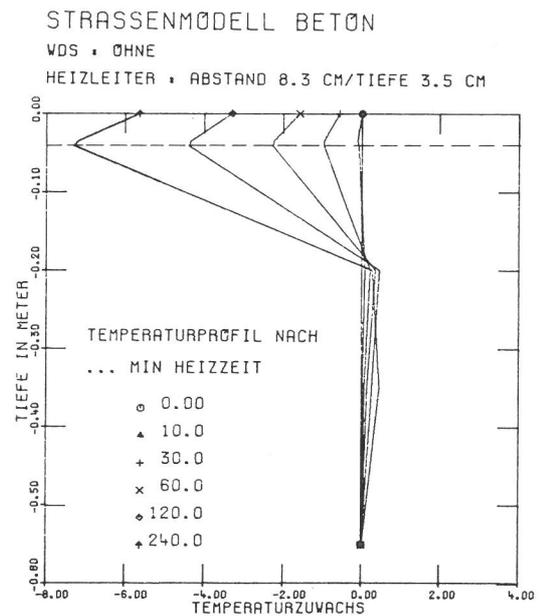


Bild BSK/3.1
Entwicklung des Temperaturzuwachses im oberen Bereich des Modells
----- Heizleiterebene

STRASSENMODELL BETON

WDS : OHNE
 HEIZLEITER : ABSTAND 8.3 CM/TIEFE 12.5 CM
 TEMPERATURPROFIL NACH ... MIN HEIZZEIT

- o 0.00 x 60.0
- ▲ 10.0 ◆ 120.0
- + 30.0 † 240.0

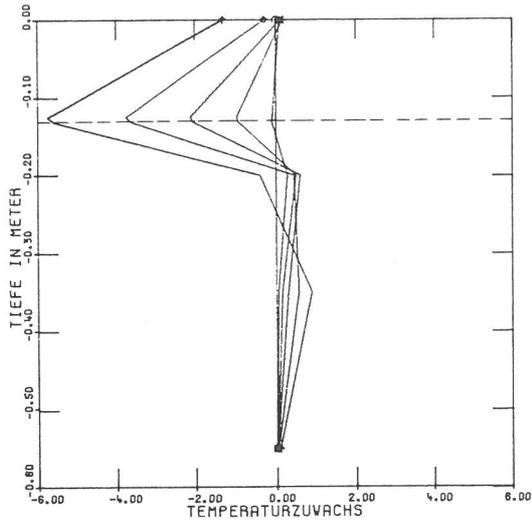


Bild BSK/3.2
 Entwicklung des Temperaturzuwachses im oberen Bereich des Modells
 ----- Heizleiterebene

STRASSENMODELL BETON

WDS : 15 CM STYROPORBETON
 HEIZLEITER : ABSTAND 8.3 CM/TIEFE 3.5 CM
 TEMPERATURPROFIL NACH ... MIN HEIZZEIT

- o 0.00 x 60.0
- ▲ 10.0 ◆ 120.0
- + 30.0 † 240.0

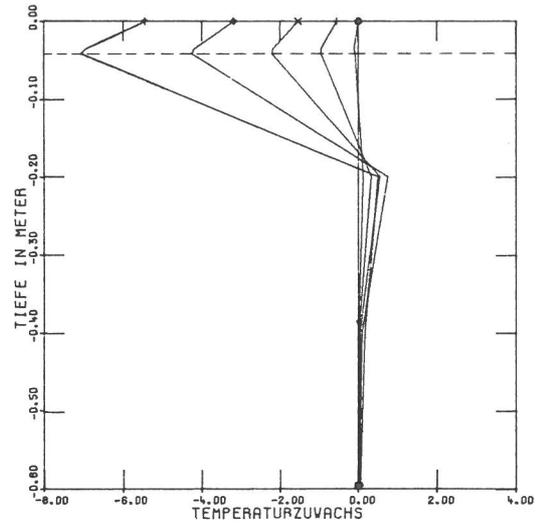


Bild BSK/3.3
 Entwicklung des Temperaturzuwachses im oberen Bereich des Modells
 ----- Heizleiterebene

STRASSENMODELL BETON

WDS : 4 CM FORMGLAS
 HEIZLEITER : ABSTAND 8.3 CM/TIEFE 3.5 CM
 TEMPERATURPROFIL NACH ... MIN HEIZZEIT

- o 0.00 x 60.0
- ▲ 10.0 ◆ 120.0
- + 30.0 † 240.0

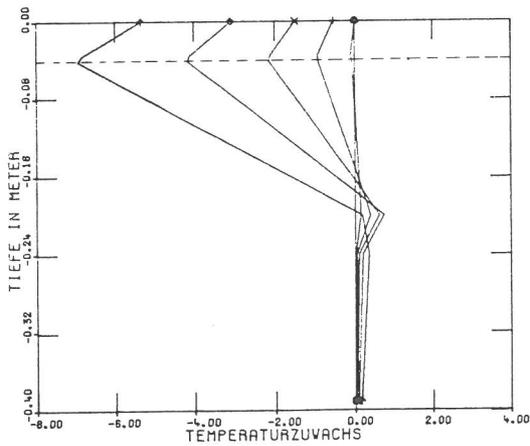


Bild BSK/3.4
 Entwicklung des Temperaturzuwachses im oberen Bereich des Modells
 ----- Heizleiterebene

10.25 Einfluß eines endlichen Heizleiters

Für das in Abschnitt 7.3 beschriebene Rechenmodell ist der Heizleiter selbst als Punktquelle angenommen worden. Um die Brauchbarkeit der Ergebnisse mit dieser Idealisierung zu überprüfen, wird nun der Einfluß eines endlichen ausgehnten und mit stofflichen Eigenschaften behafteten Heizkabels überprüft. Das Gebiet in Bild 7.7, das durch die Knoten 25, 31, 37, 32 und 26 eingeschränkt ist, wird jetzt dem Heizkabel zugeordnet.

Eine Reihe von Herstellern beheizbarer Beläge stellte Heizkabel aus ihrer Produktion zur Verfügung. Der unterschiedliche Aufbau und zugehörige Abmessungen sind in Bild 10.7 dargestellt. Die Ermittlung der thermodynamischen Stoffkennwerte erfolgte in der BAM, Berlin.

Für die Messung der Wärmeleitfähigkeit λ wurden die Berechnungen des Wärmeflusses durch ein mehrschichtiges Rohr zugrunde gelegt (siehe z.B. [2]). Unter Voraussetzung von ebenen radialsymmetrischen Verhältnissen errechnet sich der Wärmefluß im stationären Zustand zu

$$\dot{q}_l = \frac{\dot{Q}}{l} = \frac{2\pi(T_1 - T_{n+1})}{\sum_{i=1}^n \frac{1}{\lambda_i} \ln \frac{d_{i+1}}{d_i}} \quad (10.2)$$

Es wurde eine Meßvorrichtung entworfen, die als ein zweischichtiges unendlich langes Rohr idealisiert werden kann (siehe Bild 10.8). Durch Temperaturmessungen an der Seele des Heizleiters und an einem weiteren Punkt in der Sandschicht ist es mit den bekannten geometrischen Größen, der Wärmeleitfähigkeit des Sandes und dem festgelegten Heizstrom möglich, eine mittlere Wärmeleitfähigkeit für den Heizmantel zu errechnen. Dabei wird Gl. (10.2) zugrun-

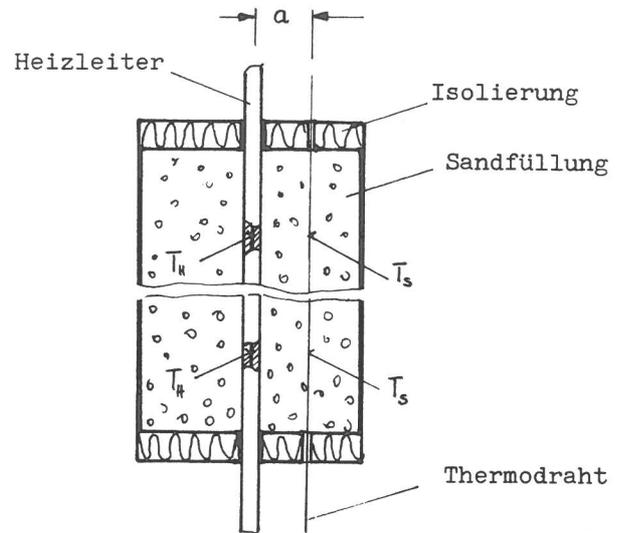


Bild 10.8
Schnitt durch Meßvorrichtung für Wärmeleitfähigkeitsmessung der Heizkabel

T_H = Temperatur am Heizdraht T_S = Sandtemperatur

de gelegt. Tabelle 10.1 gibt die ermittelten Werte für die verschiedenen Heizkabeltypen an.

Für die anschließende numerische Rechnung wurden exemplarisch die Heizkabel mit dem Aufbau 1 und 2 benutzt und die Ergebnisse mit denen des Modells Kunstharzaufbau/Punktquelle verglichen. Betrachtet man nun die Bilder KSH/1 und 2, so ist zu erkennen, daß der Einfluß des endlichen Heizkabelaufbaus auf die Oberflächentemperatur des Belages vernachlässigbar gering ist. Da die Stoffkennwerte nach Tabelle 10.1 der übrigen Heizkabel ebenfalls in der Größenordnung liegt, die für Aufbau 1 und 2 gemessen wurde, kann gefolgert werden, daß die thermodynamischen Verhältnisse im Belag mit dem Modell eines linienförmigen Heizkabels ausreichend genau wiedergegeben werden.

Die Beurteilung der im Belag vorhandenen Zwängungsspannungen aus ungleichmäßiger Ausdehnung von Heizkabel und umgebendem Material infolge Erwärmung kann mittels Darstellungen wie in Bild 10.9 und 10.10 erfolgen. Bild 10.9 zeigt das Temperaturfeld im oberen Bereich des Straßenmodells Kunstharz mit einem endlich angenommenen Heizkabel von ϕ 5,4 mm, und zwar nach einer Heizzeit von 6 Stunden. Der dargestellte Bereich umfaßt das Gebiet, welches in Bild 7.7 durch die Punkte 6, 9, 24 und 27 eingegrenzt ist. Zur besseren Be-

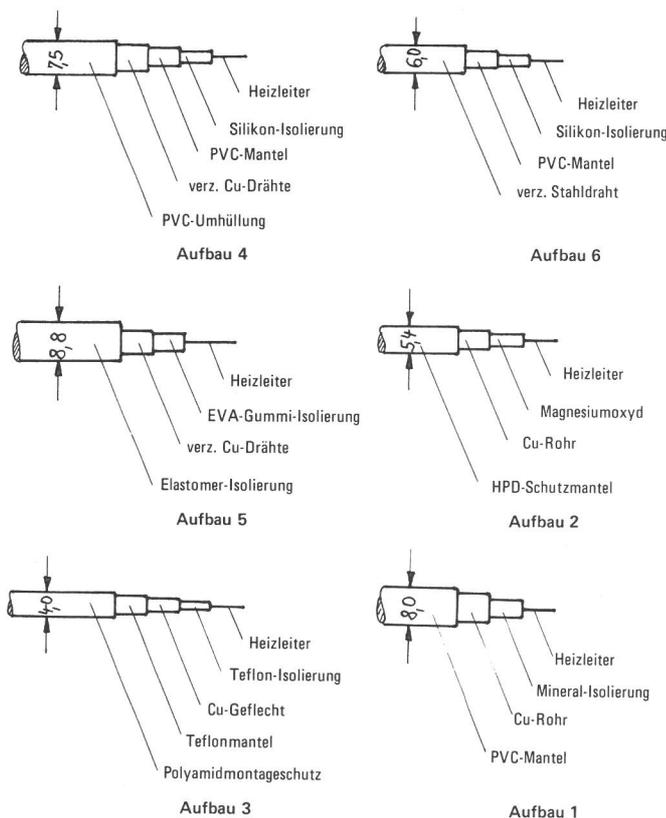


Bild 10.7
Aufbau der untersuchten Heizkabel mit Angabe der Außendurchmesser in mm

Aufbau	Wärmeleitfähigkeit λ [W/mK]	Spez. Wärmekapazität c [kJ/kgK]	Dichte ρ [kg/m ³]
1	0,20	0,81	2706
2	0,21	0,81	3046
3	0,72	0,96	2494
4	0,17	1,33	1514
5	0,24	1,21	1767
6	0,22	1,24	2004

Tabelle 10.1
Stoffkennwerte für die im Bild 10.7 untersuchten Heizkabel

STRASSENMODELL KUNSTHARZ (ENDLICHER HEIZLEITER)

TEMPERATURDIFFERENZ ZWISCHEN PKT 27 UND 9

TEMPERATUR IM PKT 9

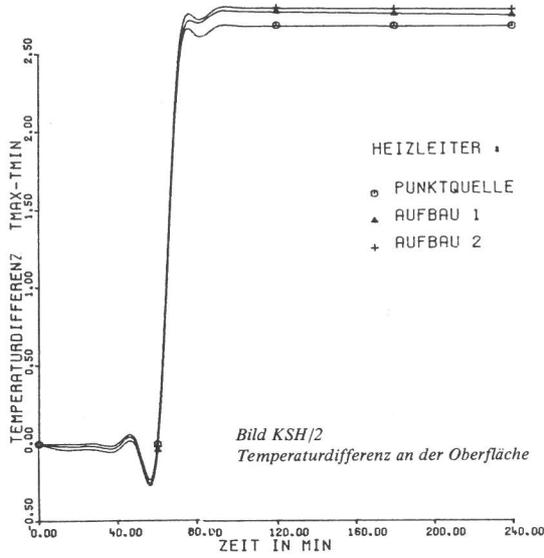


Bild KSH/2
Temperaturdifferenz an der Oberfläche

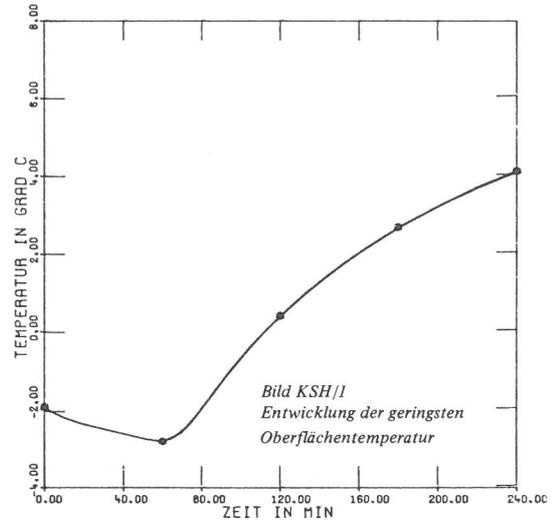
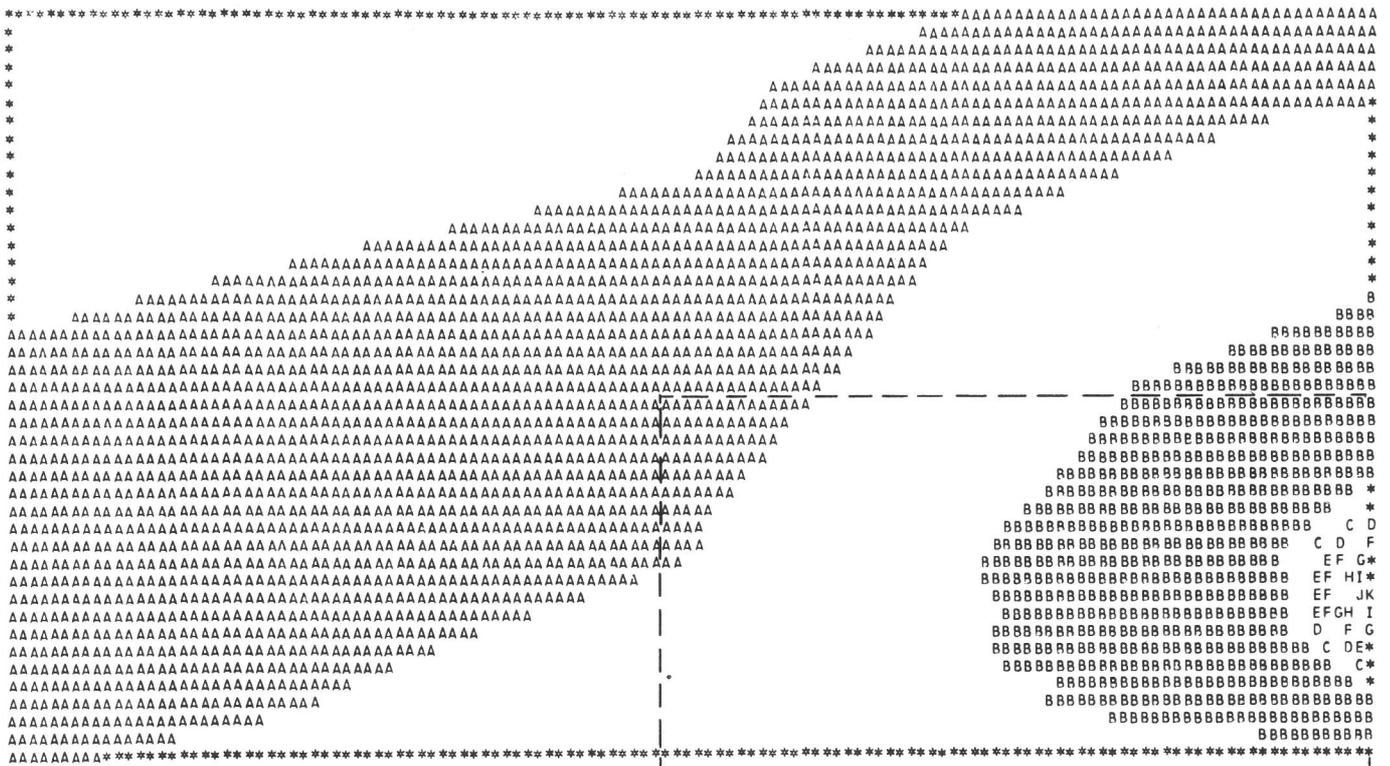


Bild KSH/1
Entwicklung der geringsten
Oberflächentemperatur

Bild KSH/2
Temperaturdifferenz an der Oberfläche

Bild KSH/1
Entwicklung der geringsten Oberflächentemperatur



UNTERE TEMPERATUR GRAD C	OBERE TEMPERATUR GRAD C	SYMBOL
8.0	10.0	A
12.0	14.0	B
16.0	18.0	C
20.0	22.0	D
24.0	26.0	E
28.0	30.0	F
32.0	34.0	G
36.0	38.0	H
40.0	42.0	I
44.0	46.0	J
48.0	50.0	K

Bild 10.9
Temperaturfeld im oberen Bereich des Straßenmodells Kunstharz
nach 6 Stunden Heizzeit.
Heizkabeldurchmesser 5,4 mm, Heizleiterabstand 8,3 cm, Überde-
ckungshöhe 2 cm.



UNTERE TEMPERATUR GRAD C	OBERE TEMPERATUR GRAD C	SYMBOL
11.0	12.0	A
13.0	14.0	B
15.0	16.0	C
17.0	18.0	D
19.0	20.0	E
21.0	22.0	F
23.0	24.0	G
25.0	26.0	H
27.0	28.0	I
29.0	30.0	J
31.0	32.0	K
33.0	34.0	L
35.0	36.0	M
37.0	38.0	N
39.0	40.0	O
41.0	42.0	P
43.0	44.0	Q
45.0	46.0	R
47.0	48.0	S
49.0	50.0	T

Bild 10.10
Vergrößerter Ausschnitt entsprechend Bild 10.9

Die unbeschriebenen Gebiete jeweils zwischen zwei Buchstaben entsprechen den Temperaturbereichen zwischen den den Buchstaben zugehörigen Temperaturintervallen.

urteilung der Verhältnisse am Heizkabelmantel selbst soll Bild 10.10 dienen, welches einen Ausschnitt von Bild 10.9 darstellt.

Diese beiden Isothermendarstellungen sind hier nur ex-

emplarisch aufgeführt, um die Möglichkeiten einer numerischen Analyse des thermodynamischen Zustandes von beheizbaren Belägen vorzustellen.

11. Zusammenfassung

Die vorliegende Arbeit erklärt anhand eines systemtechnischen Modells einer Freiflächenheizung die physikalischen Zusammenhänge, die im Sinne eines wirtschaftlich optimalen Betriebs der Heizung technisch zu beeinflussen wären. Dabei werden die bereits aus der Literatur bekannten Ergebnisse rezipiert.

Inhalt dieser Untersuchung ist es, mit theoretischen Methoden den Einfluß der geometrischen Parameter, wie Heizleiterabstand und Heizleiterüberdeckung, auf die Wärmeentwicklung in beheizbaren Straßen- oder Brückenbelägen zu untersuchen. Es werden nach einer kurzen Darstellung der Theorie der Wärmeübertragung die hier betrachteten Anteile an der Gesamtwärmebilanz im Belag vorgestellt und durch meteorologische Betrachtungen motiviert. Das zur Berechnung der instationären

Temperaturfelder benutzte Rechenprogramm wird im weiteren ausführlich dargestellt.

Für die numerischen Rechnungen werden als technische Modelle alternativ verschiedene in der Praxis übliche Straßen- und Brückaufbauten benutzt. Dabei handelt es sich um Straßenaufbauten mit Kunstharz-, Zementbeton- und bituminösen Deckschichten. Die Rechenergebnisse, die katalogähnlich zur Verfügung stehen, sind graphisch dargestellt.

Eine Erweiterung der oben beschriebenen Untersuchungen wird durch die Betrachtung des Einflusses von Wärmedämmschichten im Aufbau von Straßen- und Brückenbelägen erreicht. Dabei ist deren Einfluß sowohl auf den Anheizvorgang wie auch auf den Abkühlvorgang im Belag untersucht worden. Eine Reihe von experimentellen Untersuchungen stellt die Richtigkeit des benutzten Rechenmodells sowie der enthaltenen physikalischen Voraussetzungen sicher.

Anhang

12. Wirtschaftliche Betrachtungen bezüglich der Wahl des elektrischen Versorgungsnetzes

Grundsätzlich hat der Verbraucher elektrischer Energie die Möglichkeit der Wahl zwischen Strom aus der Niederspannungs- oder Mittel- bzw. Hochspannungsversorgung. Für den Betrieb elektrischer Freiflächenheizungen mit einer jährlichen Belastung von etwa 200 h/Jahr (im mitteleuropäischen Bereich) ergibt sich dann die im folgenden dargestellte Tarifsituation, wobei zum einen Hoch- und Niederspannungsversorgung verglichen werden, zum anderen die Vergünstigungen beim Bezug von Nachtstrom dargestellt werden sollen. Die gesamten Ko-

sten werden unterschieden in Betriebs- und Investitionskosten, wobei die Betriebskosten sich wiederum teilen in einen Preis für verbrauchte elektrische Energie (Arbeitspreis) und einen Leistungspreis entsprechend der Höhe der maximalen Leistung des Verbrauchers. Durch diese Teilung der Betriebskosten des Verbrauchers sollen für die Energieversorgungsunternehmen einmal die reinen Brennstoffkosten und zum anderen die Kosten für das Zurverfügungstellen des gesamten elektrischen Netzes bestritten werden.

Ist der Bezug elektrischer Energie auf einen relativ kleinen spezifischen Zeitraum beschränkt, wie es bei Freiflächenheizungen der Fall ist, wird dem Verbraucher elektrischer Energie aus dem Niederspannungsnetz i.a. ein besonderer Tarif zugestanden, der zwar einen höhe-

Tabelle A
Kosten für nichtöffentliche Verbraucher
(Stand 25.5.1976)

		Hochspannung		Niederspannung	
		vorh. Anlage	neue Anlage nur für Heizung		
Tag-	<u>Betriebskosten:</u> Arbeitspreis	0,0899 $\frac{\text{DM}}{\text{kWh}}$	0,0899 $\frac{\text{DM}}{\text{kWh}}$	<u>Betriebskosten:</u> Arbeitspreis	0,41 $\frac{\text{DM}}{\text{kWh}}$
		(0,1040 $\frac{\text{DM}}{\text{kWh}}$)	(0,1040 $\frac{\text{DM}}{\text{kWh}}$)		(0,476 $\frac{\text{DM}}{\text{kWh}}$)
strom	Leistung (bei 1 – 2 GWh Gesamtverbrauch)	215,06 $\frac{\text{DM}}{\text{kWJahr}}$	215,06 $\frac{\text{DM}}{\text{kWJahr}}$	Verrechnungspreis (Drehstromzähler, Stromwandlersatz)	36,00 $\frac{\text{DM}}{\text{Jahr}}$
		(249,50 $\frac{\text{DM}}{\text{kWJahr}}$)	(249,50 $\frac{\text{DM}}{\text{kWJahr}}$)		(41,76 $\frac{\text{DM}}{\text{Jahr}}$)
strom	<u>Einmalige Kosten:</u> Baukostenzuschuß (Kabelanschluß) (Hochspannungsleitung)		180,00 $\frac{\text{DM}}{\text{mKabel}}$	<u>Einmalige Kosten:</u> Baukostenzuschuß	475,00 $\frac{\text{DM}}{\text{kW}}$
	Kosten für Hochspannungs- anlage (Station)		max. 30.000,00 DM	Anschlußkosten (90 % aller Fälle)	500,00–3.000,00 DM
Nacht-	<u>Betriebskosten:</u> Arbeitspreis	0,0652 $\frac{\text{DM}}{\text{kWh}}$	0,0652 $\frac{\text{DM}}{\text{kWh}}$	<u>Betriebskosten:</u> Arbeitspreis	0,07 $\frac{\text{DM}}{\text{kWh}}$
		(0,0756 $\frac{\text{DM}}{\text{kWh}}$)	(0,0756 $\frac{\text{DM}}{\text{kWh}}$)		(0,08 $\frac{\text{DM}}{\text{kWh}}$)
strom	Leistung	215,06 $\frac{\text{DM}}{\text{kWJahr}}$	215,06 $\frac{\text{DM}}{\text{kWJahr}}$	Verrechnungspreis (Drehstromzähler, Stromwandlersatz, Tarifschaltung)	54,00 $\frac{\text{DM}}{\text{Jahr}}$
		(249,50 $\frac{\text{DM}}{\text{kWJahr}}$)	(249,50 $\frac{\text{DM}}{\text{kWJahr}}$)		(62,64 $\frac{\text{DM}}{\text{Jahr}}$)
strom	<u>Einmalige Kosten:</u>			<u>Einmalige Kosten:</u> Investitionskosten (90 % aller Fälle)	0–150.000,00 DM
	siehe Niederspannung/Nachtstrom			Anschlußkosten	500,00–3.000,00 DM

Die in Klammern geschriebenen Zahlen enthalten die Kosten einschließlich 11 % MWSt. + 4,5 % Ausgleichsabgabe.

ren Arbeitspreis enthält, dafür aber keinen Leistungspreis fordert. Bezüglich der Investitionskosten werden nach den "Allgemeinen Bedingungen für die Versorgung mit elektrischer Arbeit aus dem Niederspannungsnetz der Berliner Kraft- und Licht (Bewag)-Aktiengesellschaft" einmal Anschlußkosten in Höhe der Selbstkosten und beim Betrieb von Direktheizungen ein spezifischer Baukostenzuschuß gefordert.

Bei der Nutzung von Nachtstrom verringert sich der Arbeitspreis um mehr als 1/4 des Tagstrompreises. Wird jedoch für die Lieferung von Nachtstrom aus Kapazitätsgründen eine Netzerweiterung notwendig, so sind die in *Tabelle A* angegebenen einmaligen Kosten zu berücksichtigen. In diesem Zusammenhang muß darauf hingewiesen werden, daß ein ausschließlicher Bezug von Nachtstrom in Berlin nicht möglich ist.

Ein Bezug von elektrischer Energie aus dem Hochspannungsnetz ist bezüglich der spezifischen Stromkosten nur dann vertretbar, wenn bereits eine Hochspannungsanlage vorhanden ist.

Der Strompreis setzt sich hier zusammen aus einem Arbeitspreis und einem Leistungspreis, der sich nach der Höhe des Jahresgesamtverbrauchs und nach dem Leistungsbedarf richtet. Die Ermittlung des Leistungsbedarfs erfolgt folgendermaßen:

Monatlich wird durch Aufsuchen des Maximalwertes einer jeweils 1/4- bzw. 1/2-stündigen Leistungsmessung ein Leistungsbedarf notiert. Aus der Menge der 12 Werte innerhalb eines Jahres wird dann mit den drei höchsten Monatswerten ein arithmetisches Mittel gebildet, das der Berechnung des Leistungspreises zugrunde gelegt wird.

Man erkennt, daß der ausschließliche Betrieb einer Freiflächenheizung aus dem Hochspannungsnetz sehr große spezifische Betriebskosten mit sich bringt, und zwar aufgrund des hohen Leistungspreises, der ein Vielfaches des Arbeitspreises beträgt. Mit den angegebenen Werten in *Tabelle A* beträgt das Verhältnis Arbeitspreis: Leistungspreis $\approx 1:12$, wenn folgende Verhältnisse vorausgesetzt werden:

beheizte Fläche	F = 200 m ²
Heizleistung	Q = 300 W/m ²
Heizzeit	t = 200 h/Jahr.

Wird dagegen die Heizung neben anderen Anlagen mit hohem Verbrauch unterhalten, zählt natürlich nur der Gesamtverbrauch. Damit werden die spezifischen Heizkosten u.U. erheblich gesenkt.

Ohne Berücksichtigung von Investitionskosten für die Stromversorgung lassen sich die spezifischen Stromkosten im Prinzip wie folgt errechnen

$$K = \frac{B + V}{A} \cdot 100 + \frac{1}{\varphi} [(1-n) a_T + n a_N]$$

Dabei bedeuten

K = spezifischer Strompreis	$\frac{DM}{kWh}$
B = Bereitstellungs- bzw. Leistungspreis	$\frac{DM}{Jahr}$
V = Verrechnungs- bzw. Meßpreis	$\frac{DM}{Jahr}$

A = Arbeit (Leistung x Benutzungsdauer)	$\frac{kWh}{Jahr}$
a _T = Tag-Arbeitspreis	$\frac{DM}{kWh}$
a _N = Nacht-Arbeitspreis	$\frac{DM}{kWh}$
n = Nachtanteil ($\frac{\text{Nachtarbeit}}{\text{Gesamtarbeit}}$)	
φ = Wirkungsgrad einer benutzten Umspananlage.	

Für den Bereich Berlin wird von seiten der Bewag eine Differenzierung in "öffentliche" und "nichtöffentliche" Verbraucher vorgenommen, die sich in der Tarifgestaltung niederschlägt (s. *Tabelle B*).

Die in den Tabellen A und B angegebenen Preise beziehen sich auf das Tarifgebiet Berlin und sind vom Stand 26.3.76. Die Endpreise erhält man durch Aufschlag von 4,5 % Ausgleichsabgabe + 11 % Mehrwertsteuer. Vergleichbare Strompreise in der Bundesrepublik Deutschland liegen um etwa 10 % niedriger.

Unter Berücksichtigung von *Tabelle A* und *B* können die vorn gemachten Angaben folgendermaßen zusammengefaßt werden:

Tagstrom, öffentliche Stromabnehmer

Betriebskosten: Der Bezug von Niederspannung ist billiger als der von Hochspannung.

Baukosten: Ist eine Anlage neu zu installieren, sollte der Niederspannung immer der Vorrang gelassen werden.

Nachtstrom, öffentliche Stromabnehmer

Betriebskosten: — Der Bezug von Niederspannung ist viel billiger als der von Hochspannung.

— Der Bezug von Nachtstrom bei Hochspannungsanlagen lohnt sich nicht, da die Arbeitspreisunterschiede zum Tagstrom zu gering sind.

— Der Nachtstrompreis bei Niederspannungsanlagen beträgt etwa 25 % des Tagstrompreises.

Baukosten: Die Investitionskosten für den Nachtstrombezug können je nach Voraussetzung sehr hoch sein.

Tagstrom, nichtöffentliche Stromabnehmer

Betriebskosten: Geht man von den vorn aufgeführten Leistungsvermögen der Heizung aus, so ist die Benutzung einer Niederspannungsanlage immer rentabler, solange die jährliche Heizzeit nicht mehr als 660 Stunden beträgt.

Baukosten: Bei einer neu zu erstellenden Anlage wirkt sich der Bau einer Niederspannungsanlage unverhältnismäßig günstiger aus. Der Grund dafür ist der hohe Baukostenanteil für ansonsten benötigte Hochspannungsstationen.

Nachtstrom, nichtöffentliche Stromabnehmer

Betriebskosten: Hier ergibt sich eine eindeutige Aussage für die Benutzung einer Niederspannungsanlage.

Baukosten: siehe öffentliche Stromabnehmer.

		Hochspannung		Niederspannung	
		vorh. Anlage	neue Anlage nur für Heizung		
Tag-	<u>Betriebskosten:</u> Arbeitspreis	0,460 $\frac{\text{DM}}{\text{kWh}}$ (0,536 $\frac{\text{DM}}{\text{kWh}}$)	0,460 $\frac{\text{DM}}{\text{kWh}}$ (0,536 $\frac{\text{DM}}{\text{kWh}}$)	<u>Betriebskosten:</u> Arbeitspreis	0,318 $\frac{\text{DM}}{\text{kWh}}$ (0,369 $\frac{\text{DM}}{\text{kWh}}$)
	<u>Einmalige Kosten:</u> Baukostenzuschuß (Kabelanschluß) Kosten für Hochspannungs- anlage (Station)		180,00 $\frac{\text{DM}}{\text{mKabel}}$ $\leq 30.000,00 \text{ DM}$	<u>Einmalige Kosten:</u> Baukostenzuschuß	475,00 $\frac{\text{DM}}{\text{kW}}$
strom				Hausanschlußkosten	500,00–3.000,00 DM
	<u>Betriebskosten</u> Arbeitspreis	0,44 $\frac{\text{DM}}{\text{kWh}}$ (0,51 $\frac{\text{DM}}{\text{kWh}}$)	0,44 $\frac{\text{DM}}{\text{kWh}}$ (0,51 $\frac{\text{DM}}{\text{kWh}}$)	<u>Betriebskosten</u> Arbeitspreis	0,07 $\frac{\text{DM}}{\text{kWh}}$ (0,08 $\frac{\text{DM}}{\text{kWh}}$)
Nacht-				Verrechnungspreis (Drehstromzähler, Stromwandlersatz, Tarifschaltung)	54,00 $\frac{\text{DM}}{\text{Jahr}}$ (62,64 $\frac{\text{DM}}{\text{Jahr}}$)
	<u>Einmalige Kosten:</u> siehe Niederspannung/Nachtstrom			<u>Einmalige Kosten:</u> Investitionskosten (90 % aller Fälle)	0–150.000,00 DM
strom				Hausanschlußkosten	500,00–3.000,00 DM

Die in Klammern geschriebenen Zahlen enthalten die Kosten einschließlich 11 % MWSt. + 4,5 % Ausgleichsabgabe.

Tabelle B
Kosten für öffentliche Verbraucher
(Stand 25.5.1976)

Literaturverzeichnis

- [1] Schmidt, E.
Thermodynamik
Berlin, Göttingen, Heidelberg:
Springer-Verlag, 1963
- [2] Michejew, M.A.
Grundlagen der Wärmeübertragung, 2. Aufl.,
Berlin: VEB Verlag Technik, 1962
- [3] Plank, R.
Handbuch der Kältetechnik
Berlin, Göttingen, Heidelberg:
Springer-Verlag, 1959
- [4] Gröber; Erk; Grigull
Die Grundgesetze der Wärmeübertragung
Berlin, Göttingen, Heidelberg:
Springer-Verlag, 1969
- [5] Alvensleben, B.
Wärmeübertragung
Studienhilfe der Studentenschaft der TU Berlin, 1975
- [6] Kastl, H.; Schiffner, K.
Das instationäre Wärmeleitproblem als Variations-
aufgabe bei diskreten Zeitschritten
Zeitschrift für angewandte Mathematik und Mecha-
nik 54 (1974)
- [7] Deeg, E.; Hertweck-Crone, I.
Zur Berechnung nichtstationärer Temperaturvertei-
lung in geschichteten Medien mit elektronischen Ana-
logrechnern
Zeitschrift für angewandte Physik 12 (1960), Heft 4
- [8] Brokmeier, K.H.
Über ein Beukenmodell kleinster Abmessungen
(Eine neue Methode für die Wärmeleitungsforschung)
Elektrotechnische Zeitschrift 72 (1951), Ausg. B,
Heft 17
- [9] Rudolphi, R.; Böttcher, B.
Ein thermo-elektrisches Netzwerkverfahren zur Be-
rechnung stationärer Temperatur- und Wärmestrom-
verteilungen mit Anwendungsbeispielen.
Berichte der Bundesanstalt für Materialprüfung,
Berlin, BAM-Berichte Nr. 32 (1975)
- [10] Wilson, E.L.; Nickell, R.E.
Application of the Finite Element Method to Heat
Conduction Analysis.
Nuclear Engineering and Design, Vol. 4 (1966),
S. 276-286
- [11] Emery, A.F.; Carson, W.W.
An Evaluation of the Use of the Finite-Element
Method in the Computation of Temperature.
Transactions of the ASME, Journal of Heat Transfer
(Mai 1971), S. 136-145
- [12] Dusinberre, G.M.
Heat-Transfer Calculations by Finite Differences
Scranton, Pennsylvania: International Textbook
Company, 1961
- [13] Schwarzott, W.
Ein Elementverfahren zum Berechnen von Tempera-
turefeldern
Forsch. Ing.-Wes. 38 (1972), Nr. 6, S. 165-171
- [14] Zurmühl, R.
Praktische Mathematik für Ingenieure und Physiker
5. Auflage. Berlin, Heidelberg, New York:
Springer-Verlag, 1965
- [15] Sauer, R.; Szabo, I.
Mathematische Hilfsmittel des Ingenieurs.
Teil III.
Berlin, Heidelberg, New York: Springer-Verlag, 1968
- [16] Sauer, R.; Szabo, I.
Mathematische Hilfsmittel des Ingenieurs.
Teil II.
Berlin, Heidelberg, New York: Springer-Verlag, 1969
- [17] Smith, G.D.
Numerische Lösung von partiellen Differentialglei-
chungen.
Braunschweig: Vieweg u. Sohn, 1970
- [18] Collatz, L.
The Numerical Treatment of Differential Equations.
3. Auflage. Berlin, Heidelberg, New York:
Springer-Verlag, 1966
- [19] Dusinberre, G.M.
Triangular Grids for Heat Flow Studies. A.S.N.E.
Journal, Vol. 72 (1960), No. 1, S. 61-65
- [20] VDI-Wärmeatlas. Berechnungsblätter für den Wärme-
übergang. 2. Auflage
Düsseldorf: VDI-Verlag, 1974
- [21] Rudolphi, R.
Zur rechnerischen Übertragbarkeit der Ergebnisse von
Brandprüfungen am Beispiel von Stahl- und Holzstüt-
zen
Dissertation, eingereicht am 17.12.76 an den FB 7 –
Bauing.- u. Vermessungswesen – der TU Berlin
- [22] Williamson, P.J.; Hogbin, L.E.
An Electrical Analogue Solution of the Equations
Governing the Cooling of a Road Structure by
Convection
Road Research Laboratory Report LR 69 (1967)
- [23] Dusch, K.
Zur Berechnung des Kälteeindringens in einen ther-
misch quasihomogenen Straßenkörper
Bitumen 36 (1974), Heft 4
- [24] Neiss, J.; Winter, E.R.F.
Analyse der instationären Wärmeleitung zwischen den
Wärmetauscherrohren einer Wärmepumpe und dem
Erdreich
Wärme- und Stoffübertragung 9 (1976), S. 39-48
- [25] Johannsen, K.
Ermittlung von Temperaturen und Wärmeströmen in
beliebig geschichteten ebenen, zylindrischen und ku-
gelförmigen Wänden bei nichtstationären Verhältnis-
sen nach der Methode der finiten Elemente
Die Bautechnik 47 (1970), Heft 3
- [26] Elgetti, K.
Der Wärmeverlust einer erdverlegten Rohrleitung im
stationären Zustand unter dem Einfluß der Wärme-
übergangszahl an der Erdoberfläche
Forschung im Ing.-Wesen 33 (1967), Nr. 4
- [27] Strube, H.
Elektrische Flächenheizung mit neuen Flächenheiz-
leitern
Bitumen, Teere, Asphalte, Peche 26 (1975), Heft 1/2
- [28] Weise, E.
Beheizung von Fahrbahnen, Brücken und Flugpisten

- mit Warmluft
Straße, Brücke, Tunnel 25 (1973), Heft 9
- [29] Behr, H.
Erfahrungssammlung über die Beheizung von Straßen
und Brücken
Straßen- u. Tiefbau 22 (1968), Heft 5
- [30] Whiffin, A.C.; Williamson, R.J.
Elektrische Beheizung von Fahrbahnen, Brücken und
Pisten
Brücke und Straße 17 (1965), Heft 12
- [31] Kast, W.
Wärmebedarf bei Freiflächenheizungen
VDI-Berichte Nr. 162 (1971)
- [32] Williamson, P.J.
Die Schätzung der Heizleistung für Straßenheizungs-
installationen
Road Research Laboratory Report LR 77
Übersetzung des Bundesverbandes Flächenheizungen e.V.
- [33] Maczollek, K.-H.
Anwärmung von Verkehrsflächen –
Ein Beitrag zur Verhinderung von Glatteis
Straßen- u. Tiefbau 29 (1975), Heft 11
- [34] Böttcher; Gollmer; Odelga
Zur zerstörungsfreien Prüfung beheizbarer Beläge
Bitumen, Teere, Asphalte, Peche 25 (1974), Heft 9
- [35] Wahl, E.F.
Elektrische Beheizung von Fahrbahndecken und
Brücken
Straße und Autobahn 9 (1958), Heft 11
- [36] Aigner, R.; Reith, M.
Freiflächenheizung mit Hostaflon-Flächenheizleiter
Firmenschrift der Farbwerke Hoechst AG
- [37] (Arbeitsgemeinschaft Industriebau e.V.)
AGI: Verkehrsflächen im Industriebau:
Beheizung von Verkehrsflächen
Arbeitsunterlage G 16 (1971)
- [38] Williams, G.P.
Surface Heat Losses from Heated Pavements during
Snow Melting Tests
Technical Paper No. 427 of the Division of Building
Research, Ottawa CDN (1975)
- [39] Williams, G.P.
Heat Requirements of Snow Melting Systems in
Canada
Technical Paper No. 418 of the Division of Building
Research, Ottawa CDN (1974)
- [40] Smeets, K.; de Boer, J.
Bestimmung des wärmewirtschaftlichen Optimums
einer wärmespeichernden Fußbodenheizung mit Hilfe
von Modellmessungen für verschiedene Fußbodenauf-
bauten und verschiedene Benutzungszeiten
Elektrowärme International 22 (1964), Hefte 8 und 11
- [41] Mittelman, G.
Über Verformung und Beanspruchung von Betonfah-
rbanndecken infolge Abkühlung von oben
Straßen- u. Tiefbau 29 (1975), Heft 5
Straßen- u. Tiefbau 30 (1976), Heft 2
- [42] Jacob, H.
Methoden und Kosten des Winterdienstes auf Bundes-
fernstraßen
Straßen- u. Tiefbau 29 (1975), Heft 11
- [43] Mücke, G.
Winterdienst auf dem Flughafen Frankfurt
Straßen- u. Tiefbau 29 (1975), Heft 11
- [44] Kirk, J.M.
Bestemmelse af varmeledningstal for nogle bituminøse
materialer
Asfalt 49 (1975), Heft 4
- [45] Schultze; Muhs
Bodenuntersuchungen für Ingenieurbauten
Berlin, Heidelberg, New York: Springer-Verlag, 1967
- [46] Schneider, T.R.
Auswertung mikroklimatischer Messungen an Straßen-
körpern
Straße und Verkehr 50 (1964)
- [47] Nehring, G.
Über den Wärmefluß durch Außenwände und Dächer
in klimatisierte Räume infolge der periodischen Ta-
gesgänge der bestimmenden meteorologischen Ele-
mente
Der Gesundheitsingenieur 83 (1962), Heft 7
- [48] Tables of Emissivity of Surfaces
Int. Journal of Heat and Mass Transfer 1 (1962),
Heft 5, S. 67-76
- [49] Gubareff; Jansen; Torborg
Thermal Radiation Properties
Honeywell Research Center, Minneapolis, 1960
- [50] Schropp, K.
Die Temperaturen technischer Oberflächen unter dem
Einfluß der Sonnenbestrahlung und der nächtlichen
Ausstrahlung
Der Gesundheitsingenieur 54 (1931), Heft 50
- [51] Kehlbeck, F.
Einfluß der Sonnenstrahlung bei Brückenbauwerken
Düsseldorf: Werner-Verlag, 1975
- [52] Zichner, T.
Temperaturunterschied infolge Witterungseinfluß und
Beheizung bei massiven Brücken
Forschungsbericht F.A. 11.84
Bundesminister für Verkehr (1976)
- [53] Ruckli, R.
Der Frost im Baugrund
Wien: Springer-Verlag, 1950
- [54] Geiger, R.
Klima der bodennahen Luftschicht
Braunschweig: Vieweg, 1950
- [55] Fortak, H.
Meteorologie
Berlin, Darmstadt, Wien: Deutsche Buch-Gemein-
schaft, 1971
- [56] Ergebnisse der meteorologischen Beobachtungen in
Potsdam im Jahre 1925
Berlin: Springer-Verlag, 1926
- [57] Deutsches Meteorologisches Jahrbuch 1952/53
Teil IV, Heft 1.
Beobachtungen des Meteorologischen Hauptobserva-
toriums Potsdam, Berlin: Akademie-Verlag
- [58] Straßenbau von A - Z: Amtliche Bestimmungen und
Technische Richtlinien für Planung, Bau und Unterhal-
tung der Straßen / Forschungsgesellschaft für das Stra-
ßenwesen, Köln

- Berlin, Bielefeld, München: Erich-Schmidt-Verlag, 1955 —. Loseblattausgabe Stand Dezember 1977
- [59] Standardisierung der bituminösen Fahrbahnbefestigungen (Heißeinbau)
Straße und Autobahn 17 (1966), Heft 7
- [60] Technische Vorschriften und Richtlinien für den Aufbau bituminöser Fahrbahndecken
TVbit 3/73
- [61] Zusätzliche Technische Vorschriften und Richtlinien für Erdarbeiten im Straßenbau
ZTVE-StB 65
- [62] Eisenmann, J.
Forschungsarbeiten auf dem Gebiet des Eisenbahn- und Straßenoberbaus
Berlin, München: W. Ernst u. Sohn, 1974
- [63] Eisenmann, J.
Temperaturuntersuchungen an Betondecken mit und ohne Wärmedämmschichten
Straßen- und Tiefbau 22 (1968), Heft 9
- [64] Eisenmann, J.
Wärmedämmschichten beim Bau von Landverkehrswegen
Straßen- und Tiefbau 26 (1972), Heft 2
- [65] Meffert, R.
Stand der Anwendung von Dämmschichten im Straßenbau
Straße und Autobahn 23 (1972), Heft 3
- [66] Leonards, G. A.; Harr, M.E.; Min Ho, D.
Voraussage von momentanen Temperaturverteilungen in Straßen mit Dämmschichten
Straße und Untergrund IV
Forschungsarbeiten aus dem Straßenwesen, Neue Folge, Heft 74
Bad Godesberg: Kirschbaum-Verlag, 1969
- [67] Behr, H.
Elektrische Analogversuche zu Untersuchungen an Wärmedämmschichten in Straßen
Straße und Untergrund IV
Forschungsarbeiten aus dem Straßenwesen, Neue Folge, Heft 74
Bad Godesberg: Kirschbaum-Verlag, 1969
- [68] Behr, H.
Untersuchungen an Wärmedämmschichten im Straßenbau
Straßen- u. Tiefbau 21 (1967), Heft 5
- [69] Hohwiller, F.
Straßenbau mit wärmedämmenden Tragschichten aus Styroporbeton
Plasticconstruction 6 (1976), Heft 2
- [70] Weiss, H.; Behr, H.
Erfahrungen mit wärmedämmenden Tragschichten aus EPS-Beton
Straße u. Autobahn 26 (1975), Heft 10
- [71] Eisenmann, J.; Leykauf, G.
Heizversuche an Betondecken mit und ohne Wärmedämmschichten
Straßen- u. Tiefbau 23 (1969), Heft 12
- [72] Oosterbaan, M.D.; Roschild, E.
Die Verwendung von extrudiertem Polystyrol-Schaum als Frostschuttschicht im Straßenbau
Straßen- u. Tiefbau, 22 (1968), Heft 11
- [73] Williams, G.W.
Entwicklung und Anwendung einer Dämmschicht aus Kunststoff-Hartschaum zur Verhinderung von Frostschäden in Straßen
Straße und Untergrund IV
Forschungsarbeiten aus dem Straßenwesen, Neue Folge, Heft 74
Bad Godesberg: Kirschbaum-Verlag, 1969
- [74] Oosterbaan, M.D.
Use of Extruded Plastic Foam Insulation to Attenuate Frost Penetration in Highway Pavements
The Dow Chemical Company, Midland, Michigan, 1966
- [75] Apostolopoulos, Ch.; Kuhle, H.; Schneider, W.
Theoretische Untersuchung möglicher frostbeständiger Straßenkonstruktionen hinsichtlich ihrer thermodynamischen Eigenschaften
Frost i Jord 12 (1973), Heft 12
- [76] Schneider, W.
Erfahrungen an Versuchsstrecken mit Dämmschichten aus Schaumkunststoffen
Straße und Untergrund IV
Forschungsarbeiten aus dem Straßenwesen, Neue Folge, Heft 74
Bad Godesberg: Kirschbaum-Verlag, 1969
- [77] Siebel, P.
Beitrag zur Ermittlung der Beanspruchung standardisierter bituminöser Fahrbahnbefestigungen in Abhängigkeit von Bauart und Anordnung der LKW-Reifen.
Schriftenreihe d. Inst. f. Bau von Landverkehrswegen der TU München, H. 16 (1973)
- [78] DIN 4102, Teil 2, Ausgabe September 1977
Brandverhalten von Baustoffen und Bauteilen—Bauteile-Begriffe, Anforderungen und Prüfung von Bauteilen
- [79] Ehm, H.
Ein Beitrag zur rechnerischen Bemessung von brandbeanspruchten balkenartigen Stahlbetonbauteilen.
Dissertation, Technische Hochschule Braunschweig, 1966
- [80] Kordina, K.; Ehm, H.; von Postel, R.
Erwärmungsvorgänge an balkenartigen Stahlbetonbauteilen unter Brandbeanspruchung.
Deutscher Ausschuss für Stahlbeton, Heft 230
Berlin: Wilhelm Ernst & Sohn, 1975
- [81] Cammerer, S.
Tabellarium aller wichtigen Größen für Wärme- und Kälteschutz, 11. Auflage
Mannheim: Reinhold u. Mahla AG, 1973