

**Einsatz der Impuls-Thermografie
zur quantitativen zerstörungsfreien Prüfung
im Bauwesen**

von Diplom-Ingenieur
Arne Nielsen Brink
aus Berlin

von der Fakultät VI – Bauingenieurwesen
und Angewandte Geowissenschaften
der Technischen Universität Berlin
zur Erlangung des akademischen Grades

Doktor der Ingenieurwissenschaften
- Dr.-Ing. -

genehmigte Dissertation

Promotionsausschuss:

Vorsitzender: Prof. Dr. E. Cziesielski
Gutachter: Prof. Dr.-Ing. B. Hillemeier
Gutachter: Dr. H. Wiggenhauser

Tag der wissenschaftlichen Aussprache: 26. März 2004

Berlin 2004

D 83

Für Regine,
meine beste Freundin

Ruhe in Frieden

Kurzreferat

Die zerstörungsfreie Prüfung im Bauwesen gewinnt immer mehr an Bedeutung. Wurde sie bislang fast nur punktuell für die Schadersdiagnose zum Beispiel bei Instandsetzungsmaßnahmen eingesetzt, könnte sie in Zukunft auch in der Qualitätskontrolle eine entscheidende Rolle einnehmen.

Eine Voraussetzung für den Einsatz von zerstörungsfreien Prüfverfahren ist ihre Praxistauglichkeit. Die Weiterentwicklung der sich zum Teil noch im Forschungsstadium befindlichen Verfahren hin zu technisch ausgereiften Prüfmethoden mit entsprechender Standardisierung ist demzufolge eine klar definierte Aufgabe für die in diesem Bereich tätigen Forschungseinrichtungen.

Ein Verfahren, welches sich zur zerstörungsfreien Prüfung eignet, ist die Impuls-Thermografie, da sie in anderen Industriezweigen eine etablierte Methode zur Materialprüfung darstellt. Zudem ist die passive Thermografie im Bauwesen ein anerkanntes Verfahren zur thermischen Prüfung stationärer Systeme.

Die Vorteile der Thermografie sind die Möglichkeit der schnellen und umfassenden Untersuchung von großflächigen Bauwerken und -teilen und ihre bildgebende Anwendungsweise, die eine direkte (Vor-)Auswertung der Messungen vor Ort gestattet.

Im Rahmen dieser Arbeit werden qualitative und quantitative Möglichkeiten der Impuls-Thermografie als zerstörungsfreies Prüfverfahren im Bauwesen dargelegt. Es wird aufgezeigt, inwiefern sich die Impuls-Thermografie zur Lösung des inversen Problems eignet.

Zur Erforschung der Anwendbarkeit wurden im Labor experimentelle Untersuchungen an drei verschiedenen Probekörpern durchgeführt, welche mit einem engen Bezug zur Praxis hergestellt wurden. Im einzelnen wurden Hohlstellen in Betonbauteilen (Pk1), Putzablösungen auf Betonkonstruktionen (Pk2) und unzureichende Vermörtelungen von im Dickbettverfahren verlegten Spaltklinkern auf Betonwänden (Pk3) geprüft.

Neben den experimentellen Untersuchungen wurden numerische Simulationen durchgeführt. Dafür wurde zunächst ein Programm auf Basis der finiten Differenzen entwickelt. Die Methode, die zu berücksichtigenden Randbedingungen und der Aufbau des Simulationsprogramms werden in der Arbeit beschrieben.

Mit Hilfe des Programms wurde eine umfangreiche Variation aller Einflussparameter für den Probekörper Pk1 vorgenommen. Insbesondere die Auswirkungen auf die maximale Temperaturdifferenz über einer Fehl- und einer Referenzstelle und deren Zeitpunkt des Auftretens wurde analysiert.

Nach der Parametervariation wurden analog zu den experimentellen Untersuchungen für alle drei Probekörper numerische Simulation durchgeführt und mit den Ergebnissen der Messungen verglichen. Während die Messungen und Simulationen für den Probekörper Pk1 relativ gut übereinstimmen, weichen die Ergebnisse bei den anderen beiden Probekörpern teilweise doch erheblich voneinander ab. Mögliche Gründe für diese Unterschiede werden im Kapitel 7 diskutiert.

Im Hinblick auf die quantitativen Möglichkeiten der Impuls-Thermografie wurden im Rahmen dieser Arbeit zwei Ansätze betrachtet. Zum einen wurden die Simulationsergebnisse für den Probekörper Pk1 systematisch ausgewertet und zur Bestimmung der Tiefen der einzelnen Fehlstellen des Probekörpers verwendet. Zum anderen wurden die experimentellen und simulierten Temperatur-Zeit-Kurven an ein theoretisches Modell angepasst.

Die Ergebnisse belegen die Eignung der Impuls-Thermografie für die zerstörungsfreie Prüfung im Bauwesen für die im Rahmen der Arbeit behandelten Aufgaben.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung.....	1
2	Aufgabenstellung und Zielsetzung.....	3
3	Thermografieverfahren.....	4
3.1	Passive Thermografie.....	4
3.2	Aktive Thermografie.....	4
3.3	Verfahrensprinzip.....	6
4	Experimentelle Untersuchungen.....	9
4.1	Experimenteller Aufbau.....	9
4.1.1	Infrarotkammersystem.....	9
4.1.2	Wärmequelle.....	10
4.1.3	Probekörper.....	12
4.2	Messungen und Ergebnisse.....	16
4.2.1	Durchführung der Messungen (Messablauf).....	16
4.2.2	Durchführung der Auswertung (numerische Signalverarbeitung).....	17
4.2.3	Ergebnisse.....	18
5	Entwicklung des Simulationsprogramms.....	28
5.1	Finite-Differenzen-Methode für instationäre Wärmeleitung.....	28
5.2	Randbedingungen.....	30
5.2.1	Ausgangstemperatur.....	30
5.2.2	Wärmestromdichte.....	30
5.3	Simulationsprogramm.....	34
6	Systematische Untersuchung des Einflusses der einzelnen Parameter mit Hilfe von Simulationsrechnungen.....	36
6.1	Programmparameter.....	37
6.1.1	Weginkrement.....	37
6.1.2	Zeitinkrement.....	39
6.2	Randbedingungen.....	40
6.2.1	Erwärmungsart.....	40
6.2.2	Wärmeverluste.....	42
6.2.3	Wärmestromdichte.....	44
6.2.4	Erwärmungszeit.....	45
6.2.5	Ausgangs- und Umgebungstemperatur.....	46
6.3	Materialparameter.....	47
6.3.1	Wärmeleitfähigkeit des Betons.....	47

6.3.2 Rohdichte und spezifische Wärmekapazität des Betons.....	48
6.4 Geometrieparameter.....	49
6.4.1 Tiefe der Inhomogenität.....	49
6.4.2 Dicke der Inhomogenität.....	50
6.4.3 Flächenhafte Ausdehnung der Inhomogenität	51
6.4.4 Probekörperdicke	52
6.5 Zusammenfassung.....	53
7 Simulation der Aufheiz- und Abkühlungsvorgänge und Vergleich mit den experimentellen Ergebnissen an den Probekörpern.....	56
7.1 Beton mit Hohlstellen (Pk1)	56
7.2 Putzablösungen auf Beton (PK2)	60
7.3 Spaltklinker im Dickbettmörtel auf Beton (PK3)	67
8 Inverse Lösung.....	76
8.1 Auswertung systematischer Simulationsrechnungen zur quantitativen Tiefenbestimmung	76
8.2 Theoretisches Modell (Anpassung simulierter und experimenteller Temperatur-Zeit- Kurven an ein theoretisches Modell)	82
9 Zusammenfassung.....	90
10 Danksagung.....	93
11 Literatur	94
12 Veröffentlichungen	97
13 Anhang.....	99
Anlage 1 Materialparameter	99
Anlage 2 Parametervariation für Pk3	100

Parameterliste

Parameter	Parameters	Kürzel	Einheit
Dicke	thickness	d	m
Emissivität	emissivity	e	
Geschwindigkeit	velocity	v	m/s
kinematische Viskosität	kinematic viscosity	ν	m ² /s
Koordinaten	coordinates	x, y, z	m
- Weginkremente	- path increments	dx, dy, dz	m
Länge	length	l	m
Rohdichte	density	ρ	kg/m ³
spezifische Wärmekapazität	specific heat capacity	c	J/(kg K)
~ bei konstantem Druck	~ at constant pressure	c_p	J/(kg K)
Temperatur	temperature	T	°C
- Ausgangstemperatur	- starting temperature	T_0	°C
- mittlere Temperatur	- mean temperature	T_M	°C
Temperaturleitfähigkeit	(thermal) diffusivity	α	m ² /s
Tiefe	depth	z	m
Volumen	volumne	V	m ³
Wärmeeindringzahl	(thermal) effusivity	e	(W s ^{0,5})/(m ² K)
Wärmeleitfähigkeit	thermal conductivity	λ	W/(m K)
Wärmestromdichte	heat flux	q	W/m ²
- Konvektionsverluste	- convection loss	q_{kon}	W/m ²
- Strahlungsverluste	- radiation loss	q_{rad}	W/m ²
Wärmeübergangskoeffizient	heat transfer coefficient	α	W/(m ² K)
~ für Konvektion	~ for convection	α_{kon}	W/(m ² K)
Zeit	time	t	s
- Erwärmungszeit	- heating time	t_q	s
- Zeitinkrement	- time increment	dt	s

Konstanten	Constants	Kürzel	Wert
Erdbeschleunigung	acceleration due to gravity	<i>g</i>	9,81 m/s ²
Stefan-Boltzmann-Konstante	Stefan-Boltzmann constant	<i>s_s</i>	5,67 x 10 ⁻⁷ W/(m ² K ⁴)

Kenngößen	Numbers	Kürzel
Grashof-Zahl	Grashof number	<i>Gr</i>
Nußelt-Zahl	Nußelt number	<i>Nu</i>
Prandtl-Zahl	Prandtl number	<i>Pr</i>
Rayleigh-Zahl	Rayleigh number	<i>Ra</i>
- kritische Rayleigh-Zahl	- critical Rayleigh number	<i>Ra_c</i>
Reynolds-Zahl	Reynolds number	<i>Re</i>

1 Einleitung

In einer Gesellschaft, in der das Bewusstsein für einen schonenden und umweltverträglichen Umgang mit den natürlichen Ressourcen stetig wächst, gewinnt die Nachhaltigkeit im Bauwesen immer mehr an Bedeutung. Daraus ergibt sich zwangsläufig die Forderung nach einer zu gewährleistenden Qualität. Dieses beinhaltet nicht nur die Verwendung zuverlässiger und oftmals hochwertiger Baumaterialien, sondern es werden vor allem an die Bauweise erhöhte Ansprüche zur Einhaltung der Qualität gestellt. Ein stichhaltiges Konzept bezüglich des Qualitätsmanagements ist daher unerlässlich, um den Anforderungen des modernen Bauens gewachsen zu sein.

In diesem Zusammenhang gewinnt die zerstörungsfreie Prüfung im Bauwesen immer mehr an Bedeutung. Wurde sie bislang fast nur punktuell für die Schadensdiagnose zum Beispiel bei Instandsetzungsmaßnahmen eingesetzt, könnte sie in Zukunft auch in der Qualitätskontrolle eine entscheidende Rolle einnehmen. Das Ziel ist dabei die deutliche Verringerung der Erhaltungskosten. Das Argument der Kostenreduzierung kann auch bei Sanierungsmaßnahmen angeführt werden, bei denen durch eine frühzeitige Schadenserkennung die Instandsetzungskosten deutlich reduziert werden könnten.

Eine Voraussetzung für den Einsatz von zerstörungsfreien Prüfverfahren ist ihre Praxistauglichkeit. Die Weiterentwicklung der sich zum Teil noch im Forschungsstadium befindlichen Verfahren hin zu technisch ausgereiften Prüfmethoden ist demzufolge eine klar definierte Aufgabe für die in diesem Bereich tätigen Forschungseinrichtungen. Eine weitere Voraussetzung für die praktische Anwendung im Bauwesen ist die Erhöhung des Bekanntheitsgrads und vor allem der Akzeptanz der Verfahren. Zur Zeit sind einem Großteil der beteiligten Verantwortlichen in der Baupraxis die Leistungsfähigkeit und die Möglichkeiten der zerstörungsfreien Prüfung unbekannt.

Ein Verfahren, welches sich zur zerstörungsfreien Prüfung eignet, ist die Impuls-Thermografie, da sie in anderen Industriezweigen eine etablierte Methode zur Materialprüfung darstellt. Zudem ist die passive Thermografie im Bauwesen ein anerkanntes Verfahren zur zerstörungsfreien Prüfung.

Die Vorteile der Thermografie sind die Möglichkeit der schnellen und umfassenden Untersuchung von großflächigen Bauwerken und -teilen und ihre bildgebende Anwendungsweise, die eine direkte (Vor-)Auswertung der Messungen vor Ort gestattet.

Zum Einsatz der Impuls-Thermografie als zerstörungsfreies Prüfverfahren fehlt die konkrete Umsetzung auf das Bauwesen unter Berücksichtigung der dort vorhandenen speziellen Gegebenheiten. Vor allem die homogene Erwärmung von Bauteilen im Bauwesen stellt wegen der deutlich größeren Abmaße der Untersuchungsobjekte eine völlig neue Herausforderung dar. Ferner gilt es, insbesondere andere Materialien und deren Eigenschaften sowie Abmessungen zu berücksichtigen, was eine systematische Untersuchung der einzelnen Einflussfaktoren erfordert.

Zur Erforschung der Anwendbarkeit der Impuls-Thermografie als qualitatives und quantitatives zerstörungsfreies Prüfverfahren im Bauwesen wurde von der DFG das Forschungsprojekt „Struktur- und Feuchteuntersuchungen von Bauteil- und Bauwerksoberflächen mit der Impuls-Thermografie“ eingerichtet, welches in Kooperation von der Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung (BAM) (WI 1785/1-1) [1] und der Technischen Universität Berlin (TUB) (HI 636/2-1) [2] bearbeitet wurde.

Das Forschungsvorhaben war so aufgebaut, dass zunächst eine umfangreiche Literaturrecherche durchgeführt wurde. Parallel dazu wurden anhand theoretischer Überlegungen praxisnahe Probekörper konzipiert, um die Eignung des Verfahrens

hinsichtlich seiner Anwendungsmöglichkeiten zu evaluieren. Im einzelnen wurden folgende Problemstellungen an Probekörpern untersucht:

- Hohlstellen in Betonbauteilen
- Verklebungsfehler von CFK-Laminaten auf Beton
- Putzablösungen auf Betonbauteilen
- Putzablösungen auf Mauerwerk
- Bewehrung in Betonbauteilen
- Ablösungen von Bitumenschweißbahnen auf Stahlplatten
- Spaltklinker mit unzureichender Vermörtelung sowie Ablösungen des Dickbettmörtels auf Betonbauteilen
- Hohlstellen in Mauerwerksfugen
- Hohlstellen in Spritzbetonbauteilen
- Stahlfasergehalt bei Stahlfaserbetonbauteilen

Nach der Herstellung der Probekörper wurde eine geeignete Messapparatur aufgebaut. Dabei entfiel die wesentliche Arbeit auf die Auswahl geeigneter Wärmequellen. Außerdem wurde eine Software für die spätere Auswertung der thermografischer Messdaten entwickelt.

Danach wurden die einzelnen Probekörper zuerst qualitativ untersucht, um die Grenzen der Bestimmbarkeit der eingebrachten Inhomogenitäten zu ermitteln. Bei erfolgreicher Ortung der Fehlstellen wurde dann nach quantitativen Auswertungsmöglichkeiten gesucht.

Wichtigster Ansatz war die Durchführung von Simulationsrechnungen und die Lösung des inversen Problems mit Hilfe numerische Modelle. Zu diesem Zweck wurde ein Simulationsprogramm auf Basis der finiten Differenzen entwickelt. Dabei wurden die definierten Geometrie- und Materialparameter der praktischen Probekörper sowie die Randbedingungen der experimentellen Versuche als Ausgangslage für die Simulationsrechnungen verwendet.

Als weiterer Lösungsansatz wurde die Anpassung der experimentellen Temperatur-Zeit-Kurven an geeignete analytische Funktionen betrachtet.

2 Aufgabenstellung und Zielsetzung

Diese Arbeit wurde im Rahmen des zuvor erwähnten Forschungsprojekts angefertigt. Das Ziel dieser Arbeit war die Entwicklung eines geeigneten Simulationsprogramms für die Impuls-Thermografie sowie mit dessen Hilfe die systematische Untersuchung der Einflussparameter. Ein weiteres Ziel war die Lösung des inversen Problems zum einen durch einen Vergleich der experimentellen Messungen mit den numerischen Simulationen und zum anderen durch eine Anpassung der experimentellen Temperatur-Zeit-Kurven mit analytischen Funktionen.

In dieser Arbeit wird im Kapitel 3 zunächst ein Überblick über passive und aktive Thermografieverfahren im allgemeinen und im Bauwesen gegeben und anschließend das angewendete Verfahrensprinzip erklärt.

Danach werden experimentelle Untersuchungen für drei in der Einleitung beschriebene Problemstellungen vorgestellt. Im ersten Teil des Kapitels 4 werden das Infrarotkameranystem, die Wärmequellen und die drei Probekörper zu der jeweils ausgewählten Problemstellung beschrieben. Im zweiten Teil des Kapitels sind die Durchführung der experimentellen Messungen dargestellt und die Ergebnisse zusammengefasst.

Im Kapitel 5 wird das auf Basis der Finite-Differenzen-Methode entwickelte Simulationsprogramm präsentiert. Die Variation der Material-, Geometrie- und Programmparameter sowie der Randbedingungen, die mit Hilfe des Simulationsprogramms durchgeführt wurde, um den Einfluss der einzelnen Parameter auf die Messungen abschätzen zu können, wird im Kapitel 6 dargestellt.

Anschließend erfolgt im Kapitel 7 die Ergebnispräsentation der Simulationsrechnungen und der Vergleich der experimentellen Messungen und der numerischen Simulationen.

Im Kapitel 8 werden zwei mögliche Ansätze für die Lösung des inversen Problems erläutert und die mit ihrer Hilfe erzielten Ergebnisse beschrieben.

Kapitel 9 fasst die wichtigsten Erkenntnisse dieser Arbeit zusammen.

3 Thermografieverfahren

3.1 Passive Thermografie

Die Thermografie ist ein unkompliziertes Verfahren zur schnellen, gefahrlosen und berührungsfreien Untersuchung von Oberflächen aller Art. Die einfachste Form der Thermografie ist ihre passive Anwendung. Hierbei werden Oberflächentemperaturen von Bauteilen mit einer Infrarotkamera gemessen, ohne dass eine externe Beeinflussung auf das Bauteil ausgeübt wird.

Mit Hilfe einer Infrarotkamera wird von einem zu untersuchenden Bereich eines Bauteils eine thermische Bestandsaufnahme gemacht, indem ein Wärmebild (Thermogram) zu einem festgelegten Zeitpunkt aufgenommen wird. Dieses Thermogram wird dann hinsichtlich seiner Temperaturverteilung analysiert und auf thermische Auffälligkeiten hin überprüft.

Die passive Thermografie eignet sich demzufolge für die Aufzeichnung von Temperaturprofilen der Oberflächen. Die Ortung von Inhomogenitäten ist nur dann möglich, wenn sich aufgrund der natürlichen Gegebenheiten auf der Oberfläche Temperaturkontraste einstellen.

Anwendungsgebiete für passive Thermografie sind zum Beispiel die Untersuchung von elektrischen Anschlüssen und Geräten [3] und die Überwachung der Bandstahlherstellung [4].

Auch im Bauwesen ist die passive Thermografie seit etlichen Jahren eine klassische zerstörungsfreie Prüfmethode [5] zur Untersuchung stationärer Systeme. Typische Anwendungsbeispiele sind die Untersuchung von Wärmedämmungen auf Wärmebrücken [6], die Kontrolle von Fußbodenheizungen auf undichte Stellen und das Aufzeigen der Holzbalken bei Holzfachwerken unter Putz.

3.2 Aktive Thermografie

Impuls-Thermografie

Bei der Impuls-Thermografie wird die Oberfläche eines Körpers gezielt, möglichst homogen und verzögerungsfrei erwärmt. Die thermische Anregung wird in Form eines Rechteckpulses oder periodisch durchgeführt. Die Anregungsdauer wird in Abhängigkeit der Materialeigenschaften des Körpers und der Wärmequelle so gewählt, dass die geforderte Eindringtiefe erreicht werden kann. Je nachdem variiert die optimale Erwärmungszeit von wenigen Millisekunden bis hin zu einer Stunde.

Im Anschluss wird das Abkühlungsverhalten mit Hilfe einer Infrarotkamera beobachtet. Gegebenenfalls kann zuvor auch der Erwärmungsvorgang mit aufgezeichnet werden. Die Impuls-Thermografie kann sowohl als Reflexions- als auch als Transmissionsmethode angewendet werden. Bei der Reflexion werden die Wärmequelle und die Infrarotkamera von der gleichen Seite auf den Körper gerichtet. Bei der Transmission wird der betrachtete Körper zwischen der Wärmequelle und der Infrarotkamera angeordnet.

Die Impuls-Thermografie ermöglicht die Ortung von Inhomogenitäten und verdeckten Strukturen innerhalb eines Körpers, wenn diese sich in ihren thermischen Materialeigenschaften von denen des Körpers unterscheiden. Je tiefer eine Fehlstelle oder eine Struktur in dem Körper liegt, desto später tritt sie zutage und desto kontrastärmer zeichnet sie sich ab. Nach [7] lassen sich die optimale Beobachtungszeit t_{DTmax} , bei welcher der Temperaturkontrast maximal wird, und der Kontrastverlust k in Abhängigkeit der Tiefe z [m] und der Temperaturleitfähigkeit a [m²/s] wie folgt abschätzen:

$$t_{\Delta T \max} \approx \frac{z^2}{a} \quad (1)$$

und

$$k \approx \frac{1}{z^3} \quad (2)$$

Die Grenze der Bestimmbarkeit von Fehlstellen liegt empirisch etwa bei einer Fehlstellentiefe, die dem minimalen Fehlstellendurchmesser parallel zur betrachteten Oberfläche entspricht.

Die Impuls-Thermografie eignet sich demzufolge für die Bestimmung oberflächennaher Inhomogenitäten bzw. zur Untersuchung verhältnismäßig dünner Körper. Das Verfahren wird erfolgreich zur Materialprüfung eingesetzt. Anwendungsgebiete sind unter anderem die Ortung von Ablösungen und Defekten bei Kohlefaser-Verbundwerkstoffen [8], Aluminium-Laminaten [7] und beschichteten Metalloberflächen [9].

Lock-In-Thermografie

Die Lock-In-Thermografie oder auch phasenempfindliche Modulationsthermografie wird mit einer sinusförmigen periodischen Erwärmung durchgeführt und die Oberfläche parallel zu der Erwärmung mit einer Infrarotkamera beobachtet. Die durch diese Art der Anregung erzeugten thermischen Wellen [10] stoßen im Körper auf thermische Grenzflächen und werden dort reflektiert.

Die aufgenommenen Bilddaten werden mit Hilfe einer Fourier-Transformation vom Zeit- in den Frequenzbereich transformiert. Für jede Frequenz kann dann der Phasen- und der Amplitudenanteil für jeden Punkt der betrachteten Oberfläche dargestellt werden.

Das Amplitudenbild gibt die durch die Modulation hervorgerufene Temperaturänderung wieder und ist abhängig von der Emissivität der Oberfläche sowie der Homogenität der Erwärmung. Im Amplitudenbild werden im Idealfall alle Strukturen innerhalb der thermischen Eindringtiefe abgebildet.

Die thermische Eindringtiefe entspricht der Strecke, auf der die Amplitude ebener Wärmewellen auf e^{-1} abfällt und auf der sich die Phase um 1 rad ändert. Wegen ihrer Frequenzabhängigkeit muss für die Untersuchung mehrerer Tiefenlagen jeweils eine andere Modulationsfrequenz verwendet werden. Je niedriger die Modulationsfrequenz gewählt wird, desto größer ist die thermische Eindringtiefe [11].

Im Gegensatz zum Amplitudenbild wird das Phasenbild kaum von der Emissivität der Oberfläche und der Homogenität der Erwärmung beeinflusst, was die Aussagesicherheit der Messung erhöht. Zudem hat das Phasenbild eine etwa doppelt so große Tiefenreichweite und der Phasenwinkel ist als Maß für die Laufzeit der thermischen Welle indirekt mit der Tiefe von Inhomogenitäten verknüpft.

Bei der Materialprüfung werden vor allem faserverstärkte Metall- und Kunststoff-Lamine sowie beschichtete Bauteile mit der Lock-In-Thermografie untersucht. Erfahrungsgemäß kann das Verfahren erfolgreich bis zu einer Eindringtiefe bzw. Materialdicke von ungefähr 0,01 m eingesetzt werden.

Puls-Phasen-Thermografie

Die Puls-Phasen-Thermografie stellt eine Kombination der Impuls-Thermografie und der Lock-In-Thermografie dar [12]. Wie bei der Impuls-Thermografie wird der Probekörper mit einem Rechteckpuls oder einer periodischen Schwingung erwärmt. Analog zur Lock-In-Thermografie werden die Bilddaten mit einer Fourier-Transformation umgewandelt und im allgemeinen die aussagekräftigeren Phasenbilder analysiert.

Aktive Thermografie im Bauwesen

Neben der passiven Thermografie wird im Bauwesen auch eine quasi-statische Form der Thermografie seit längerer Zeit angewendet, die streng genommen schon zu den aktiven Thermografieverfahren gerechnet werden müsste. Bei dieser Art der Thermografie werden z. B. Raumheizungen oder die anfallende Verdunstungskälte ausgenutzt, um thermische Kontraste zu erhalten.

Bei der aktiven Thermografie wird ein sich im thermischen Gleichgewicht befindliches System gezielt mit Hilfe einer Wärmequelle gestört und die Auswirkung dieser Systembeeinflussung erforscht. Aktive Thermografie wird im Bauwesen vor allem unter Ausnutzung der Sonne als natürlicher Wärmequelle durchgeführt. Sehr gute Ergebnisse werden damit bei der Inspektion von Brücken [13] und Straßenbelägen [14] erzielt.

Weitere Anwendungsgebiete, in denen die aktive Thermografie im Bauwesen erfolgreich getestet worden ist, sind:

- Ablösungen und Lufteinschlüsse bei faserverstärkten Kunststoffschichten auf Beton [15][16]
- Metallische Ankerplatten bei Fassadenbefestigungen [17]
- Feuchtigkeit in Beton und Mauerwerk [18][19]
- Hohlstellen und Einschlüsse in Beton [20]
- Unvollständig verfüllte Fugen bei Mauerwerk
- Ablösungen bei Putz, Spritzbeton, etc.
- Ablösungen und Hohlräume bei Boden- und Wandplatten

3.3 Verfahrensprinzip

Die schematische Funktionsweise der im Rahmen dieser Arbeit angewendeten Impuls-Thermografie in Form der Reflexionsmethode ist in Abbildung 3.1 dargestellt. Die dort aufgeführte (Video-)Kamera bzw. ein Fotoapparat dienen zur Dokumentation der Problemstellung und des Messaufbaus.

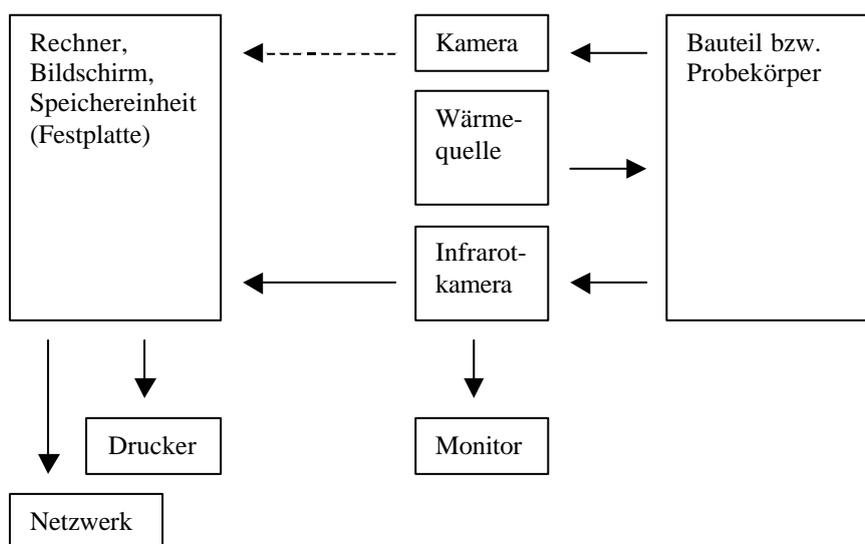


Abbildung 3.1 Schematischer Aufbau der Impuls-Thermografie

Mit Hilfe einer Wärmequelle wird die Oberfläche des zu untersuchenden Bauteils bzw. Probekörpers erwärmt. Im Idealfall würde die Wärmequelle verzögerungsfrei ein homogenes

Temperaturfeld auf der Oberfläche erzeugen. Für die Anwendung der Impuls-Thermografie im Bauwesen ist eine verzögerungsfreie Erwärmung aus technischer und auch aus wirtschaftlicher Sicht kaum zu realisieren. Je nach Problemstellung muss daher die Erwärmung mit Zeiten von 15 s bis hin zu 3600 s durch geeignete Infrarotheizstrahler erfolgen.

Die auf die Oberfläche eingebrachte Wärmemenge verursacht einen instationären Wärmefluss in den Probekörper hinein. Abbildung 3.2 veranschaulicht diesen dynamischen Prozess. Zusätzlich findet an allen freien Rändern des Probekörpers ein Wärmeaustausch mit der Luft über Konvektion und Strahlung statt.

Die Ausbreitung der Wärme innerhalb des Probekörpers ist abhängig von den thermischen Materialparametern Wärmeleitfähigkeit (λ), spezifische Wärmekapazität (c_p) und Rohdichte (ρ). Solange das Material homogen und isotrop ist, erfolgt die Ausbreitung der Wärme gleichmäßig. Falls innerhalb des Probekörpers Inhomogenitäten auftreten, deren thermische Materialeigenschaften sich von denen der Umgebung unterscheiden, wird die gleichmäßige Wärmeausbreitung in einem lokalen Bereich gestört. Es entsteht entweder ein Wärmestau oder ein beschleunigter Wärmeabfluss.

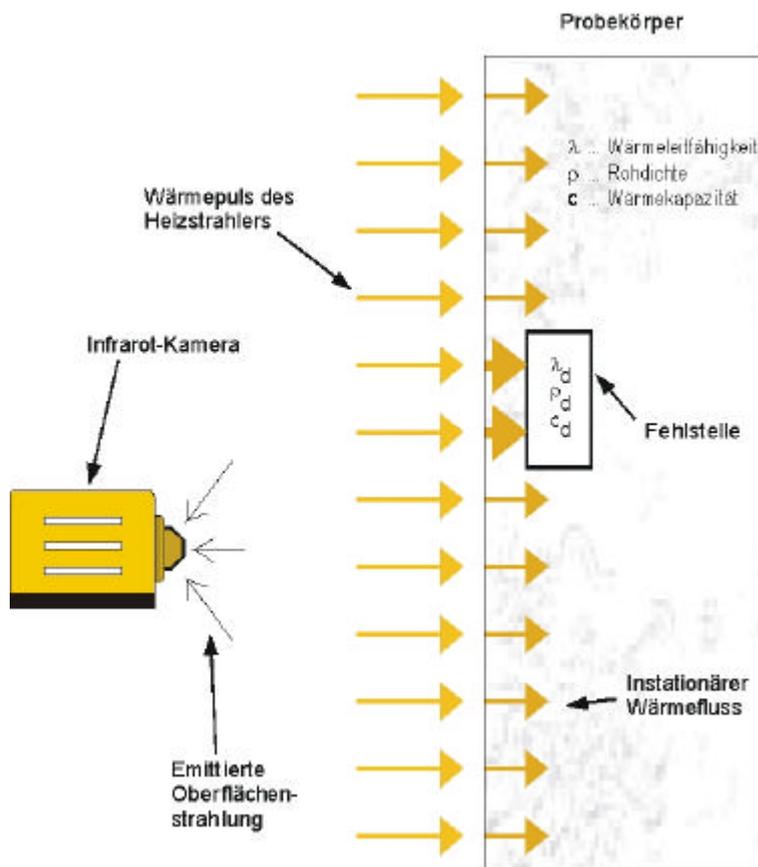


Abbildung 3.2 Prinzipielle Funktionsweise der Impuls-Thermografie

Nach der Erwärmung des Bauteils bzw. Probekörpers wird der Abkühlungsprozess der Oberfläche mit einer Infrarotkamera beobachtet, indem die Kamera die von der Oberfläche emittierte Strahlung aufnimmt und in thermische Bilddaten umwandelt. Während die zeitlichen Veränderungen der Temperaturverteilung auf der Oberfläche auf diese Weise betrachtet werden, können oberflächennahe Inhomogenitäten geortet werden, wenn sie aufgrund des veränderten Wärmeflusses einen messbaren Temperaturkontrast auf der Oberfläche verursachen.

Die von der Infrarotkamera aufgenommenen thermischen Bilddaten können während der Beobachtung des Abkühlungsprozesses in Echtzeit auf einem Computer gespeichert werden. Dieses ermöglicht neben der qualitativen Bestimmung von Inhomogenitäten auch eine spätere quantitative Auswertung der Messdaten.

4 Experimentelle Untersuchungen

4.1 Experimenteller Aufbau

In Abbildung 4.1 ist der experimentelle Aufbau für die Messungen mit der Impuls-Thermografie dargestellt. Er setzt sich aus einer Wärmequelle, einem Infrarotkamarasystem und einer Einheit für die Datenerfassung zusammen.



Abbildung 4.1 Experimenteller Aufbau für die Impuls-Thermografie im Bauwesen

4.1.1 Infrarotkamarasystem

Zu dem Infrarotkamarasystem gehören eine ThermaCAM SC1000 Infrarotkamera von Inframetrics (jetzt FLIR Systems GmbH) und ein darauf abgestimmtes Rechnersystem.

Die Infrarotkamera hat einen Focal-Plane-Array-Detektor (FPA) bestehend aus 256 mal 256 Detektorelementen (PtSi-Schottky-Dioden) in CMOS-Bauweise mit einem Stirling-Mikrokühler. Durch eine permanente automatische Kennlinienkorrektur über das gesamte Bild wird ein punktwiser elektronischer Ausgleich von Inhomogenitäten des Sensorfeldes erzielt. Weitere technische Daten und Spezifikationen der ThermaCAM SC1000 Infrarotkamera sind in der Tabelle 4.1 zusammengefasst.

Spektralbereich	3,4 bis 5,0 μm
Temperaturmessbereich	-10 bis +450 $^{\circ}\text{C}$
Temperaturauflösung	Mindestens 0,07 K bei 30 $^{\circ}\text{C}$
Messgenauigkeit	$\pm 2\%$ bzw. 2 K
Bildrate	50 Hz (PAL) Vollbild
Dynamikumfang pro Messpunkt	12 Bit
Räumliche Auflösung (IFOV)	1,2 mrad
Sichtfeld mit Normalobjektiv	17 $^{\circ}$ x 16 $^{\circ}$

Tabelle 4.1 Technische Daten und Spezifikationen der ThermaCAM SC1000 Infrarotkamera

Für die Kamera stehen drei Objektive (8 $^{\circ}$, 16 $^{\circ}$, 32 $^{\circ}$) zur Verfügung. Für die Untersuchungen im Rahmen dieser Arbeit wurde das 32 $^{\circ}$ -Objektiv verwendet.

Die Kamera verfügt über einen Video- und einen Digitalausgang. Über den Digitalausgang kann sie zur Echtzeiterfassung der digitalen Bilddaten mit dem Rechnersystem verbunden werden. Dabei bleibt der volle Dynamikumfang pro Messpunkt erhalten.

Mit Hilfe der Software kann eine Korrektur der atmosphärischen Transmission durch Eingabe des Kameraabstands, der Atmosphärentemperatur und der relativen Luftfeuchtigkeit durchgeführt und die Emissivität der betrachteten Oberfläche eingestellt werden.

4.1.2 Wärmequelle

Im Rahmen eines Forschungsvorhabens wurden an der BAM verschiedene thermische Anregungseinheiten hinsichtlich ihrer Verwendbarkeit als Wärmequelle für die Impuls-Thermografie im Bauwesen getestet. Das Ziel war es, mindestens 1,0 x 1,0 m² nahezu homogen erwärmen zu können. Bei den Untersuchungen wurden sowohl die Wärmeübertragung in Form von Wärmeleitung durch direkten Kontakt als auch jene über Konvektion bzw. Strahlung berücksichtigt [1].

Eine Erwärmung über direkte Wärmeleitung mit Hilfe von Heizmatten erwies sich als wenig vorteilhaft, weil der Wärmeeintrag direkt vom Anpressdruck abhängt, welcher sich selbst bei relativ glatten Oberflächen nur mit großem technischen Aufwand ausreichend gleichmäßig ausführen lässt. Auch die Verwendung eines Heißluftgebläse zur konvektiven Anregung der Oberfläche wurde wegen der sehr unhandlichen Apparatur und einer zu inhomogenen Erwärmung verworfen.

Als sinnvollste Variante zur Erwärmung der Oberfläche zeigte sich der Einsatz von Infrarotstrahlern, mit denen ein kontaktloser Energieeintrag möglich ist und die im Vergleich zu Leuchtmitteln eine günstigere Wellenlänge für die Erwärmung von Baustoffen haben. Ein einzelner Infrarotstrahler ist jedoch nicht ausreichend, um die geforderte Mindestfläche zu erwärmen. Da ein Feld aus Infrarotstrahlern, mit dem eine entsprechend große Fläche statisch homogen erwärmt werden kann, aus finanzieller und praktischer Sicht nicht realisierbar war, wurde schließlich eine bewegliche Wärmequelle aus drei mittelwelligen Infrarotstrahlern des Typs MMS 2400 von Heraeus ausgewählt, von denen jeder einzelne Strahler drei in Längsrichtung angeordnete Zwillingsröhren aus Quarzglas vor einer vergoldeten Umarmung besitzt. Die technischen Daten eines einzelnen Infrarotstrahlers dieses Typs sind in Tabelle 4.2 aufgeführt.

Leistungsaufnahme	2400 W
Abmaße	0,50 x 0,25 m ²
Maximale Felddauslegung	19,2 kW/m ²
Spektralbereich	1,5 bis 3,0 μm

Tabelle 4.2 Technische Daten eines einzelnen Infrarotstrahlers MMS 2400

Die drei Strahler sind in Längsrichtung linienförmig angeordnet und vertikal an einer umgebauten Beregnungsanlage befestigt (siehe Abbildung 4.1). Die Strahler können computergesteuert gleichmäßig senkrecht zu ihrer Anordnungsrichtung mit einer Geschwindigkeit von bis zu 0,12 m/s über eine maximale Länge von 1,75 m hin und her bewegt werden. Auf diese Art und Weise ist es möglich, eine Fläche von ungefähr 1,5 x 1,5 m² nahezu homogen zu erwärmen, wie Abbildung 4.2 veranschaulicht. 90 % aller Temperaturwerte liegen innerhalb einer Spanne von 4,5 K.

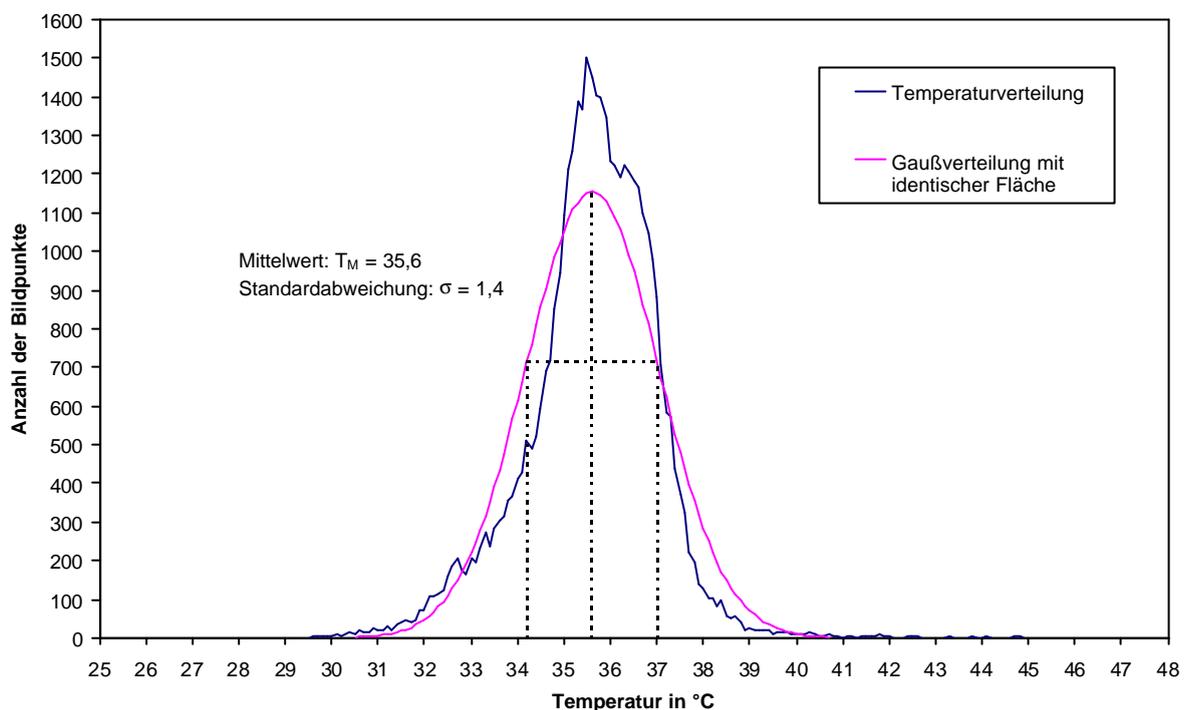


Abbildung 4.2 Temperaturverteilung auf der Oberfläche des Probekörpers Pk1 direkt nach einer Erwärmung von 900 s

Für die experimentellen Untersuchungen wurde für die zweimal 1,75 m lange Strecke eine Periodendauer von 30 s verwendet, nachdem Voruntersuchungen gezeigt hatten, dass diese nahezu keinen Einfluss auf die Messergebnisse hat. Die nachträglich im Rahmen einer Parametervariation (siehe Kapitel 6) durchgeführten Simulationen bestätigen diese Beobachtung.

Der Abstand der Wärmequelle zum Probekörper wurde mit 0,15 m für die Probekörper Pk1 und Pk3 bzw. 0,30 m für den Probekörper Pk2 jeweils so festgelegt, dass die Oberflächentemperatur bei der gewählten Erwärmungszeit unter normalen Bedingungen den maximalen Temperaturwert des eingestellten Temperaturbereiches der Infrarotkamera (-10 °C bis 50 °C) möglichst nicht überschreitet. Eine Überschreitung einer maximalen Oberflächentemperatur von 50 °C ist auch hinsichtlich der Gewährleistung einer zerstörungsfreien Durchführung der Erwärmung nicht zu empfehlen. Der Einfluss des Abstandes wurde ebenfalls experimentell untersucht. Bis zu einem Abstand von 0,6 m fällt die auf die Oberfläche aufgebrachte Wärmemenge mit wachsender Distanz quasi linear ab.

4.1.3 Probekörper

Im Rahmen dieser Arbeit wurden drei Problemstellungen bezüglich der Anwendung der Impuls-Thermografie im Bauwesen als quantitatives zerstörungsfreies Prüfverfahren bearbeitet:

- Hohlstellen in Betonbauteilen
- Putzablösungen auf Betonbauteilen
- Spaltklinker mit unzureichender Vermörtelung sowie Ablösungen des Dickbettmörtels auf Betonbauteilen

Weitere baupraktische Problemstellungen, die innerhalb des übergeordneten Forschungsvorhabens in der BAM untersucht wurden, sind 11:

- Verklebungsfehler von CFK-Laminaten auf Beton
- Putzablösungen auf Mauerwerk
- Bewehrung in Betonbauteilen
- Ablösungen von Bitumenschweißbahnen auf Stahl

Von der TUB wurden im Rahmen des Forschungsvorhabens die folgenden Problemstellungen untersucht:

- Hohlstellen in Mauerwerksfugen
- Hohlstellen in Spritzbetonbauteilen
- Stahlfasergehalt bei Stahlfaserbetonbauteilen

Für jede Aufgabenstellung wurde ein Probekörper für die experimentellen Untersuchungen angefertigt. Die drei in dieser Arbeit betrachteten Probekörper wurden aus unbewehrtem Transportbeton C 20/25 in einer Holzschalung hergestellt. Die Grundfläche der Probekörper wurde mit $1,5 \times 1,5 \text{ m}^2$ relativ groß gewählt, um die Randeinflüsse bei den Untersuchungen möglichst gering zu halten. Alle drei Probekörper wurden mit einer Tiefe von 0,5 m ausgeführt, damit die Probekörper im Rahmen der theoretischen und experimentellen Untersuchungen als halbunendliche Körper betrachtet werden können.

Die Messungen an den drei Probekörpern fanden in einer Halle der BAM statt, wo jeder Probekörper an einem festen Standort aufgestellt wurde. Wie beispielhaft aus Abbildung 4.1 ersichtlich ist, wurde die zu untersuchende Oberfläche der Probekörper senkrecht zum Fußboden ausgerichtet. Zur Vermeidung eines Wärmeabflusses in den Fußboden während der Messungen wurden die Probekörper mit der unteren Seitenfläche auf zwei Kanthölzern gelagert.

Beton mit Hohlstellen (Pk1)

Der Probekörper Pk1 dient zur Simulation von Kiesnestern und sonstigen Hohlstellen in Betonbauteilen, die häufig eine Folge von mangelnder Verdichtung bei der Herstellung sind. Mit Hilfe der Impuls-Thermografie wurden die Nachweisgrenzen für solche Fehlstellen abgeschätzt und ihre Geometrieparameter sowie die Betonüberdeckung bestimmt.

Abbildung 4.3 zeigt eine Zeichnung des Probekörpers Pk1, in den jeweils vier Fehlstellen mit den Abmaßen $0,10 \times 0,10 \times 0,10 \text{ m}^3$ bzw. $0,20 \times 0,20 \times 0,10 \text{ m}^3$ aus Polystyrol-Extruderschäum eingebracht wurden. Für beide Fehlstellengrößen waren je vier verschiedene Tiefenlagen mit 0,02, 0,04, 0,06 sowie 0,08 m Betondeckung auf der abzureibenden Seite des Probekörpers vorgesehen. Tabelle 4.3 gibt die Werte für die planmäßigen Einbautiefen und

die Abmaße der einzelnen Fehlstellen an. Die jeweiligen Einbaupositionen innerhalb des Probekörpers können der Abbildung 4.3 entnommen werden.

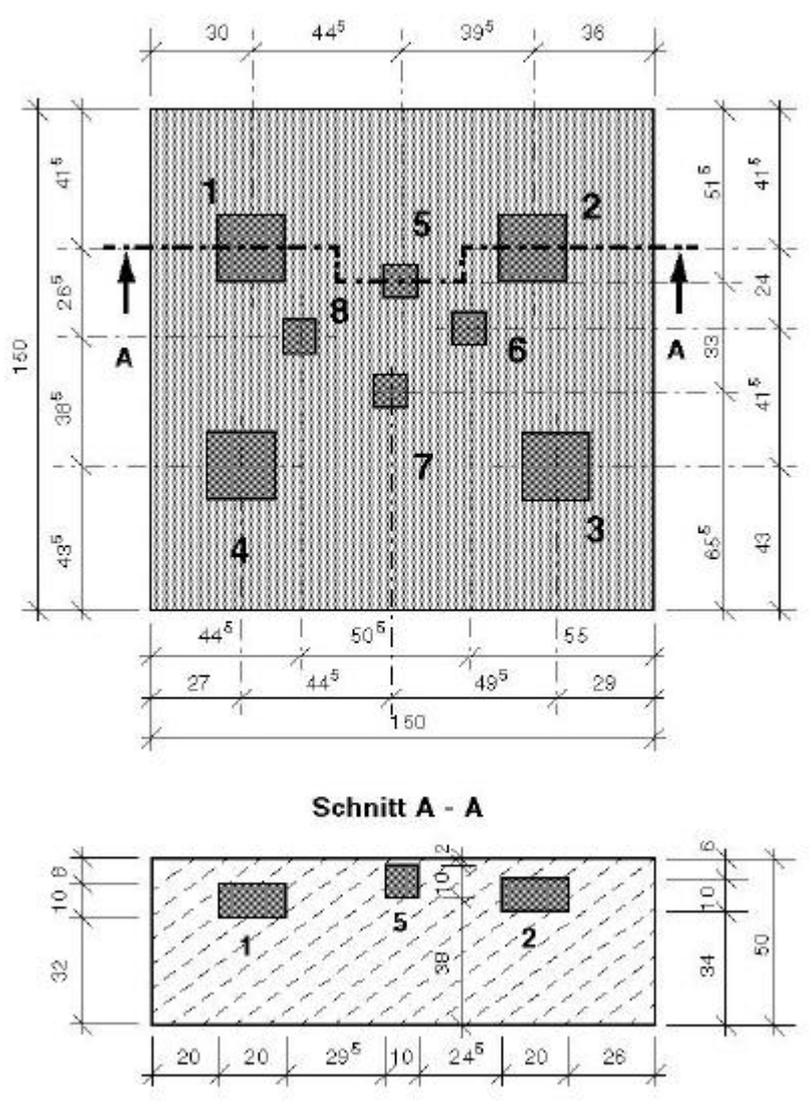


Abbildung 4.3 Ansicht und Schnitt des Probekörpers Pk1

Fehlstelle Nr.	Einbautiefe in m	Länge in m	Breite in m	Tiefe in m
1	0,08	0,20	0,20	0,10
2	0,06	0,20	0,20	0,10
3	0,04	0,20	0,20	0,10
4	0,02	0,20	0,20	0,10
5	0,02	0,10	0,10	0,10
6	0,04	0,10	0,10	0,10
7	0,06	0,10	0,10	0,10
8	0,08	0,10	0,10	0,10

Tabelle 4.3 Planmäßige Einbautiefen und Abmaße der Fehlstellen in Probekörper Pk1

Während die kleinen Blöcke nach der Verdichtung des Betons ohne Fixierung eingebaut wurden, wurden die größeren zusätzlich mit Holzlatten gegen Aufschwimmen gesichert. Die Holzlatten wurden nach der Erhärtung des Betons entfernt und die entstandenen Löcher nachträglich mit Beton verfüllt.

Putzablösungen auf Beton (Pk2)

Putzablösungen treten meistens infolge von mangelnder Untergrundvorbereitung bzw. unsachgemäßer Ausführung beim Verputzen auf. Am Probekörper Pk2 wurde die Nachweisbarkeit solcher Putzablösungen im Hinblick auf ihre flächenmäßige Ausdehnung und die Putzdicke untersucht.

Der Probekörper wurde nach der Erhärtung des Betons auf seiner Schalungsseite grundiert und mit einem handelsüblichen Gipsputz beschichtet, welcher in drei Bereichen mit verschiedenen Dicken von $0,01 \pm 0,002$, $0,015 \pm 0,002$ und $0,02 \pm 0,002$ m aufgebracht wurde. Zur Simulation von Ablösungen wurden vor dem Verputzen Papierblätter von $0,10 \times 0,10$ m² an ihren Rändern mit Silikon auf die Oberfläche geklebt.

Für die Fehlstellen wurden sowohl ungelochte Papierblätter als auch gelochte mit zwei verschiedenen Lochmustern verwendet. Die Fehlstellen 3, 7 und 10 bestehen aus ungelochtem Papier. Bei den Fehlstellen 1, 5 und 8 wurden die einzelnen Papierstücke mit 49 gleichmäßig verteilten Löchern versehen, die einen Radius von $0,006 \pm 0,001$ m haben. Die Fehlstellen 4, 6 und 9 weisen jeweils 5 Löcher mit einem Radius von $0,0125 \pm 0,001$ m auf. Die größere Fehlstelle 2 mit $0,20 \times 0,20$ m² wurde aus vier einzelnen Papierblättern zusammengesetzt.

Eine Zeichnung des Probekörpers Pk2 und ein Überblick über die eingebauten Fehlstellen ist in Abbildung 4.4 dargestellt.

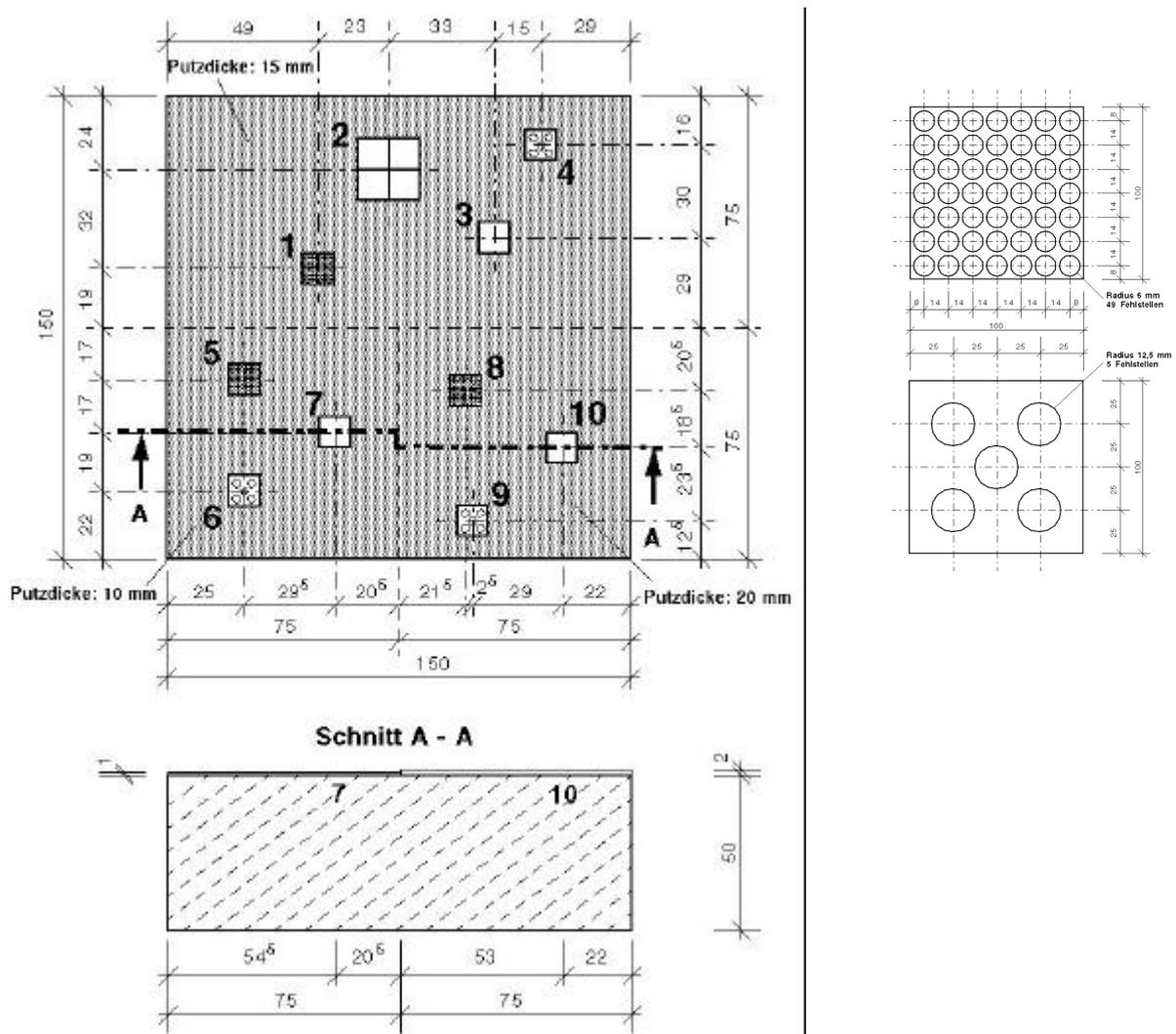


Abbildung 4.4 Ansicht und Schnitt des Probekörpers Pk2 sowie Skizzen der gelochten Fehlstellen

Spaltklinker auf Beton (Pk3)

Häufige Ursachen für Schäden bei Spaltklinkern auf Beton sind eine mangelhafte Vermörtelung oder großflächige Ablösungen des Mörtels. Zur Überprüfung der Detektierbarkeit von Ablösungen mittels der Impuls-Thermografie wurde der Probekörper Pk3 hergestellt, der sowohl Stellen mit unzureichender Vermörtelung als auch welche mit großflächig vom Beton abgelöstem Mörtel aufweist.

Eine Zeichnung des Probekörpers Pk3 zeigt Abbildung 4.5.

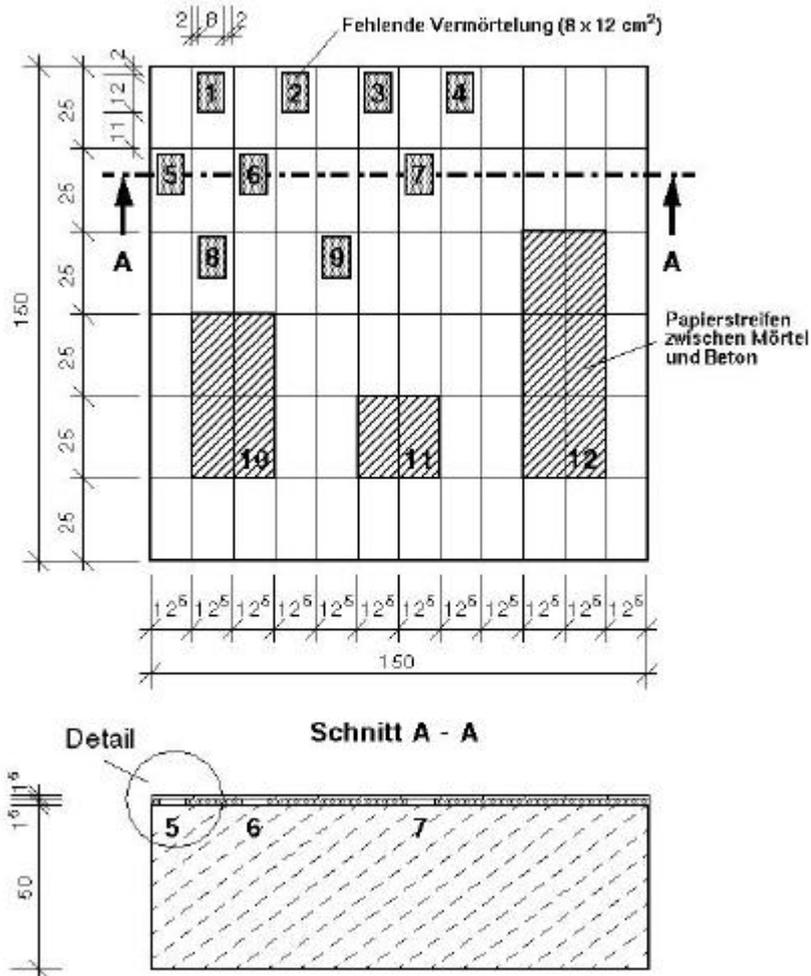


Abbildung 4.5 Ansicht und Schnitt des Probekörpers Pk3

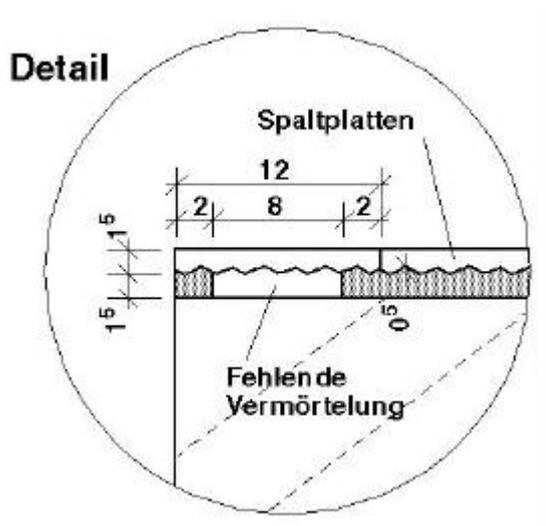


Abbildung 4.6 **Detail zu Schnitt A-A bei Probekörper Pk3**

Auf der Schalungsseite des Probekörpers wurden weiß-glasierte Spaltplatten von $0,120 \times 0,245 \times 0,015 \text{ m}^3$ im Dickbettverfahren verlegt. Zur Simulation der Vermörtelungsfehler wurden bei der Herstellung hinter verschiedenen Spaltplatten ca. $0,08 \times 0,12 \text{ m}^2$ große Aussparungen im Dickbett vorgenommen. In anderen Bereichen des Probekörpers wurden mit Papierblättern der Größe von zwei, vier und sechs Spaltplatten Ablösungen zwischen dem Dickbettmörtel und dem Beton erzeugt. Die Papierblätter wurden analog zum Probekörper Pk2 mit Silikon auf den Beton geklebt.

4.2 Messungen und Ergebnisse

4.2.1 Durchführung der Messungen (Messablauf)

Während des Aufbaus der Messapparatur wird zuerst die genaue Kameraposition über die Höhe der Kamera vom Boden, ihren Abstand zum Untersuchungsobjekt und ihren Winkel zur horizontalen Ebene protokolliert. Im Allgemeinen ist die Kamera senkrecht auf die zu untersuchende Oberfläche gerichtet.

Weiterhin werden die thermischen Randbedingungen Lufttemperatur und Luftfeuchtigkeit sowie gegebenenfalls die Emissivität der Oberfläche gemessen und neben dem Untersuchungsobjekt, dem Datum, der Uhrzeit, der Erwärmungszeit und dem Abstand der Erwärmungseinheit zum Bauteil bzw. Probekörper in das Messprotokoll eingetragen. Bei Bedarf können im Messprotokoll auch Skizzen vom Untersuchungsobjekt angefertigt werden.

Im Messprotokoll werden später auch noch die Dateinamen der aufgezeichneten thermischen Daten vermerkt. Zur Protokollierung des Ausgangszustandes wird vor der Erwärmung mit der Aufnahmesoftware (ThermaCAM Researcher 2000) ein einzelnes Thermogramm vom Probekörper als Bilddatei gespeichert.

Mit Hilfe eines Laptops wird die auszuführende Anzahl von Erwärmungszyklen à 30 s und damit die Erwärmungszeit festgelegt. Da die Infrarotstrahler der Wärmequelle nach dem Einschalten etwa 180 s benötigen, bevor sie ihre volle Strahlungsleistung erreichen, wird die Erwärmungseinheit erst mit Messbeginn vor das Untersuchungsobjekt geschoben. Der Erwärmungsvorgang wird über den Laptop gestartet und die Erwärmungszyklen werden ausgeführt. Anschließend wird die Erwärmungseinheit aus dem Sichtfeld der Infrarotkamera entfernt und mit der Aufzeichnung des Abkühlungsprozesses begonnen.

Der Abkühlungsprozess kann mit Hilfe der Infrarotkamera auf einem Monitor in Echtzeit verfolgt werden. Gleichzeitig gibt die Infrarotkamera über ihren Digitalausgang die Thermogramme an die angeschlossene Computereinheit weiter, wo die thermischen Bilddaten

mit der Aufnahmesoftware erfasst und mit einer vorher eingestellten Frequenz von maximal 50 Hz für einen festgelegten Zeitraum als Filmdatei gespeichert werden. Da die Daten digital aufgenommen und weiterverarbeitet werden, entstehen keine Verluste durch A/D- oder D/A-Wandlungen.

4.2.2 Durchführung der Auswertung (numerische Signalverarbeitung)

Für die Auswertung der Filmdateien wird ein auf der Makroprogrammiersprache PVWave (Version 7.01, Visual Numerics Inc.) basierendes Programm verwendet, welches in der BAM für die Auswertung der thermografischen Messdaten entwickelt wurde.

In einem ersten Arbeitsschritt werden die einzelnen Filmdateien in ein dreidimensionales zeit- und orts aufgelöstes Datenfeld umgewandelt, bei dem jedem Datenpunkt ein realer Temperaturwert in Grad Celsius zugeordnet ist. Das Datenfeld wird in einem internen Datenformat (.sav) von PVWave als Datei gespeichert.

Während dieser Datenkonvertierung können noch Korrekturen an den Daten vorgenommen werden. Sowohl am Anfang als auch am Ende der Filmdatei können beliebig viele Thermogramme abgeschnitten werden, um zum Beispiel übersteuerte Thermogramme zu entfernen. Weiterhin ist es zur Verminderung des thermischen Rauschens möglich, aufeinanderfolgende Bilder durch Mittelung zusammenzufassen, wodurch gleichzeitig die Datenmenge entsprechend reduziert wird. Für die im Rahmen der Arbeit ausgewerteten Messdaten wurde jeweils eine Mittelung über zehn Thermogramme vorgenommen.

Auch die Temperaturwerte selbst können noch korrigiert werden, was durch einen Austausch der Standardwerte aus der Messdatenerfassungssoftware mit den im Messprotokoll erfassten realen Daten erfolgt, sofern diese nicht schon bei der Datenerfassung eingegeben wurden. Im einzelnen können die Emissivität, die Luftfeuchtigkeit, die Lufttemperatur und der Abstand der Infrarotkamera zum Untersuchungsobjekt nachträglich noch verändert werden. Die als sav-Datei abgespeicherten Temperaturdatenfelder können mit dem Auswertungsprogramm jederzeit wieder zur Betrachtung und Auswertung eingelesen werden.

Für die Wiedergabe auf dem Bildschirm werden die einzelnen Thermogramme, welche intern mit einer Dynamik von 12 Bit abgespeichert sind, in zeitlicher Abfolge mit einer 8 Bit tiefen Grauwertkodierung, skaliert auf das Minimum und das Maximum des jeweiligen Thermogramms, dargestellt. In gleicher Darstellung können die Thermogramme auch als Einzelbilder im jpg-Format abgespeichert werden.

Zur Auswertung der konvertierten Messdaten wird zunächst ein Thermogramm mit gutem Kontrast anhand der in zeitlicher Abfolge zugeordneten Bildnummer ausgewählt. Das Thermogramm kann dann mit Hilfe im Programm implementierter Bildverarbeitungsfunktionen weiter bearbeitet werden. Im Rahmen dieser Arbeit war eine solche Einzelbildanalyse nicht erforderlich.

Der Hauptansatz für die quantitative Auswertung im Rahmen dieser Arbeit ist die Analyse von Temperatur-Zeit-Kurven über Fehl- und Referenzstellen. Das ausgewählte Diagramm dient dabei als Grundlage für die Erzeugung und Auswertung von Temperatur-Zeit-Kurven über orts aufgelösten Bereichen des Datenfeldes. Mit dem Cursor können im Thermogramm Datenpunkte bestimmt werden, für die direkt die Temperatur-Zeit-Kurven in einem anderen Programmfenster angezeigt werden.

Für die Auswertung von Temperatur-Zeit-Kurven werden nacheinander zwei Datenpunkte im Thermogramm ausgewählt. Mit dem Cursor wird zuerst ein Punkt über einem ungestörten Bereich als Referenzstelle und anschließend der Mittelpunkt der zu untersuchenden Fehlstelle markiert. Beide Punkte können entweder als Einzelpunkt oder als Mittelpunkt einer bezüglich der Punktanzahl frei zu wählenden quadratischen Fläche betrachtet werden. Für den zweiten

Fall wird der Temperatur-Zeit-Kurve jeweils der Mittelwert aus allen Punkten der Fläche als Temperaturwert zugewiesen. Nach der Erstellung werden beide Temperatur-Zeit-Kurven in dem bereits erwähnten Programmfenster dargestellt.

Weiterhin wird eine Temperaturdifferenzkurve der beiden Temperatur-Zeit-Kurven berechnet, wobei die Kurve über der Referenz von der Kurve über der Fehlstelle subtrahiert wird. Die Temperaturdifferenzkurve wird in einem zusätzlichen Programmfenster ausgegeben. Alle drei Kurven sowie die Zeitachse können im ascii-Format abgespeichert und mit handelsüblichen Tabellenkalkulations- bzw. Datenanalyseprogrammen ausgewertet und dargestellt werden. Abbildung 4.7 zeigt beispielhaft solche Temperatur-Zeit-Kurven über einer Fehlstelle und einer Referenz sowie deren entsprechende Temperaturdifferenzkurve.

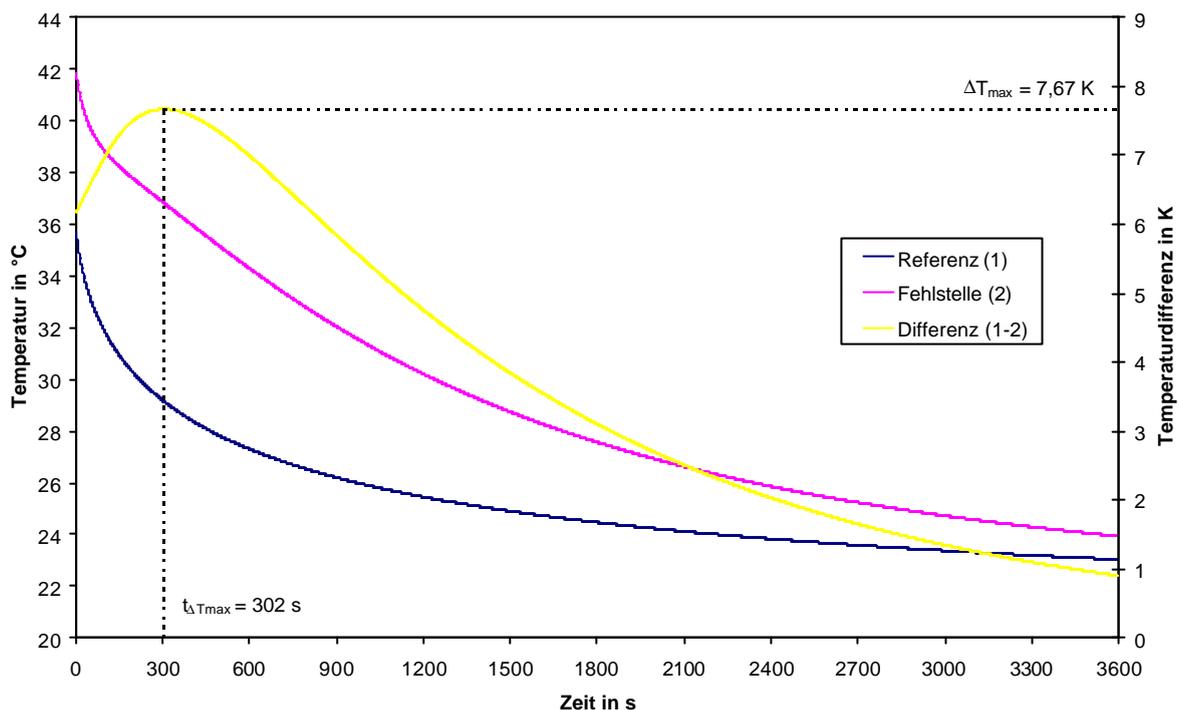


Abbildung 4.7 Temperatur-Zeit-Kurven über einer Referenz (1) und einer Fehlstelle (2) sowie die dazugehörige Differenzkurve (1-2)

Charakteristisch für die Differenzkurve ist das Auftreten einer maximalen Temperaturdifferenz DT_{max} zu einem bestimmten Zeitpunkt t_{DTmax} . Die maximale Temperaturdifferenz und der Zeitpunkt ihres Auftretens werden von diversen Geometrie- und Materialparametern sowie äußeren Randbedingungen beeinflusst. Die größten Abhängigkeiten bestehen zu der Fehlstellentiefe und der Erwärmungszeit. Nach einer entsprechenden Analyse des Einflusses der einzelnen Parameter und wegen der bekannten Erwärmungszeit kann mit Hilfe der beiden Werte demzufolge eine Tiefenbestimmung der Fehlstellen durchgeführt werden.

4.2.3 Ergebnisse

Beton mit Hohlstellen (Pk1)

An dem Probekörper Pk1 wurden sechs Messungen mit unterschiedlichen Erwärmungszeiten von 300, 600, 900, 1800, 2700 und 3600 s vorgenommen. Bei jeder Messung wurde nach der Erwärmung der Abkühlungsprozess zwei Stunden lang beobachtet und währenddessen alle 0,5 s ein Thermogramm aufgezeichnet. Durch die während der Datenkonvertierung durchgeführte Mittelung wurden für die Auswertung Thermografiefilme mit 1440 Thermogrammen und einem Zeitschritt von 5 s zwischen den einzelnen Bildern erzeugt.

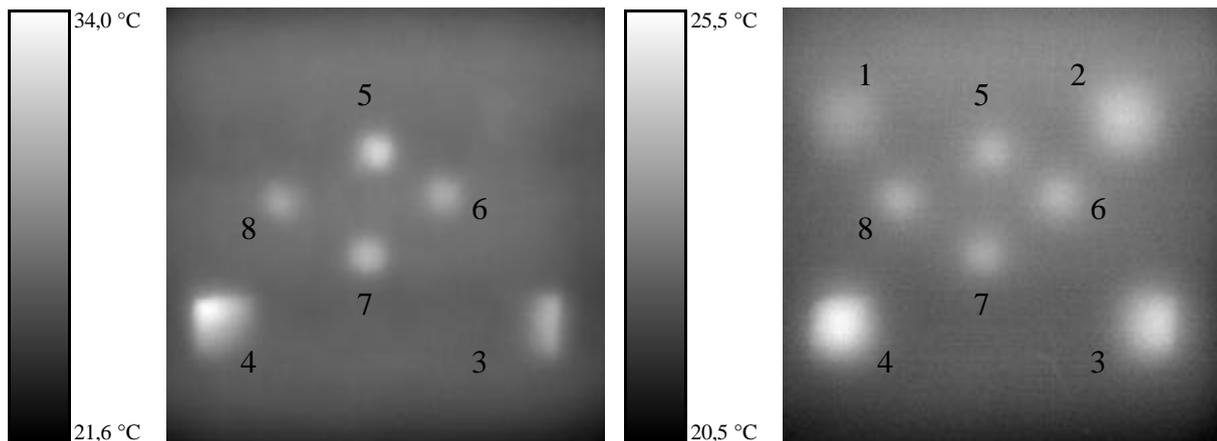


Abbildung 4.8 Thermogramme von Pk1 nach 900 s Erwärmung und 485 s (links) bzw. 2445 s (rechts) Abkühlung mit optimierter Temperaturskalierung

Für alle sechs Erwärmungszeiten konnten die acht in den Probekörper eingebauten Fehlstellen eindeutig geortet werden. Abbildung 4.8 zeigt beispielhaft zwei Thermogramme des Probekörpers mit optimierter Temperaturskalierung nach 900 s Erwärmung zu unterschiedlichen Zeitpunkten des Abkühlungsprozesses. Im linken Thermogramm 485 s nach Ende der Erwärmung zeichnen sich die oberflächennahen Fehlstellen mit einem guten Temperaturkontrast und die tieferen Fehlstellen noch gar nicht ab. Im rechten Thermogramm nach 2445 s sind dann auch die tieferen Fehlstellen deutlich zu erkennen, während der Temperaturkontrast für die flacheren Fehlstellen bereits abgenommen hat.

Die beiden Thermogramme lassen vermuten, dass die Einbautiefen der beiden Fehlstellen 7 und 8 geringer als geplant (0,06 m bzw. 0,08 m) sind, da diese schon nach relativ kurzer Zeit mit einem guten Temperaturkontrast zu sehen sind, was bei den in den gleichen Einbautiefen fixierten Fehlstellen 1 (0,08 m) und 2 (0,06 m) nicht der Fall ist.

Ferner ist anhand der Thermogramme festzustellen, dass zumindest die beiden Fehlstellen 3 und 4 schräg eingebaut sind, weil sie zuerst nur teilweise zu erkennen sind, und sie damit nur an den Fixierungspunkten in der Mitte der Fehlstelle die gewünschte Solltiefe aufweisen.

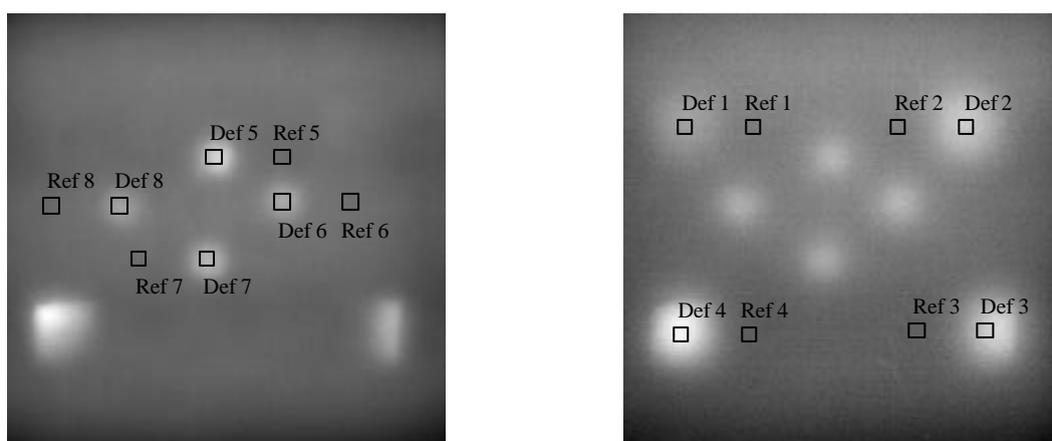


Abbildung 4.9 Thermogramme aus Abbildung 4.8 mit markierten Referenz- (Ref) und Fehlstellen (Def)

In Abbildung 4.9 sind die Fehlstellen mit den jeweils dazugehörigen Referenzstellen eingezeichnet, für die Temperatur-Zeit-Kurven berechnet und eine anschließende Auswertung durchgeführt wurden.

Das Diagramm in Abbildung 4.10 zeigt beispielhaft die Temperatur-Zeit-Kurven für die Fehlstelle 5 und die dazugehörige Referenzstelle sowie die aus beiden Kurven resultierende Differenzkurve bei einer Erwärmungszeit von 900 s. Die Differenzkurve wird durch Subtraktion der Temperaturwerte über der Fehlstelle von denen über der Referenzstelle berechnet.

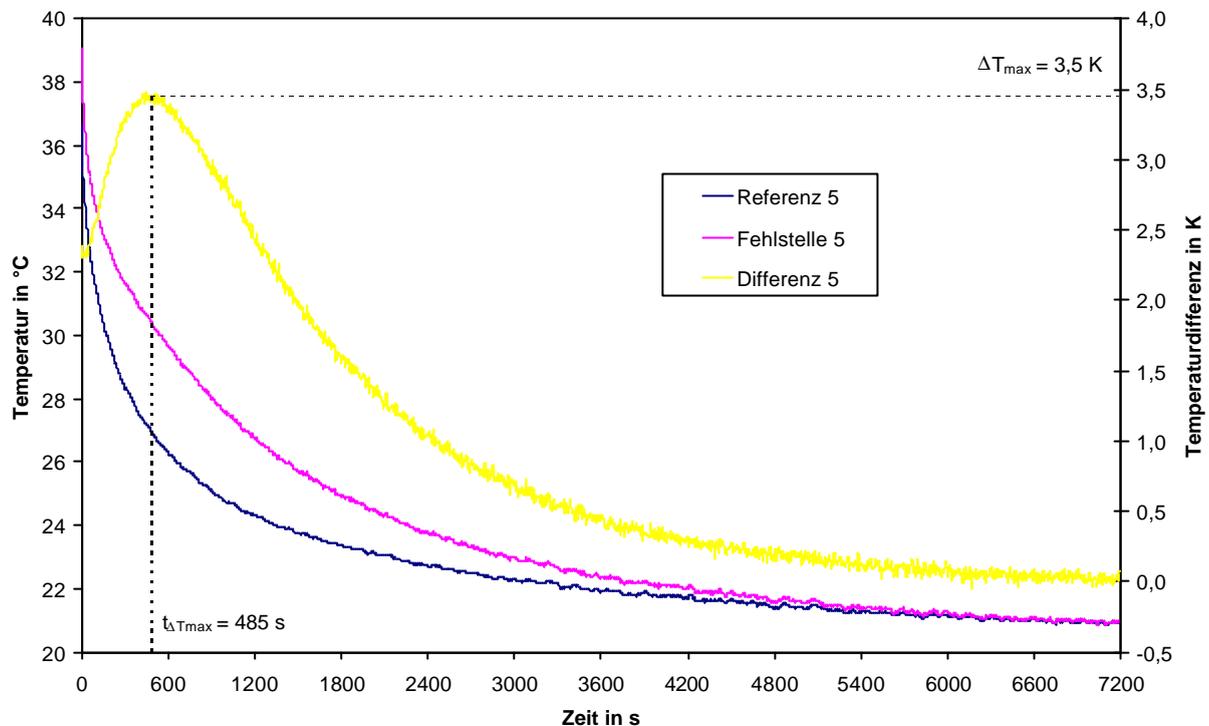


Abbildung 4.10 Temperatur-Zeit-Kurven über der Fehlstelle 5 und der Referenzstelle 5 sowie die dazugehörige Differenzkurve zwischen den beiden Temperatur-Zeit-Kurven nach 900 s Erwärmung

In Tabelle 4.4 sind die für die Differenzkurven charakteristischen Werte der maximalen Temperaturdifferenz DT_{max} und deren Zeitpunkt $t_{DT_{max}}$ für alle acht Fehlstellen bei den unterschiedlichen Erwärmungszeiten zusammengestellt. Für die Fehlstellen 4 und 7 war bei langen Erwärmungszeiten keine Auswertung möglich, da die Temperaturwerte über der Fehlstelle für den in Frage kommenden Zeitraum oberhalb des mit der Infrarotkamera im eingestellten Temperaturmessbereich (-10 °C bis 50 °C) maximal messbaren Wertes lagen.

Fehl- stelle	Erwärmungszeit											
	300 s		600 s		900 s		1800 s		2700 s		3600 s	
	DT_{max} in K	$t_{DT_{max}}$ in s										
1	0,2	3860	0,7	3700	0,7	3125	1,4	2915	2,0	2630	2,4	2570
2	0,4	2835	0,9	2645	1,5	2445	2,6	2100	3,5	2045	4,3	1575
3	0,8	1945	1,7	1545	2,3	1485	3,7	1375	5,4	1290	6,0	1175
4	1,7	1135	3,5	1055	4,7	940	8,4	655	-	-	-	-
5	1,4	600	2,7	525	3,5	485	5,4	325	6,6	300	7,3	285
6	1,2	735	2,1	600	3,0	585	4,8	390	6,1	330	6,9	295
7	2,2	385	4,0	290	5,5	280	8,5	160	-	-	-	-
8	1,0	885	1,8	765	2,6	605	4,1	515	5,8	370	6,4	350

Tabelle 4.4 Maximale Temperaturdifferenzen DT_{max} und Zeitpunkte $t_{DT_{max}}$ für die einzelnen Fehlstellen bei unterschiedlichen Erwärmungszeiten

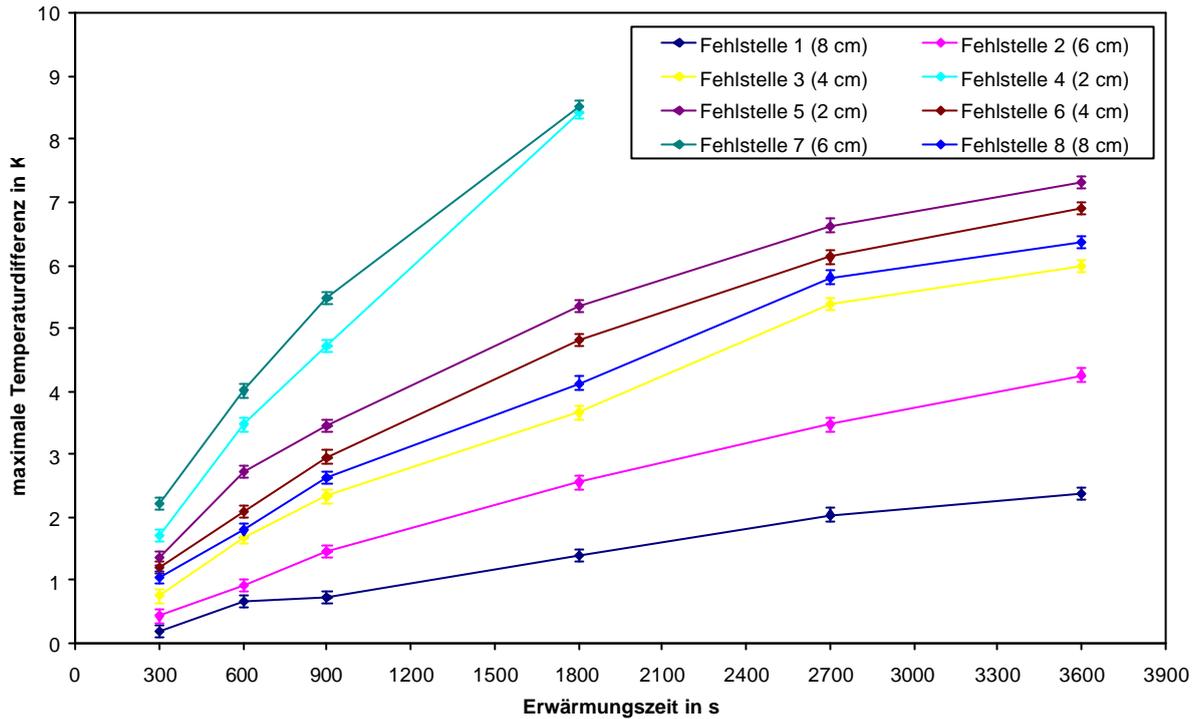


Abbildung 4.11 Maximale Temperaturdifferenzen für die einzelnen Fehlstellen mit Angabe der Solltiefen in Abhängigkeit der Erwärmungszeit

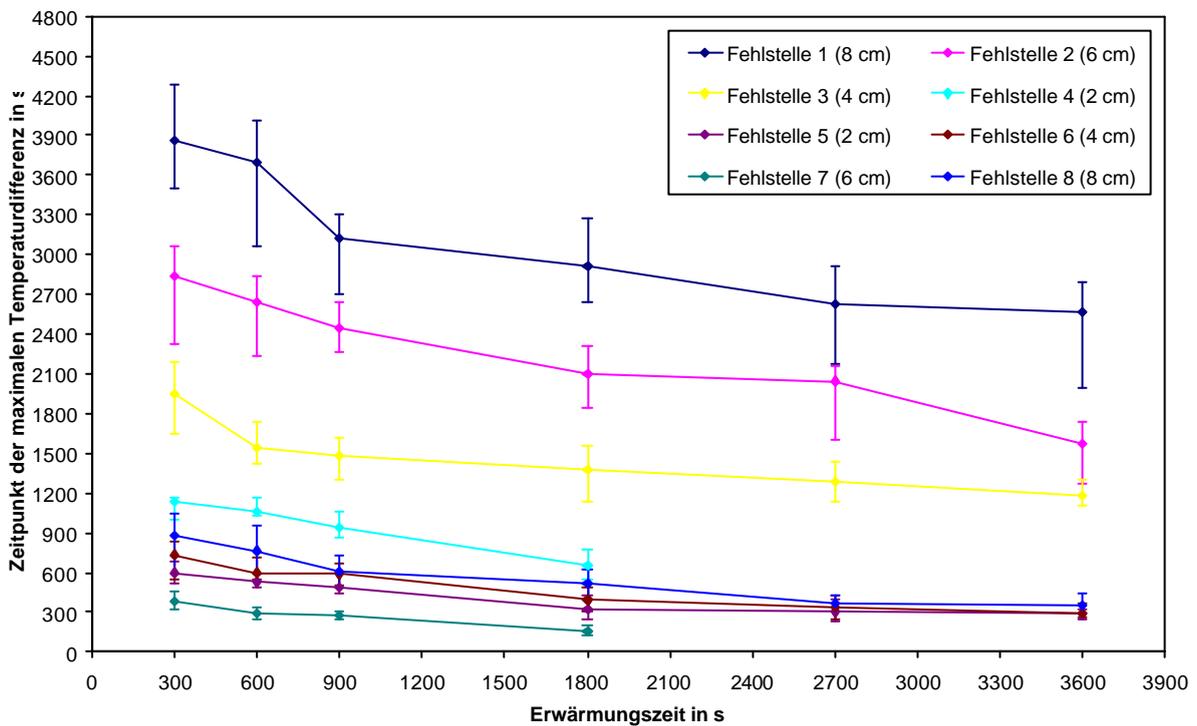


Abbildung 4.12 Zeitpunkte der maximalen Temperaturdifferenzen für die einzelnen Fehlstellen mit Angabe der Solltiefen in Abhängigkeit der Erwärmungszeit

Ausgehend von den mit der Infrarotkamera gemessenen Temperaturwerten kann die maximale Temperaturdifferenz DT_{max} im allgemeinen mit einer Genauigkeit von $\pm 0,1$ K bestimmt werden, was den Fehlerbalken in Abbildung 4.11 entspricht. Die dazugehörigen Zeitpunkte $t_{DT_{max}}$ können nur abgeschätzt werden. Abbildung 4.12 zeigt die Werte und die

Fehlerbalken, die graphisch anhand der jeweiligen Temperaturdifferenzkurve ermittelt wurden.

Wie bereits erwähnt bestehen die größten Abhängigkeiten der maximalen Temperaturdifferenz und ihres Zeitpunktes zu der Fehlstellentiefe und der Erwärmungszeit. Mit zunehmender Fehlstellentiefe sinkt DT_{max} und steigt $t_{DT_{max}}$ an. Je größer die Erwärmungszeit, desto größer wird auch DT_{max} , während $t_{DT_{max}}$ mit länger werdender Erwärmungszeit abnimmt, was die Abbildung 4.11 und die Abbildung 4.12 verdeutlichen.

Der genaue Einfluss der einzelnen Geometrie- und Materialparameter sowie der Randbedingungen werden mittels numerischer Simulationen im Kapitel 6 dieser Arbeit betrachtet. Unter Berücksichtigung dieser Ergebnisse wird im Kapitel 8 mit Hilfe von Simulationen eine Tiefenbestimmung anhand von DT_{max} und $t_{DT_{max}}$ durchgeführt.

Putzablösungen auf Beton (Pk2)

Der Probekörper Pk2 wurde mit Erwärmungszeiten von 180, 360 und 720 s untersucht. Der Abkühlungsprozess wurde bei jeder Messung 1800 s lang beobachtet. Die Aufzeichnung der Thermogramme erfolgte alle 0,2 s, so dass nach der Datenkonvertierung ein Thermografiefilm mit 900 Bildern und einem Zeitschritt zwischen den einzelnen Bildern von 2 s für die Auswertung zur Verfügung stand, weil wie bereits erwähnt über zehn Thermogramme gemittelt wurde.

Die Fehlstellen 2, 3, 7 und 10 aus ungelochtem Papier sind für alle drei Erwärmungszeiten eindeutig zu orten, während die gelochten Fehlstellen nur teilweise zu sehen sind. In Abbildung 4.13 sind zwei Thermogramme des Probekörpers mit optimierter Temperaturskalierung nach 360 s Erwärmung dargestellt.

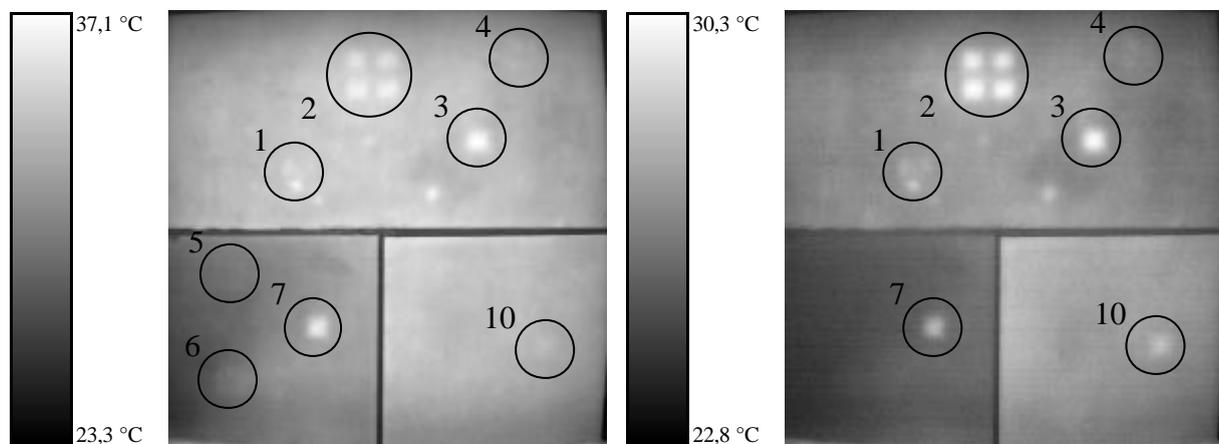


Abbildung 4.13 Thermogramme von Pk2 nach 360 s Erwärmung und 190 s (links) bzw. 329 s (rechts) Abkühlung mit optimierter Temperaturskalierung

Die beiden gelochten Fehlstellen 8 und 9 sind nicht zu erkennen, was auch bei den beiden anderen Erwärmungszeiten der Fall ist. Die Fehlstellen 4 und 6 können für alle drei Erwärmungszeiten geortet werden, allerdings mit einem deutlich schlechteren Temperaturkontrast als die ungelochten Fehlstellen. Die Fehlstelle 5 lässt sich nach Erwärmungszeiten von 360 s bzw. 720 s erahnen, ist aber praktisch nicht zu sehen. Bei der 15 mm dicken Putzschicht treten zudem einige ungewollt eingebrachte Inhomogenitäten auf, die deutlich in den Thermogrammen zu erkennen sind. Deshalb ist eine Beurteilung der Fehlstelle 1 schwierig, da sie von einer eben solchen überlagert wird.

Nach Ansicht der Thermografiefilme war eine weitere Auswertung nur für die Fehlstellen 3, 7 und 10 sinnvoll, da sich die anderen zu schwach abzeichnen. Die Fehlstelle 2 wurde nicht

ausgewertet, weil sich die Anordnung von mehreren Papierstücken nebeneinander thermisch kaum auswirkt, so dass die einzelnen Papierstücke der Fehlstelle 2 genau wie die Fehlstelle 3 betrachtet werden können.

Analog zu Probekörper Pk1 wurden für die auszuwertenden Fehlstellen Referenzstellen gewählt und jeweils für beide Temperatur-Zeit-Kurven berechnet. Beispielhaft werden für eine Erwärmungszeit von 360 s die beiden Temperatur-Zeit-Kurven für die Fehlstelle 7 und ihre Referenzstelle sowie deren Differenzkurve in Abbildung 4.14 gezeigt.

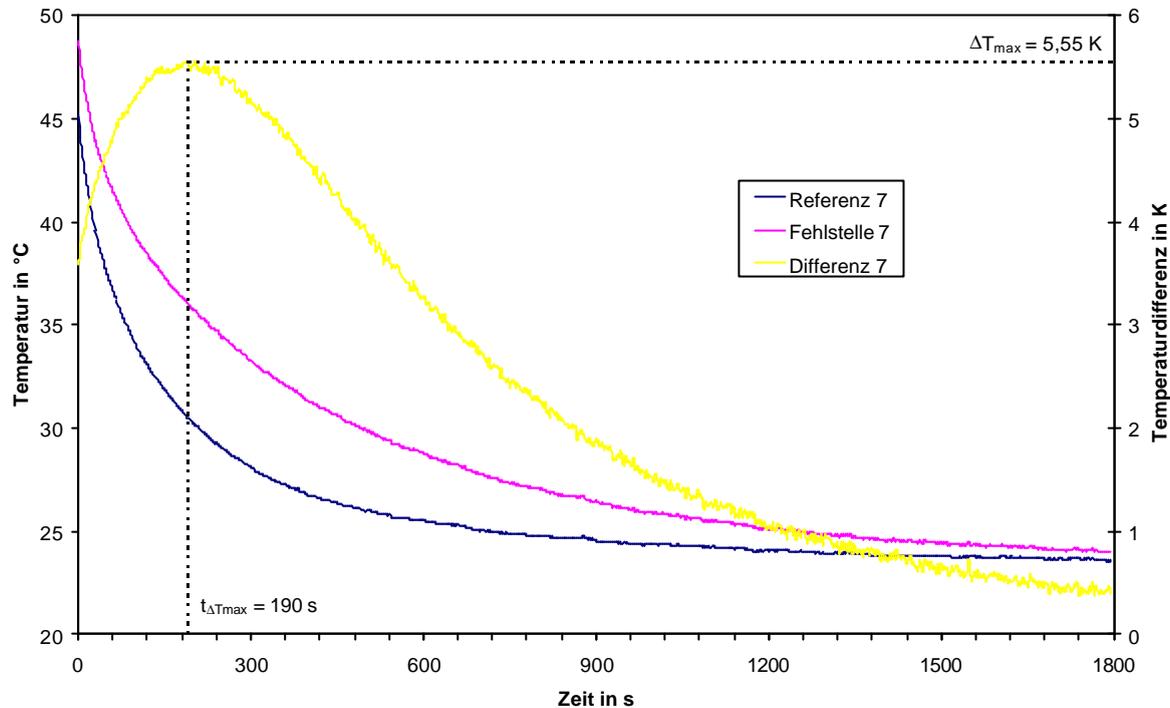


Abbildung 4.14 Temperatur-Zeit-Kurven über der Fehlstelle 7 und ihrer Referenzstelle sowie die dazugehörige Differenzkurve zwischen den beiden Temperatur-Zeit-Kurven nach 360 s Erwärmung

Analog zu den Betrachtungen an Pk1 lassen sich für alle Differenzkurven jeweils eine maximale Temperaturdifferenz DT_{max} zu einem bestimmten Zeitpunkt $t_{DT_{max}}$ feststellen. Die Werte für die maximale Temperaturdifferenzen und deren Zeitpunkte sind für die ausgewerteten Fehlstellen 3, 7 und 10 mit den entsprechenden Erwärmungszeiten in der Tabelle 4.5 aufgeführt.

Fehlstelle	Putzdicke	Erwärmungszeit					
		180 s		360 s		720 s	
		DT_{max} in K	$t_{DT_{max}}$ in s	DT_{max} in K	$t_{DT_{max}}$ in s	DT_{max} in K	$t_{DT_{max}}$ in s
7	1,0	3,38	254	5,55	190	9,15	118
3	1,5	1,78	430	3,26	394	6,04	264
10	2,0	0,71	746	0,94	658	1,74	566

Tabelle 4.5 Maximale Temperaturdifferenzen DT_{max} und Zeitpunkte $t_{DT_{max}}$ für die einzelnen Fehlstellen bei unterschiedlichen Erwärmungszeiten

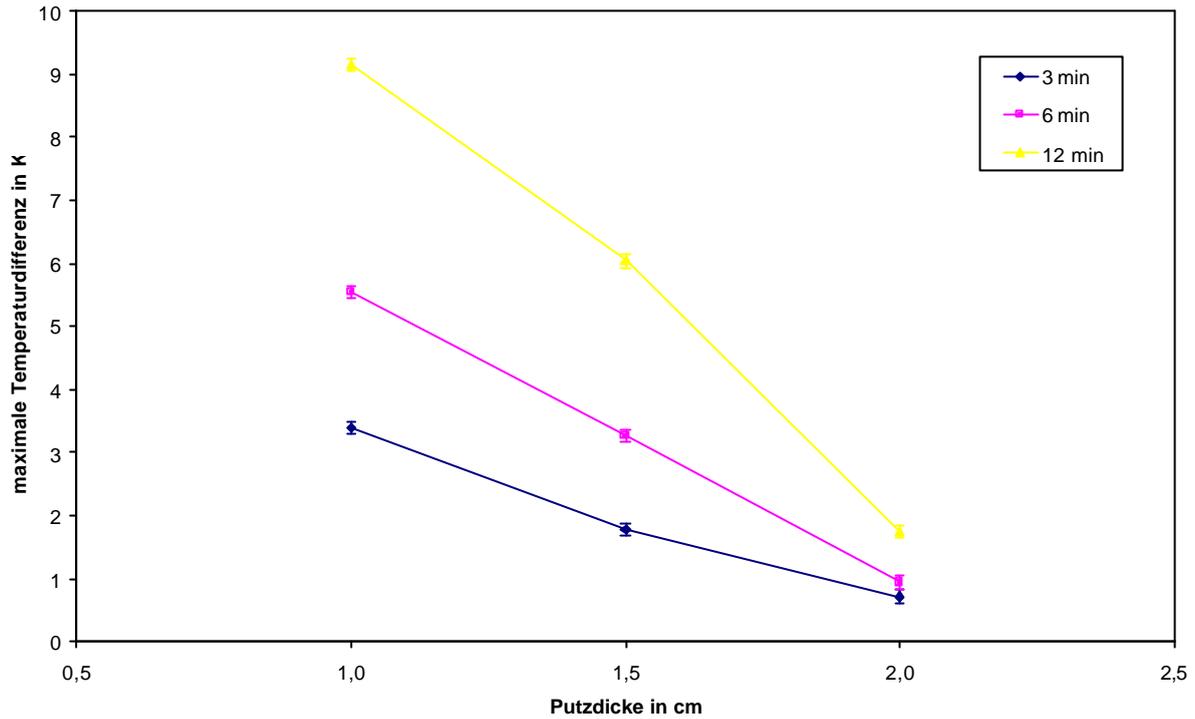


Abbildung 4.15 Maximale Temperaturdifferenzen für die einzelnen Fehlstellen in Abhängigkeit der Putzdicke

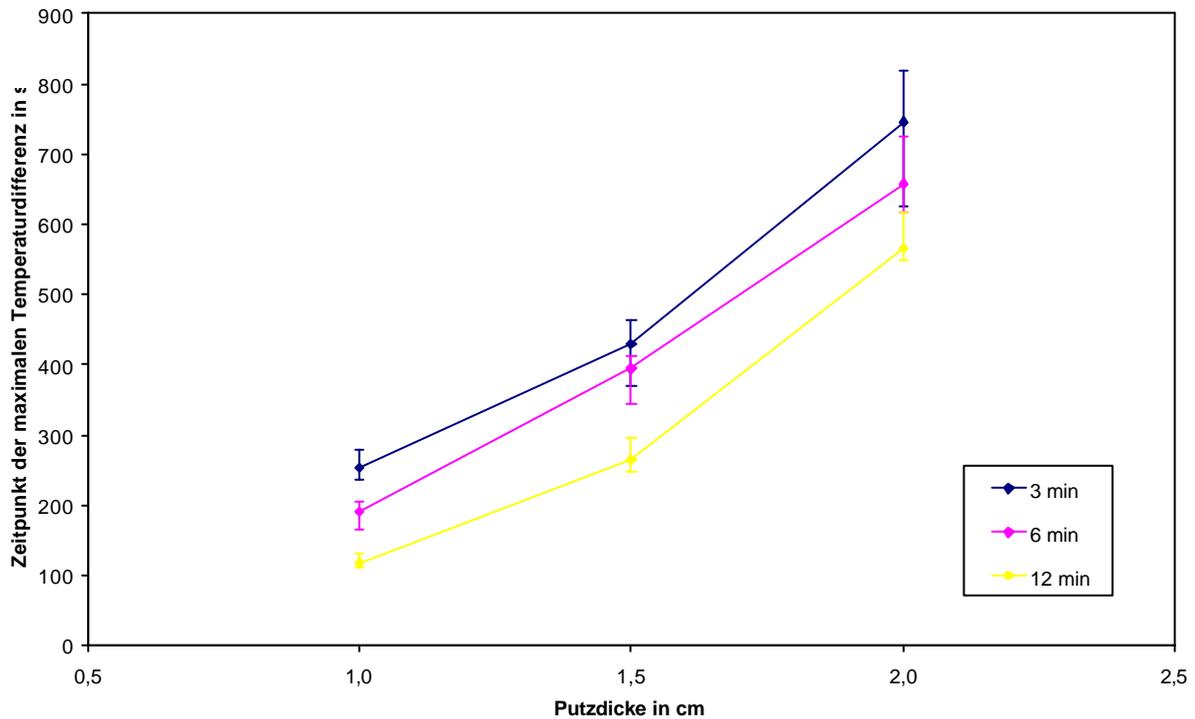


Abbildung 4.16 Zeitpunkte der maximalen Temperaturdifferenzen für die einzelnen Fehlstellen in Abhängigkeit der Putzdicke

In Abbildung 4.15 sind DT_{max} und in Abbildung 4.16 $t_{DT_{max}}$ für die drei Fehlstellen 3, 7 und 10 in Abhängigkeit der Putzdicke dargestellt. Je dicker die Putzdicke ist, desto kleiner ist DT_{max} und desto größer ist $t_{DT_{max}}$. Analog zu Pk1 steigt DT_{max} mit längerer Erwärmungszeit, während $t_{DT_{max}}$ gleichzeitig abnimmt.

Spaltklinker auf Beton (Pk3)

Der Probekörper Pk3 wurde mit Erwärmungszeiten von 180 s, 360 s und 720 s betrachtet. Die Aufnahmeparameter wurden analog zum Probekörper Pk2 gewählt.

Sowohl die durch fehlende Vermörtelung direkt hinter den Spaltklinkern erzeugten Hohlräume (Fehlstellen 1 bis 9) als auch die mit Papierstreifen hergestellten Ablösungen zwischen Dickbettmörtel und Beton (Fehlstellen 10 bis 12) sind mit Hilfe der Impuls-Thermografie zu detektieren. Abbildung 4.17 zeigt zwei Thermogramme des Probekörpers Pk3 nach 360 s Erwärmung mit optimierter Temperaturskalierung.

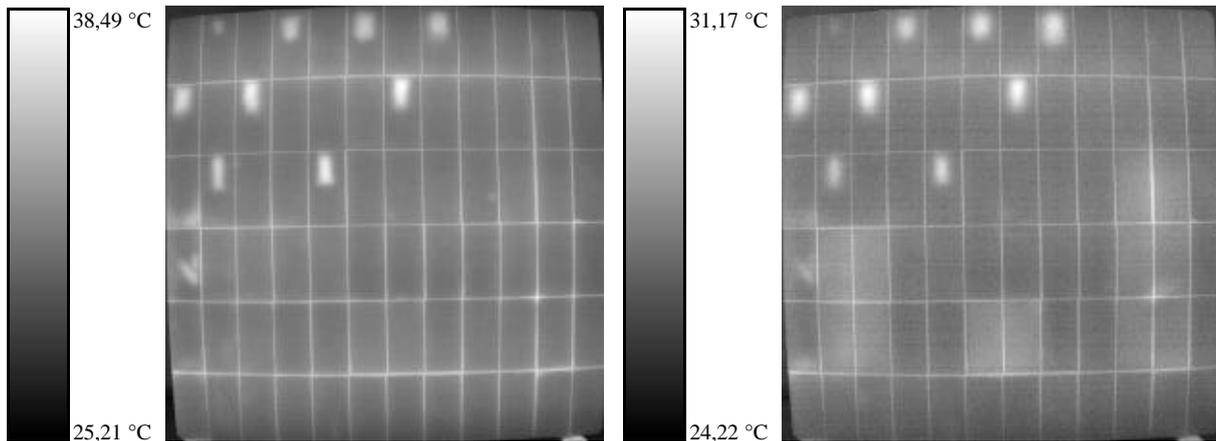


Abbildung 4.17 Thermogramme von Pk3 nach 360 s Erwärmung und 46 s (links) bzw. 410 s (rechts) Abkühlung mit optimierter Temperaturskalierung

Im linken Thermogramm nach 46 s Abkühlung sind zunächst nur die Fehlstellen 1 bis 9 mit einem sehr guten Temperaturkontrast sowie zwei ungewollt eingebrachte Störstellen hinter den beiden mittigen Spaltklinkern ganz links zu erkennen. Dabei ist der Wärmestau über den Fehlstellen 6,7 und 9 naturgemäß deutlich größer als bei den randnahen Fehlstellen 1 bis 5 und 8. Im rechten Thermogramm 410 s nach der Abschaltung der Wärmequellen sind dann auch die Fehlstellen 10 bis 12 zu sehen.

Eine weiterführende Auswertung analog zu Probekörper Pk1 wurde nur für die Fehlstellen 6,7 und 9 sowie 10 bis 12 durchgeführt. In Abbildung 4.18 und Abbildung 4.19 sind beispielhaft die Temperatur-Zeit-Kurven für die Fehlstellen 9, 11 und den jeweiligen Referenzstellen sowie die resultierenden Temperaturdifferenzkurven dargestellt.

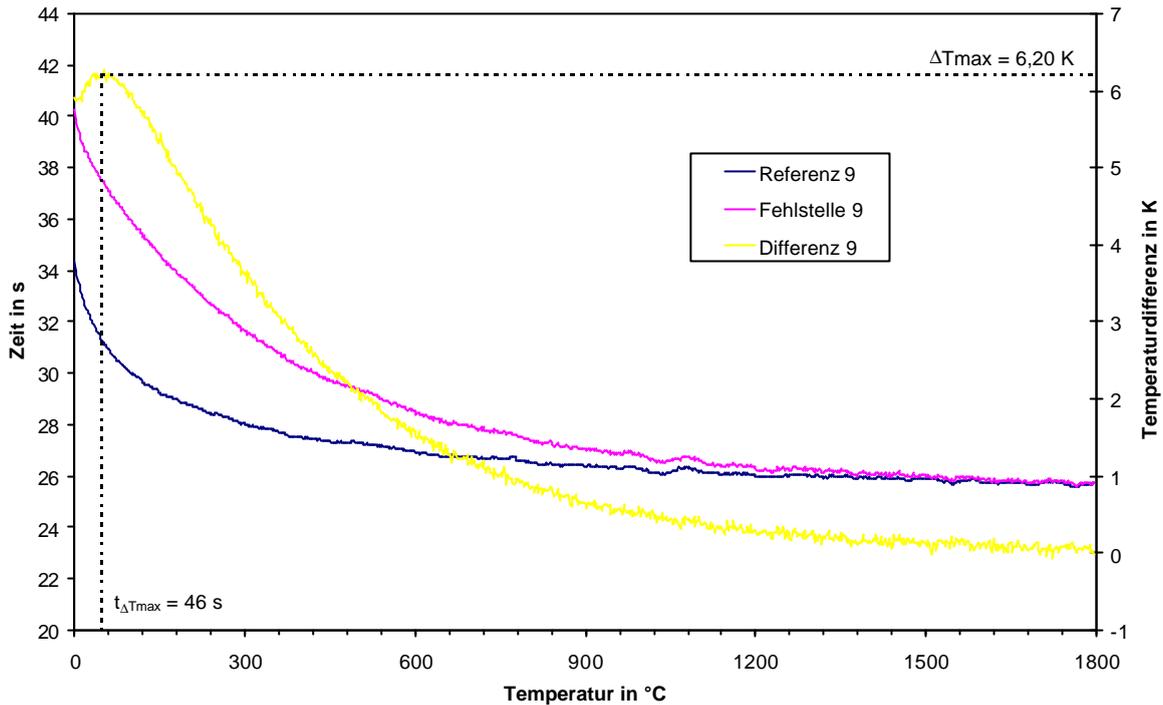


Abbildung 4.18 Temperatur-Zeit-Kurven über der Fehlstelle 9 und ihrer Referenzstelle sowie der dazugehörigen Differenzkurve nach 360 s Erwärmung

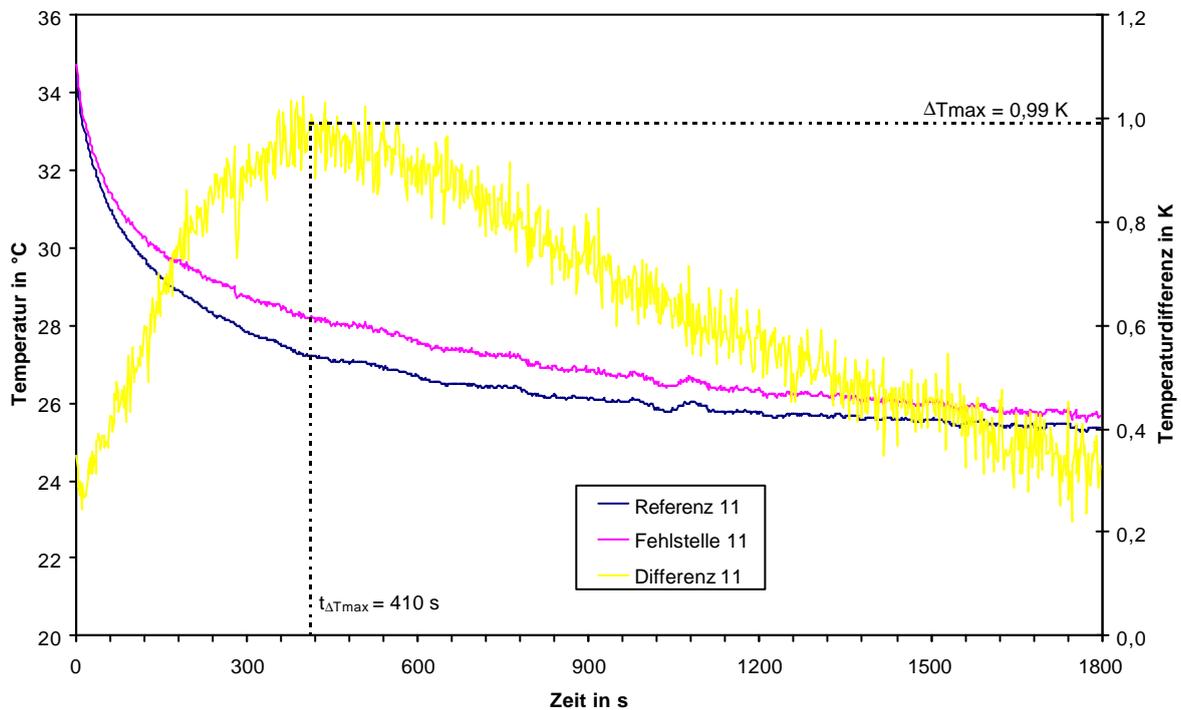


Abbildung 4.19 Temperatur-Zeit-Kurven über der Fehlstelle 11 und ihrer Referenzstelle sowie der dazugehörigen Differenzkurve nach 360 s Erwärmung

Für alle Differenzkurven kann analog zu Pk1 die maximale Temperaturdifferenz DT_{max} und der Zeitpunkt $t_{DT_{max}}$ bestimmt werden. Die Werte für DT_{max} und $t_{DT_{max}}$ sind für die ausgewerteten Fehlstellen in der Tabelle 4.6 zusammengefasst.

Fehlstelle	Erwärmungszeit					
	180 s		360 s		720 s	
	DT_{max} in K	t_{DTmax} in s	DT_{max} in K	t_{DTmax} in s	DT_{max} in K	t_{DTmax} in s
6	3,27	102	5,81	70	8,71	34
7	3,66	92	5,96	58	8,89	20
9	3,63	78	6,20	46	8,79	22
10	0,65	506	1,07	438	1,67	338
11	0,56	502	0,99	410	1,56	298
12	0,37	542	0,53	416	1,36	338

Tabelle 4.6 Maximale Temperaturdifferenzen DT_{max} und Zeitpunkte t_{DTmax} für die einzelnen Fehlstellen bei verschiedenen Erwärmungszeiten

Analog zu Pk1 und Pk2 vergrößert sich DT_{max} für längere Erwärmungszeiten, während t_{DTmax} gleichzeitig immer kleiner wird. Der deutlich größere Einfluss der Tiefe als die Fläche auf DT_{max} und t_{DTmax} lässt sich bei einem Vergleich der erheblich kleineren Fehlstellen 6, 7 und 9 mit den dafür deutlich tieferen Fehlstellen 10, 11 und 12 erkennen.

5 Entwicklung des Simulationsprogramms

5.1 Finite-Differenzen-Methode für instationäre Wärmeleitung

Für die Simulation von instationären Wärmeleitungen können sowohl die Finite-Differenzen-Methode als auch die Finite-Elemente-Methode verwendet werden. Im allgemeinen sind die Berechnungen mit Hilfe der Finite-Elemente-Methode stabiler, jedoch auch wesentlich zeitintensiver in Bezug auf die Systemerstellung und die Rechenzeit. Wegen der Vielzahl im Rahmen dieser Arbeit durchgeführten Simulationen wurde daher die Finite-Differenzen-Methode verwendet.

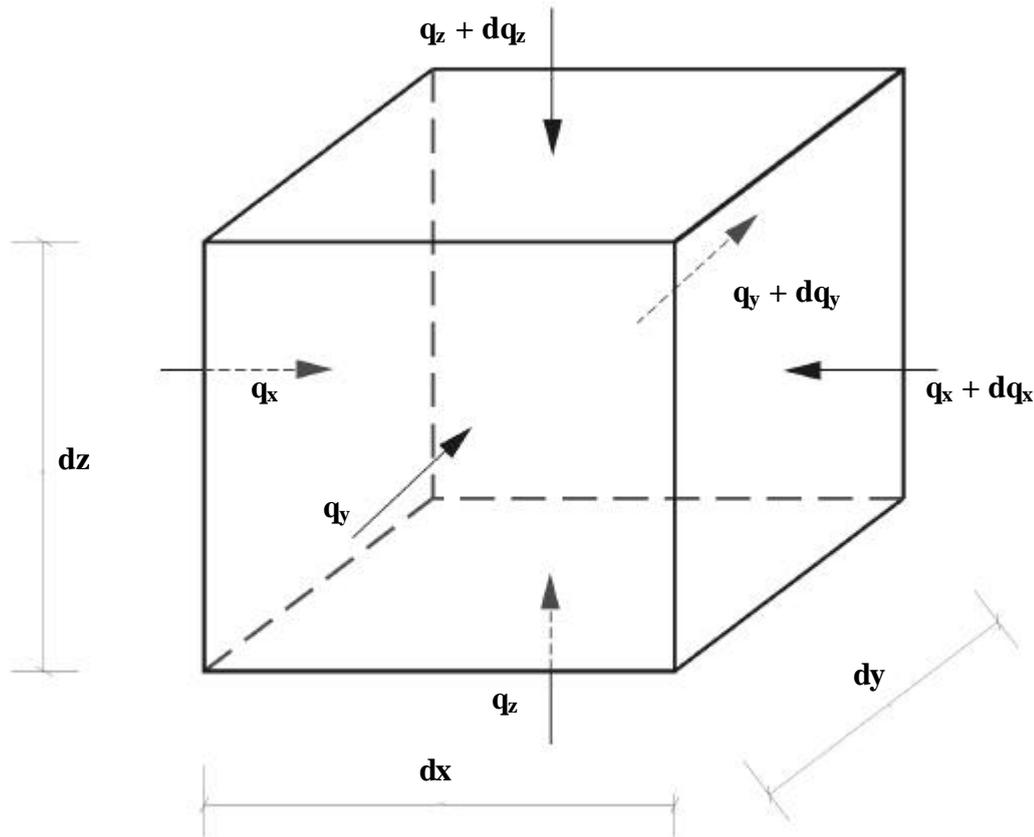


Abbildung 5.1 Wärmestromdichten für ein finites Volumenelement dV

Die Grundlage für die Berechnung der instationären Wärmeleitung innerhalb eines Festkörpers bildet der erste Hauptsatz der Thermodynamik. Für das Volumenelement dV [m³], dargestellt in Abbildung 5.1 mit den Weginkrementen dx [m], dy [m] und dz [m], eines inkompressiblen Festkörpers gilt:

$$\mathbf{r} \cdot c_p \frac{\partial T(x, y, z, t)}{\partial t} = -\nabla q(x, y, z, t) \quad (3)$$

mit \mathbf{r} [kg/m³] als Rohdichte, c_p [J/(kg K)] als spezifische Wärmekapazität bei konstantem Druck, T [°C] als Temperatur, t [s] als Zeit, q [W/m²] als Wärmestromdichte und x [m], y [m], z [m] als Koordinaten im Raum.

Über das Fouriersche Gesetz der Wärmeleitung lässt sich die Wärmestromdichte mit dem Gradienten des Temperaturfeldes verknüpfen:

$$q(x, y, z, t) = -\mathbf{I} \cdot \nabla T(x, y, z, t) \quad (4)$$

mit I [W/(m K)] als Wärmeleitfähigkeit.

Für eine konstante Wärmeleitfähigkeit ergibt sich dann aus den Gleichungen (3) und (4) die Fouriersche Differentialgleichung der Wärmeleitung:

$$\mathbf{r} \cdot c_p \frac{\partial T(x, y, z, t)}{\partial t} = I \cdot \nabla^2 T(x, y, z, t) \quad (5)$$

Mit Hilfe von Taylorschen Polynomen in x , y , z und t kann diese parabolische Differentialgleichung in eine Differenzengleichung umgewandelt werden [21]. Ausgehend von einem Volumenelement dV , in dem zu einem Zeitpunkt t die Temperatur T bekannt ist, kann die Temperatur der sechs angrenzenden Volumenelemente sowie die des nächsten Zeitschritts über den Satz von Taylor berechnet werden. Stellt man diese Gleichungen so um, dass die einzelnen Terme aus Gleichung (5) substituiert werden können und vernachlässigt die aus den Restgliedern der Taylorentwicklung entstandenen Terme, dann erhält man:

$$\begin{aligned} \mathbf{r} \cdot c_p \frac{T(x, y, z, t + dt) - T(x, y, z, t)}{dt} = & \\ I \cdot \left(\frac{T(x + dx, y, z, t) - 2 \cdot T(x, y, z, t) + T(x - dx, y, z, t)}{dx^2} \right. & \\ + \frac{T(x, y + dy, z, t) - 2 \cdot T(x, y, z, t) + T(x, y - dy, z, t)}{dy^2} & \\ \left. + \frac{T(x, y, z + dz, t) - 2 \cdot T(x, y, z, t) + T(x, y, z - dz, t)}{dz^2} \right) & \end{aligned} \quad (6)$$

Der Fehler F , der sich aus dieser Umwandlung ergibt, ist die Summe der Terme, die auf den Restgliedern der einzelnen Taylorpolynome basieren, mit $\mathbf{J}_t, \mathbf{J}_x, \mathbf{J}_y, \mathbf{J}_z \in (0,1)$:

$$\begin{aligned} F = \frac{\partial^2 T(x, y, z, \mathbf{J}_t \cdot t)}{\partial t^2} \frac{dt}{2} - a^2 \frac{\partial^4 T(\mathbf{J}_x \cdot x, y, z, t)}{\partial x^4} \frac{dx^2}{12} & \\ - a^2 \frac{\partial^4 T(x, \mathbf{J}_y \cdot y, z, t)}{\partial y^4} \frac{dy^2}{12} - a^2 \frac{\partial^4 T(x, y, \mathbf{J}_z \cdot z, t)}{\partial z^4} \frac{dz^2}{12} & \end{aligned} \quad (7)$$

Die Temperatur T eines jeden Volumenelementes dV für den nächsten Zeitschritt dt ist folglich:

$$\begin{aligned} T(x, y, z, t + dt) = T(x, y, z, t) + dt \cdot a \cdot \left(\frac{T(x + dx, y, z, t) - 2 \cdot T(x, y, z, t) + T(x - dx, y, z, t)}{dx^2} \right. & \\ + \frac{T(x, y + dy, z, t) - 2 \cdot T(x, y, z, t) + T(x, y - dy, z, t)}{dy^2} & \\ \left. + \frac{T(x, y, z + dz, t) - 2 \cdot T(x, y, z, t) + T(x, y, z - dz, t)}{dz^2} \right) & \end{aligned} \quad (8)$$

Bei dieser auch als aufsteigendes Differenzenverfahren bekannten Methode muss die Stabilitätsbedingung

$$a \cdot \frac{dt}{dx^2} \leq \frac{1}{6} \quad (9)$$

für dx und analog auch für dy und dz eingehalten werden [21].

Wärmeleitfähigkeit

Bei der in Gleichung (8) enthaltenen Temperaturleitfähigkeit a sind für ein Volumenelement dV die Rohdichte ρ und die spezifische Wärmekapazität c_p eindeutig bestimmt. Nur die effektive Wärmeleitfähigkeit I hängt sowohl von dem betrachteten als auch von dem jeweils angrenzenden Volumenelement ab, mit dem der Wärmeaustausch stattfindet. Für sie gilt nach [22] für zwei benachbarte Volumenelemente dV_1 mit I_1 und dV_2 mit I_2 analog dem Wärmeübergang bei Schichten

$$I = \frac{dV_1 + dV_2}{\frac{dV_1}{I_1} + \frac{dV_2}{I_2}} \quad (10)$$

Haben die Volumenelemente so wie in diesem Fall die gleiche Größe, dann vereinfacht sich die Gleichung zu

$$I = \frac{2 \cdot I_1 \cdot I_2}{I_1 + I_2} \quad (11)$$

5.2 Randbedingungen

5.2.1 Ausgangstemperatur

Die Ausgangs- und die Umgebungstemperatur T_0 [°C] werden vereinfachend als konstant angenommen. In der Realität trifft dieses zwar nur bedingt mit einer nicht näher bestimmten Schwankungsbreite zu, jedoch ist diese im Verhältnis zu den durch die Erwärmung aufgetragenen Temperaturänderungen vernachlässigbar klein.

5.2.2 Wärmestromdichte

An allen freien Oberflächen des Probekörpers findet ein Wärmeaustausch des Festkörpers und der Luft über Konvektion und Strahlung statt. Die Probekörper wurden so dimensioniert, dass die Wärmeverluste an den Seitenflächen und der Rückwand die Messungen praktisch nicht beeinflussen. Demzufolge wurden die Wärmeverluste auch bei den Simulationen nur bei der bestrahlten Oberfläche betrachtet. Die Wärmestromdichte q an dieser Oberfläche ist gegeben durch:

$$q = q_q - q_{kon} - q_{rad} \quad (12)$$

mit q_q [W/m²] als Wärmestromdichte der künstlichen Wärmequelle, q_{kon} [W/m²] als Konvektionsverluste und q_{rad} [W/m²] als Strahlungsverluste.

Wärmeverluste

Die Strahlungsverluste q_{rad} können sehr einfach mit Hilfe des Stefan-Boltzmannschen Gesetzes erfasst werden:

$$q_{rad} = \epsilon \mathbf{s}_s (T^4 - T_0^4) \quad (13)$$

mit ϵ als Emissivität und \mathbf{s}_s^a als Stefan-Boltzmann-Konstante, wobei die Emissivität für die einzelnen Baustoffe aus der Literatur zu entnehmen oder gegebenenfalls experimentell zu bestimmen ist [23].

Die Konvektionsverluste q_{kon} werden durch das Newtonsche Gesetz

^a $\mathbf{s}_s = 5,67 \times 10^{-7} \text{ W}/(\text{m}^2 \text{ K}^4)$

$$q_{kon} = \mathbf{a}_{kon} (T - T_0) \quad (14)$$

berücksichtigt. Der konvektive Wärmeübergangskoeffizient \mathbf{a}_{kon} [W/(m² K)] ist jedoch ebenfalls von der Temperatur abhängig. Eine ausführliche Herleitung des Koeffizienten wird im VDI-Wärmeatlas [24] beschrieben. Im folgenden sind die wichtigsten Ausführungen dazu sowie einige Annahmen zusammengefasst. Die Berechnung von \mathbf{a}_{kon} erfolgt direkt aus der Definition der Nußelt-Zahl Nu :

$$Nu = \frac{\mathbf{a}_{kon} \cdot l}{\mathbf{I}_{Luft}} \quad (15)$$

mit l [m] als überströmter Länge des Bauteils bzw. Probekörpers und \mathbf{I}_{Luft} [W/(m K)] als Wärmeleitfähigkeit der Luft.

Definitionsgemäß ist die Nußelt-Zahl nach [25]:

$$Nu = \sqrt[3]{Nu_{frei}^3 + Nu_{erzw}^3} \quad (16)$$

mit Nu_{frei} als Nußelt-Zahl für freie und Nu_{erzw} als Nußelt-Zahl für erzwungene Konvektion.

Nach [26] ist die Nußelt-Zahl für freie Konvektion:

$$Nu_{frei} = \left(0,825 + 0,387 \cdot \left(Ra \cdot \cos g \cdot \left(1 + \left(\frac{0,492}{Pr_{Luft}} \right)^{\frac{9}{16}} \right)^{\frac{16}{9}} \right)^{\frac{1}{6}} \right)^2 \quad (17)$$

mit Ra als Rayleigh-Zahl für $10^{-1} \leq Ra \leq 10^{12}$, mit g als Neigungswinkel gegenüber der Vertikalen und Pr_{Luft} als Prandtl-Zahl der Luft. Für den Fall, dass die Rayleigh-Zahl größer als die kritische Rayleighzahl definiert durch $Ra_c = 10^{(8,9 - 0,00178g^{1,82})}$ ist, darf die Gleichung (17) nicht mehr angewendet werden, sondern die Nußelt-Zahl für freie Konvektion muss nach Gleichung (18) berechnet werden.

$$Nu_{frei} = 0,56 \cdot (Ra_c \cdot \cos g)^{\frac{1}{4}} + 0,13 \cdot \left(Ra^{\frac{1}{3}} - Ra_c^{\frac{1}{3}} \right) \quad (18)$$

Weiterhin gilt nach [27] für die erzwungene Konvektion:

$$Nu_{erzw} = \sqrt{Nu_{erzw,lam}^2 + Nu_{erzw,turb}^2} \\ = \sqrt{\left(0,664 \cdot \sqrt{Re_{Luft}} \cdot \sqrt[3]{Pr_{Luft}} \right)^2 + \left(\frac{0,037 \cdot Re_{Luft}^{0,8} \cdot Pr_{Luft}}{1 + 2,443 \cdot Re_{Luft}^{-0,1} \cdot \left(Pr_{Luft}^{\frac{2}{3}} - 1 \right)} \right)^2} \quad (19)$$

Die in den Gleichungen (17), (18) und (19) verwendete Rayleigh-Zahl Ra , die in ihr enthaltene Grashof-Zahl Gr und die Reynolds-Zahl Re sind gegeben durch

$$Ra = Pr_{Luft} \cdot Gr_{Luft} \quad (20)$$

$$Gr_{Luft} = \frac{g \cdot l^3 \cdot (T - T_0)}{(T_0 + 273,15K) \cdot \mathbf{n}_{Luft}^2} \quad (21)$$

$$Re_{Luft} = \frac{v_{Luft} \cdot l}{\mathbf{n}_{Luft}} \quad (22)$$

mit g^b als Erdbeschleunigung, \mathbf{n}_{Luft} [m²/s] als kinematische Viskosität und v_{Luft} [m/s] als mittlere Geschwindigkeit der Luft, welche bei den experimentellen Messungen aufgezeichnet und für die Simulationsrechnungen vereinfacht in Form des jeweiligen Mittelwerts mit 0,5 m/s während der Erwärmungszeit und 0,2 m/s während der Abkühlungsphase angenommen wurde.

Die Wärmeleitfähigkeit \mathbf{I} aus Gleichung (15), die kinematische Viskosität \mathbf{n} aus den Gleichungen (21) und (22) und die Prandtl-Zahl Pr aus den Gleichungen (19) und (20) jeweils für Luft werden zur Vereinfachung durch linearisierte Funktionen ausgehend von den jeweiligen Werten für 20 °C und 40 °C angenähert:

$$\mathbf{I}_{Luft} = 0,735 \cdot 10^{-4} \frac{W}{m \cdot K \cdot ^\circ C} \cdot T_M + 0,02422 \frac{W}{m \cdot K} \quad (23)$$

$$\mathbf{n}_{Luft} = 0,955 \cdot 10^{-7} \frac{m^2}{s \cdot ^\circ C} \cdot T_M + 0,1344 \cdot 10^{-4} \frac{m^2}{s} \quad (24)$$

$$Pr_{Luft} = -0,00013 ^\circ C^{-1} \cdot T_M + 0,7174 \quad (25)$$

mit T_M [°C] als mittlere Temperatur.

Der konvektive Wärmeübergangskoeffizient \mathbf{a}_{kon} ist demzufolge

$$\mathbf{a}_{kon} = \frac{Nu \cdot \mathbf{I}_{Luft}}{l} = \frac{\sqrt[3]{Nu_{frei}^3 + Nu_{erzw}^3} \cdot (0,735 \cdot 10^{-4} \frac{W}{m \cdot K \cdot ^\circ C} \cdot T_M + 0,02422 \frac{W}{m \cdot K})}{l} \quad (26)$$

Wärmestromdichte der künstlichen Wärmequelle

Für die Oberflächentemperatur T eines semiinfiniten Körpers gilt unter adiabatischen Bedingungen bei konstanter Wärmestromdichte für die Zeit t_q [s] auf der Oberfläche [28]:

$$T(x=0, t) = T_0 + \frac{2q}{e} \sqrt{\frac{t}{\mathbf{p}}} \quad (27)$$

für $0 \leq t \leq t_q$ und

$$T(x=0, t) = T_0 + \frac{2q}{e} \left(\sqrt{\frac{t}{\mathbf{p}}} - \sqrt{\frac{t-t_q}{\mathbf{p}}} \right) \quad (28)$$

für $t > t_q$, mit e [(W s^{0,5})/(m² K)] als Wärmeeindringzahl.

Damit ergibt sich für den adiabatischen Zustand, d. h. ohne die Berücksichtigung von Konvektions- und Strahlungsverluste, die Wärmestromdichte q zu:

^b $g = 9,81 \text{ m/s}^2$

$$q = (T - T_0) \frac{e}{2} \sqrt{\frac{\mathbf{p}}{t}} \quad (29)$$

bzw.

$$q = (T - T_0) \frac{e}{2} \left(\sqrt{\frac{t}{\mathbf{p}}} - \sqrt{\frac{t - t_q}{\mathbf{p}}} \right)^{-1} \quad (30)$$

Zur Berücksichtigung der Oberflächenverluste werden das Stefan-Boltzmannsche Gesetz (13) und das Newtonsche Gesetz (14) verwendet. Beide Formeln sind in der jeweiligen Form allerdings nur für den stationären Fall gültig. Daher müssen sie für den instationären Fall modifiziert werden. Dazu wird die abgegebene Energie der Oberfläche für die beiden Fälle betrachtet. Diese ergibt sich aus:

$$\int_0^{t_q} q_{kon} dt = \mathbf{a}_{kon} \int_0^{t_q} (T - T_0) dt \quad (31)$$

bzw.

$$\int_0^{t_q} q_{rad} dt = \mathbf{e} \mathbf{s}_s \int_0^{t_q} (T^4 - T_0^4) dt \quad (32)$$

Die Temperatur T soll im stationären Fall der maximalen Temperatur T_q am Ende der Erwärmungszeit t_q des instationären Falls entsprechen. Für den stationären Fall bedeutet das:

$$\int_0^{t_q} q_{kon} dt = \mathbf{a}_{kon} \cdot (T - T_0) \cdot t_q = \mathbf{a}_{kon} \cdot \left(T_0 + \frac{2q}{e} \sqrt{\frac{t_q}{\mathbf{p}}} - T_0 \right) \cdot t_q = \mathbf{a}_{kon} \frac{2q}{e} \sqrt{\frac{t_q^3}{\mathbf{p}}} \quad (33)$$

und

$$\begin{aligned} \int_0^{t_q} q_{rad} dt &= \mathbf{e} \mathbf{s}_s (T^4 - T_0^4) \cdot t_q = \mathbf{e} \mathbf{s}_s \left(\left(T_0 + \frac{2q}{e} \sqrt{\frac{t_q}{\mathbf{p}}} \right)^4 - T_0^4 \right) \cdot t_q \\ &= \mathbf{e} \mathbf{s}_s \left(4T_0^3 \frac{2q}{e} \sqrt{\frac{t_q^3}{\mathbf{p}}} + 6T_0^2 \frac{4q^2}{e^2} \frac{t_q^2}{\mathbf{p}} + 4T_0 \frac{8q^3}{e^3} \sqrt{\frac{t_q^5}{\mathbf{p}^3}} + \frac{16q^4}{e^4} \frac{t_q^3}{\mathbf{p}^2} \right) \end{aligned} \quad (34)$$

Die Energieverluste durch Konvektion und Strahlung für den instationären Fall sind:

$$\int_0^{t_q} q_{kon} dt = \mathbf{a}_{kon} \int_0^{t_q} \left(T_0 + \frac{2q}{e} \sqrt{\frac{t}{\mathbf{p}}} - T_0 \right) dt = \mathbf{a}_{kon} \frac{2q}{e} \frac{2}{3} \sqrt{\frac{t_q^3}{\mathbf{p}}} \quad (35)$$

und

$$\begin{aligned} \int_0^{t_q} q_{rad} dt &= \mathbf{e} \mathbf{s}_s \int_0^{t_q} (T^4 - T_0^4) dt = \mathbf{e} \mathbf{s}_s \int_0^{t_q} \left(\left(T_0 + \frac{2q}{e} \sqrt{\frac{t}{\mathbf{p}}} \right)^4 - T_0^4 \right) dt \\ &= \mathbf{e} \mathbf{s}_s \left(4T_0^3 \frac{2q}{e} \frac{2}{3} \sqrt{\frac{t_q^3}{\mathbf{p}}} + 6T_0^2 \frac{4q^2}{e^2} \frac{1}{2} \frac{t_q^2}{\mathbf{p}} + 4T_0 \frac{8q^3}{e^3} \frac{2}{5} \sqrt{\frac{t_q^5}{\mathbf{p}^3}} + \frac{16q^4}{e^4} \frac{1}{3} \frac{t_q^3}{\mathbf{p}^2} \right) \end{aligned} \quad (36)$$

Ein Vergleich der abgegebenen Energie der Oberfläche über Konvektion entsprechend den Gleichungen (33) und (35) zeigt:

$$\int_0^{t_q} q_{kon} dt \underset{\text{instationär}}{=} \frac{2}{3} \int_0^{t_q} q_{kon} dt \underset{\text{stationär}}{\quad} \quad (37)$$

Da der Term $\left(4T_0 \frac{2q}{e} \frac{2}{3} \sqrt{\frac{t_q^3}{\mathbf{p}}} \right)$ über 90 Prozent der über Strahlung abgegebenen Energie ausmacht, lässt sich aus den Gleichungen (34) und (36) die Beziehung

$$\int_0^{t_q} q_{rad} dt \underset{\text{instationär}}{\approx} \frac{2}{3} \int_0^{t_q} q_{rad} dt \underset{\text{stationär}}{\quad} \quad (38)$$

ableiten. Unter der vereinfachenden Annahme von konstanten Oberflächenverlusten über die Zeit ist dann

$$q_{kon,instationär} = \frac{2}{3} q_{kon,stationär} \quad (39)$$

und

$$q_{rad,instationär} = \frac{2}{3} q_{rad,stationär} \quad (40)$$

Für die Berechnung der aufgebrauchten Wärmestromdichte verringern sich die Oberflächenverluste aufgrund der instationären Bedingungen also um den Faktor 2/3. Modifiziert man die Gleichungen (13) und (14) mit den Gleichungen (39) und (40) und stellt die Gleichung (12) entsprechend um, dann ist die für die Zeit t_q mit Hilfe der künstlichen Wärmequelle auf die Oberfläche aufgebrauchte Wärmestromdichte gegeben durch:

$$q_q = (T - T_0) \frac{e}{2} \sqrt{\frac{\mathbf{p}}{t}} + \frac{2}{3} \mathbf{a}_{kon} (T - T_0) + \frac{2}{3} \mathbf{e} \mathbf{s}_s (T^4 - T_0^4) \quad (41)$$

5.3 Simulationsprogramm

Das Simulationsprogramm wurde wie auch das Auswertungsprogramm (siehe Kapitel 4.2.2) in der Makroprogrammiersprache PVWave (Version 7.01, Visual Numerics Inc.) geschrieben. Das Programm simuliert einen Rechteckpuls, der für eine festgelegte Zeit auf die zu betrachtende Oberfläche eines Körpers aufgebracht wird. Mit Hilfe der Finiten-Differenzen-Methode wird der dadurch verursachte instationäre Wärmefluss im Körper berechnet. An der bestrahlten Oberfläche des Körpers werden die Wärmeverluste durch Konvektion und Strahlung berücksichtigt. Abbildung 5.2 zeigt den Algorithmus des Simulationsprogramms in Form eines Strukturgramms.

Zuerst werden in dem Programm die Parameter definiert und mit Werten belegt sowie die für die spätere Berechnung notwendigen Felder für die Temperatur-, Wärmeleitfähigkeits- und Rohdichte-Wärmekapazitäts-Matrix bereitgestellt. Jedem Volumenelement der Temperaturmatrix wird der konstante Parameter der Anfangstemperatur zugewiesen. Aus den Material- und Geometrieparametern werden die lokalen Materialkennwerte für die einzelnen Volumenelemente berechnet und in der Wärmeleitfähigkeits- bzw. Rohdichte-Wärmekapazitäts-Matrix abgelegt.

Die eigentliche Berechnung ist in drei Schritte unterteilt. Im ersten Schritt wird für die festgelegte Erwärmungszeit die Wärmestromdichte nach Kapitel 5.2.3 auf die Oberfläche aufgebracht. Im zweiten Schritt wird die Wärmeausbreitung innerhalb des Festkörpers nach

Kapitel 5.1 berechnet und im dritten Schritt werden schließlich die in Kapitel 5.2.2 behandelten Wärmeverluste an der Oberfläche berücksichtigt.

Als Ergebnis liefert das Programm eine Matrix, in der die Temperatur für jedes Volumenelement auf der Oberfläche zu jedem Zeitpunkt abgelegt ist. Diese Matrix wird mit demselben Dateityp gespeichert wie die Filmsequenzen der praktischen Messungen, so dass die Ergebnisse der Simulationen und der experimentellen Messreihen analog zueinander ausgewertet werden können.

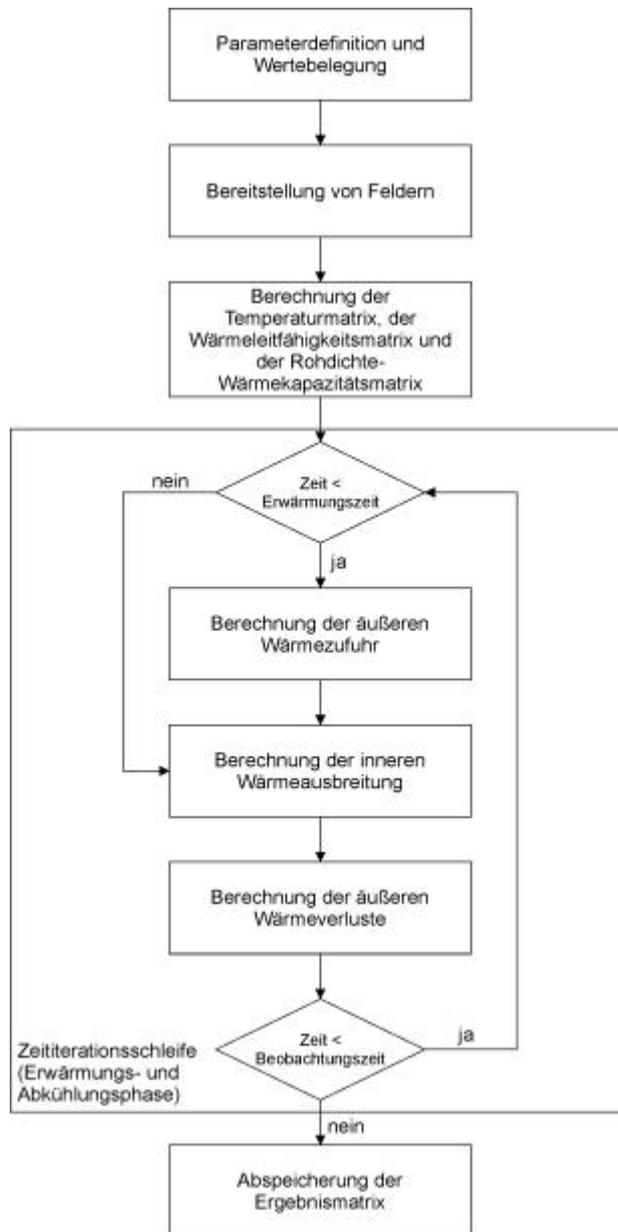


Abbildung 5.2 Strukturgramm des Simulationsprogramms

6 Systematische Untersuchung des Einflusses der einzelnen Parameter mit Hilfe von Simulationsrechnungen

Mit Hilfe des entwickelten Simulationsprogramms werden die Einflüsse der einzelnen Material- und Geometrieparameter sowie der Randbedingungen auf die Messergebnisse der Impuls-Thermografie untersucht. Weiterhin wird die Beeinflussung der Ergebnisse der Simulationsrechnungen durch die Programmparameter betrachtet.

Die Variation der Parameter wird für einen Probekörper aus Beton mit den Standardabmaßen $0,50 \times 0,50 \times 0,25 \text{ m}^3$ und einer Inhomogenität der Standardgröße $0,10 \times 0,10 \times 0,10 \text{ m}^3$ durchgeführt. In der Tabelle 6.7 sind jeweils der Standardwert und die dazugehörigen Variationswerte für die einzelnen Parameter aufgeführt. Die Materialparameter für ausgewählte Stoffe bzw. Materialien sind in der Anlage 1 (Tabelle 13.1) zu finden.

Parameter	Standardwert	Variationswerte
<i>Programmparameter</i>		
Zeitinkrement	1,0 s	0,5; 1,5; 2,0; 2,5; 3,0 s
Weginkrement	0,005 m	0,002; 0,003; ... ; 0,010 m
<i>Randbedingungen</i>		
Erwärmungsart	Statischer Puls	Periodischer Puls
Wärmeverluste an der Oberfläche	Strahlungs- und Konvektionsverluste	Keine Verluste, nur Strahlungsverluste, nur Konvektionsverluste
Wärmestromdichte	1250 W/m ²	250; 500; ... ; 2500 W/m ²
Erwärmungszeit	900 s	60; 180; 300; 600; 1800; 2700; 3600; 4500; 5400 s
Ausgangs- und Umgebungstemperatur	20 °C	10; 12; ... ; 30 °C
<i>Materialparameter</i>		
Wärmeleitfähigkeit des Betons	2,1 W/(m K)	1,1; 1,3; ... ; 3,1 W/(m K)
Rohdichte des Betons	2400 kg/m ³	2000; 2100; ... ; 2800 kg/m ³
Spezifische Wärmekapazität des Betons	1000 J/(kg K)	Keine Variation, da analog zur Rohdichte
Wärmeleitfähigkeit des Polystyrol-Extruderschaums	0,035 W/(m K)	-
Rohdichte des Polystyrol-Extruderschaums	20 kg/m ³	-
Spezifische Wärmekapazität des Polystyrol-Extruderschaums	1500 J/(kg K)	-
<i>Geometrieparameter</i>		
Tiefe der Inhomogenität	0,02 und 0,04 m	0,01; 0,02; ... ; 0,10 m
Dicke der Inhomogenität	0,10 m	0,01; 0,02; ... ; 0,09 m
Flächenhafte Ausdehnung der Inhomogenität	0,10 x 0,10 m ²	0,11 x 0,11; 0,12 x 0,12; ... ; 0,20 x 0,20 m ²
Probekörperdicke	0,25 m	0,15; 0,20; ... ; 0,50 m

Tabelle 6.7 Standard- und Variationswerte der einzelnen Parameter

Wie aus der Tabelle 6.7 ersichtlich werden alle Variationen jeweils für zwei unterschiedliche Tiefen der Inhomogenität durchgeführt. In den folgenden Kapiteln werden meistens nur die Variationen für eine Defekttiefe von 0,02 m vorgestellt, sofern die Ergebnisse für die beiden Defekttiefen analog zu betrachten sind.

6.1 Programmparameter

6.1.1 Weginkrement

Mit Hilfe der beiden Gleichungen (27) und (28) aus Kapitel 5.2 lässt sich eine analytische Temperatur-Zeit-Kurve berechnen. Zur Überprüfung des Einflusses der Weginkremente wurden Simulationsrechnungen unter adiabatischen Bedingungen an einem $0,10 \times 0,10 \times 0,20 \text{ m}^3$ großen Betonprobekörper ohne Inhomogenitäten für unterschiedliche Weginkremente mit den in Tabelle 6.7 aufgeführten Standardwerten durchgeführt.

Nur für das Zeitinkrement konnte wegen des Stabilitätskriteriums für das aufsteigende Differenzenverfahren bei einem bis zu $0,002 \text{ m}$ kleinen Weginkrement der Standardwert nicht verwendet werden. Nach Gleichung (9) aus Kapitel 5.1 muss das Zeitinkrement dt [s] für Beton die Bedingung

$$dt \leq \frac{dx^2}{6 \cdot a} = \frac{0,002^2}{6 \cdot 0,875 \cdot 10^{-6}} = 0,76 \quad (42)$$

erfüllen, so dass anstelle des Standardwerts ein Zeitinkrement von $0,5 \text{ s}$ gewählt wurde.

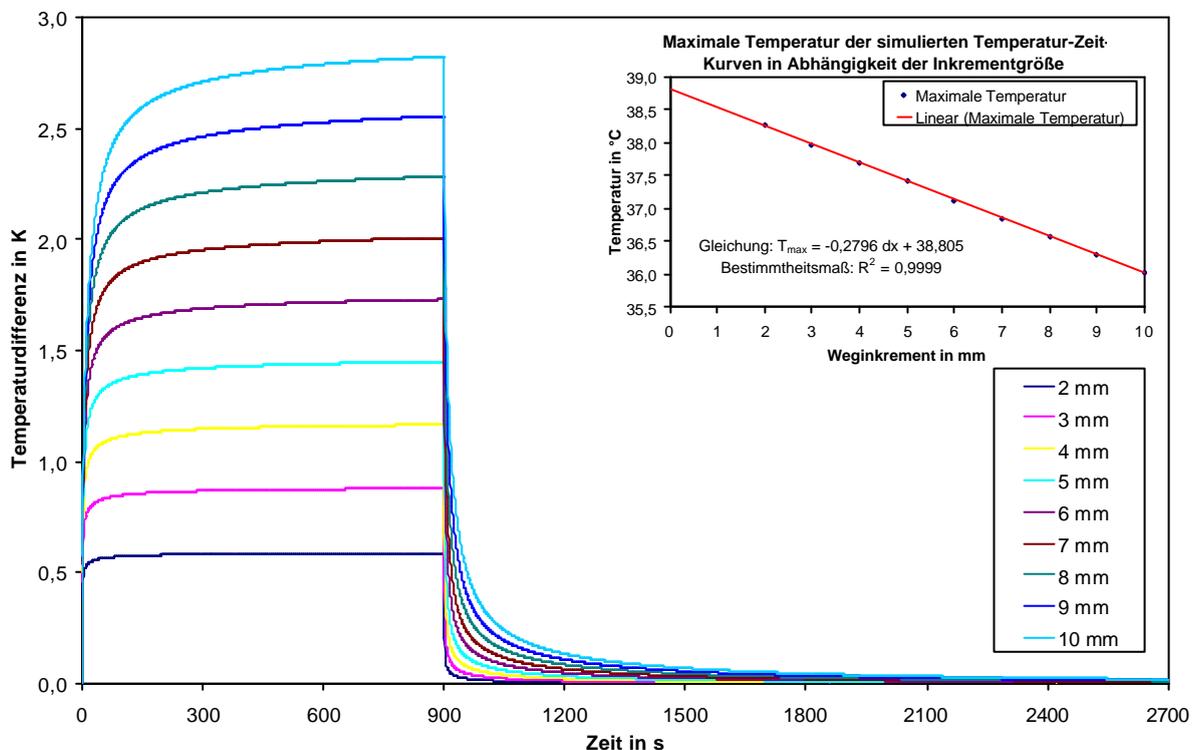


Abbildung 6.3 Variation des Weginkrements: Differenzkurven der analytischen abzüglich der jeweiligen simulierten Temperatur-Zeit-Kurve für 900 s Erwärmung unter adiabatischen Bedingungen und Maxima der simulierten Temperatur-Zeit-Kurven (eingefügte Grafik)

Die Temperatur-Zeit-Kurven der einzelnen Simulationsrechnungen wurden jeweils mit der aus den Gleichungen (27) und (28) berechneten Abkühlungskurve verglichen. Abbildung 6.3 zeigt die Differenzkurven der analytischen abzüglich der jeweiligen simulierten Temperatur-Zeit-Kurve für Weginkremente von $0,002$ bis $0,010 \text{ m}$.

Erwartungsgemäß steigt die Differenz mit größer werdendem Inkrement an. Die größte Temperaturdifferenz liegt jeweils direkt am Ende der Erwärmungsphase vor, an dem auch die absolute Temperatur der Temperatur-Zeit-Kurven maximal ist. In dem eingefügten Diagramm

in Abbildung 6.3 sind die Maxima der simulierten Temperatur-Zeit-Kurven aufgetragen. In Abhängigkeit der Weginkremente können die Temperaturmaxima durch die lineare Gleichung

$$T_{\max}(dx) = -0,2796 \cdot dx + 38,805 \quad (43)$$

im betrachteten Bereich mit einem Bestimmtheitsmaß von 0,9999 beschrieben werden. Die Funktion des Temperaturmaximums in Abhängigkeit des Weginkrements hat für $dx = 0$ den Temperaturwert 38,81 °C. Dieser entspricht nahezu der analytischen Oberflächentemperatur von 38,85 °C unter adiabatischen Bedingungen aus der Gleichung (27) bei gleichen Ausgangsparametern. Je größer das Weginkrement wird, desto stärker weicht das Temperaturmaximum von diesen 38,85 °C ab. Die simulierten Kurven weisen demzufolge in Abhängigkeit des Weginkrements einen maximalen relativen Fehler von

$$\frac{T_{\max, \text{analytisch}} - T_{\max, \text{simuliert}}}{T_{\max, \text{analytisch}}} = \frac{38,85 - (-0,2796 \cdot dx + 38,805)}{38,85} = \frac{0,2796 \cdot dx + 0,045}{38,85} \quad (44)$$

auf. Bei einem Vergleich von Simulationsrechnungen und experimentellen Messungen muss demnach eine Abweichung der Ergebnisse in Kauf genommen werden. Für die Weginkremente von 0,002 m und 0,005 m, mit denen die in Kapitel 7 betrachteten Simulationsrechnungen durchgeführt wurden, beträgt der maximale relative Fehler 1,6 % bzw. 3,7 %.

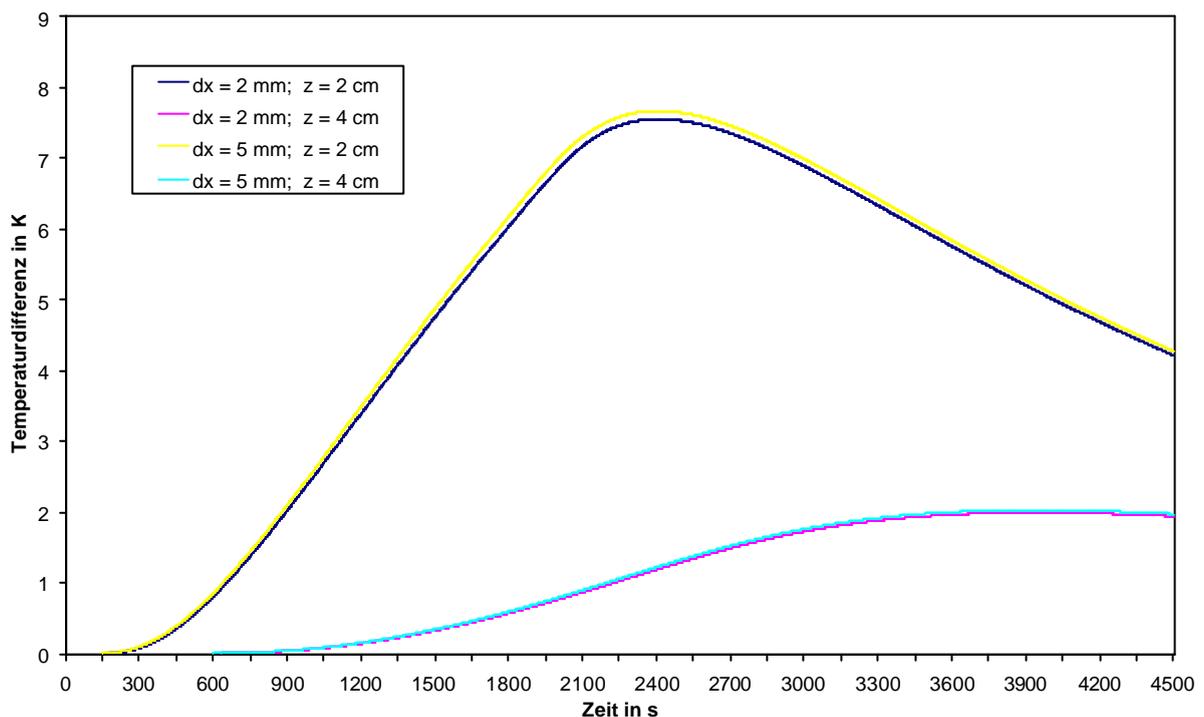


Abbildung 6.4 Temperaturdifferenzkurven zwischen 0,02 bzw. 0,04 m tiefen Fehl- und dazugehörigen Referenzstellen für 900 s Erwärmung mit unterschiedlichen Weginkrementen

Aufgrund der zur Verfügung stehenden Rechenkapazität wurde wie in Tabelle 6.7 beschrieben für die Simulationsrechnungen im Normalfall ein Weginkrement von 0,005 m gewählt. Zu Vergleichszwecken wurden Simulationen mit einem Inkrement von 0,002 m durchgeführt. Abbildung 6.4 zeigt die Temperaturdifferenzkurven zwischen 0,02 bzw. 0,04 m tiefen Fehl- und dazugehörigen Referenzstellen für die unterschiedlich gewählten Weginkremente.

Für beide Defekttiefen weichen die Differenzkurven minimal voneinander ab. Das Maximum der Temperaturdifferenz ist für ein Weginkrement von 0,005 m mit 7,67 K vergleichsweise etwas größer und dessen Zeitpunkt mit 2404 s minimal kleiner als für das 0,002 m große Inkrement, bei dem die maximale Temperaturdifferenz 7,56 K beträgt und nach 2410 s auftritt.

Im Gegensatz zu den absoluten Temperaturwerten, bei denen zwischen experimentellen Messungen und Simulationsrechnungen relative Fehler von bis zu 4 % zu erwarten sind, sollten dementsprechend für übereinstimmende Material- und Geometrieparameter sowie Randbedingungen kaum messbare Unterschiede bei den maximalen Temperaturdifferenzen und deren Zeitpunkten festzustellen sein.

6.1.2 Zeitinkrement

Die Wahl des Zeitinkrements unterliegt zwei Einschränkungen. Das Zeitinkrement muss der Rechenkapazität des Computersystems unter Berücksichtigung der geometrischen Abmaße angepasst werden und es muss das in Kapitel 5.1 erwähnte Stabilitätskriterium für das aufsteigende Differenzenverfahren erfüllen. Bei einem Weginkrement von 0,005 m und einer maximalen Temperaturleitfähigkeit innerhalb des Probekörpers am Übergang des Polystyrol-Extruderschaums zum Beton von $2,3 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ muss das Zeitinkrement dem Stabilitätskriterium folgend kleiner als 1,8 s gewählt werden.

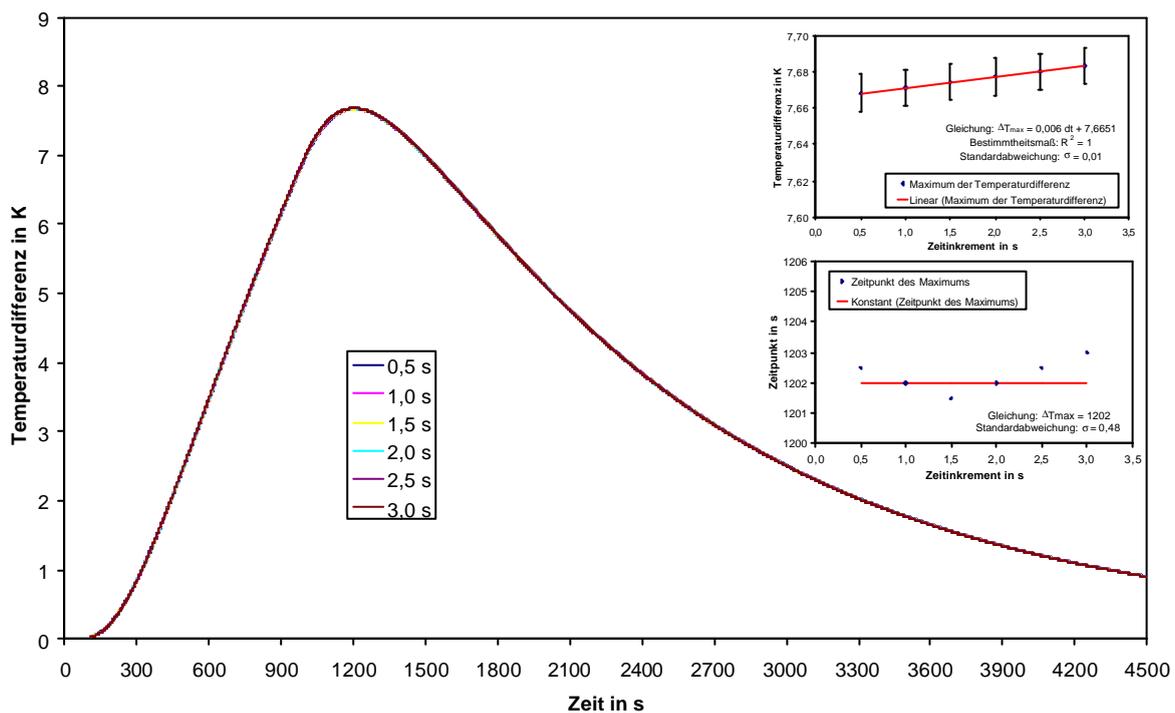


Abbildung 6.5 Variation des Zeitinkrements: Temperaturdifferenzkurven für Referenz- und 0,02 m tiefe Fehlstellen und Maxima der Temperaturdifferenz sowie deren Zeitpunkte in Abhängigkeit des Zeitinkrements (eingefügte Grafik)

Abbildung 6.5 zeigt die Temperaturdifferenzkurven zwischen einer Referenz- und einer 0,02 m tiefen Fehlstelle für Zeitinkremente von 0,5 bis 3,0 s. Auch für Zeitinkremente größer als 1,8 s zeigt sich die Simulation im betrachteten Zeitraum stabil. Dieses könnte zum einen daran liegen, dass das Stabilitätskriterium nur in einem sehr lokalen Bereich verletzt wird. Zum anderen könnte auch das System mit einem quasi eindimensionalen Wärmefluss bei

ausschließlich isotropen Materialien und einem nahezu symmetrischen System senkrecht zum Wärmefluss so günstig sein, dass der dreimal kleinere Wert, der sich aus dem Stabilitätskriterium für ein dreidimensionales System gegenüber einem eindimensionalen ergibt, viel zu niedrig ist.

Aus der Abbildung geht hervor, dass die dargestellten Temperaturdifferenzen und analog die absoluten Temperaturen der Referenz- und der Fehlstelle quasi unabhängig vom Zeitinkrement sind. Demzufolge sind die auch die maximale Temperaturdifferenz und deren Zeitpunkt in Abhängigkeit des Zeitinkrements nahezu konstant, wie die beiden eingefügten Diagramme in Abbildung 6.5 zeigen. Die Standardabweichung beträgt bei der maximalen Temperaturdifferenz 0,01 K und für deren Zeitpunkte 0,48 s. Bei den Zeitpunkten muss allerdings berücksichtigt werden, dass diese aufgrund der jeweils gewählten Zeitinkremente mit Ausnahme des Zeitinkrements von 0,5 s nicht exakter an den vermutlichen Wert von 1202 s heranreichen können.

Das Zeitinkrement kann also bei Simulationsrechnungen im Rahmen der Rechenkapazität des Computersystems und unter Einhaltung des beschriebenen Stabilitätskriteriums ohne Beeinträchtigung der Ergebnisse frei gewählt werden.

6.2 Randbedingungen

6.2.1 Erwärmungsart

Die experimentellen Messungen im Rahmen dieser Arbeit wurden wie in Kapitel 4.1.2 beschrieben mit einer zyklischen Erwärmung durchgeführt, um eine möglichst homogene Erwärmung zu erreichen. In erster Näherung kann diese Erwärmung für die mittleren Bereich eines Probekörpers als ein alle 15 s wiederkehrender 1,0 s langer Rechteckpuls betrachtet werden.

Die Simulationen sollten wenn möglich der Einfachheit halber mit einer statischen Erwärmung berechnet werden. Abbildung 6.6 zeigt die Temperatur-Zeit-Kurven eines Oberflächenpunktes oberhalb einer ungestörten Stelle für eine 900 s lange statische sowie periodische Erwärmung, wobei dem System jeweils die gleiche Wärmemenge zugeführt wurde. Bei der statischen Erwärmung wurde in jedem Zeitschritt von 1 s eine Wärmestromdichte von 1250 W/m^2 und bei der periodischen Erwärmung alle 15 s für je einen Zeitschritt gleicher Dauer eine Wärmestromdichte von 18750 W/m^2 auf die Oberfläche aufgebracht.

In Abbildung 6.6 eingefügt ist eine Differenzkurve für die beiden im Diagramm dargestellten Temperatur-Zeit-Kurven aufgetragen, wobei die periodische Temperatur-Zeit-Kurve von der statischen subtrahiert wurde. Es ist deutlich zu erkennen, dass sich in der Erwärmungsphase Temperaturunterschiede von bis zu 1,2 K ergeben. Während des Abkühlungsprozesses verringert sich diese Differenz von anfänglich 0,75 K auf näherungsweise Null nach ungefähr 300 s. Das Bestimmtheitsmaß für die beiden Temperatur-Zeit-Kurven liegt für die messtechnisch relevante Abkühlungsphase bei 0,99981, die Standardabweichung bei 0,06 K.

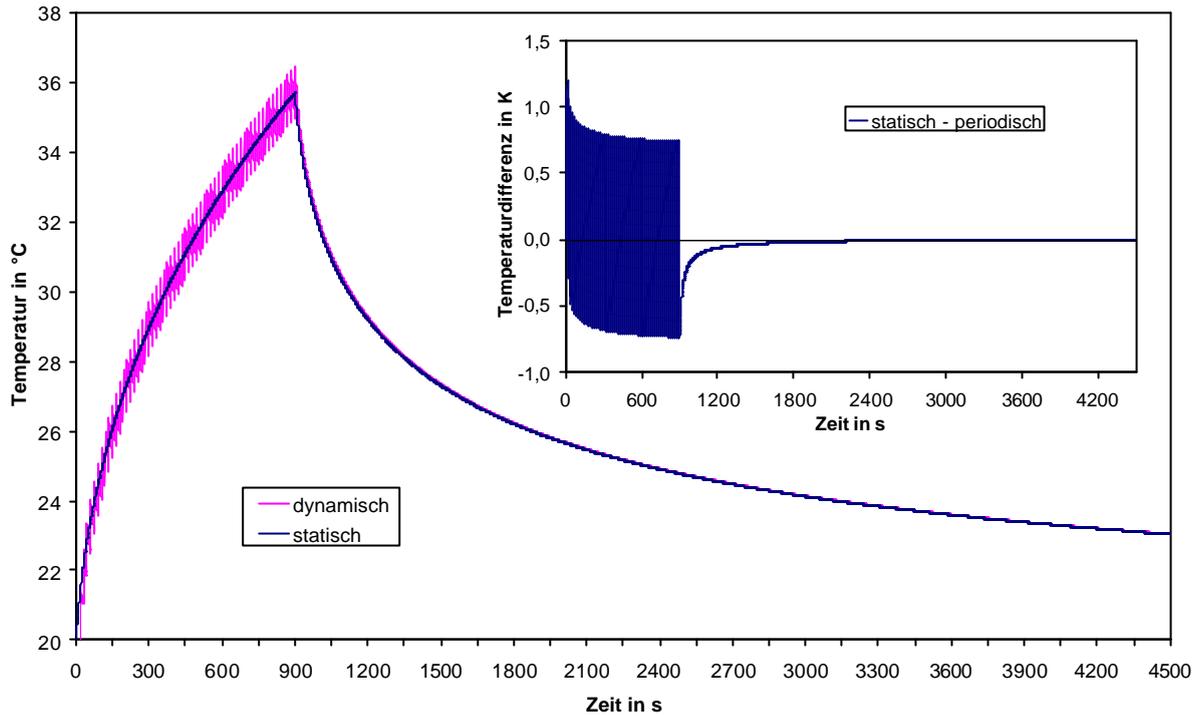


Abbildung 6.6 Temperatur-Zeit-Kurven für 900 s statische bzw. dynamische Erwärmung und die dazugehörige Differenzkurve (eingefügte Grafik)

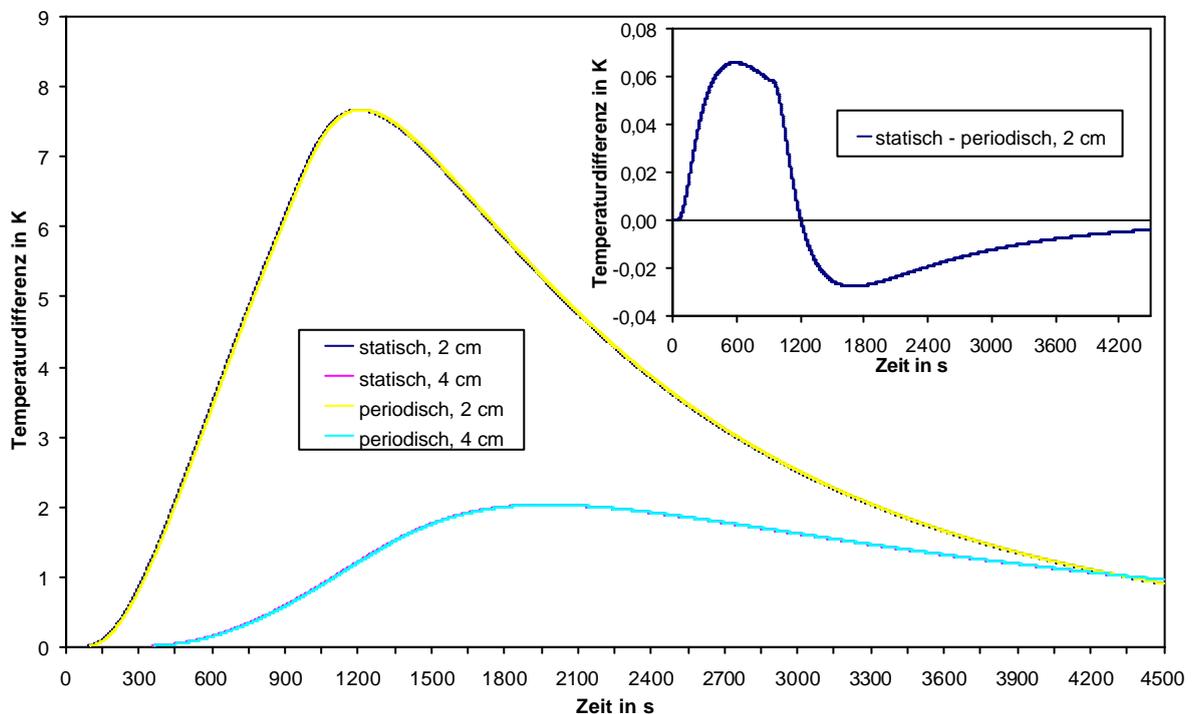


Abbildung 6.7 Temperaturdifferenzkurven zwischen 0,02 bzw. 0,04 m tiefen Fehl- und dazugehörigen Referenzstellen für 900 s statische bzw. dynamische Erwärmung und eine Differenzkurve für die beiden Temperaturdifferenzkurven mit einer 0,02 m tiefen Fehlstelle (eingefügte Grafik)

Noch besser sind die Übereinstimmungen bei den Temperaturdifferenzkurven von Fehl- und Referenzstellen. In Abbildung 6.7 sind die Temperaturdifferenzkurven zwischen 0,02 bzw. 0,04 m tiefen Fehl- und dazugehörigen Referenzstellen für 900 s sowohl statische als auch dynamische Erwärmung dargestellt.

Für beide Fehlstellentiefen sind trotz unterschiedlicher Erwärmungsart die Temperaturdifferenzkurven jeweils nahezu deckungsgleich, was die Differenzkurve der beiden Temperaturdifferenzkurven, die in Abbildung 6.7 eingefügt ist, noch einmal für die 0,02 m tiefe Fehlstelle verdeutlicht. Das Bestimmtheitsmaß für die beiden Temperaturdifferenzkurven beträgt 0,99983, die Standardabweichung 0,03 K.

Bei der Wahl einer geeigneten Referenzstelle kann die Erwärmungsart für die Auswertung von Temperaturdifferenzkurven demzufolge vernachlässigt werden. Die geringfügigen Abweichungen in den Temperatur-Zeit-Kurven werden bei den Temperaturdifferenzen fast vollständig eliminiert, da der Einfluss der Erwärmungsart auf die Fehlstelle genauso groß ist wie auf die Referenzstelle.

Die mit dynamischer Erwärmung durchgeführten experimentellen Messungen können demzufolge ohne weiteres mit den mit statischer Erwärmung berechneten Simulationen verglichen werden.

6.2.2 Wärmeverluste

Während und nach der Erwärmung tragen der Wärmeabfluss in den Probekörper hinein und die durch Konvektion und Strahlung verursachten Wärmeverluste an der Oberfläche und an den Seiten zur Abkühlung der Oberfläche bei. Zur Ermittlung des Einflusses der Wärmeverluste wurden neben dem für die experimentellen Messungen relevanten Fall mit gleichzeitigen Wärmeverlusten durch Konvektion und Strahlung weitere Simulationen durchgeführt, in denen nur mit Konvektions- bzw. Strahlungsverlusten sowie ganz ohne Wärmeverluste an der Oberfläche gerechnet wurde.

Abbildung 6.8 zeigt Temperatur-Zeit-Kurven für 900 s Erwärmung mit den unterschiedlichen Arten von Wärmeverlusten an der Oberfläche des Probekörpers. Sowohl die Wärmeverluste durch Strahlung als auch die etwas geringeren durch Konvektion haben einen nicht zu vernachlässigenden Einfluss auf die Oberflächentemperatur. Das eingefügte Diagramm in Abbildung 6.8 zeigt Temperaturabweichung der Temperatur-Zeit-Kurven unter adiabatischen Bedingungen und mit Strahlungs- oder Konvektionsverlusten von der realistischen Temperatur-Zeit-Kurve mit allen Wärmeverlusten.

Eine Vernachlässigung der Wärmeverluste führt aber nicht nur zu einer Erhöhung der absoluten Temperatur, sondern sie wirkt sich auch auf die Temperaturdifferenzkurven aus Temperatur-Zeit-Kurven von Referenz- und Fehlstellen aus. Abbildung 6.9 zeigt die Temperaturdifferenzkurven für die unterschiedlichen Wärmeverluste zwischen einer 0,02 m tiefen Fehl- und einer dazugehörigen Referenzstelle.

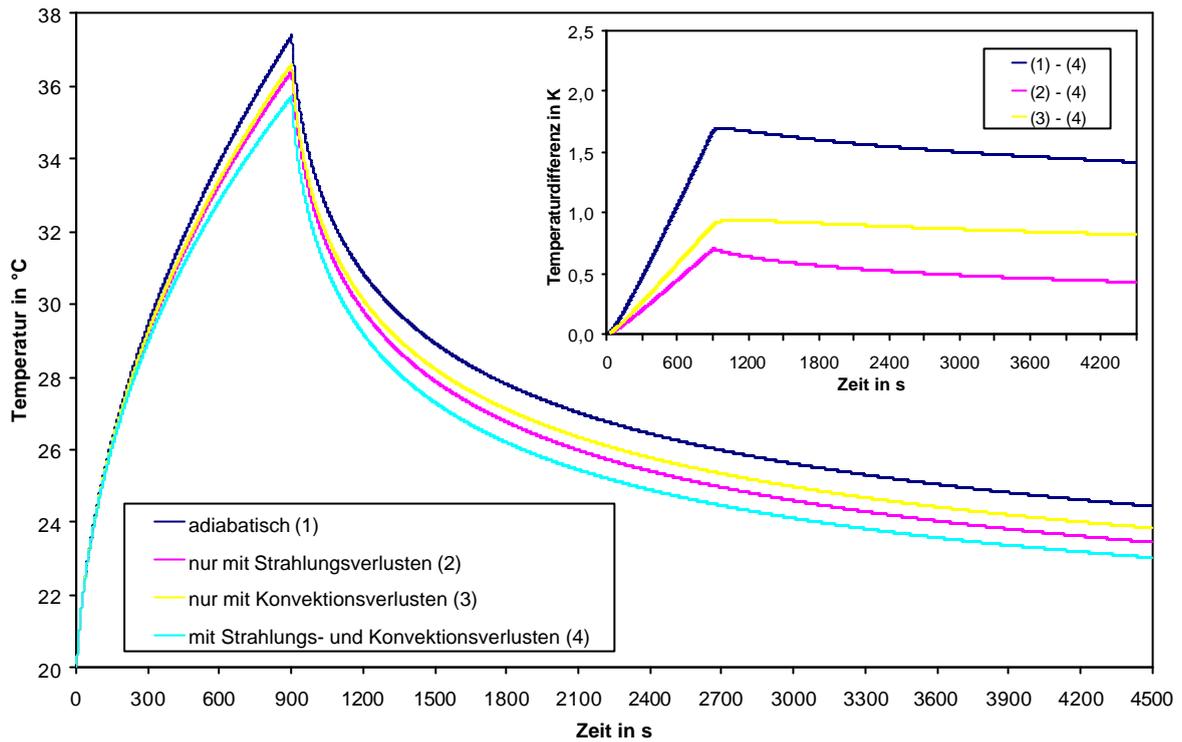


Abbildung 6.8 Temperatur-Zeit-Kurven mit unterschiedlichen Wärmeverlusten für 900 s Erwärmung und Differenzkurven zwischen den einzelnen Kurven und der Kurve mit allen Wärmeverlusten (eingefügte Grafik)

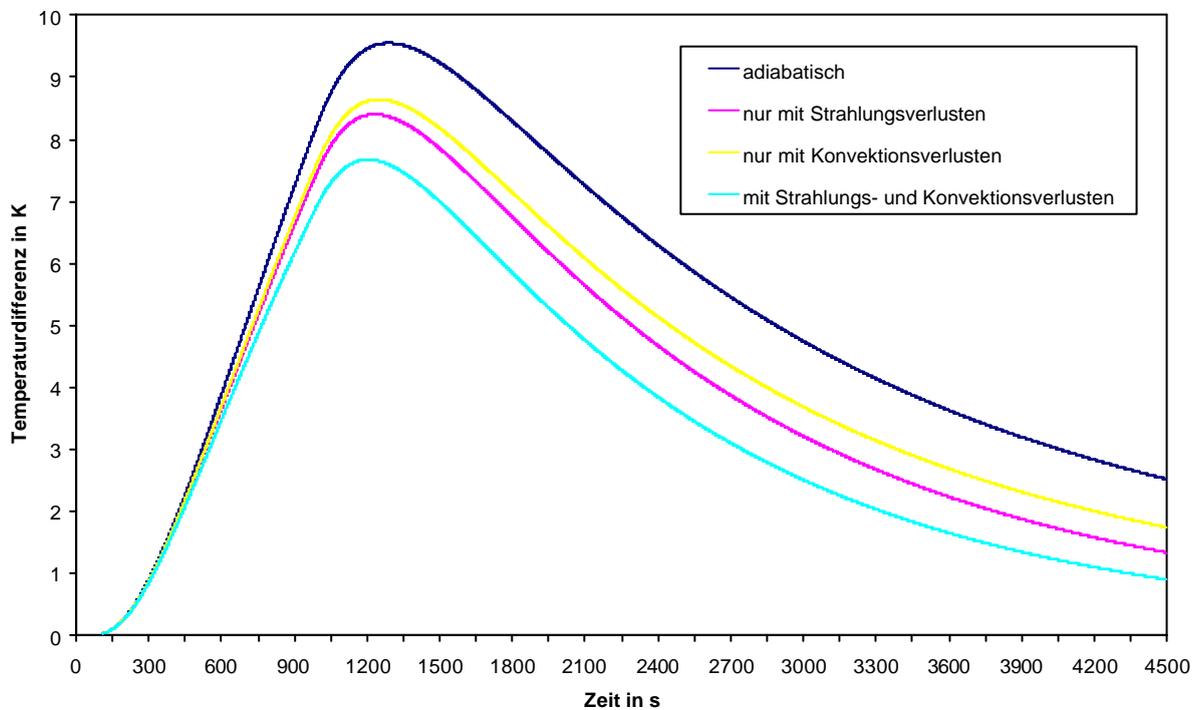


Abbildung 6.9 Temperaturdifferenzkurven mit unterschiedlichen Wärmeverlusten zwischen einer 0,02 m tiefen Fehl- und einer dazugehörigen Referenzstelle für 900 s Erwärmung

Da sich sowohl das Maximum der Temperaturdifferenz als auch der Zeitpunkt seines Auftretens für die verschiedenen Wärmeverlustarten ändern, ist für die Simulationsrechnungen eine möglichst exakte Berechnung der Wärmeverluste anzustreben. Temperaturabnahmen durch Strahlung und Konvektion werden demzufolge bei den Simulationen berücksichtigt.

6.2.3 Wärmestromdichte

Die experimentellen Messungen fanden mit einer absorbierten Wärmestromdichte von 1250 W/m^2 statt. Der gleiche Wert wurde bei den Simulationen standardmäßig benutzt. Eine Variation der Wärmestromdichte wurde von 250 W/m^2 bis 2500 W/m^2 mit einer Schrittweite von 250 W/m^2 ausgeführt.

In Abbildung 6.10 sind die Temperaturdifferenzkurven zwischen einer Referenz- und einer $0,02 \text{ m}$ tiefen Fehlstelle für die verschiedenen Wärmestromdichten dargestellt. Sowohl die absolute Temperatur als auch die Temperaturdifferenz zwischen Referenz- und Fehlstellen steigen mit zunehmender Wärmestromdichte quasi linear an. Für die Temperaturdifferenz ist die lineare Abhängigkeit zur Wärmestromdichte mit einem Bestimmtheitsmaß von $0,9998$ in dem oberen eingefügten Diagramm in Abbildung 6.10 dargestellt.

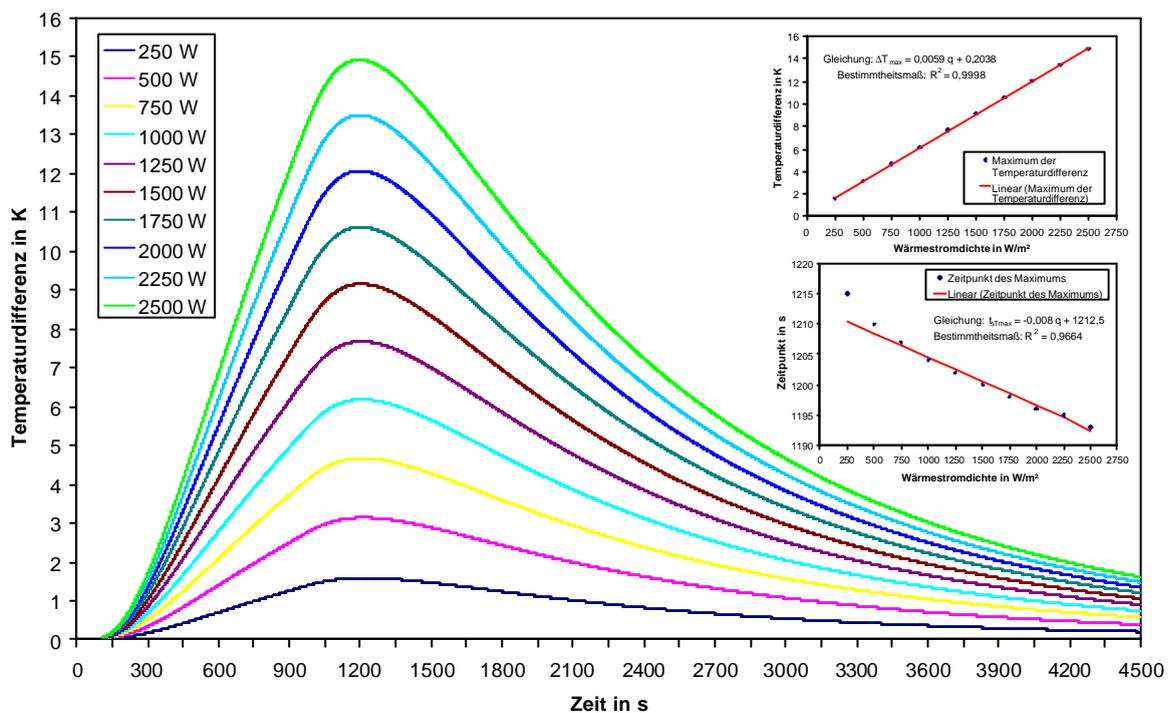


Abbildung 6.10 Variation der Wärmestromdichte: Temperaturdifferenzkurven für Referenz- und $0,02 \text{ m}$ tiefe Fehlstellen und Maxima der Temperaturdifferenz sowie deren Zeitpunkte in Abhängigkeit der Wärmestromdichte (eingefügte Grafik)

Die Zeitpunkte der Maxima der Temperaturdifferenz sind für Wärmestromdichten größer als 750 W/m^2 ebenfalls linear abhängig. Liegt die Wärmestromdichte unter 750 W/m^2 vergrößert sich die Differenz zwischen zwei Zeitpunkten allerdings stärker, wie das untere eingefügte Diagramm in Abbildung 6.10 zeigt. Für einen Mittelwert von 1202 s ist die Standardabweichung mit $6,69$ aber immer noch kaum größer als die Zeitschritte der realen Messungen von 5 s , so dass auch für den realen Fall die Zeitpunkte sogar als konstant betrachtet werden können.

6.2.4 Erwärmungszeit

Die experimentellen Messungen am Probekörper Pk1 wurden wie bereits im Kapitel 4.2.3 beschrieben mit sechs Erwärmungszeiten von 300 s, 600 s, 900 s, 1800 s, 2700 s und 3600 s durchgeführt. Zur besseren Einschätzung des Einflusses der Erwärmungszeit auf die maximale Temperaturdifferenz und deren Zeitpunkt wurden bei den Simulationen zusätzlich noch kürzere (60 s und 180 s) und längere (4500 s und 5400 s) Erwärmungszeiten berechnet.

Die Abbildung 6.11 zeigt die Temperaturdifferenzkurven zwischen einer Referenz- und einer 0,02 m tiefen Fehlstelle für die verschiedenen Erwärmungszeiten. Der Nullpunkt der Zeitachse in Abbildung 6.11 ist gleich dem Beginn der Erwärmungsphase wie bei den anderen Parametervariationen.

Aus dem Verlauf der Temperaturdifferenzkurven in Abbildung 6.11 ist ersichtlich, dass die Temperaturdifferenz in Abhängigkeit der Erwärmung zunächst stark ansteigt. Mit zunehmender Erwärmungszeit wird der Anstieg der Temperaturdifferenz immer geringer und nähert sich bei entsprechend langer Erwärmungszeit einem Maximalwert an. Danach nimmt die Temperaturdifferenz trotz fortlaufender äußerer Wärmezufuhr langsam wieder ab.

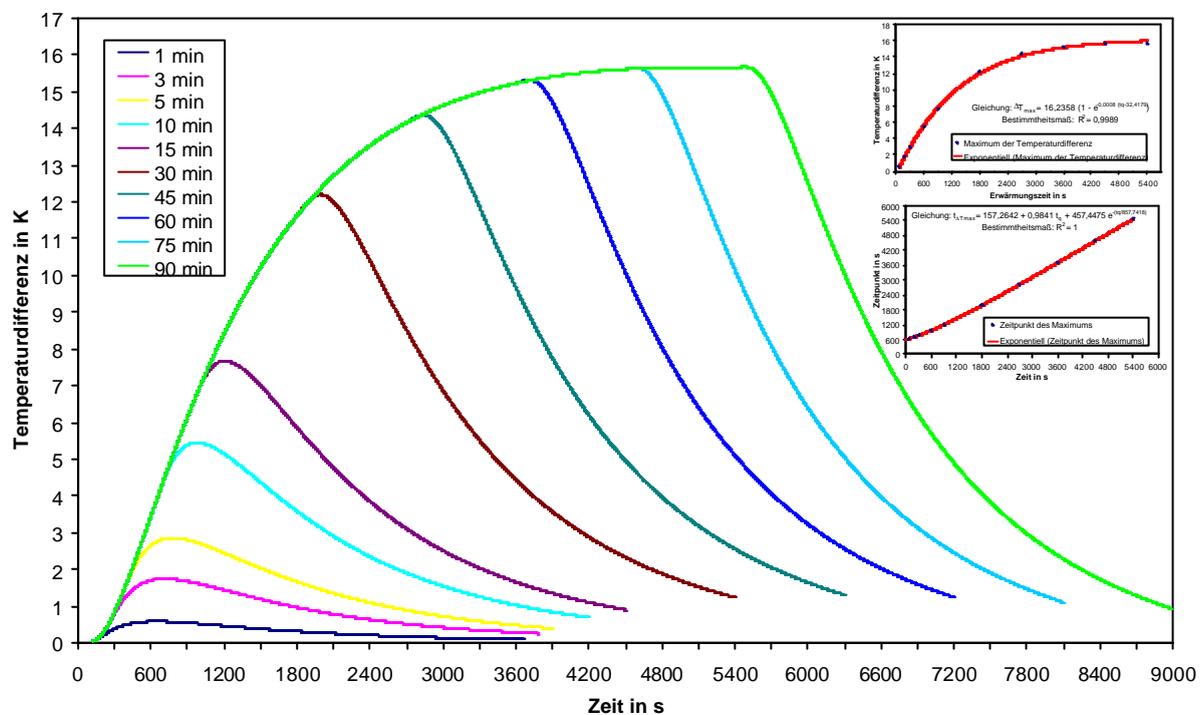


Abbildung 6.11 Variation der Erwärmungszeit: Temperaturdifferenzkurven für Referenz- und 0,02 m tiefe Fehlstellen und Zeitpunkte der maximalen Temperaturdifferenz in Abhängigkeit der Erwärmungszeit (eingefügte Grafik)

Die Maxima der Temperaturdifferenz und deren Zeitpunkte bezogen auf den Beginn der Erwärmungszeit sind in dem eingefügten Diagramm in Abbildung 6.11 dargestellt. Die maximale Temperaturdifferenz steigt in Abhängigkeit der Erwärmungszeit zunächst quasi linear an, nimmt ab einer Erwärmungszeit von ungefähr 600 s immer weniger zu und nähert sich schließlich asymptotisch einem Grenzwert.

Die Zeitpunkte der Maxima lassen sich für den betrachteten Bereich exakt mit einem Bestimmtheitsmaß von 1, durch eine Addition einer exponentiell fallenden und einer linearen Funktion beschreiben. Mit zunehmender Erwärmungszeit wird der exponentielle Anteil

immer kleiner, so dass nach ungefähr 1800 s der Einfluss der Erwärmungszeit auf den Zeitpunkt näherungsweise als linear angenommen werden kann.

6.2.5 Ausgangs- und Umgebungstemperatur

Die experimentellen Messungen unterliegen den natürlichen Schwankungen des örtlichen Klimas. Für die Simulationen wurde als Standardwert eine Ausgangstemperatur von 20 °C gewählt. Eine Variation der Ausgangstemperatur wurde für einen Temperaturbereich von 10 °C bis 30 °C mit einer Schrittweite von 2 K durchgeführt.

In Abbildung 6.12 sind die Temperaturdifferenzkurven zwischen einer Referenz- und einer 0,02 m tiefen Fehlstelle für die unterschiedlichen Ausgangstemperaturen dargestellt. Während die absolute Temperatur in Abhängigkeit der Ausgangstemperatur quasi linear ansteigt, hat die Ausgangstemperatur nahezu keinen Einfluss auf die Temperaturdifferenz zwischen Referenz- und Fehlstelle.

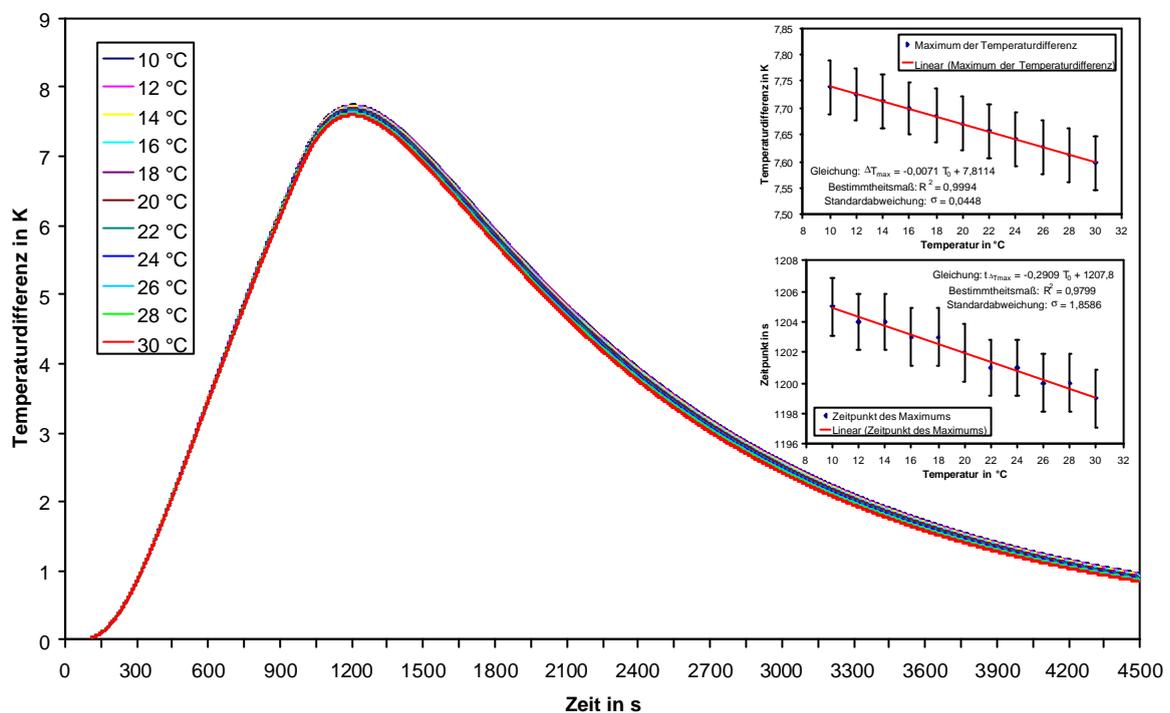


Abbildung 6.12 Variation der Ausgangstemperatur: Temperaturdifferenzkurven für Referenz- und 0,02 m tiefe Fehlstellen und Maxima der Temperaturdifferenz sowie deren Zeitpunkte in Abhängigkeit der Ausgangstemperatur (eingefügte Grafik)

Die beiden eingefügten Diagramme in Abbildung 6.12 zeigen, dass sowohl die Maxima der Temperaturdifferenz als auch deren Zeitpunkte im Grunde nicht von der Ausgangstemperatur abhängig sind. Bei einem Anstieg der Ausgangstemperatur um 20 K verringern sich die maximale Temperaturdifferenz um 0,14 K und deren Zeitpunkt um 6 s, was eine Abnahme von nicht einmal 2 % bzw. 0,5 % bezogen auf die jeweiligen Mittelwerte ist. Da bei realen Messungen 0,14 K im Bereich des thermischen Rauschens der Detektoren liegen und 6 s in etwa dem für die experimentellen Messungen als ausreichend genau gewählten Zeitschritt von 5 s entsprechen, kann der minimale Einfluss der Ausgangstemperatur, der durch die von der Ausgangstemperatur abhängigen Strahlungsverluste zustande kommt, vernachlässigt werden.

6.3 Materialparameter

Die Kenntnis der Materialparameter des Betons sind für eine Vergleichbarkeit der experimentellen und simulierten Ergebnisse wichtig. Da die Materialparameter des Betons in der Realität Schwankungen unterliegen, wurde mit Hilfe der Simulationen der Einfluss der einzelnen Parameter auf die maximale Temperaturdifferenz und deren Zeitpunkt untersucht.

6.3.1 Wärmeleitfähigkeit des Betons

Die Wärmeleitfähigkeit des Betons ist normalerweise 2,1 W/(m K). Im Rahmen der Simulationsrechnungen wurde sie von 1,1 W/(m K) bis 3,1 W/(m K) mit einer Schrittweite von 0,2 W/(m K) variiert.

In Abbildung 6.13 werden die Temperaturdifferenzkurven zwischen einer Referenz- und einer 0,02 m tiefen Fehlstelle für die verschiedenen Wärmeleitfähigkeiten des Betons gezeigt. Während die absolute Temperatur der Oberfläche mit zunehmender Wärmeleitfähigkeit durch den schnelleren Wärmeabfluss in den Probekörper sinkt, führt eine Erhöhung der Wärmeleitfähigkeit zu einer beschleunigten Änderung der Temperaturdifferenz, was einen früheren Zeitpunkt des Temperaturmaximums zur Folge hat.

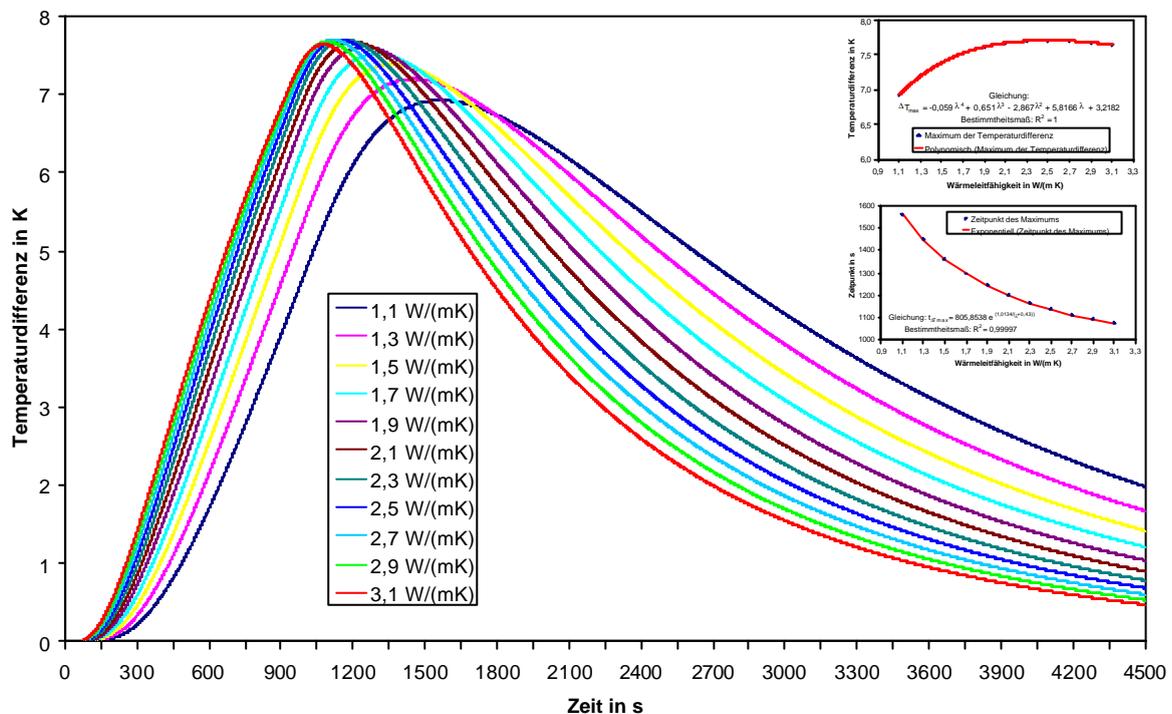


Abbildung 6.13 Variation der Wärmeleitfähigkeit des Betons: Temperaturdifferenzkurven für Referenz- und 0,02 m tiefe Fehlstellen und Maxima der Temperaturdifferenz sowie deren Zeitpunkte in Abhängigkeit der Wärmeleitfähigkeit (eingefügte Grafik)

Die Temperaturmaxima und deren Zeitpunkte sind in Abhängigkeit von der Wärmeleitfähigkeit des Betons in den eingefügten Diagrammen in Abbildung 6.13 dargestellt. Je kleiner die Wärmeleitfähigkeit ist, je größer ist ihr Einfluss auf die maximale Temperaturdifferenz und deren Zeitpunkt.

Die maximale Temperaturdifferenz steigt zunächst mit der Wärmeleitfähigkeit an, erreicht bei 2,5 W/(m K) ein Maximum und fällt danach wieder ab. Die Abhängigkeit der maximalen Temperaturdifferenz lässt sich für den betrachteten Bereich mit einer Polynomfunktion

4. Grades anpassen. Für einen relativ realistischen Bereich von 1,5 W/(m K) bis 3,1 W/(m K) weichen die einzelnen Werte der Wärmeleitfähigkeit maximal 0,31 K voneinander ab, so dass der Einfluss der Wärmeleitfähigkeit des Betons bezogen auf die maximale Temperaturdifferenz vernachlässigt werden kann.

In Abhängigkeit der Wärmeleitfähigkeit fallen die Zeitpunkte der maximalen Temperaturdifferenz exponentiell ab. Sie lassen sich durch die im unteren eingefügten Diagramm der Abbildung 6.13 dargestellte Exponentialfunktion mit einem Bestimmtheitsmaß von 0,99997 anpassen. Der Einfluss der Wärmeleitfähigkeit auf die Zeitpunkte ist deutlich höher als auf die maximale Temperaturdifferenz und damit nicht vernachlässigbar. Zur Verwendung der Zeitpunkte für die quantitative Analyse ist eine genaue Kenntnis der Wärmeleitfähigkeit notwendig.

6.3.2 Rohdichte und spezifische Wärmekapazität des Betons

Die Rohdichte des Betons wurde standardmäßig mit 2400 kg/m³ und die spezifische Wärmekapazität mit 1000 J/(kg K) angesetzt. Die Rohdichte wurde bei den Simulationsrechnungen im Rahmen der Spannweite für Normalbeton von 2000 kg/m³ bis 2800 kg/m³ mit einer Schrittweite von 100 kg/m³ verändert. Da die Rohdichte und die spezifische Wärmekapazität bei den vorliegenden thermischen Prozessen nur als Produkt auftreten, kann auf eine explizite Betrachtung der spezifischen Wärmekapazität verzichtet werden, da ihre Schwankungsbreite mit ungefähr 800 J/(kg K) bis 1200 J/(kg K) kleiner als die der Rohdichte ist.

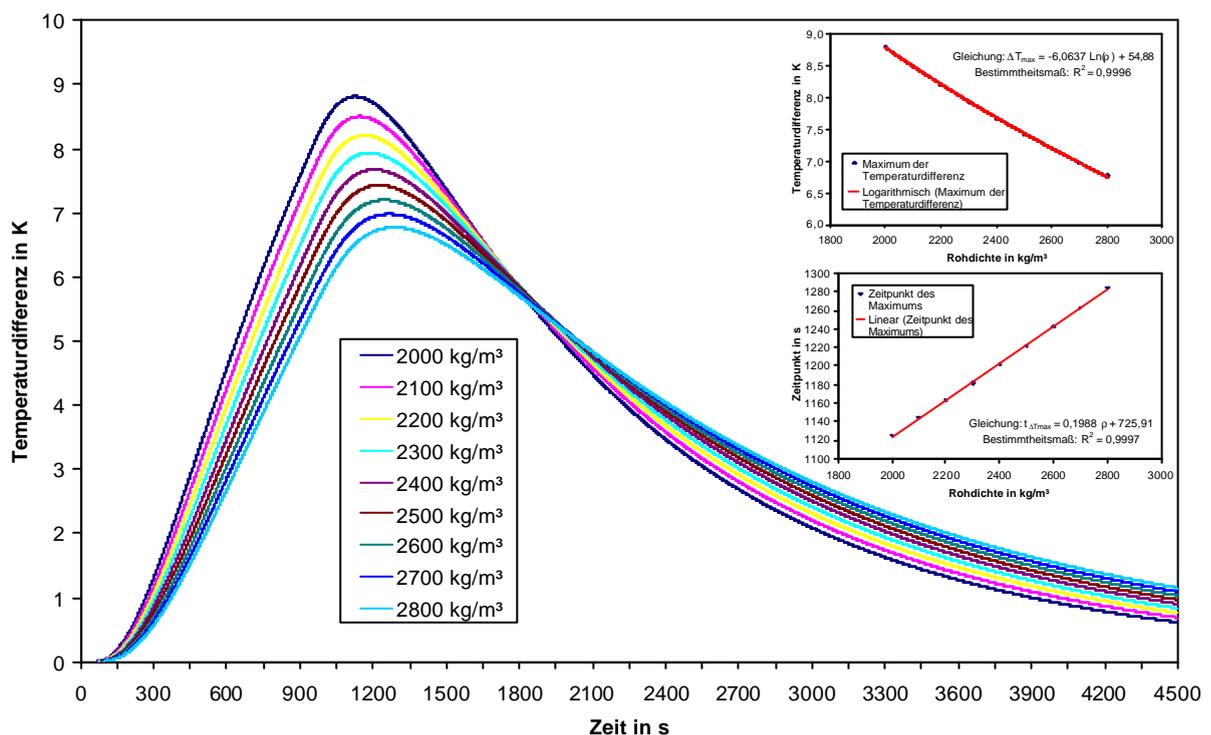


Abbildung 6.14 Variation der Rohdichte des Betons: Temperaturdifferenzkurven für Referenz- und 0,02 m tiefe Fehlstellen und Maxima der Temperaturdifferenz sowie deren Zeitpunkte in Abhängigkeit der Rohdichte (eingefügte Grafik)

In Abbildung 6.14 werden die Temperaturdifferenzkurven zwischen einer Referenz- und einer 0,02 m tiefen Fehlstelle für die unterschiedlichen Rohdichten des Betons gezeigt. Mit zunehmender Rohdichte des Betons sinkt die maximale Temperaturdifferenz bei insgesamt

kleineren absoluten Temperaturen und die Änderung der Temperaturdifferenz verlangsamt sich, weshalb das Temperaturmaximum zu einem späteren Zeitpunkt auftritt.

Die Temperaturmaxima und deren Zeitpunkte sind in Abhängigkeit von der Rohdichte des Betons in den eingefügten Diagrammen in Abbildung 6.14 dargestellt. Die Abhängigkeit der maximalen Temperaturdifferenz lässt sich für den betrachteten Bereich sehr gut mit einem Bestimmtheitsmaß von 0,9996 durch eine logarithmische Funktion anpassen. Die Zeitpunkte der Temperaturmaxima steigen in Abhängigkeit der Rohdichte des Betons quasi linear an. Das Bestimmtheitsmaß für die lineare Anpassung beträgt 0,9997.

6.4 Geometrieparameter

6.4.1 Tiefe der Inhomogenität

Die Tiefe der Inhomogenität stellt einen der Parameter dar, der bei den experimentellen Messungen bestimmt werden soll. Insofern gibt es für die Tiefe keinen wirklichen Standardwert. Bei der Variation der anderen Parameter wurden daher die zwei sinnvollen Einbautiefen von 0,02 m bzw. 0,04 m frei gewählt. Die Variation der Tiefe wurde von 0,01 m bis 0,10 m mit einer Schrittweite von 0,01 m durchgeführt.

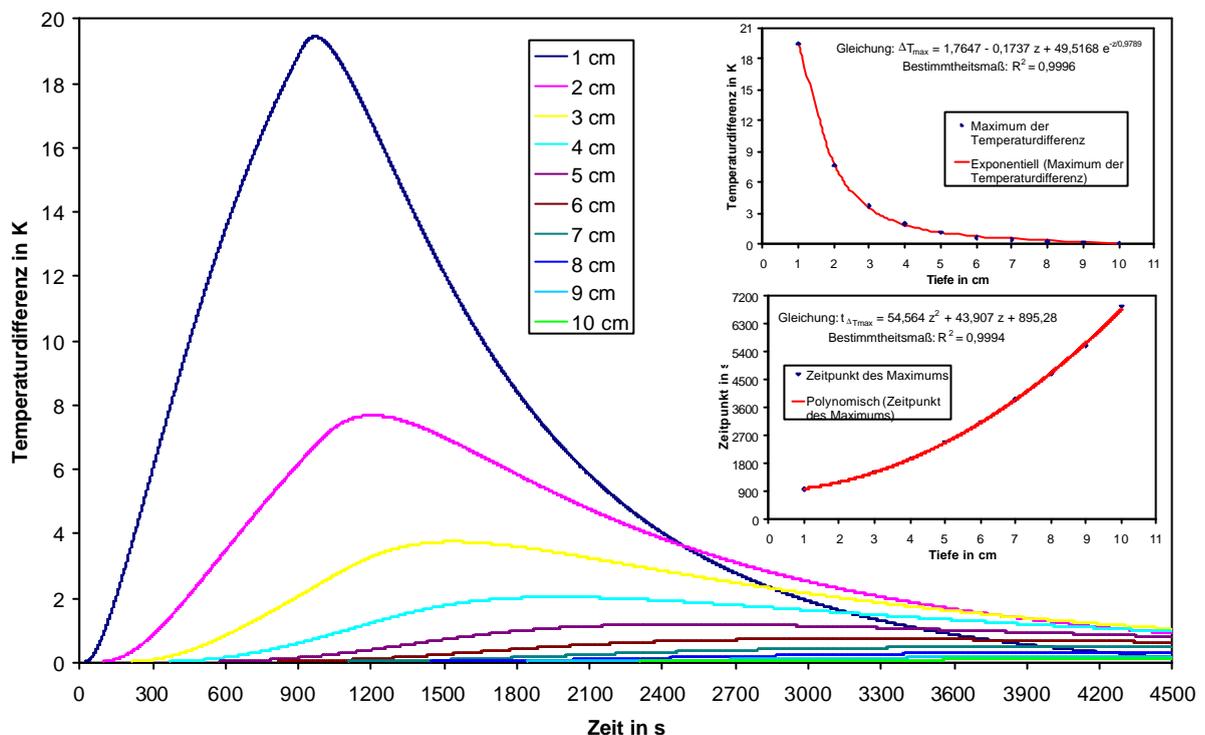


Abbildung 6.15 Variation der Tiefe der Inhomogenität: Temperaturdifferenzkurven für Referenz- und verschieden tiefe Fehlstellen und Maxima der Temperaturdifferenz sowie deren Zeitpunkte in Abhängigkeit der Tiefe der Inhomogenität (eingefügte Grafik)

In Abbildung 6.15 sind die Temperaturdifferenzkurven zwischen einer Referenz- und den verschieden tiefen Fehlstellen dargestellt. Erwartungsgemäß nimmt die Temperaturdifferenz bis zu ihrem jeweiligen Maximum ΔT_{\max} umso schneller zu und nach dem Erreichen des Maximums auch wieder umso schneller ab, je flacher die Inhomogenität unter der Oberfläche liegt. Die maximale Temperaturdifferenz tritt ebenfalls erwartungsgemäß mit zunehmender Tiefe der Inhomogenität immer später auf.

Das obere eingefügte Diagramm in Abbildung 6.15 bildet die maximale Temperaturdifferenz in Abhängigkeit der Tiefe der Inhomogenität ab. Die Vermutung, dass Temperaturmaximum in Abhängigkeit der Tiefe exponentiell abfällt, lässt sich durch die Anpassung mit einer Exponentialfunktion bei einem Bestimmtheitsmaß von 0,9996 gut bestätigen.

Das untere eingefügte Diagramm in Abbildung 6.15 zeigt die Zeitpunkte der maximalen Temperaturdifferenz in Abhängigkeit der Tiefe der Inhomogenität. Die Zeitpunkte des Temperaturmaximums steigen abhängig von der Tiefe quasi quadratisch an. Das Bestimmtheitsmaß der quadratischen Anpassung beträgt 0,9994.

6.4.2 Dicke der Inhomogenität

Die Dicke der Inhomogenität wurde standardmäßig mit 0,10 m angenommen und zur Untersuchung ihres Einflusses zwischen 0,01 m und 0,10 m mit einer Schrittweite von 0,01 m verändert.

In Abbildung 6.16 sind die Temperaturdifferenzkurven zwischen einer Referenz- und einer 0,02 m tiefen Fehlstelle für die unterschiedlichen Dicken der Inhomogenität dargestellt. Selbst für die mit 0,02 m sehr oberflächennahe Fehlstelle ist ein messbarer Unterschied nur für Dicken bis zu 0,02 m festzustellen. Die maximalen Abweichungen bei Dicken von 0,02 m bis 0,10 m liegen für den gesamten Beobachtungszeitraum mit 0,2 K im Bereich des thermischen Rauschens.

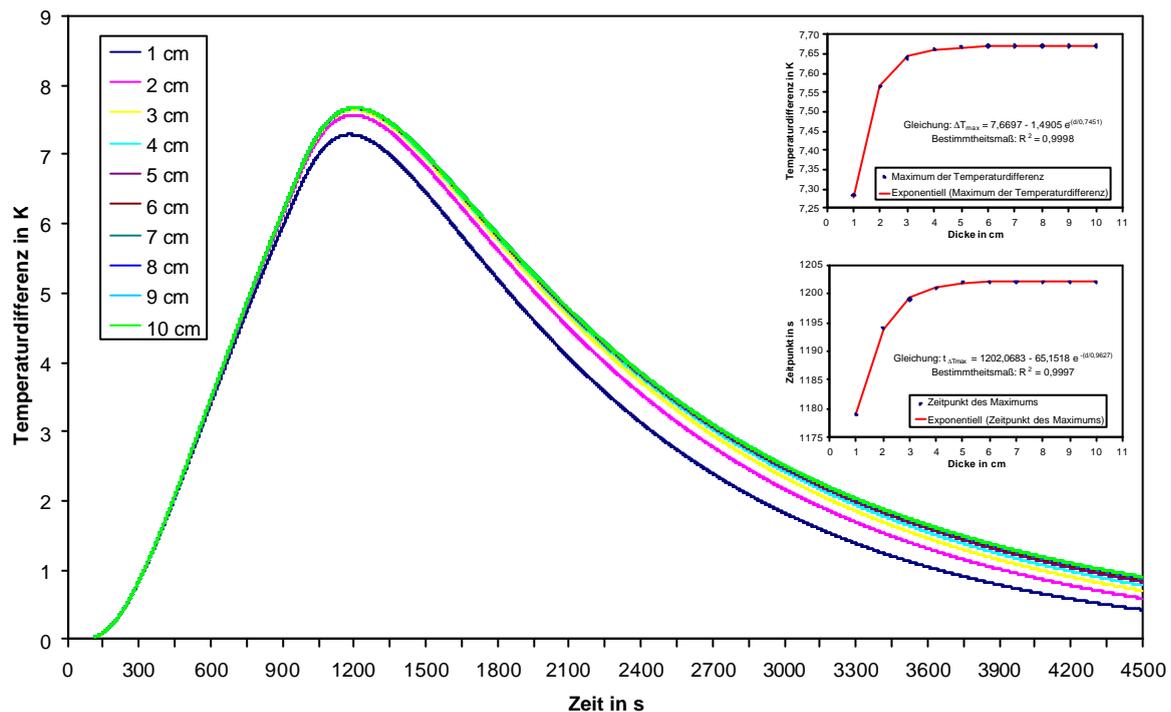


Abbildung 6.16 Variation der Dicke der Inhomogenität: Temperaturdifferenzkurven für Referenz- und 0,02 m tiefe Fehlstellen und Maxima der Temperaturdifferenz sowie deren Zeitpunkte in Abhängigkeit der Dicke der Inhomogenität (eingefügte Grafik)

Auf die maximale Temperaturdifferenz und deren Zeitpunkt hat die Dicke demzufolge nur bei sehr dünnen Inhomogenitäten einen messbaren Einfluss, was die beiden in Abbildung 6.16 eingefügten Diagramme zeigen. In Abhängigkeit der Dicke der Inhomogenität nähern sich beide Parameter asymptotisch den jeweiligen Grenzwerten von 7,67 K bzw. 1202 s an. Die

Annäherung an die Grenzwerte lässt sich sehr gut mit in den Diagrammen dargestellten Funktionen anpassen. Das Bestimmtheitsmaß beträgt 0,9998 bzw. 0,9997.

Die Standardabweichung für die maximale Temperaturdifferenz ist mit 0,11 K schon im Bereich des thermischen Rauschens und wird nochmals wesentlich verbessert (0,03 K), wenn die Dicke von 0,01 m nicht in die Berechnungen eingeht. Analog ist die Standardabweichung für die Zeitpunkte 6,93 s, was wiederum kaum höher als der sinnvoll gewählte Zeitschritt von 5 s ist, und auch dieser Wert ist bei Vernachlässigung der Dicke von 0,01 m mit 2,54 s deutlich kleiner.

Nur für eine im Verhältnis zur Tiefe der Inhomogenität sehr große Erwärmungszeit liegt demzufolge eine Beeinflussung der Oberflächentemperatur über der Fehlstelle durch die Dicke der Inhomogenität vor. Die Bestimmung der anderen Geometrieparameter insbesondere der Tiefe der Inhomogenität über eine Auswertung der Temperaturdifferenzkurven wird daher kaum durch die Dicke der Inhomogenität beeinträchtigt. Andererseits kann die Dicke selbst nicht auf diese Art und Weise bestimmt werden.

6.4.3 Flächenhafte Ausdehnung der Inhomogenität

Bei den experimentellen Messungen wurden Inhomogenitäten mit den quadratischen Grundflächen von $0,10 \times 0,10 \text{ m}^2$ und $0,20 \times 0,20 \text{ m}^2$ in den Probekörper eingebracht. Für die Simulationen wurde als Standardwert eine Kantenlänge von 0,10 m angesetzt und diese zur Untersuchung des Einflusses der flächenhaften Ausdehnung mit einer Schrittweite von 0,01 m bis hin zu einer Länge von 0,20 m variiert.

Abbildung 6.17 zeigt die Temperaturdifferenzkurven zwischen einer Referenz- und einer 0,02 m tiefen Fehlstelle für die verschiedenen flächigen Ausdehnungen der Inhomogenität. Erwartungsgemäß steigt die maximale Temperaturdifferenz mit größer werdender flächiger Ausdehnung der Inhomogenität an, da sich der Weg des seitlichen Abflusses der gestauten Wärmemenge vergrößert. Aus dem selben Grund verlagert sich auch der Zeitpunkt des Temperaturmaximums zeitlich nach hinten.

Beide Parameter sind in Abhängigkeit der Kantenlänge der quadratischen flächigen Ausdehnung in den eingefügten Diagrammen in Abbildung 6.17 dargestellt. Die maximale Temperaturdifferenz kann durch eine Exponentialfunktion mit einem Bestimmtheitsmaß von 0,99996 angepasst werden. Die verwendete Exponentialfunktion lässt für den Parameter einen steigenden asymptotischen Verlauf erkennen, dessen Grenzwert mit dem für eine Trennschicht von 10,61 K, die einer unendlich ausgedehnten Inhomogenität entspricht, übereinstimmen sollte.

Die Zeitpunkte der maximalen Temperaturdifferenz verhalten sich in Abhängigkeit der flächigen Ausdehnung zunächst linear. Erst ab einer Kantenlänge von 0,18 m verringert sich die Steigung und der Parameter nähert sich vermutlich analog der maximalen Temperaturdifferenz dem Grenzwert der Trennschicht von 1674 s.

Theoretisch sollten die Asymptoten erreicht sein, wenn die flächige Ausdehnung der Inhomogenität so groß ist, dass die mittig über ihr gestaute Wärmemenge nicht mehr seitlich sondern nur noch über die Inhomogenität und die Oberfläche wieder abgegeben werden kann.

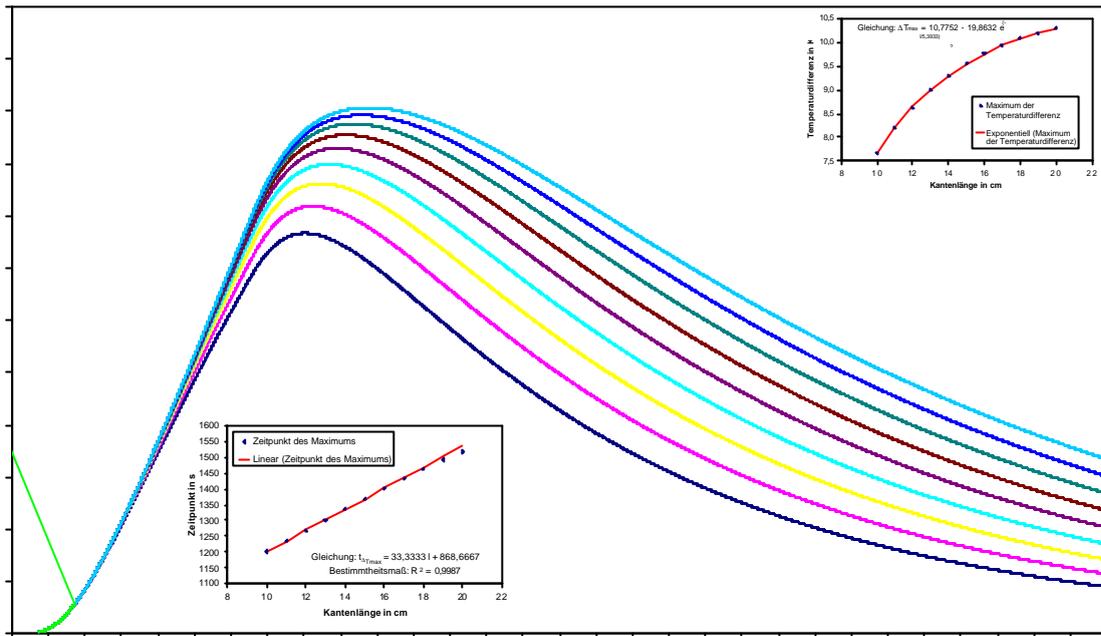


Abbildung 6.17 Variation der Fläche der Inhomogenität: Temperaturdifferenzkurven für Referenz- und 0,02 m tiefe Fehlstellen und Maxima der Temperaturdifferenz sowie deren Zeitpunkte in Abhängigkeit der flächigen Ausdehnung der Inhomogenität (eingefügte Grafik)

6.4.4 Probekörperdicke

Die Dicke der realen Probekörper wurde wie bereits in Kapitel 4.1.3 beschrieben mit 0,5 m ausgeführt. Bei den Simulationsrechnungen wurde zur Reduzierung der Rechenkapazität nur mit einer Dicke von 0,25 m gerechnet. Im Rahmen der Parametervariation wurde der Einfluss einer unterschiedlichen Probekörperdicke für den Bereich von 0,15 m bis 0,5 m mit einer Schrittweite von 0,05 m untersucht.

Die Abbildung 6.18 zeigt die Temperaturdifferenzkurven zwischen einer Referenz- und einer 0,02 m tiefen Fehlstelle für die unterschiedlichen Probekörperdicken. Aus den beiden eingefügten Diagrammen der Abbildung ist ersichtlich, dass für eine Beobachtungszeit von 3600 s keine Beeinflussung der Temperaturdifferenzkurven sowie deren charakteristischen Parameter vorliegt. Die maximale Temperaturdifferenz und deren Zeitpunkte stimmen für alle untersuchten Probekörperdicken exakt überein.

Das Ergebnis dieser Variation bestätigt auch die Annahme, dass der Probekörper sowohl bei den experimentellen Messungen als auch bei den Simulationsrechnungen als semiinfiniter Körper betrachtet werden kann.

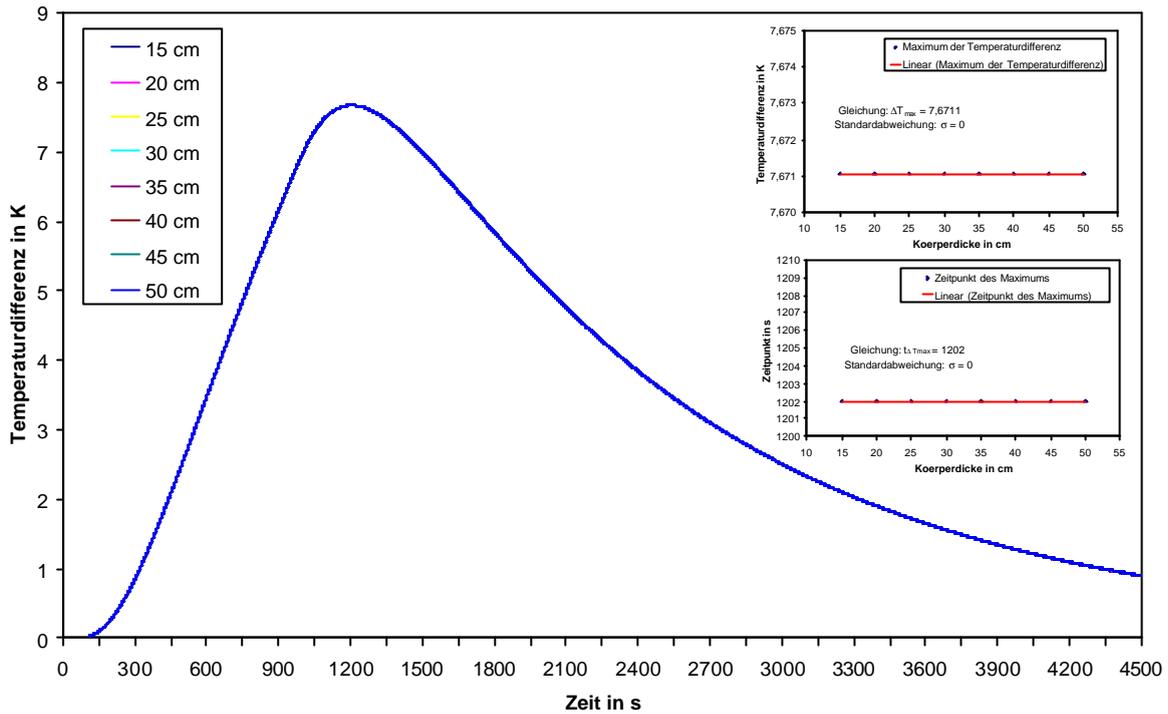


Abbildung 6.18 Variation der Probekörperdicke: Temperaturdifferenzkurven für Referenz- und 0,02 m tiefe Fehlstellen und Maxima der Temperaturdifferenz sowie deren Zeitpunkte in Abhängigkeit der Probekörperdicke (eingefügte Grafik)

6.5 Zusammenfassung

Nachfolgend sind die Ergebnisse der Parameteruntersuchungen tabellarisch dargestellt. In den einzelnen Tabellen sind für die Parameter jeweils der Untersuchungsbereich, die Schrittweite, und die Anpassungsfunktion mit der dazugehörigen ersten Ableitung aufgeführt. Zur Veranschaulichung der Dynamik der einzelnen Parameter sind zudem die betragsmäßig maximale und minimale prozentuale Änderung des Funktionswerts bei einer Erhöhung der jeweiligen Variablen um 10 % angegeben.

Parameter	Untersuchungsbereich und Schrittweite	Anpassungsfunktion T_{\max} und 1. Ableitung $\frac{dT_{\max}}{dx}$	$\left \frac{T_{\max}(1,1x) - T_{\max}(x)}{T_{\max}(x)} \right $
Weginkrement	2 – 10 mm mit 1 mm	$T_{\max} = -0,28dx + 38,81$ $\frac{dT_{\max}}{ddx} = -0,28$	$dx = 10 : \max .. = 0,8\%$ $dx = 2 : \min .. = 0,1\%$

Tabelle 6.2 Zusammenfassung der Ergebnisse für das Weginkrement

Tabelle 6.2 fasst die Ergebnisse für das Weginkrement zusammen. Die übrigen Parameter sind bezogen auf die maximale Temperaturdifferenz in Tabelle 6.3 und bezüglich des dazugehörigen Zeitpunkts in Tabelle 6.4 aufgelistet. In den Tabellen nicht berücksichtigt sind die Erwärmungsart (siehe 6.2.1) und die Wärmeverluste (siehe 6.2.2), bei denen entsprechende Angaben nicht möglich sind.

Parameter	Untersuchungsbereich und Schrittweite	Anpassungsfunktion ΔT_{\max} und 1. Ableitung $\frac{d(\Delta T_{\max})}{dx}$	$\left \frac{\Delta T_{\max}(1,1x) - \Delta T_{\max}(x)}{\Delta T_{\max}(x)} \right $
Zeitinkrement	0,5 – 3 s mit 0,5 s	$\Delta T_{\max} = 0,01dt + 7,67$ $\frac{d(\Delta T_{\max})}{ddt} = 0,01$	$ \dots \approx 0\%$
Wärme- stromdichte	250 – 2500 W/m ² mit 250 W/m ²	$\Delta T_{\max} = 0,01q + 0,20$ $\frac{d(\Delta T_{\max})}{dq} = 0,01$	$q = 2500 : \max \dots = 9,9\%$ $q = 250 : \min \dots = 8,8\%$
Erwärmungs- zeit	60 – 7200 s mit min 120 s und max 1800 s	$\Delta T_{\max} = 16,24(1 - e^{-0,0008t_q + 0,03})$ $\frac{d(\Delta T_{\max})}{dt_q} = 0,01e^{-0,0008t_q + 0,03}$	$t_q = 60 : \max \dots = 21,4\%$ $t_q = 7200 : \min \dots = 0,1\%$
Ausgangs- und Umgebungs- temperatur	10 – 30 °C mit 2 °C	$\Delta T_{\max} = -0,01T_0 + 7,81$ $\frac{d(\Delta T_{\max})}{dT_0} = -0,01$	$T_0 = 30 : \max \dots = 0,3\%$ $T_0 = 10 : \min \dots = 0,1\%$
Wärme- leitfähigkeit	1,1 – 3,1 W/(m K) mit 0,2 W/(m K)	$\Delta T_{\max} = -0,06I^4 + 0,65I^3$ $- 2,86I^2 + 5,82I + 3,22$ $\frac{d(\Delta T_{\max})}{dI} = -0,24I^3 + 1,95I^2$ $- 5,73I + 5,82$	$I = 1,1 : \max \dots = 2,3\%$ $I = 2,4 : \min \dots \approx 0\%$
Rohdichte	2000 – 2800 kg/m ³ mit 100 kg/m ³	$\Delta T_{\max} = -6,06 \ln(r) + 54,88$ $\frac{d(\Delta T_{\max})}{dr} = \frac{-6,06}{r}$	$r = 2800 : \max \dots = 8,6\%$ $r = 2000 : \min \dots = 6,6\%$
Fehlstellen- tiefe	1 – 10 cm mit 1 cm	$\Delta T_{\max} = 1,76 - 0,17z + 49,52e^{-\frac{z}{0,98}}$ $\frac{d(\Delta T_{\max})}{dz} = -0,17 - 50,58e^{-\frac{z}{0,98}}$	$z = 10 : \max \dots = 592,5\% ^\circ$ $z = 1 : \min \dots = 9,0\%$
Fehlstellen- dicke	1 – 10 cm mit 1 cm	$\Delta T_{\max} = 7,67 - 1,49e^{-\frac{d}{0,75}}$ $\frac{d(\Delta T_{\max})}{dd} = 2,00e^{-\frac{d}{0,75}}$	$d = 1 : \max \dots = 0,7\%$ $d = 10 : \min \dots \approx 0\%$
Fehlstellen- ausdehnung	10 – 20 cm mit 1 cm	$\Delta T_{\max} = 10,78 - 19,86e^{-\frac{l}{5,39}}$ $\frac{d(\Delta T_{\max})}{dl} = 3,68e^{-\frac{l}{5,39}}$	$l = 10 : \max \dots = 6,9\%$ $l = 20 : \min \dots = 1,5\%$
Probe- körperdicke	15 – 50 cm mit 5 cm	$\Delta T_{\max} = 7,67$ $\frac{d(\Delta T_{\max})}{dz_{PK}} = 0$	$ \dots = 0\%$

Tabelle 6.3 Zusammenfassung der Ergebnisse hinsichtlich DT_{\max}

[°] Der hohe Wert ergibt sich durch Ungenauigkeiten der Anpassungsfunktion bei tiefen Fehlstellen.

Parameter	Untersuchungsbereich und Schrittweite	Anpassungsfunktion $t_{\Delta T_{\max}}$ und 1. Ableitung $\frac{dt_{\Delta T_{\max}}}{dx}$	$\left \frac{t_{\Delta T_{\max}}(1,1x) - t_{\Delta T_{\max}}(x)}{t_{\Delta T_{\max}}(x)} \right $
Zeitinkrement	0,5 – 3 s mit 0,5 s	$t_{\Delta T_{\max}} = 1202$ $\frac{dt_{\Delta T_{\max}}}{ddt} = 0$	$ \dots = 0\%$
Wärme- stromdichte	250 – 2500 W/m ² mit 250 W/m ²	$t_{\Delta T_{\max}} = -0,008q + 1212,5$ $\frac{dt_{\Delta T_{\max}}}{dq} = -0,008$	$q = 2500 : \max \dots = 0,2\%$ $q = 250 : \min \dots \approx 0\%$
Erwärmungs- zeit	60 – 7200 s mit min 120 s und max 1800 s	$t_{\Delta T_{\max}} = 157,3 + 0,98t_q + 457,4e^{-\frac{t_q}{857,7}}$ $\frac{dt_{\Delta T_{\max}}}{dt_q} = 0,98 - 0,5e^{-\frac{t_q}{857,7}}$	$t_q = 7200 : \max \dots = 9,8\%$ $t_q = 60 : \min \dots = 0,5\%$
Ausgangs- und Umgebungs- temperatur	10 – 30 °C mit 2 °C	$t_{\Delta T_{\max}} = -0,3T_0 + 1207,8$ $\frac{dt_{\Delta T_{\max}}}{dT_0} = -0,3$	$T_0 = 30 : \max \dots = 0,1\%$ $T_0 = 10 : \min \dots \approx 0\%$
Wärme- leitfähigkeit	1,1 – 3,1 W/(m K) mit 0,2 W/(m K)	$t_{\Delta T_{\max}} = 805,9e^{\frac{1,01}{I+0,4}}$ $\frac{dt_{\Delta T_{\max}}}{dI} = -\frac{816,7}{(I+0,4)^2} e^{\frac{1,01}{I+0,4}}$	$I = 1,1 : \max \dots = 5,0\%$ $I = 3,1 : \min \dots = 2,6\%$
Rohdichte	2000 – 2800 kg/m ³ mit 100 kg/m ³	$t_{\Delta T_{\max}} = 0,2r + 725,9$ $\frac{dt_{\Delta T_{\max}}}{dr} = 0,2$	$r = 2800 : \max \dots = 4,3\%$ $r = 2000 : \min \dots = 3,5\%$
Fehlstellen- tiefe	1 – 10 cm mit 1 cm	$t_{\Delta T_{\max}} = 54,6z^2 + 43,9z + 895,3$ $\frac{dt_{\Delta T_{\max}}}{dz} = 109,1z + 43,9$	$z = 10 : \max \dots = 17,5\%$ $z = 1 : \min \dots = 1,6\%$
Fehlstellen- dicke	1 – 10 cm mit 1 cm	$t_{\Delta T_{\max}} = 1202,1 - 65,2e^{-\frac{d}{0,96}}$ $\frac{dt_{\Delta T_{\max}}}{dd} = 67,7e^{-\frac{d}{0,96}}$	$d = 1 : \max \dots = 0,2\%$ $d = 10 : \min \dots \approx 0\%$
Fehlstellen- ausdehnung	10 – 20 cm mit 1 cm	$t_{\Delta T_{\max}} = 33,3l + 868,7$ $\frac{dt_{\Delta T_{\max}}}{dl} = 33,3$	$l = 20 : \max \dots = 4,3\%$ $l = 10 : \min \dots = 2,8\%$
Probekörper- dicke	15 – 50 cm mit 5 cm	$t_{\Delta T_{\max}} = 1202$ $\frac{dt_{\Delta T_{\max}}}{dz_{PK}} = 0$	$ \dots = 0\%$

Tabelle 6.4 Zusammenfassung der Ergebnisse hinsichtlich $t_{D T_{\max}}$

7 Simulation der Aufheiz- und Abkühlvorgänge und Vergleich mit den experimentellen Ergebnissen an den Probekörpern

7.1 Beton mit Hohlstellen (Pk1)

Analog zu den Messungen am Probekörper Pk1 wurden Simulationen mit Erwärmungszeiten von 300, 600, 900, 1800, 2700 und 3600 s berechnet. Die Abmaße des simulierten Probekörpers wurden mit $0,50 \times 0,50 \times 0,25 \text{ m}^3$ so gewählt, dass wie bei den experimentellen Messungen der Probekörper als semiinfinites Körper betrachtet werden kann. Für die einzelnen Parameter wurden die Standardwerte aus Kapitel 6 angenommen. Nur die Ausgangstemperatur wurde entsprechend dem Messprotokoll der jeweiligen Messung angepasst.

Für einen quantitativen Vergleich zwischen Experiment und Simulation wurden zunächst nur die Referenzstellen der experimentellen Messungen und der Simulationen miteinander verglichen. Abbildung 7.1 zeigt die experimentellen und simulierten Temperatur-Zeit-Kurven des Betons ohne Fehlstelle für die sechs verschiedenen Erwärmungszeiten.

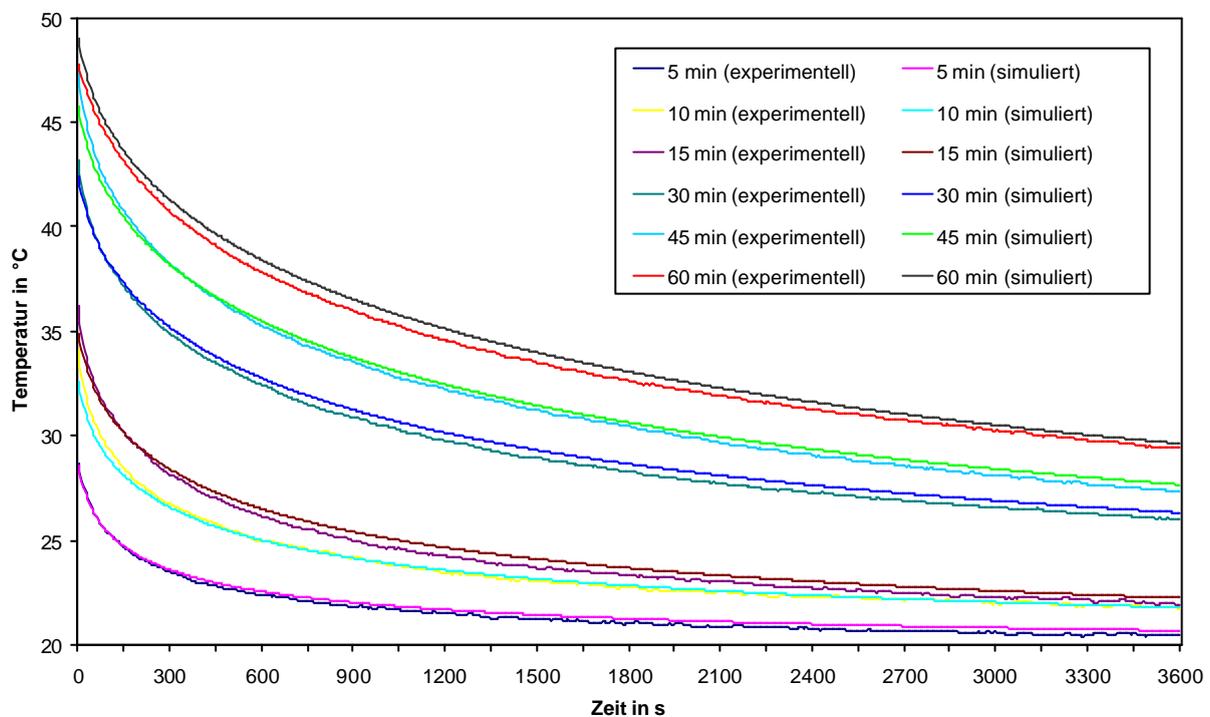


Abbildung 7.1 Experimentelle und simulierte Temperatur-Zeit-Kurven über Referenzstellen für unterschiedliche Erwärmungszeiten

Das Bestimmtheitsmaß der einzelnen Kurvenpaare schwankt zwischen 0,9974 und 0,9996. Die Differenzkurven zwischen den experimentellen und simulierten Temperatur-Zeit-Kurven sind in Abbildung 7.2 dargestellt.

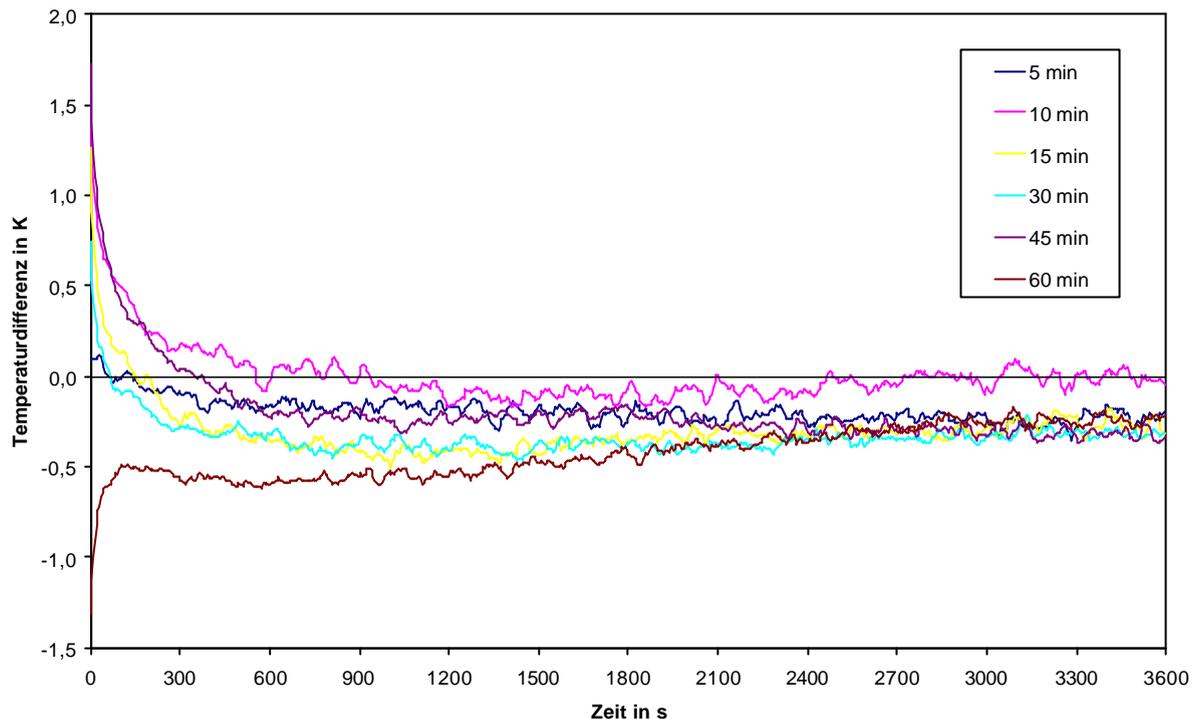


Abbildung 7.2 Differenzkurven der jeweiligen experimentellen abzüglich der jeweiligen simulierten Temperatur-Zeit-Kurve für unterschiedliche Erwärmungszeiten

Nur zu Beginn der Abkühlungsphase weichen die experimentellen und simulierten Temperatur-Zeit-Kurven deutlich voneinander ab, was sich anhand der Differenzkurven aus Abbildung 7.2 erkennen lässt. Die Mittelwerte und die Standardabweichungen der Differenzkurven sind für den betrachteten Zeitbereich von 3600 s in Tabelle 7.1 dargestellt.

Erwärmungszeit	Mittelwert	Standardabweichung
300 s	-0,2	0,1
600 s	0,0	0,2
900 s	-0,3	0,2
1800 s	-0,3	0,1
2700 s	-0,2	0,2
3600 s	-0,4	0,1

Tabelle 7.1 Mittelwerte und Standardabweichungen der Differenzkurven für unterschiedliche Erwärmungszeiten

Die Abweichungen zu Beginn der Abkühlung sind vermutlich auf den in Kapitel 6.1.1 ausführlich betrachteten Einfluss des Weginkrements zurückzuführen. Eine nennenswerte Verbesserung gegenüber dem verwendeten Weginkrement von 0,005 m stellt sich erst ab einem Weginkrement kleiner 0,002 m ein, für das Simulationsrechnungen in dem durchgeführten Umfang mit der zur Verfügung stehenden Rechenkapazität nicht möglich sind.

Die Simulationen wurden für die beiden auch real verwendeten Defektgrößen von $0,10 \times 0,10 \times 0,10 \text{ m}^3$ und $0,20 \times 0,20 \times 0,10 \text{ m}^3$ durchgeführt. Da die Einbautiefen der Inhomogenitäten bei Pk1 teilweise stark von den Solltiefen abweichen, wurde die Tiefe bei den Simulationsrechnungen entsprechend dem Kapitel 6.4.1 für alle Erwärmungszeiten variiert. Abbildung 7.3 zeigt beispielhaft die simulierten Temperatur-Zeit-Kurven über einer

Referenzstelle und über $0,10 \times 0,10 \times 0,10 \text{ m}^3$ großen Fehlstellen für eine Erwärmungszeit von 900 s und Defekttiefen von 0,01 m bis 0,10 m.

Im Gegensatz zu den experimentellen Messungen kann bei den Simulationen auch der Temperaturverlauf der einzelnen Oberflächenpunkte während der Erwärmungszeit dargestellt werden. Bei einem direkten Vergleich von experimentellen und simulierten Kurven wird dieser Teil der Kurven abgeschnitten und die Zeitskala entsprechend der Erwärmungszeit verschoben.

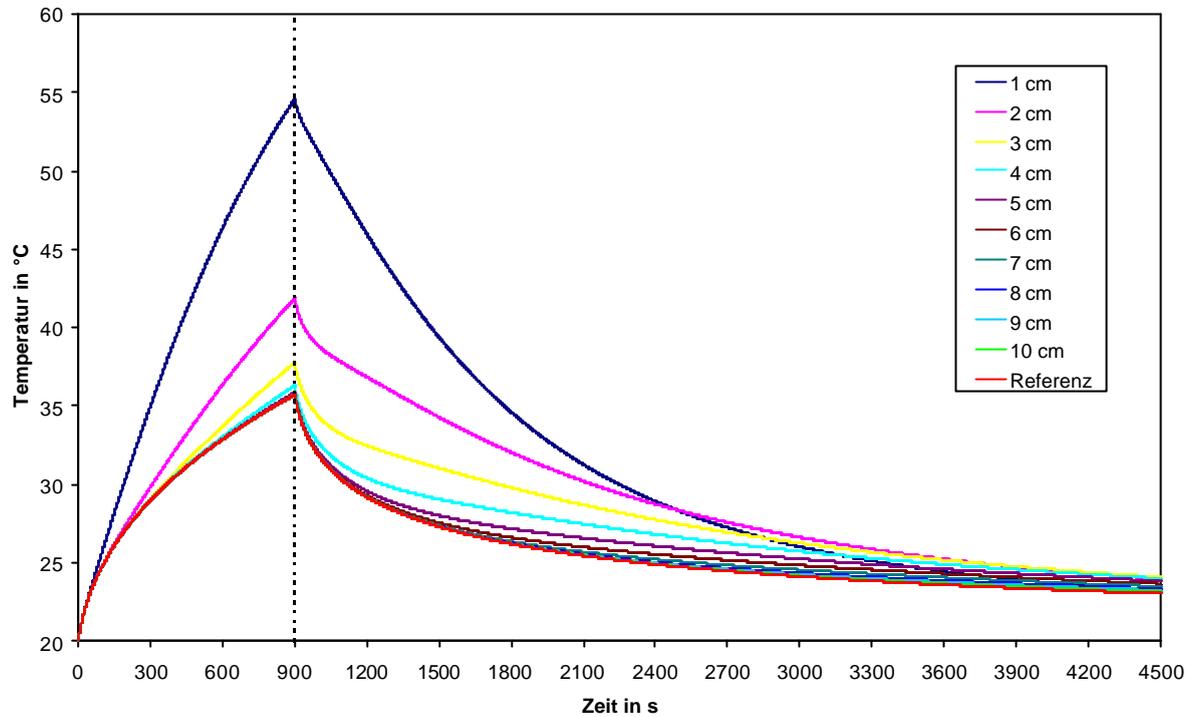


Abbildung 7.3 Temperatur-Zeit-Kurven über einer Referenzstelle und verschieden tief eingebauten Fehlstellen der Größe $0,10 \times 0,10 \times 0,10 \text{ m}^3$ für 900 s Erwärmung

Die entsprechenden Temperaturdifferenzkurven für die in Abbildung 7.3 dargestellten Temperatur-Zeit-Kurven werden in Abbildung 7.4 gezeigt.

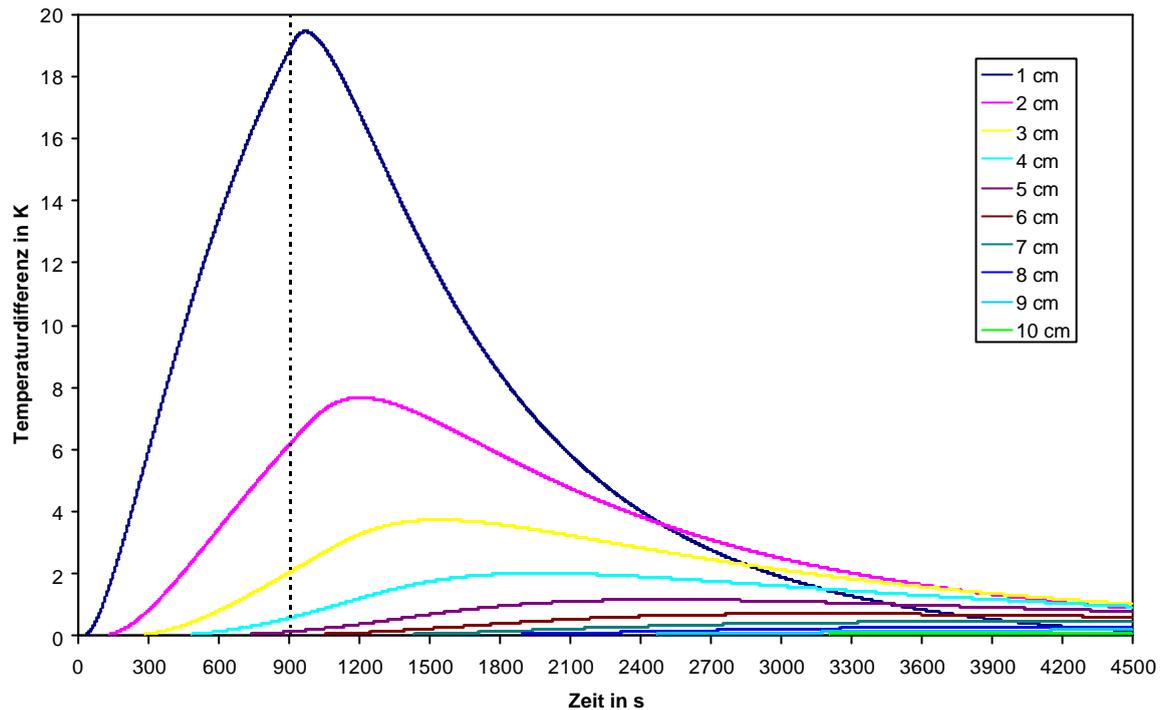


Abbildung 7.4 Temperaturdifferenzkurven zwischen den Temperatur-Zeit-Kurven über den einzelnen Fehlstellen und der Referenzstelle

Analog zu den experimentellen Messungen kann für jede Temperaturdifferenzkurve eine maximale Temperaturdifferenz DT_{max} zu einem Zeitpunkt t_{DTmax} bestimmt werden. Beide Parameter sind in Abhängigkeit der Fehlstellentiefe und der Erwärmungszeit für die $0,10 \times 0,10 \times 0,10 \text{ m}^3$ großen Fehlstellen in Tabelle 7.2 und für die $0,20 \times 0,20 \times 0,10 \text{ m}^3$ großen Fehlstellen in Tabelle 7.3 abgebildet.

Tiefe der Fehlstelle	Erwärmungszeit											
	300 s		600 s		900 s		1800 s		2700 s		3600 s	
	DT_{max} in K	t_{DTmax} in s	DT_{max} in K	t_{DTmax} in s	DT_{max} in K	t_{DTmax} in s	DT_{max} in K	t_{DTmax} in s	DT_{max} in K	t_{DTmax} in s	DT_{max} in K	t_{DTmax} in s
0,01 m	8,02	178	14,63	103	19,45	66	26,03	26	27,32	14	27,33	-707
0,02 m	2,86	475	5,44	374	7,67	302	12,19	187	14,37	135	15,31	105
0,03 m	1,34	846	2,59	728	3,74	635	6,47	455	8,20	357	9,24	296
0,04 m	0,71	1314	1,39	1178	2,03	1068	3,68	828	4,90	678	5,76	579
0,05 m	0,41	1856	0,80	1726	1,18	1603	2,20	1310	3,03	1108	3,68	964
0,06 m	0,25	2510	0,49	2371	0,72	2237	1,37	1903	1,94	1651	2,41	1461
0,07 m	0,16	3254	0,32	k. A. ^d	0,47	2970	0,89	2602	1,28	2308	1,61	2072
0,08 m	0,11	4090	0,21	3856	0,31	3798	0,60	3403	0,87	3073	1,11	2796
0,09 m	0,07	5015	0,15	4844	0,22	4716	0,42	4299	0,61	3938	0,78	3625
0,10 m	0,05	6016	0,10	5850	0,16	k. A. ^d	0,30	5277	0,43	4889	0,56	4545

Tabelle 7.2 Maximale Temperaturdifferenzen DT_{max} und Zeitpunkte t_{DTmax} für die verschieden tiefen Fehlstellen ($0,10 \times 0,10 \times 0,10 \text{ m}^3$) bei unterschiedlichen Erwärmungszeiten aus Simulationen

^d In diesem Fall konnte mit den verwendeten Parametern kein vernünftiger Wert ermittelt werden.

Tiefe der Fehlstelle	Erwärmungszeit											
	300 s		600 s		900 s		1800 s		2700 s		3600 s	
	DT_{max} in K	t_{DTmax} in s										
0,01 m	8,63	303	16,47	193	23,34	129	37,07	53	42,64	29	44,03	16
0,02 m	3,65	896	7,07	744	10,28	618	18,46	369	24,15	246	27,66	182
0,03 m	2,03	1462	3,96	1306	5,80	1171	10,75	857	14,72	651	17,70	516
0,04 m	1,27	2064	2,47	1907	3,63	1766	6,84	1420	9,59	1166	11,84	980
0,05 m	0,83	2713	1,64	2574	2,42	2429	4,60	2057	6,53	1766	8,20	1538
0,06 m	0,57	3465	1,14	3348	1,67	3168	3,20	2773	4,59	2450	5,84	2187
0,07 m	0,41	4291	0,81	k. A. ^e	1,19	3988	2,29	3573	3,31	3223	4,24	2926
0,08 m	0,30	5195	0,59	5001	0,87	4890	1,68	4457	2,43	4082	3,13	3756
0,09 m	0,22	6178	0,44	k. A. ^e	0,65	5974	1,25	5422	1,82	5025	2,35	4673
0,10 m	-	-	0,33	7358	0,50	6986	0,95	6460	-	-	-	-

Tabelle 7.3 Maximale Temperaturdifferenzen DT_{max} und Zeitpunkte t_{DTmax} für die verschieden tiefen Fehlstellen (0,20 x 0,20 x 0,10 m³) bei unterschiedlichen Erwärmungszeiten aus Simulationen

Die Abhängigkeit der beiden Parameter DT_{max} und t_{DTmax} von der Fehlstellentiefe und der Erwärmungszeit bestätigt die Beobachtungen der experimentellen Messungen. DT_{max} nimmt mit zunehmender Fehlstellentiefe ab und steigt mit größer werdender Erwärmungszeit an. Der Zeitpunkt t_{DTmax} tritt desto später auf, desto tiefer die Fehlstelle ist und desto früher je länger die Erwärmungszeit ist. Eine genaue Betrachtung der Abhängigkeit der einzelnen Parameter wurde bereits in Kapitel 6 durchgeführt. Mit Hilfe der Simulationen wird über die beiden Parameter DT_{max} und t_{DTmax} in Kapitel 8.2 die Tiefe der Fehlstellen 1 bis 8 des realen Probekörpers bestimmt.

7.2 Putzablösungen auf Beton (PK2)

Wie bei den experimentellen Messungen wurden Simulationen mit Erwärmungszeiten von 180 s, 360 s und 720 s durchgeführt. Die Simulationen wurden für Putzdicken von 0,01 m und 0,02 m an einem 0,10 x 0,10 x 0,05 m³ großen Betonkörper vorgenommen. Die verwendeten Programm-, Material- und Geometrieparameter sowie die Randbedingungen sind in der Tabelle 7.4 aufgelistet.

Da sich der Putz wegen seiner vergleichsweise kleinen Rohdichte und spezifischen Wärmekapazität leichter erwärmt, wurde wie in Kapitel 4.1 bereits erwähnt bei den experimentellen Messungen mit 0,30 m ein doppelt so großer Abstand wie bei den anderen Probekörpern zwischen Wärmequelle und Probekörper gewählt, weshalb die aufgebrachte Wärmestromdichte bei nahezu gleicher Emissivität (0,91 für Putz und 0,92 für Beton) erheblich kleiner ist.

^e In diesem Fall konnte mit den verwendeten Parametern kein vernünftiger Wert ermittelt werden.

Parameter	Wert
Zeitinkrement	0,5 s
Weginkrement	0,002 m
Erwärmungsart	Statischer Puls
Wärmeverluste an der Oberfläche	Strahlungs- und Konvektionsverluste
Wärmestromdichte	850 W/m ²
Erwärmungszeit	180 s, 360 s, 720 s
Ausgangs- und Umgebungstemperatur	23,0 °C, 21,6 °C, 21,3 °C
Wärmeleitfähigkeit des Putzes	0,35 W/(m K)
Rohdichte des Putzes	1200 kg/m ³
Spezifische Wärmekapazität des Putzes	850 J/(kg K)
Wärmeleitfähigkeit des Betons	2,1 W/(m K)
Rohdichte des Betons	2400 kg/m ³
Spezifische Wärmekapazität des Betons	1000 J/(kg K)
Wärmeleitfähigkeit der Luft	0,026 W/(m K)
Tiefe der Ablösung	0,01 m, 0,02 m
Flächenhafte Ausdehnung der Ablösung	0,10 x 0,10 m ²

Tabelle 7.4 Werte der Parameter für die Simulation von Probekörper Pk2

Im Gegensatz zu den beiden anderen Probekörpern werden die Inhomogenitäten des Probekörpers Pk2 nicht durch Volumenelemente anderen Materials simuliert, sondern die effektive Wärmeleitfähigkeit am Übergang von Putz zu Beton wird in dem gestörten Bereich mit der Wärmeleitfähigkeit von Luft modifiziert, was eher den mit Hilfe von Papierblättern erzeugten Putzablösungen des realen Probekörpers Pk2 entspricht.

Unter der Annahme gleichen Volumens werden mit Hilfe der Gleichung (11) zunächst die effektiven Wärmeleitfähigkeiten am Übergang Putz / Luft

$$I_1 = \frac{2 \cdot I_{\text{Putz}} \cdot I_{\text{Luft}}}{I_{\text{Putz}} + I_{\text{Luft}}} \quad (45)$$

und am Übergang Luft / Beton

$$I_2 = \frac{2 \cdot I_{\text{Luft}} \cdot I_{\text{Beton}}}{I_{\text{Luft}} + I_{\text{Beton}}} \quad (46)$$

berechnet und aus diesen wiederum mit Gleichung (9) die effektive Wärmeleitfähigkeit für die Fehlstelle ermittelt:

$$I = \frac{2 \cdot I_1 \cdot I_2}{I_1 + I_2} = \frac{4 \cdot I_{\text{Putz}} \cdot I_{\text{Luft}} \cdot I_{\text{Beton}}}{2 \cdot I_{\text{Putz}} \cdot I_{\text{Beton}} + I_{\text{Luft}} (I_{\text{Putz}} + I_{\text{Beton}})} \quad (47)$$

Analog zu Kapitel 7.1 wurden die experimentellen Messungen und die Simulationen für ungestörte Bereiche quantitativ miteinander verglichen. Deren Temperatur-Zeit-Kurven sind für die verschiedenen Erwärmungszeiten und eine Putzdicke von 0,01 m in Abbildung 7.5 und eine Putzdicke von 0,02 m in Abbildung 7.7 dargestellt. Das Bestimmtheitsmaß der jeweiligen Kurvenpaare liegt zwischen 0,9852 und 0,9982.

Die zu den einzelnen Erwärmungszeiten dazugehörigen Differenzkurven von experimentellen und simulierten Temperatur-Zeit-Kurven werden für die entsprechenden Putzdicken in Abbildung 7.6 und Abbildung 7.8 gezeigt.

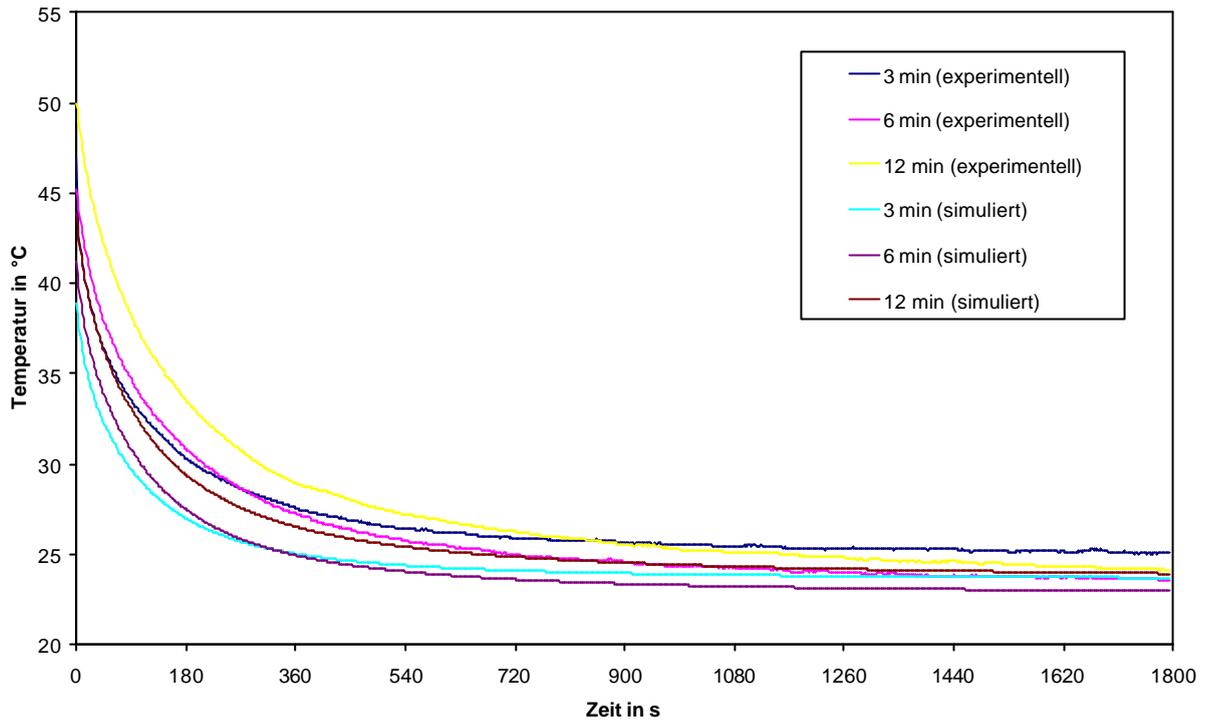


Abbildung 7.5 Experimentelle und simulierte Temperatur-Zeit-Kurven über Referenzstellen für 0,01 m dicken Putz und unterschiedliche Erwärmungszeiten

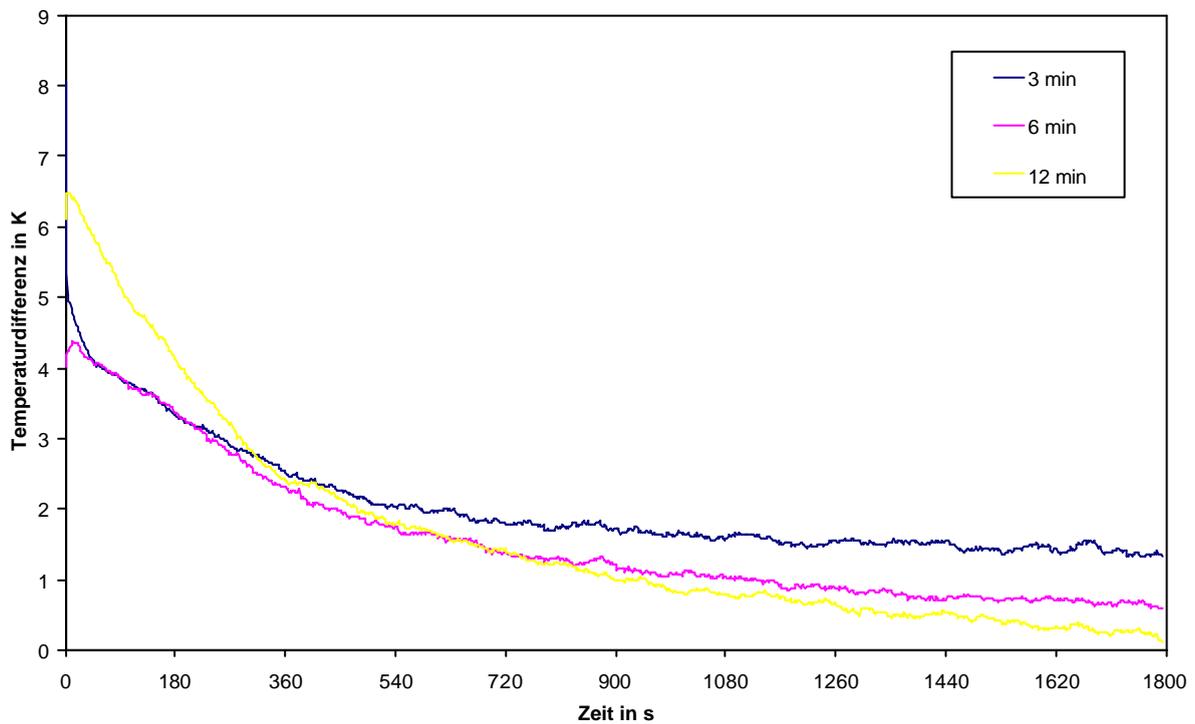


Abbildung 7.6 Differenzkurven der jeweiligen experimentellen abzüglich der jeweiligen simulierten Temperatur-Zeit-Kurve für 0,01 m dicken Putz und unterschiedliche Erwärmungszeiten

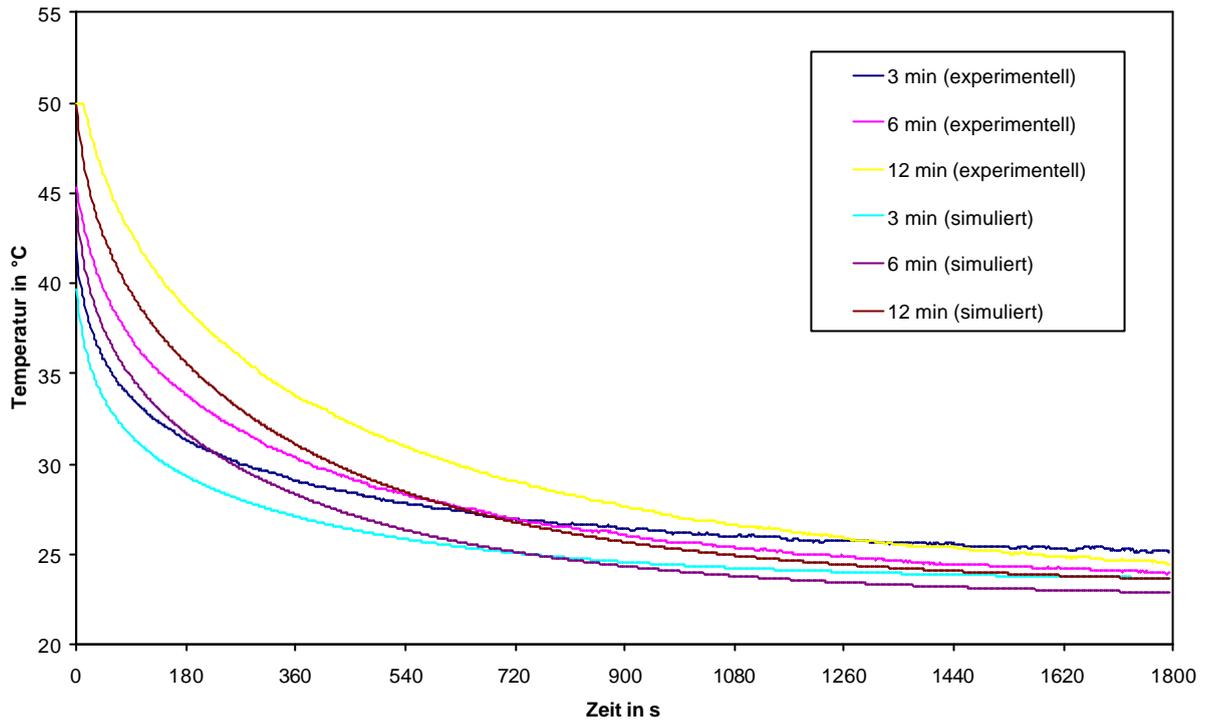


Abbildung 7.7 Experimentelle und simulierte Temperatur-Zeit-Kurven über Referenzstellen für 0,02 m dicken Putz und unterschiedliche Erwärmungszeiten

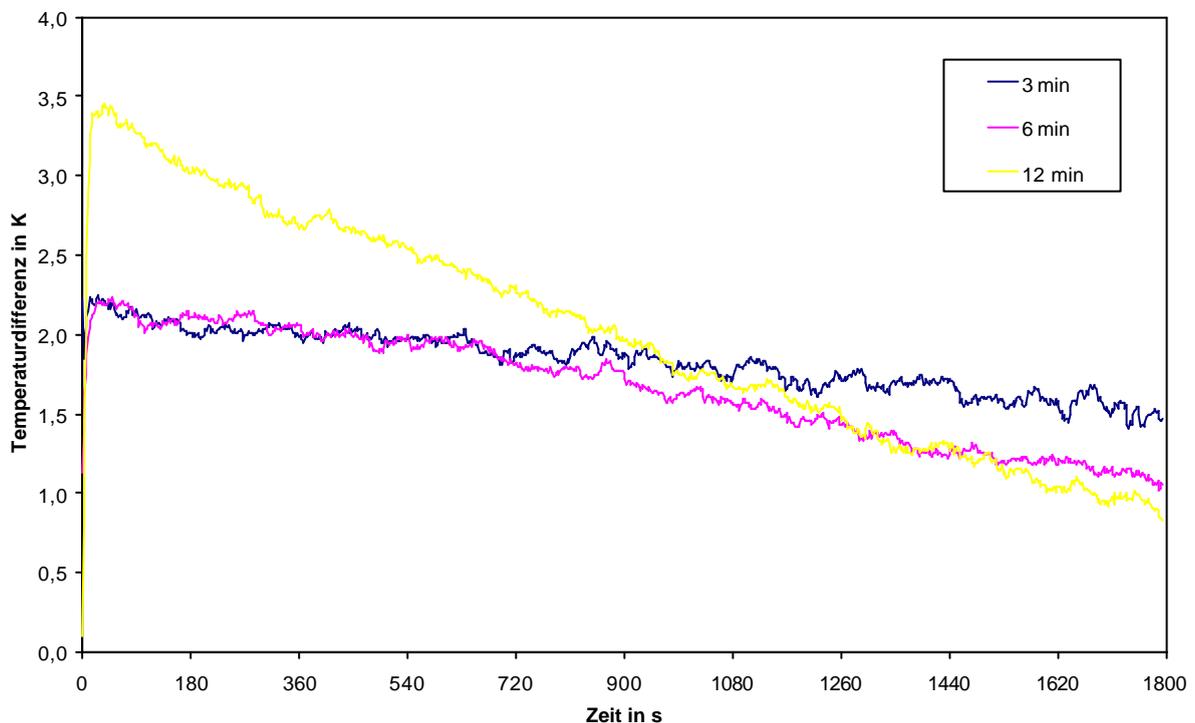


Abbildung 7.8 Differenzkurven der jeweiligen experimentellen abzüglich der jeweiligen simulierten Temperatur-Zeit-Kurve für 0,02 m dicken Putz und unterschiedliche Erwärmungszeiten

Wie den Differenzkurven aus Abbildung 7.6 und Abbildung 7.8 zu entnehmen ist, ist die experimentell gemessene Oberflächentemperatur bei beiden Putzdicken und allen Erwärmungszeiten größer als die simulierte Oberflächentemperatur.

Die mittleren Abweichungen und die Standardabweichungen der Differenzkurven für die unterschiedlichen Erwärmungszeiten sind für das betrachtete Zeitintervall in Tabelle 7.5 zusammengefasst.

Putzdicke	Erwärmungszeit	Mittelwert	Standardabweichung
0,01 m	180 s	2,1	0,8
	360 s	1,6	1,0
	720 s	1,6	1,5
0,02 m	180 s	1,8	0,2
	360 s	1,7	0,3
	720 s	2,0	0,7

Tabelle 7.5 Mittelwerte und Standardabweichungen der Differenzkurven für 0,01 m und 0,02 m dicken Putz und unterschiedliche Erwärmungszeiten

Der größte Temperaturunterschied tritt jeweils direkt zu Beginn der Abkühlungsphase auf. Anschließend nähern sich die jeweiligen experimentellen und simulierten Temperatur-Zeit-Kurven mit fallender Geschwindigkeit für den 0,01 m dicken Putz und mit nahezu gleichbleibender Geschwindigkeit bei dem 0,02 m dicken Putz aneinander an.

Die Ursachen für die zum Teil deutlichen Abweichungen konnten nicht ermittelt werden, da auch eine Variation in Frage kommender Parameter innerhalb eines für sie realistischen Bereiches zu keinen besseren Ergebnissen führte.

Die simulierten Temperatur-Zeit-Kurven über Referenz- und Fehlstellen werden für 0,01 m dicken Putz in Abbildung 7.9 und für 0,02 m dicken Putz in Abbildung 7.10 für alle drei Erwärmungszeiten gezeigt. Die dazugehörigen Temperaturdifferenzkurven sind für beide Putzdicken in Abbildung 7.11 zusammengefasst.

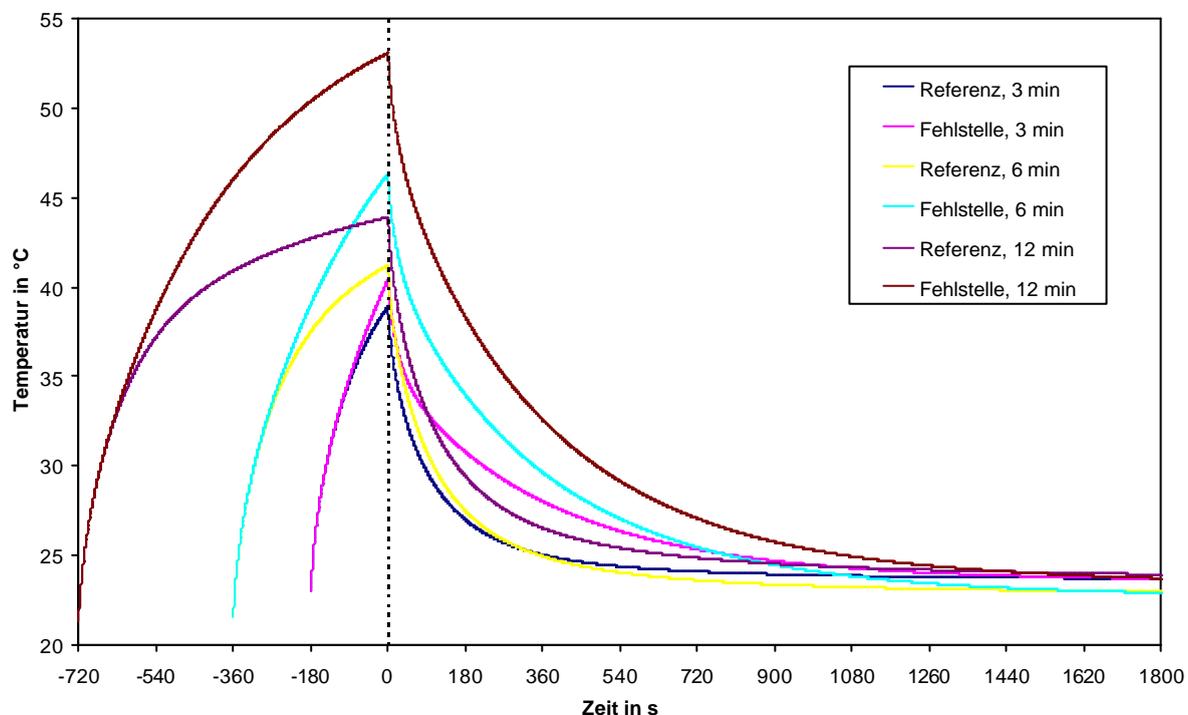


Abbildung 7.9 Temperatur-Zeit-Kurven über einer Referenzstelle und einer Fehlstelle bei 0,01 m dicken Putz für unterschiedliche Erwärmungszeiten

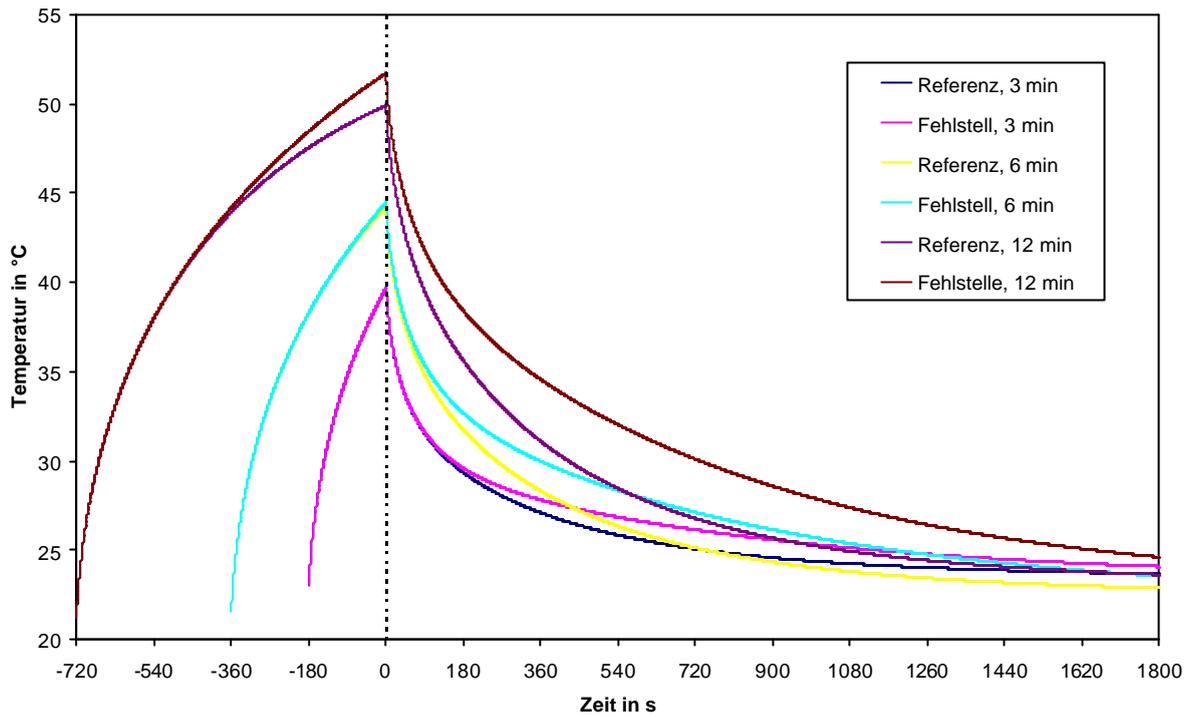


Abbildung 7.10 Temperatur-Zeit-Kurven über einer Referenzstelle und einer Fehlstelle bei 0,02 m dicken Putz für unterschiedliche Erwärmungszeiten

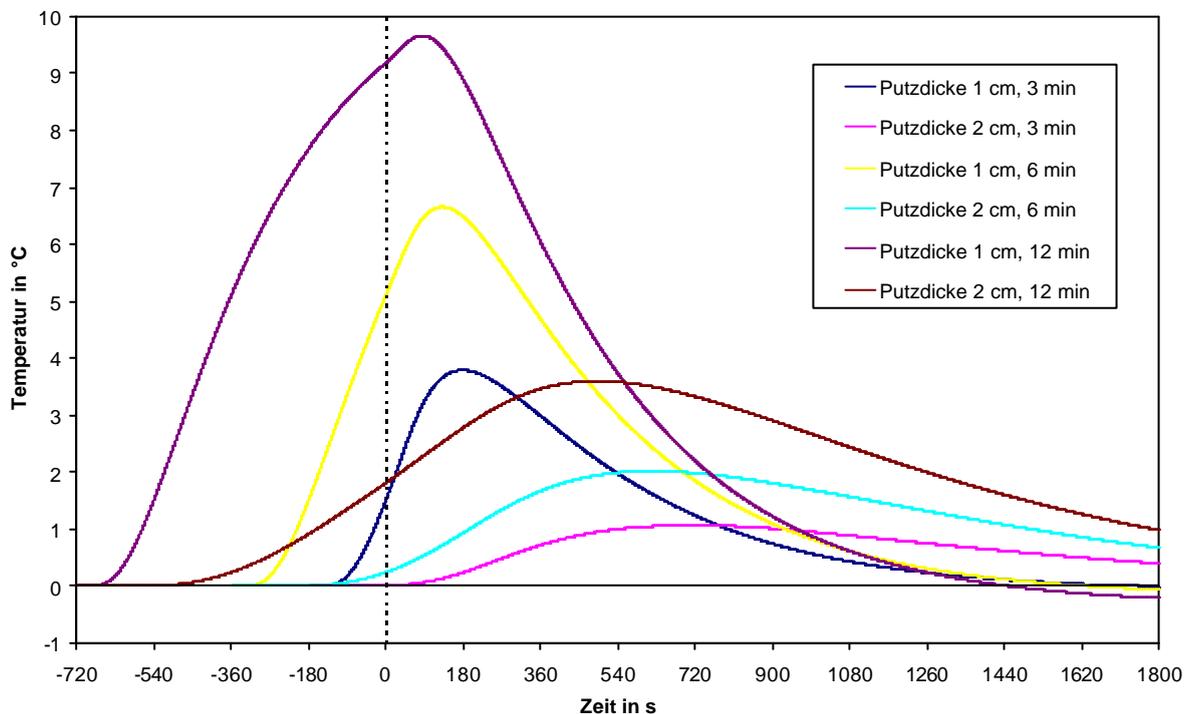


Abbildung 7.11 Temperaturdifferenzkurven zwischen den Temperatur-Zeit-Kurven über den Fehlstellen und dazugehörigen Referenzstellen für unterschiedliche Erwärmungszeiten und 0,01 m bzw. 0,02 m dicken Putz

Wie bei Probekörper Pk1 kann für jede Temperaturdifferenzkurve eine maximale Temperaturdifferenz zu einem bestimmten Zeitpunkt ermittelt werden. Die Werte für die in Abbildung 7.11 gezeichneten Kurven sind in der Tabelle 7.6 aufgelistet.

Putzdicke	Erwärmungszeit					
	180 s		360 s		720 s	
	DT_{max} in K	$t_{DT_{max}}$ in s	DT_{max} in K	$t_{DT_{max}}$ in s	DT_{max} in K	$t_{DT_{max}}$ in s
0,01 m	3,79	177,5	6,65	130	9,66	84
0,02 m	1,07	707	2,02	618	3,60	490,5

Tabelle 7.6 Maximale Temperaturdifferenzen DT_{max} und Zeitpunkte $t_{DT_{max}}$ für die Fehlstellen bei verschiedenen Erwärmungszeiten aus Simulationen

Trotz der Abweichungen bei den absoluten Temperaturwerten stimmen die Ergebnisse für DT_{max} und $t_{DT_{max}}$ zwischen Simulation und experimenteller Messung ganz gut überein, wie ein Vergleich der Tabelle 4.5 und Tabelle 7.6 bzw. die Abbildung 7.12 und die Abbildung 7.13 zeigen, in denen DT_{max} und $t_{DT_{max}}$ in Abhängigkeit der Erwärmungszeit und der Putzdicke aus Simulationen und experimentellen Messungen aufgetragen sind.

Die Abweichungen der experimentell gemessenen von den simulierten maximalen Temperaturdifferenzen liegen betragsmäßig beim 0,01 m dicken Putz zwischen 5,3 % und 16,5 % und beim 0,02 m dicken Putz zwischen 33,6 % und 53,5 %. Bei den Zeitpunkten reichen sie betragsmäßig von 40,5 % bis 46,2 % für 0,01 m dicken Putz und von 5,5 % bis 15,4 % für 0,02 m dicken Putz.

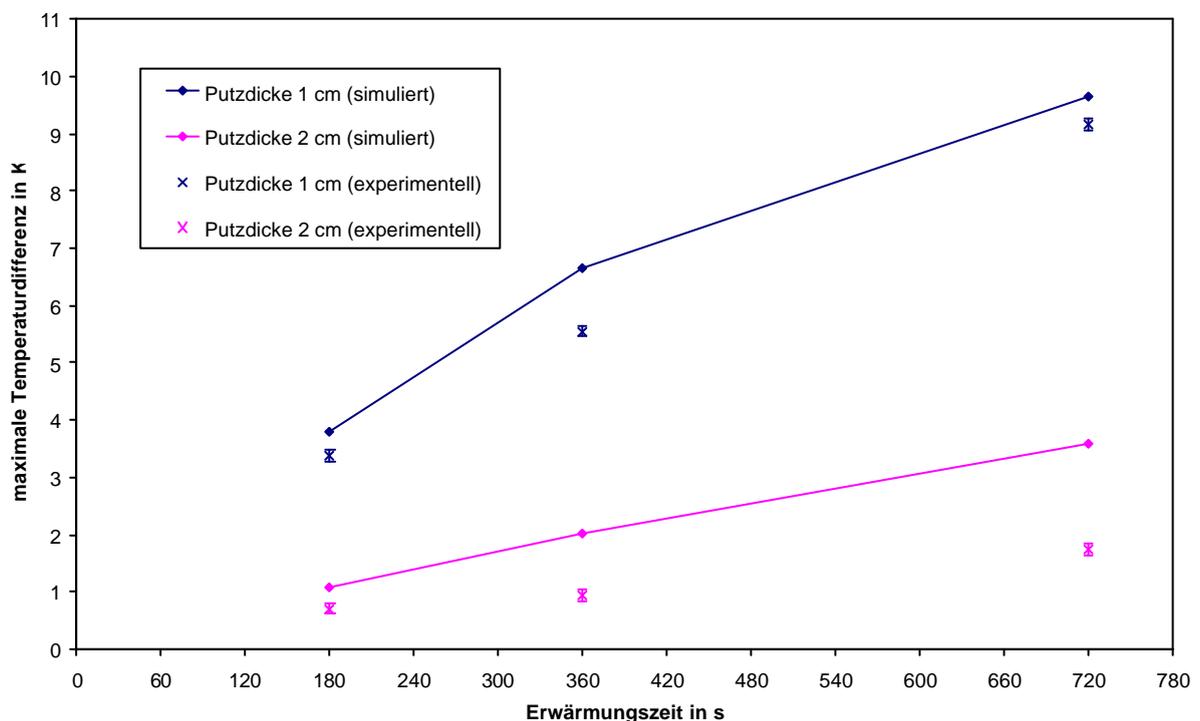


Abbildung 7.12 Maximale Temperaturdifferenz in Abhängigkeit der Erwärmungszeit und der Putzdicke aus Simulationen und experimentellen Messungen

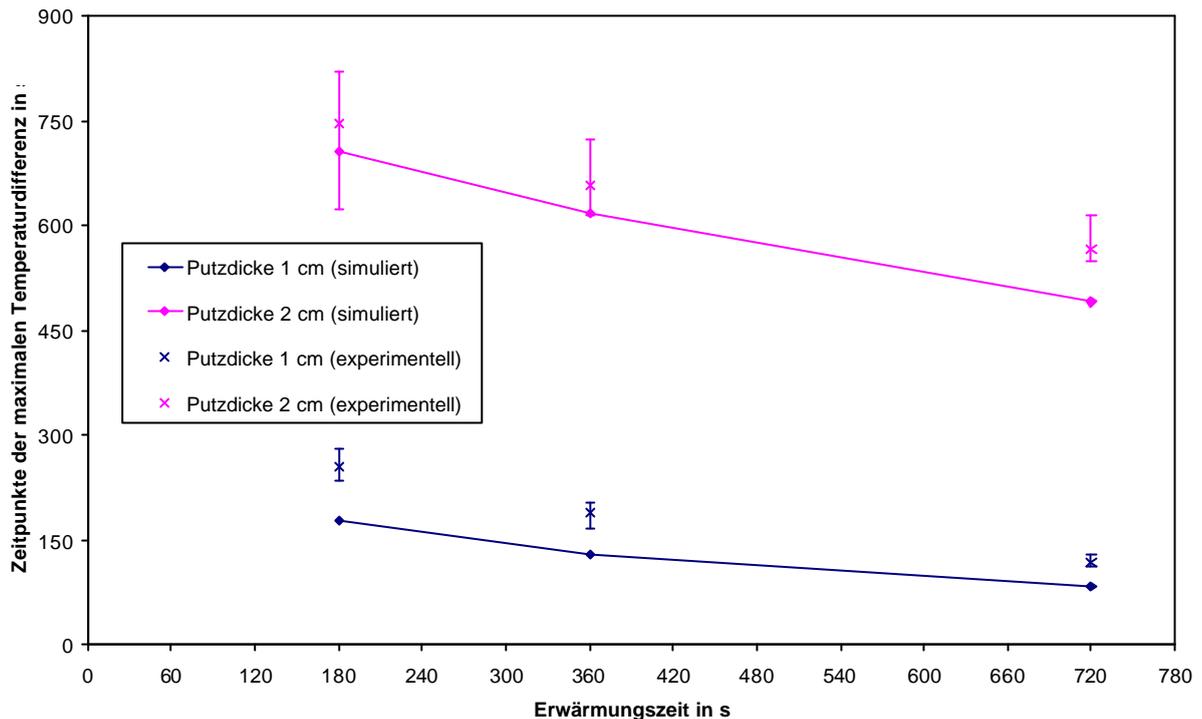


Abbildung 7.13 Zeitpunkte der maximalen Temperaturdifferenz in Abhängigkeit der Erwärmungszeit und der Putzdicke aus Simulationen und experimentellen Messungen

7.3 Spaltklinker im Dickbettmörtel auf Beton (PK3)

Analog zu den experimentellen Messungen wurden Simulationen für Erwärmungszeiten von 180 s, 360 s und 720 s gerechnet. Bei den Simulationen wurde ein Bereich von $0,10 \times 0,10 \times 0,09 \text{ m}^3$ betrachtet. Die Werte der Programm-, Material- und Geometrieparameter sowie der Randbedingungen für die Simulation sind in Tabelle 7.7 zusammengefasst. Die aufgebrachte Wärmestromdichte ist im Verhältnis zum Probekörper Pk1 trotz gleicher Wärmequelle kleiner, weil die Emissivität von Spaltklinkern mit 0,62 geringer ist als die von Beton mit 0,92.

Parameter	Wert
Zeitinkrement	0,5 s
Weginkrement	0,002 m
Erwärmungsart	Statischer Puls
Wärmeverluste an der Oberfläche	Strahlungs- und Konvektionsverluste
Wärmestromdichte	820 W/m ²
Erwärmungszeit	180 s, 360 s, 720 s
Ausgangs- und Umgebungstemperatur	22,6 °C, 23,3 °C, 23,3 °C
Wärmeleitfähigkeit der Spaltklinker	1,05 W/(m K)
Rohdichte der Spaltklinker	2000 kg/m ³
Spezifische Wärmekapazität der Spaltklinker	900 J/(kg K)
Wärmeleitfähigkeit des Mörtels	1,2 W/(m K)
Rohdichte des Mörtels	2000 kg/m ³
Spezifische Wärmekapazität des Mörtels	1050 J/(kg K)
Wärmeleitfähigkeit des Betons	2,1 W/(m K)
Rohdichte des Betons	2400 kg/m ³
Spezifische Wärmekapazität des Betons	1000 J/(kg K)
Wärmeleitfähigkeit des Polystyrol-Extruderschaums	0,035 W/(m K)
Rohdichte des Polystyrol-Extruderschaums	20 kg/m ³
Spezifische Wärmekapazität des Polystyrol-Extruderschaums	1500 J/(kg K)
Tiefe der Mörtelaussparung	0,012 m
Dicke der Mörtelaussparung	0,018 m
Flächenhafte Ausdehnung der Mörtelaussparung	0,08 x 0,08 m ²
Tiefe der Ablösung	0,028 m
Dicke der Ablösung	0,002 m
Flächenhafte Ausdehnung der Ablösung	0,20 x 0,20 m ²

Tabelle 7.7 Werte der Parameter für die Simulation von Probekörper Pk3

Wie in den beiden Kapiteln 7.1 und 7.2 wurden anhand der Referenzstellen die experimentellen Messungen und die Simulationen quantitativ verglichen. Die jeweiligen Temperatur-Zeit-Kurven sind in Abbildung 7.14 für die drei unterschiedlichen Erwärmungszeiten dargestellt. Das Bestimmtheitsmaß für die einzelnen Kurvenpaare liegt zwischen 0,9946 und 0,9991. Die Differenzkurven zu den entsprechenden Temperatur-Zeit-Kurven werden in Abbildung 7.15 gezeigt.

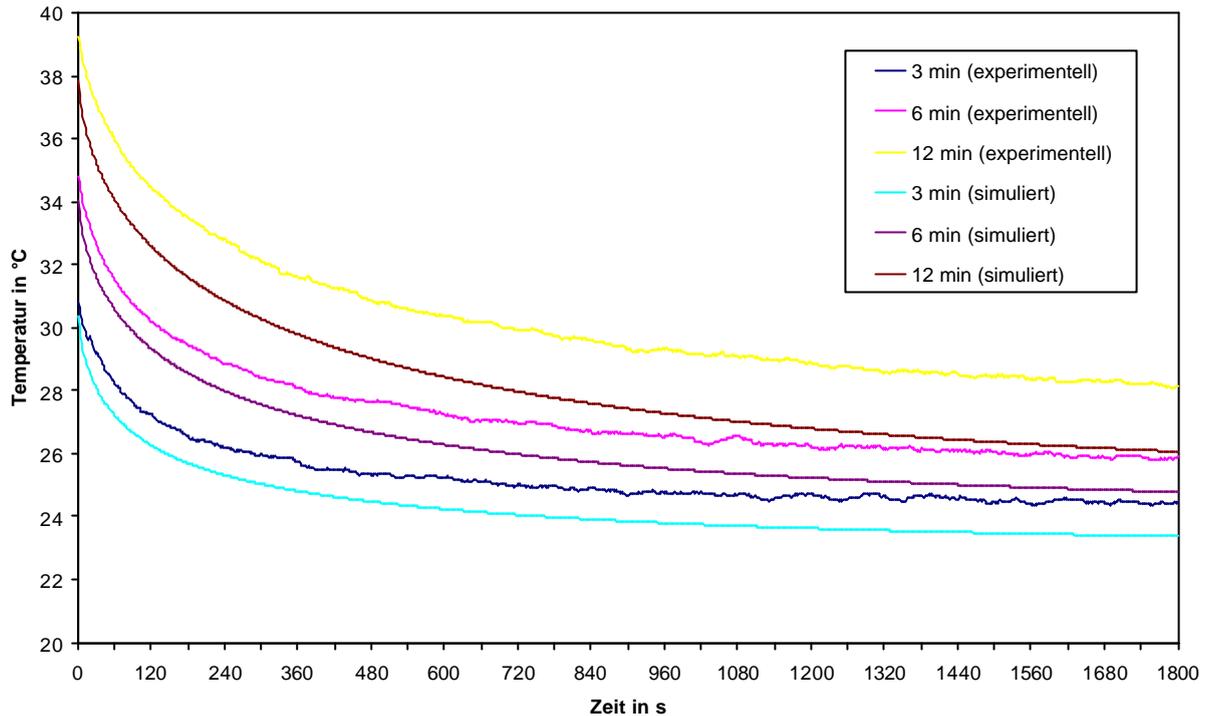


Abbildung 7.14 Experimentelle und simulierte Temperatur-Zeit-Kurven über Referenzstellen für unterschiedliche Erwärmungszeiten

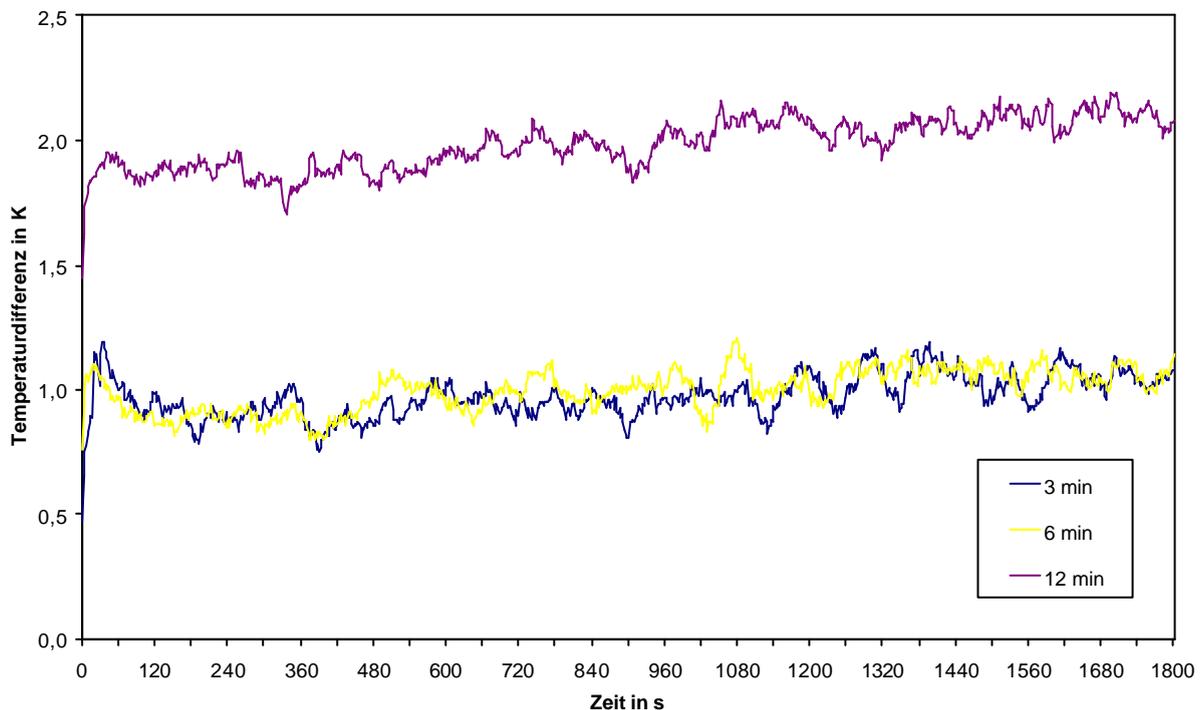


Abbildung 7.15 Differenzkurven der jeweiligen experimentellen abzüglich der jeweiligen simulierten Temperatur-Zeit-Kurve für unterschiedliche Erwärmungszeiten

Aus den Differenzkurven lässt sich ersehen, dass für alle Erwärmungszeiten eine relative konstante Abweichung zwischen experimentellen und simulierten Temperatur-Zeit-Kurven in Höhe von 1 K für die beiden Erwärmungszeiten von 180 s bzw. 360 s und von 2 K für die 720 s lange Erwärmung vorliegt. Über das betrachtete Zeitintervall betragen die mittleren

Abweichungen der Differenzkurven 1,0 K (180 s), 1,0 K (360 s) und 2,0 K (720 s) bei Standardabweichungen von 0,1 K.

Die Ursache für diese nahezu konstante Abweichung ist nicht eindeutig zu erklären. Bei einer Variation sämtlicher Materialparameter sowie der Randbedingungen konnte mit Ausnahme der Ausgangs- und Umgebungstemperatur ein Zusammenhang zwischen den einzelnen Parametern und der konstanten Abweichung ausgeschlossen werden (siehe Anlage 2).

Durch eine Erhöhung der Ausgangs- und Umgebungstemperatur um 1 K (180 s, 360 s) bzw. 2 K (720 s) bei den Simulationsrechnungen wird die konstante Abweichung zwischen experimentellen und simulierten Temperatur-Zeit-Kurven quasi auf Null reduziert. Die entsprechenden Temperatur-Zeit-Kurven sowie die dazugehörigen Differenzkurven sind in Abbildung 7.16 und Abbildung 7.17 dargestellt.

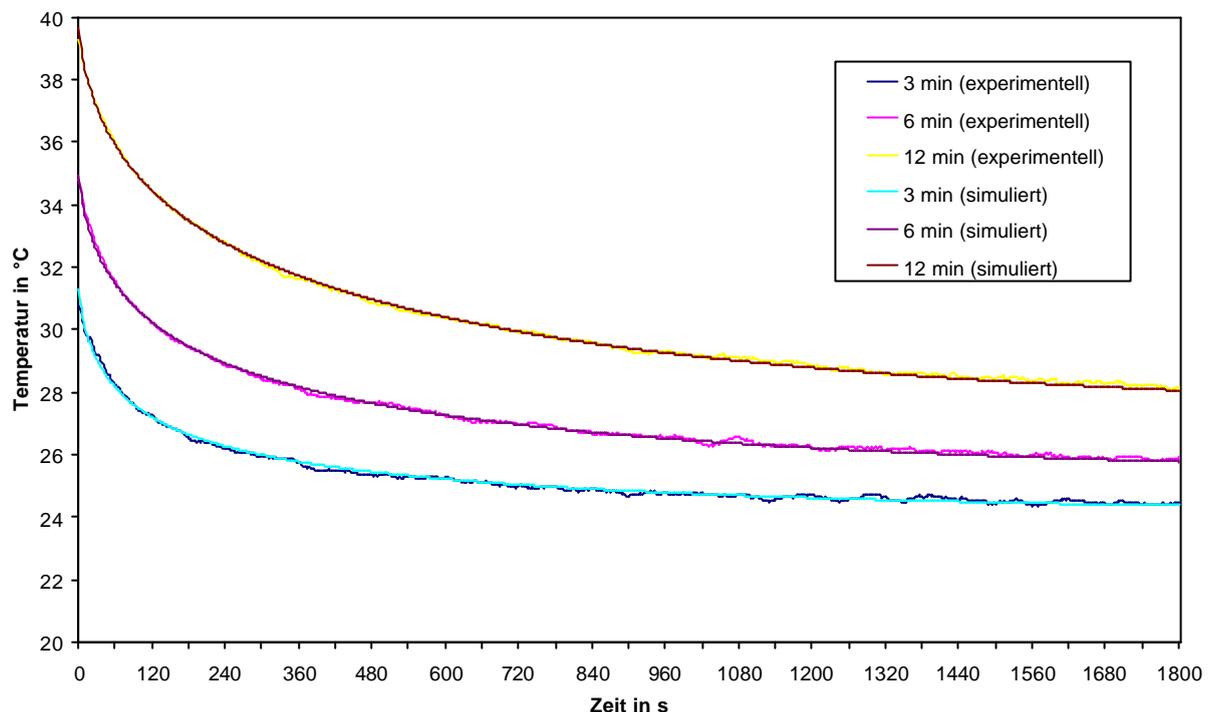


Abbildung 7.16 Experimentelle und simulierte Temperatur-Zeit-Kurven über Referenzstellen für unterschiedliche Erwärmungszeiten mit erhöhten Ausgangstemperaturen bei den Simulationen

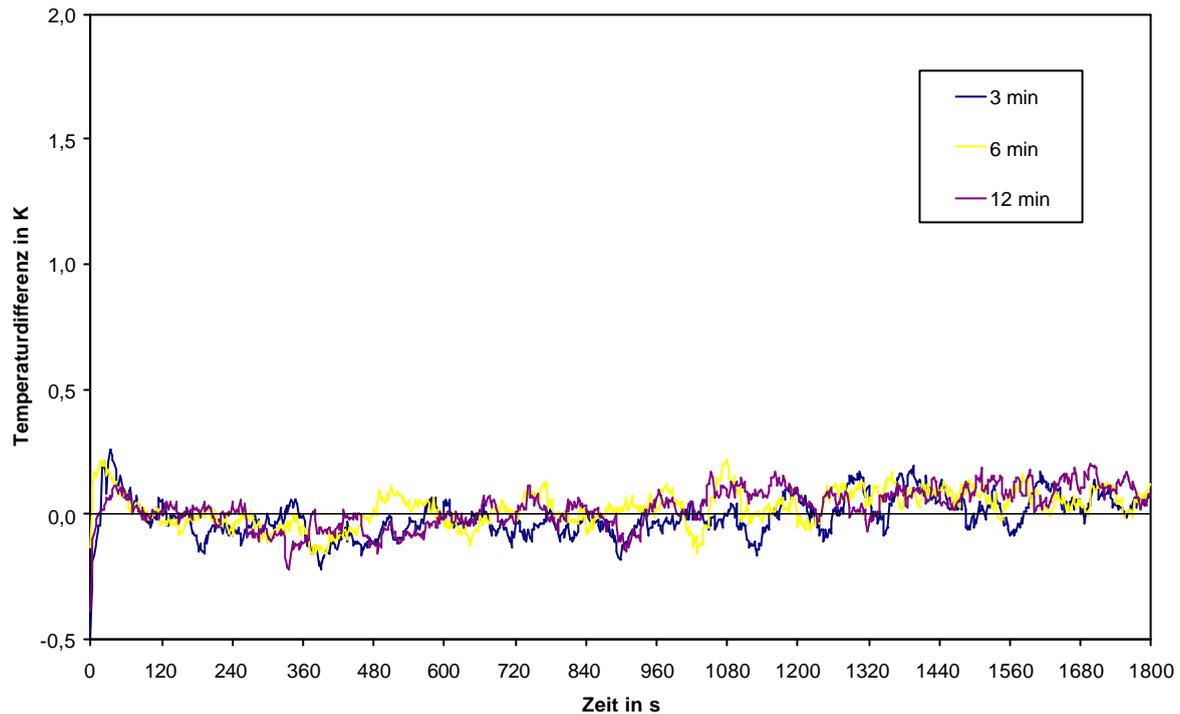


Abbildung 7.17 Differenzkurven der jeweiligen experimentellen abzüglich der jeweiligen simulierten Temperatur-Zeit-Kurve aus Abbildung 7.16

Die Bestimmtheitsmaße für die in Abbildung 7.16 dargestellten Kurvenpaare sind mit 0,9947 bis 0,9990 genau so groß wie zuvor. Die mittleren Abweichungen der Differenzkurven sinken betragsmäßig aber unter 0,1 K bei den ebenfalls unveränderten Standardabweichungen von 0,1 K.

Nach Kapitel 6.2.5 hat die Ausgangs- und Umgebungstemperatur nahezu keinen Einfluss auf die Temperaturdifferenzkurven der Temperatur-Zeit-Kurven über Fehl- und Referenzstellen. Für die nachfolgende Auswertung können daher sowohl die in Abbildung 7.14 als auch die in Abbildung 7.16 dargestellten Temperatur-Zeit-Kurven verwendet werden.

Abbildung 7.18 zeigt die simulierten Temperatur-Zeit-Kurven über einer Referenzstelle, einer $0,08 \times 0,08 \times 0,018 \text{ m}^3$ großen und 0,012 m tiefen Mörtelaussparung und einer $0,20 \times 0,20 \times 0,002 \text{ m}^3$ großen und 0,028 m tiefen Ablösung des Mörtels vom Beton für alle drei Erwärmungszeiten. In Abbildung 7.19 sind die dazugehörigen Temperaturdifferenzkurven und in Tabelle 7.8 die einzelnen Werte für die maximale Temperaturdifferenz sowie deren Zeitpunkte zusammengestellt.

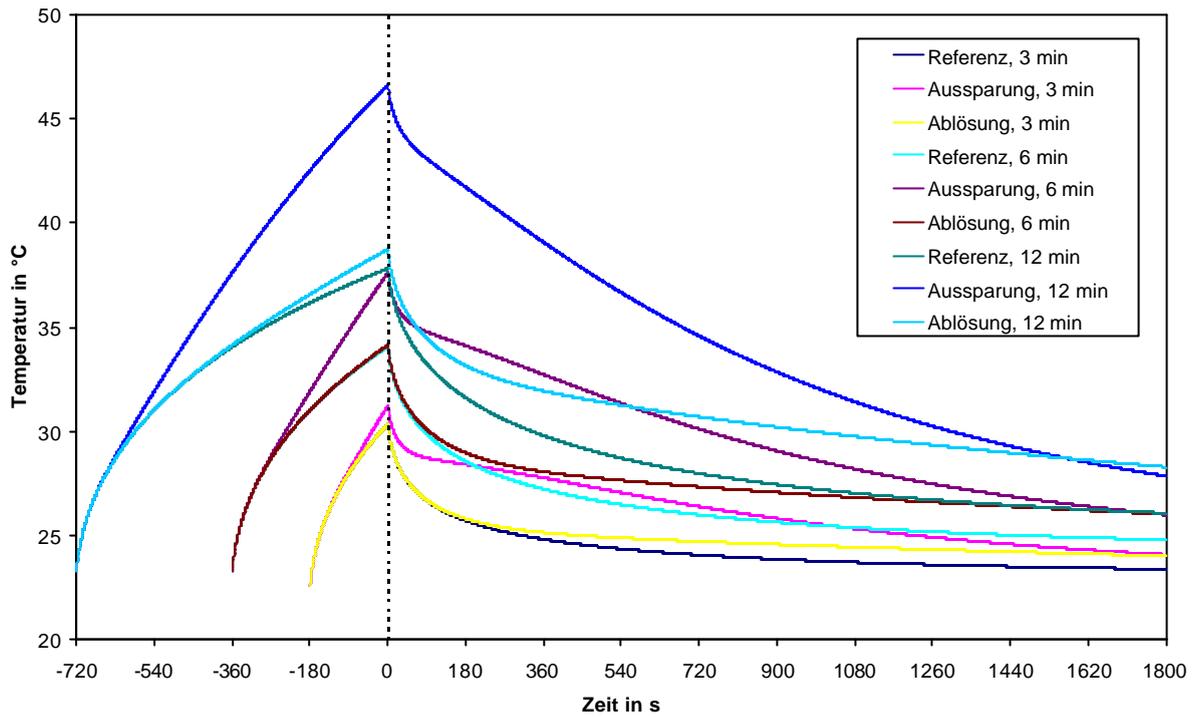


Abbildung 7.18 Temperatur-Zeit-Kurven über einer Referenzstelle, über einer Mörtelaussparung und über einer Ablösung für verschiedene Erwärmungszeiten

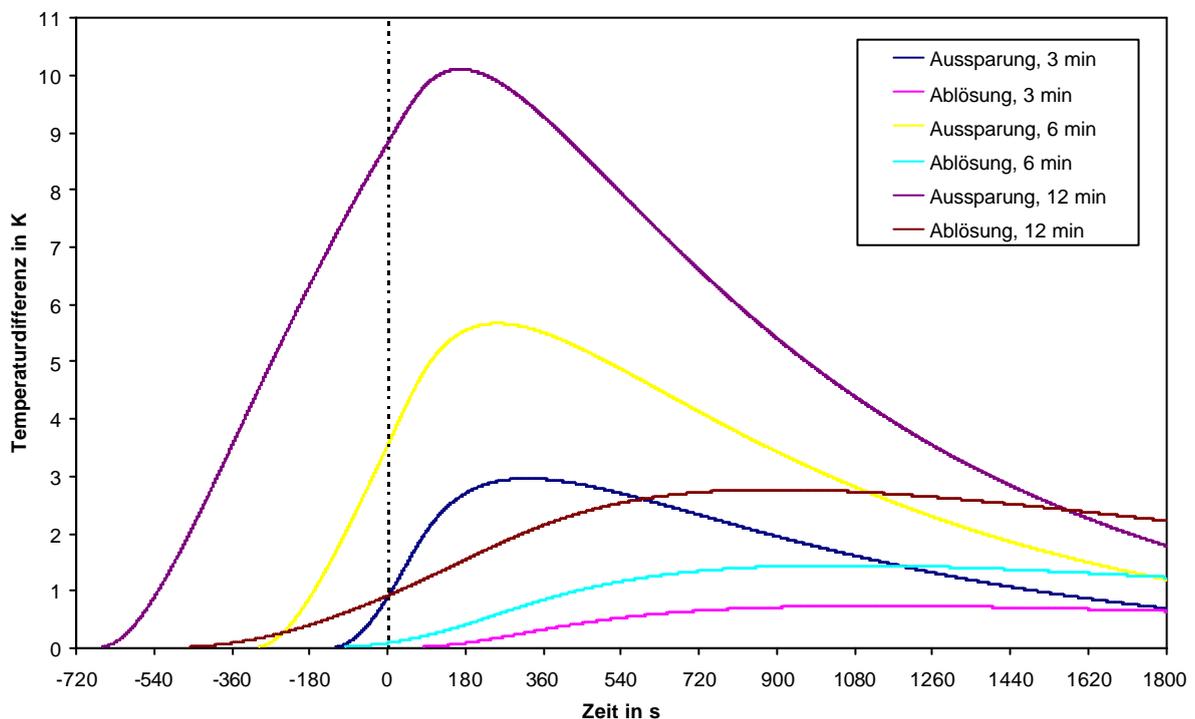


Abbildung 7.19 Temperaturdifferenzkurven zwischen den Temperatur-Zeit-Kurven über den Fehlstellen und der dazugehörigen Referenzstelle für verschiedene Erwärmungszeiten

Fehlstelle	Erwärmungszeit					
	180 s		360 s		720 s	
	DT_{max} in K	$t_{DT_{max}}$ in s	DT_{max} in K	$t_{DT_{max}}$ in s	DT_{max} in K	$t_{DT_{max}}$ in s
Aussparung	2,96	322,0	5,66	252,5	10,11	166,5
Ablösung	0,73	1129,0	1,44	1052,0	2,77	894,0

Tabelle 7.8 Maximale Temperaturdifferenzen DT_{max} und Zeitpunkte $t_{DT_{max}}$ für die Fehlstellen bei verschiedenen Erwärmungszeiten aus Simulationen

Die Ergebnisse für DT_{max} und $t_{DT_{max}}$ aus der Simulation weichen doch erheblich von den experimentell bestimmten Werten ab, was ein Vergleich der Tabelle 4.6 mit der Tabelle 7.8 bzw. die Abbildung 7.20 und die Abbildung 7.21 veranschaulichen.

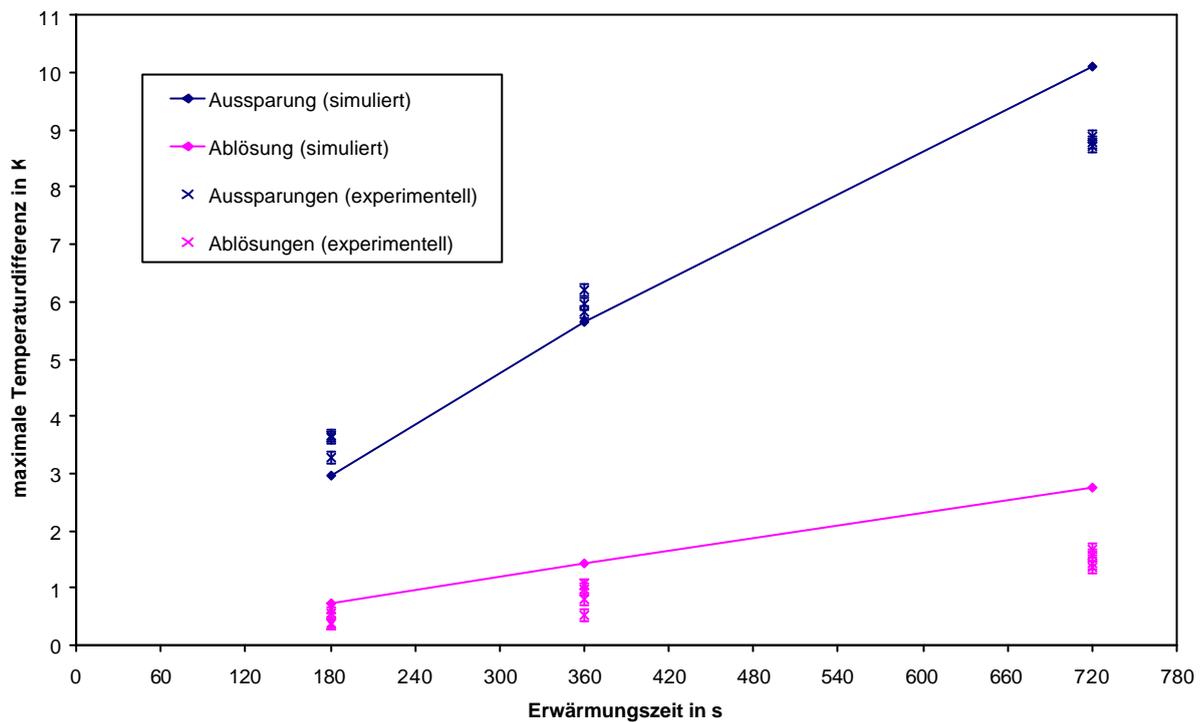


Abbildung 7.20 Maximale Temperaturdifferenz in Abhängigkeit der Erwärmungszeit für Aussparungen und Ablösungen aus Simulationen und experimentellen Messungen

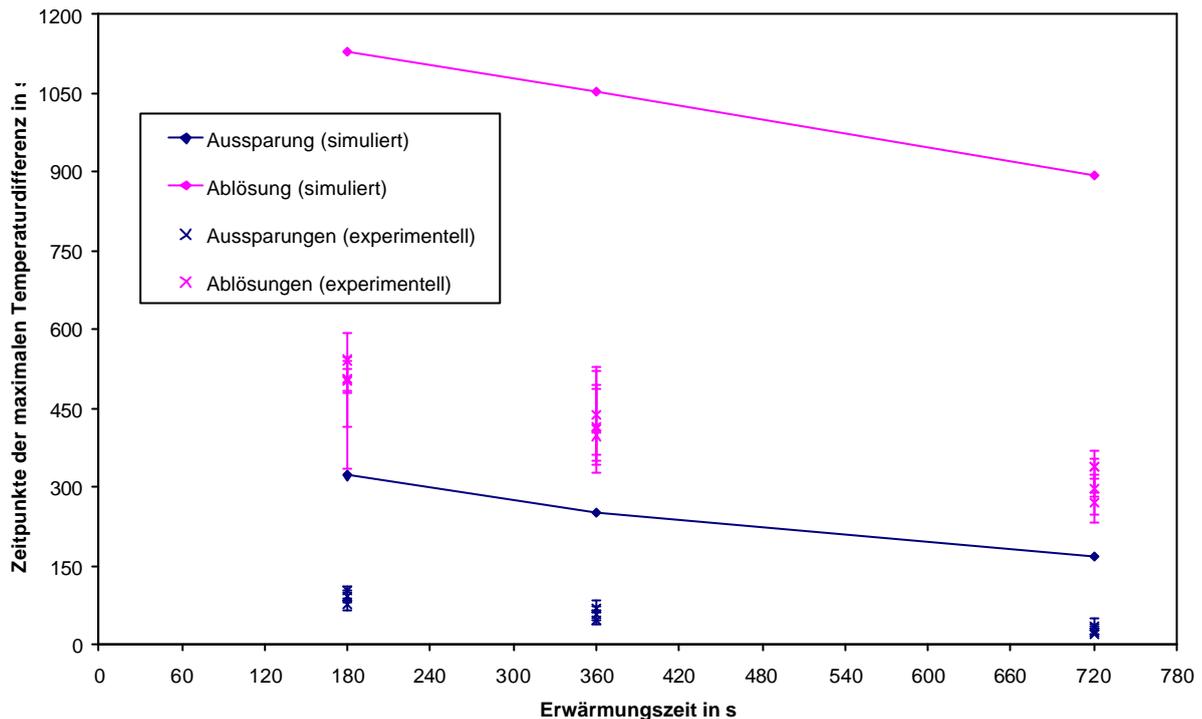


Abbildung 7.21 Zeitpunkte der maximalen Temperaturdifferenz in Abhängigkeit der Erwärmungszeit für Ausparungen und Ablösungen aus Simulationen und experimentellen Messungen

Bei den experimentellen Messungen treten die maximalen Temperaturdifferenzen erheblich früher auf als bei den Simulationen. Die Ergebnisse für die maximalen Temperaturdifferenzen selbst sind mit Abweichungen von bis zu 19,1 % bei den Ausparungen (Fehlstellen 6, 7 und 9 in Tabelle 4.6) noch relativ gut, aber mit Abweichungen von bis zu 172,6 % bei den Ablösungen (Fehlstellen 10, 11 und 12 in Tabelle 4.6) teilweise sehr schlecht.

Zu berücksichtigen ist dabei allerdings, dass die absoluten Werte der maximalen Temperaturdifferenzen für die Ablösungen deutlich kleiner sind als für die Ausparungen, wodurch sich selbst bei betragsmäßig gleichen Abweichungen ein höherer relativer Fehler für die Ablösungen ergibt.

Die Oberflächentemperatur über den Referenzstellen kann mit einer für die Auswertung unerheblichen nahezu konstanten Abweichung simuliert werden. Die Oberflächentemperatur hängt von den Randbedingungen und der Wärmeausbreitung innerhalb des Probekörpers ab. Die gute Übereinstimmung zwischen experimenteller Messung und Simulation bedeutet wegen der vielen Einflussfaktoren nicht, dass der Temperaturverlauf im Inneren bei der Simulation korrekt beschrieben wird.

Da der simulierte Oberflächentemperaturverlauf über der Fehlstelle deutlich von dem experimentell gemessenen abweicht, ist es demzufolge nicht gelungen, die einzelnen Prozesse mit Hilfe des Simulationsprogramms gut zu beschreiben oder die Fehlstellen in geeigneter Art und Weise zu simulieren.

Da für die Fehlstellen alle realistischen und im Rahmen des Simulationsprogramms möglichen Änderungen überprüft wurden und dabei keine besseren Ergebnisse für die Oberflächentemperatur über der Fehlstelle erzielt werden konnten, ist es vermutlich nicht gelungen, das komplexe System mit Hilfe des gewählten Simulationsverfahrens ausreichend genau abzubilden.

Es wäre daher sinnvoll die Simulationen für diesen Probekörper noch einmal mit einem modifizierten Algorithmus oder gegebenenfalls einem anderen Simulationsverfahren durchzuführen, weil eine quantitative Auswertung der experimentellen Daten mit Hilfe der vorliegenden Simulationsrechnungen wegen der großen Abweichungen nicht möglich ist.

8 Inverse Lösung

8.1 Auswertung systematischer Simulationsrechnungen zur quantitativen Tiefenbestimmung

Neben der in den Kapiteln 4 und 7 demonstrierten qualitativen Auswertung der Inhomogenitäten sollen mit Hilfe der Impulsthermografie nach Möglichkeit auch quantitative Aussagen getroffen werden. Die Lösung des inversen Problems ist wesentlich zur quantitativen Bestimmung von Geometrie- und Materialparametern aus den experimentellen Daten. Sie kann unter anderem durch eine praktische numerische Annäherung in Form von systematischen Simulationsrechnungen gefunden werden, welche mit Hilfe des in Kapitel 5 vorgestellten Simulationsprogramms durchgeführt wurden.

Die Ergebnisse dieser Simulationsrechnungen für den Probekörper Pk1 sind in den Tabellen 7.1 und 7.2 zusammengestellt. Die maximale Temperaturdifferenzen DT_{max} und die Zeitpunkte $t_{DT_{max}}$ ihres Auftretens können in Abhängigkeit der Erwärmungszeit und der Fehlstellentiefe für die beiden untersuchten Fehlstellengrößen dargestellt werden. Die maximalen Temperaturdifferenzen werden für die $0,10 \times 0,10 \times 0,10 \text{ m}^3$ großen Fehlstellen in Abbildung 8.1 und für die $0,20 \times 0,20 \times 0,10 \text{ m}^3$ großen Fehlstellen in Abbildung 8.3 gezeigt. Die dazugehörigen Zeitpunkte sind analog in Abbildung 8.2 und Abbildung 8.4 zu sehen.

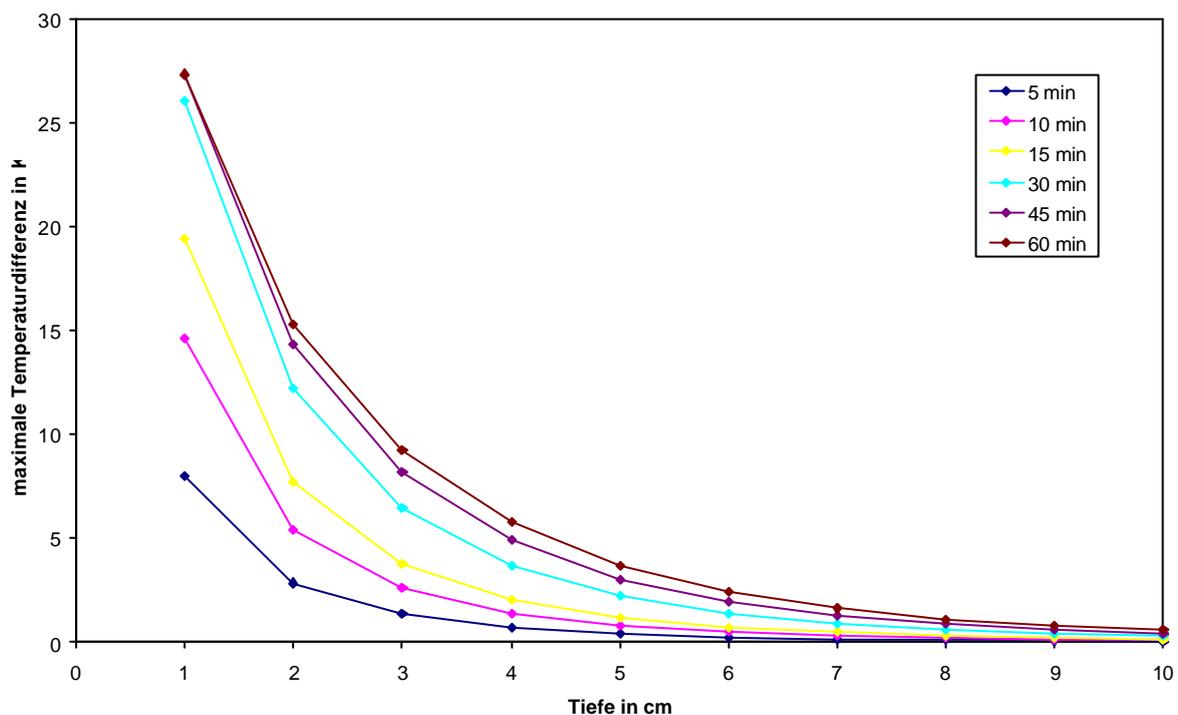


Abbildung 8.1 Maximale Temperaturdifferenz in Abhängigkeit der Fehlstellentiefe für $0,10 \times 0,10 \times 0,10 \text{ m}^3$ große Fehlstellen und verschiedener Erwärmungszeiten

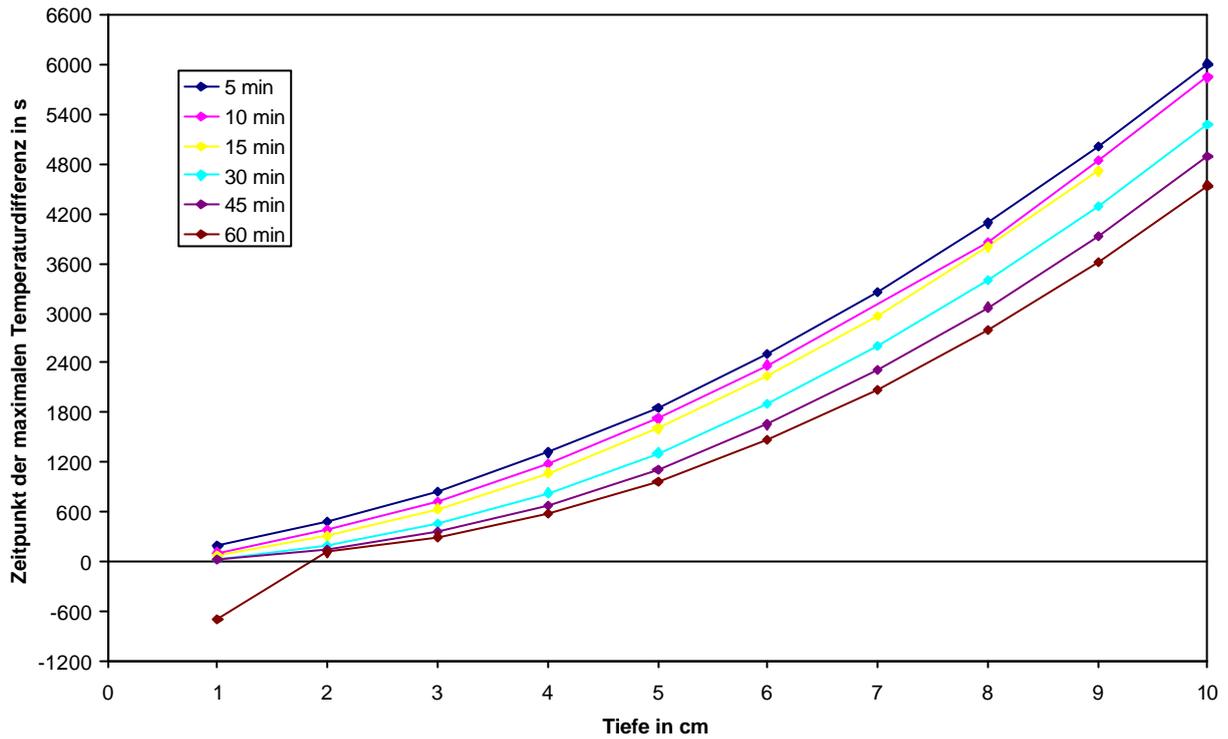


Abbildung 8.2 Zeitpunkte der maximalen Temperaturdifferenz in Abhängigkeit der Fehlstellentiefe für $0,10 \times 0,10 \times 0,10 \text{ m}^3$ große Fehlstellen und verschiedener Erwärmungszeiten

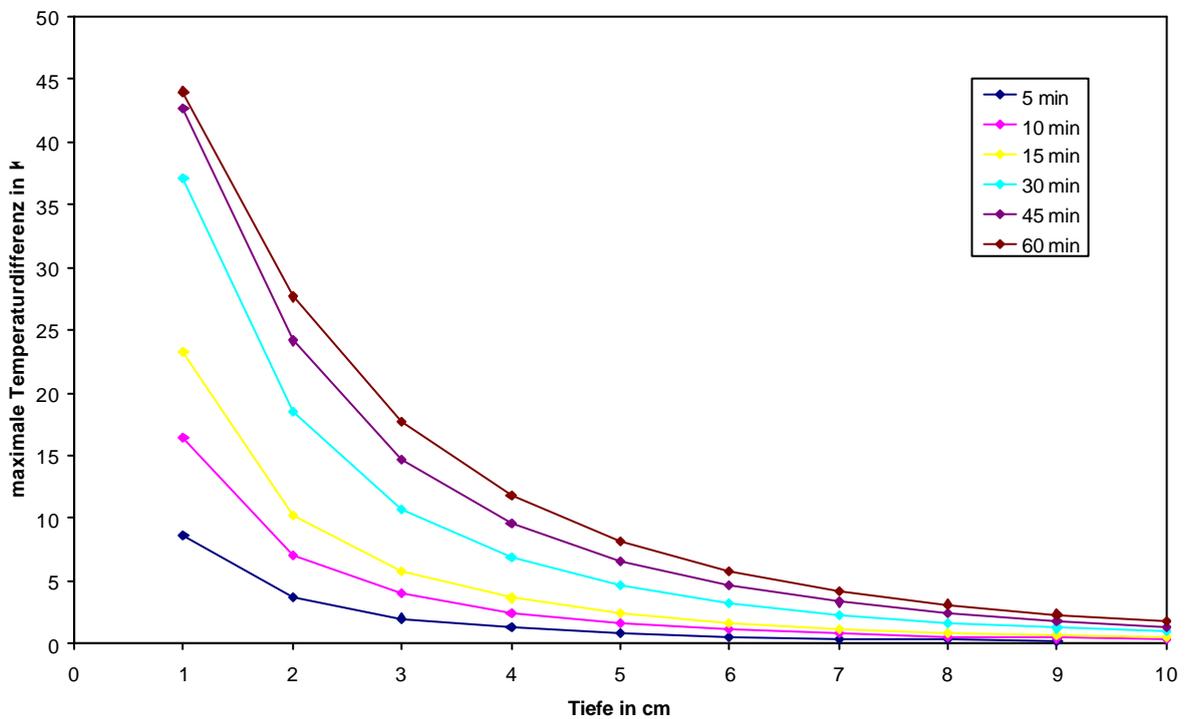


Abbildung 8.3 Maximale Temperaturdifferenz in Abhängigkeit der Fehlstellentiefe für $0,20 \times 0,20 \times 0,10 \text{ m}^3$ große Fehlstellen und verschiedener Erwärmungszeiten

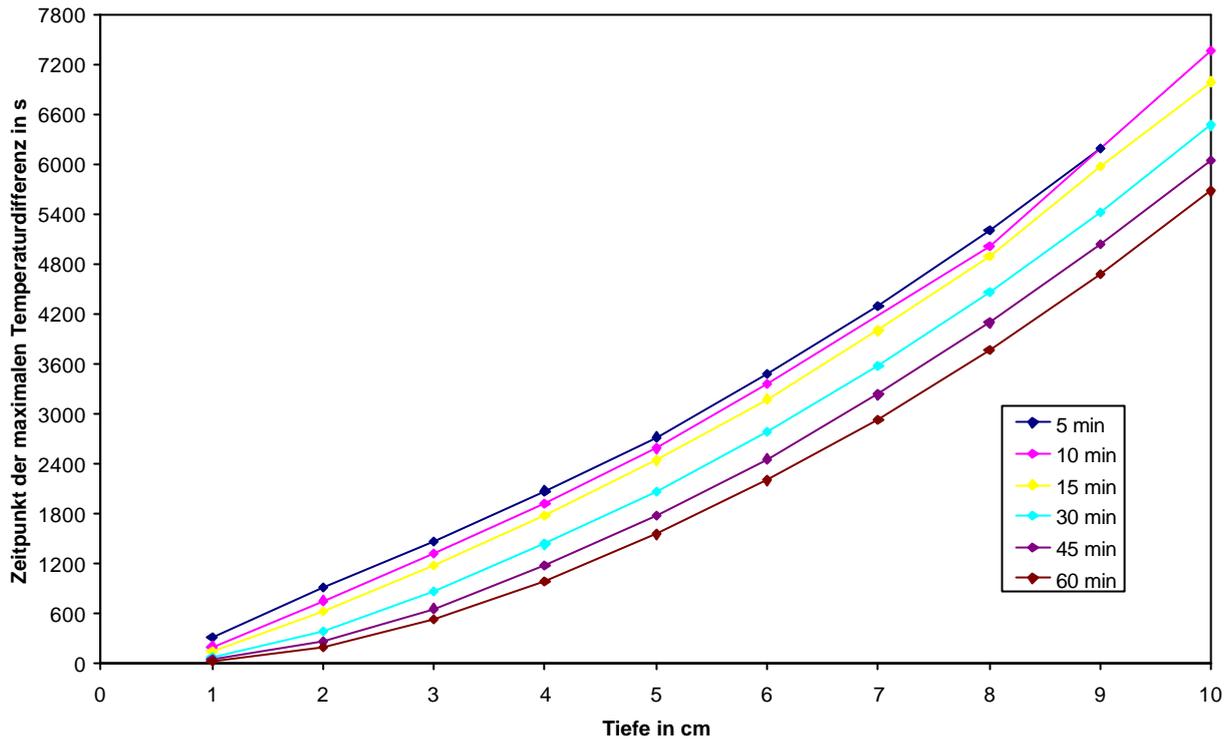


Abbildung 8.4 Zeitpunkte der maximalen Temperaturdifferenz in Abhängigkeit der Fehlstellentiefe für $0,20 \times 0,20 \times 0,10 \text{ m}^3$ große Fehlstellen und verschiedener Erwärmungszeiten

Die Erwärmungszeit, die Fehlstellengröße und die Fehlstellentiefe haben einen maßgeblichen Einfluss auf die beiden Parameter DT_{max} und $t_{DT_{max}}$. Die Erwärmungszeiten und in diesem Fall auch die Abmaße der Fehlstellen sind sowohl bei den Simulationsrechnungen als auch bei den experimentellen Messungen bekannt. Normalerweise sind die Abmaße der Fehlstellen jedoch unbekannt und müssen dann zunächst anhand der thermischen Bilddaten abgeschätzt werden, was im allgemeinen zu hinreichend genauen Werten führt.

Daher eignet sich die aus den Simulationen bekannte Beziehung der maximalen Temperaturdifferenz und der Zeitpunkt ihres Auftretens zur Fehlstellentiefe, um die unbekanntes Fehlstellentiefen in dem realen Probekörper zu ermitteln. Unter der Annahme, dass die anderen weniger einflussreichen Geometrie- und Materialparameter sowie Randbedingungen hinreichend genau zwischen Simulation und Experiment übereinstimmen, sind auch DT_{max} und $t_{DT_{max}}$ bei entsprechender Fehlstellentiefe vergleichbar.

Da die Fehlstellentiefe bei den Simulationsrechnungen bekannt ist, kann die Bestimmung der realen Fehlstellentiefen des Probekörpers Pk1 aus den experimentell ermittelten Werten der Tabelle 4.4 graphisch mit Hilfe der Abbildungen 8.1 bis 8.4 erfolgen oder mittels Interpolationen anhand der Werte aus den Tabellen 7.1 und 7.2 durchgeführt werden. Die Ergebnisse für die Fehlstellentiefen, in diesem Fall beispielhaft durch Interpolation bestimmt, sind in Tabelle 8.9 und in Tabelle 8.10 für den Probekörper Pk1 zusammengefasst.

Fehl- stelle	Erwärmungszeit											
	300 s		600 s		900 s		1800 s		2700 s		3600 s	
	DT_{max} in K	Tiefe in cm										
1 ^f	0,2	8,6	0,7	7,5	0,7	8,6	1,4	8,4	2,0	8,5	2,4	8,9
2 ^f	0,4	6,8	0,9	6,7	1,5	6,5	2,6	6,7	3,5	6,9	4,3	7,0
3 ^f	0,8	5,3	1,7	4,9	2,3	5,1	3,7	5,7	5,4	5,6	6,0	5,9
4 ^f	1,7	3,4	3,5	3,3	4,7	3,5	8,4	3,6	-	-	-	-
5 ^g	1,4	3,0	2,7	3,0	3,5	3,2	5,4	3,4	6,6	3,5	7,3	3,6
6 ^g	1,2	3,2	2,1	3,4	3,0	3,5	4,8	3,6	6,1	3,6	6,9	3,7
7 ^g	2,2	2,4	4,0	2,5	5,5	2,6	8,5	2,6	-	-	-	-
8 ^g	1,0	3,5	1,8	3,7	2,6	3,7	4,1	3,8	5,8	3,7	6,4	3,8

Tabelle 8.9 Interpolierte Fehlstellentiefen des Probekörpers Pk1 bei Verwendung der maximalen Temperaturdifferenzen

Fehl- stelle	Erwärmungszeit											
	300 s		600 s		900 s		1800 s		2700 s		3600 s	
	t_{DTmax} in s	Tiefe in cm										
1 ^f	3860	6,5	3700	6,3	3125	5,9	2915	6,2	2630	6,2	2570	6,5
2 ^f	2835	5,2	2645	5,1	2445	5,0	2100	5,1	2045	5,4	1575	5,1
3 ^f	1945	3,8	1545	3,4	1485	3,5	1375	3,9	1290	4,2	1175	4,4
4 ^f	1135	2,8	1055	2,6	940	2,6	655	2,6	-	-	-	-
5 ^g	600	2,3	525	2,4	485	2,6	325	2,5	300	2,7	285	2,9
6 ^g	735	2,7	600	2,6	585	2,9	390	2,8	330	2,9	295	3,0
7 ^g	385	1,7	290	1,7	280	1,9	160	1,8	-	-	-	-
8 ^g	885	3,1	765	3,1	605	2,9	515	3,2	370	3,0	350	3,2

Tabelle 8.10 Interpolierte Fehlstellentiefen des Probekörpers Pk1 bei Verwendung der Zeitpunkte der maximalen Temperaturdifferenzen

Aus beiden Tabellen ist ersichtlich, dass die Ergebnisse in Abhängigkeit der maximalen Temperaturdifferenz bzw. ihres Zeitpunktes für die verschiedenen Erwärmungszeiten sehr gut übereinstimmen. Die Unterschiede zwischen den einzelnen Werten innerhalb einer Tabelle liegen zumeist in einem Bereich von $\pm 0,002$ m.

Die Abweichungen entstehen unter anderem durch Fehler bei der Bestimmung von DT_{max} und t_{DTmax} aus den experimentellen Daten. Dieses wird in Abbildung 8.5 beispielhaft an den Temperaturdifferenzkurven für eine Erwärmungszeit von 900 s der Fehlstellen 1 und 4 veranschaulicht.

^f Fehlstellengröße 0,20 x 0,20 x 0,10 m³

^g Fehlstellengröße 0,10 x 0,10 x 0,10 m³

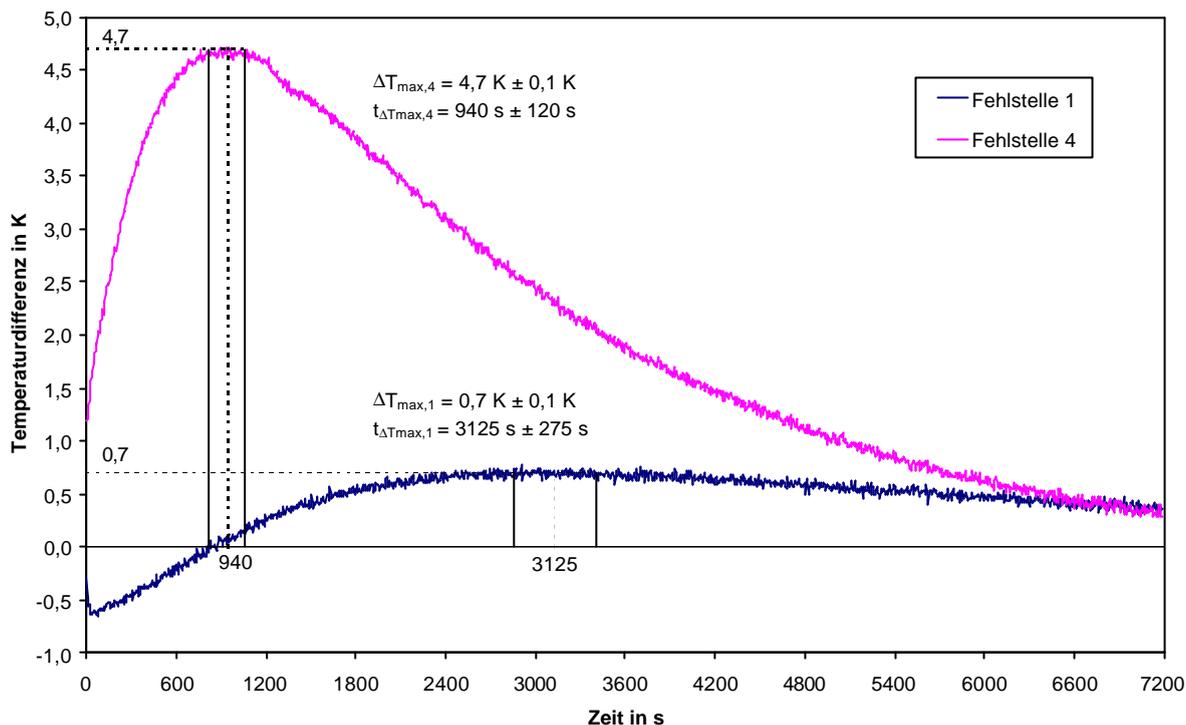


Abbildung 8.5 Eingrenzung der Bereiche von ΔT_{\max} und $t_{\Delta T_{\max}}$ bei den experimentellen Daten der Fehlstellen 1 und 4 des Probekörpers Pk1 für 900 s Erwärmung

Bei der flachen Fehlstelle 4 tritt die maximale Temperaturdifferenz von $4,7 \text{ K} \pm 0,1 \text{ K}$ in einem Zeitintervall von ca. 820 s bis 1060 s auf. Der Zeitpunkt der maximalen Temperaturdifferenz hat demzufolge eine Genauigkeit von $\pm 120 \text{ s}$. Noch schwieriger ist die Bestimmung der Werte bei der tieferen Fehlstelle 1. Hier kann der maximalen Temperaturdifferenz von $0,7 \text{ K} \pm 0,1 \text{ K}$ ein Zeitpunkt von $3125 \text{ s} \pm 275 \text{ s}$ zugeordnet werden.

Fehlstelle	Solltiefe in cm	Tiefe aus Radarmessungen in cm	Mittlere Tiefe nach Tabelle 8.1 in cm	Mittlere Tiefe nach Tabelle 8.2 in cm
1	8,0	$9,2 \pm 1,0$	$8,4 \pm 0,9$	$6,3 \pm 0,4$
2	6,0	$7,6 \pm 1,0$	$6,8 \pm 0,3$	$5,2 \pm 0,2$
3	4,0	$4,0 \pm 1,0$	$5,4 \pm 0,5$	$3,9 \pm 0,5$
4	2,0	$1,0 \pm 1,0$	$3,5 \pm 0,2$	$2,7 \pm 0,1$
5	2,0	$3,5 \pm 1,0$	$3,3 \pm 0,3$	$2,6 \pm 0,3$
6	4,0	$4,3 \pm 1,0$	$3,5 \pm 0,3$	$2,8 \pm 0,2$
7	6,0	$3,0 \pm 1,0$	$2,5 \pm 0,1$	$1,8 \pm 0,1$
8	8,0	$4,3 \pm 1,0$	$3,7 \pm 0,2$	$3,1 \pm 0,2$

Tabelle 8.11 Vergleich der unterschiedlich ermittelten Tiefen für die Fehlstellen von Probekörper Pk1

Die mittleren Tiefen und die maximale absolute Abweichung sind für alle Fehlstellen in Tabelle 8.11 aufgelistet. Die Werte der mittleren Tiefen aus den beiden Tabellen 8.1 und 8.2 weichen für die einzelnen Fehlstellen teilweise erheblich voneinander ab. Die wahrscheinlichste Ursache dafür ist, dass ein oder mehrere bei der Simulation verwendete Materialparameter nicht mit den realen Werten übereinstimmen.

In der Tabelle 8.11 sind zudem sind die geplanten Einbautiefen und die durch Radarmessungen bestimmten Werte dargestellt. Während die Einbautiefen nur Sollwerte darstellen, die, wie bereits in Kapitel 4 erwähnt, für einige Fehlstellen mit Sicherheit nicht verwirklicht worden sind, haben die Radarwerte eine Messgenauigkeit von $\pm 0,01$ m.

Die über die charakteristischen Werte von DT_{max} und $t_{DT_{max}}$ ermittelten Tiefen weichen teilweise deutlich von den Radarergebnissen ab. Für die schief eingebauten Fehlstellen 3 und 4 sind die Radar- und die Thermografieergebnisse allerdings nicht vergleichbar, da bei den Radarmessungen generell die geringste Betondeckung und bei den Thermografiemessungen immer die Tiefe in der Mitte der Fehlstelle ermittelt wurde.

Eine Verbesserung der Simulationsergebnisse kann vermutlich durch eine genauere Anpassung der Materialparameter zwischen experimenteller Messung und Simulation erzielt werden. Aus diesem Grund wurde am Probekörper Pk1 ein Bohrkern gezogen und an diesem mit einem hochauflösenden optischen Abtastverfahren [29] eine Wärmeleitfähigkeit von $2,5 \text{ W/(m K)} \pm 0,5 \text{ W/(m K)}$ bestimmt. Diese ist merklich größer als der bei den Simulationen angenommene Wert von $2,1 \text{ W/(m K)}$, liegt aber noch innerhalb der Fehlergrenzen des experimentell bestimmten Werts.

Mit der Wärmeleitfähigkeit von $2,5 \text{ W/(m K)}$ wurde eine neue Simulationsreihe mit einer Erwärmungszeit von 900 s und Fehlstellentiefen von 0,01 m bis 0,10 m sowie den vorher verwendeten Standardparametern durchgeführt. Die Simulationsreihe wurde analog zu den bisherigen Betrachtungen ausgewertet und ihre Ergebnisse mit denen der experimentellen Messungen verglichen. Die mit Hilfe der Simulationen ermittelten Fehlstellentiefen für die beiden unterschiedlichen Wärmeleitfähigkeiten sind in Tabelle 8.12 gegenübergestellt.

Fehlstelle	Wärmeleitfähigkeit			
	$I = 2,1 \text{ W/(m K)}$		$I = 2,5 \text{ W/(m K)}$	
	Tiefe aus Temperaturdifferenz in cm	Tiefe aus Zeitpunkt in cm	Tiefe aus Temperaturdifferenz in cm	Tiefe aus Zeitpunkt in cm
5	3,2	2,6	3,2	2,9
6	3,5	2,9	3,5	3,2
7	2,6	1,9	2,6	2,2
8	3,7	2,9	3,7	3,3

Tabelle 8.12 Fehlstellentiefen des Probekörpers Pk1 für eine Erwärmungszeit von 900 s bei Verwendung von unterschiedlichen Wärmeleitfähigkeiten

Die Fehlstellentiefen, die über die maximale Temperaturdifferenz bestimmt wurden, sind für beide Wärmeleitfähigkeiten bei allen vier Fehlstellen gleich. Diejenigen, die über die Zeitpunkte der maximalen Temperaturdifferenzen ermittelt wurden, sind für die Wärmeleitfähigkeit von $2,5 \text{ W/(m K)}$ um 0,003 m bis 0,004 m größer und liegen damit näher an den über die maximale Temperaturdifferenz berechneten Fehlstellentiefen. Die genauere Anpassung der Wärmeleitfähigkeit an die realen Werte des Probekörpers bei den Simulationen führt also, wie vermutet, zu besseren Ergebnissen.

8.2 Theoretisches Modell (Anpassung simulierter und experimenteller Temperatur-Zeit-Kurven an ein theoretisches Modell)

Ein anderer Ansatz zur Bestimmung quantitativer Material- und Geometrieparameter als die in Kapitel 8.1 vorgestellte Vorgehensweise ist die Beschreibung des Abkühlungsprozesses mit Hilfe eines analytischen Modells. Eine vollständige Lösung wäre die Darstellung der Oberflächentemperatur durch eine analytische Funktion in Abhängigkeit aller Einflussparameter. Aufgrund ihrer Komplexität ist eine solche Lösung aber praktisch nicht zu realisieren.

Es wird daher nach weniger komplexen analytischen Funktionen gesucht, die Vereinfachungen der Lösung der Fourierschen Differentialgleichung (5) darstellen oder die aus empirischen Überlegungen über das Temperaturverhalten abgeleitet werden.

Eine solche Funktion kann aus der Betrachtung eines gleichmäßig erwärmten Körpers mit der Ausgangstemperatur

$$T(t=0) = A_0 + A_1 \quad (48)$$

und der konstanten Umgebungstemperatur

$$T_0(t) = A_0 \quad (49)$$

abgeleitet werden. Dabei wird die Zunahme der Umgebungstemperatur durch die Wärmeabgabe des Körpers nicht berücksichtigt und die Geometrie des Körpers sowie sein Wärmedurchgangswert vernachlässigt. Die Temperatur des Körpers ist dann proportional zur zeitlichen Änderung der Temperatur und es gilt

$$T(t) = T_0(t) - t_1 \frac{dT(t)}{dt} \quad (50)$$

Die Lösung für diese Differentialgleichung ist

$$T(t) = T_0(t) + T_1(t) \quad (51)$$

mit

$$T_1(t) = A_1 e^{-\frac{t}{t_1}} \quad (52)$$

Aus diesen Überlegungen heraus konnte für die Oberflächentemperatur eines homogenen halbumendlichen Körpers empirisch eine Funktion zur Anpassung gegeben durch

$$T(t) = T_0(t) + T_1(t) + T_2(t) \quad (53)$$

mit

$$T_2(t) = A_2 e^{-\frac{t}{t_2}} \quad (54)$$

finden. Die Abkühlungskurven der Oberfläche setzen sich demzufolge aus der Summe der drei Funktionen T_0 , T_1 und T_2 zusammen, wobei die Funktionen T_1 und T_2 den inneren und äußeren Wärmeabfluss beschreiben. Die Parameter A_1 , A_2 , t_1 und t_2 sind zeitlich konstant und werden näherungsweise als unabhängig von T angenommen.

In den folgenden drei Abbildungen sind jeweils experimentelle Temperatur-Zeit-Kurven für den Probekörper Pk1 nach 900 s Erwärmung sowie die dazugehörigen Anpassungskurven und deren drei Funktionen T_0 , T_1 und T_2 dargestellt. Die experimentell gemessene Umgebungstemperatur betrug 18,3 °C. Abbildung 8.6 zeigt die Abkühlungskurve über der Referenzstelle 1, Abbildung 8.7 die über der tiefen Fehlstelle 1 und Abbildung 8.8 die über

der flachen Fehlstelle 4. Die Bestimmtheitsmaße für die einzelnen Anpassungen liegen bei 0,9974, 0,9965 und 0,9994.

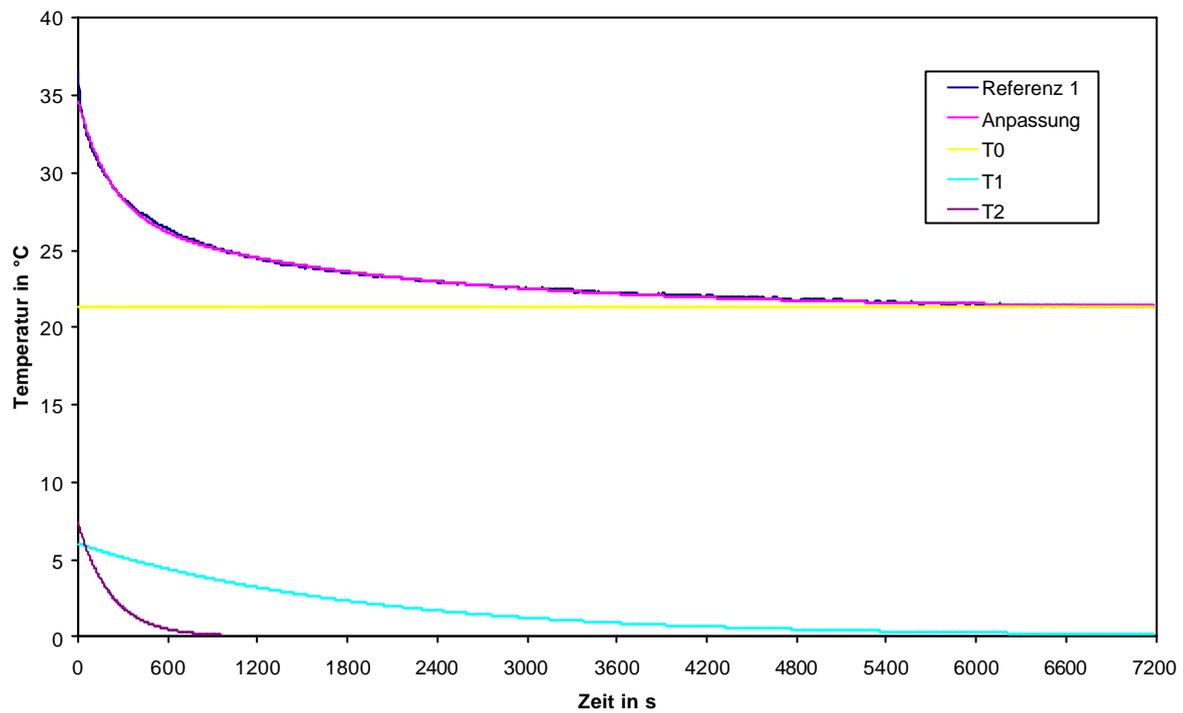


Abbildung 8.6 Temperatur-Zeit-Kurve des Probekörpers Pk1 über der Referenzstelle 1 sowie die Anpassungskurve und deren drei Funktionen T_0 , T_1 und T_2

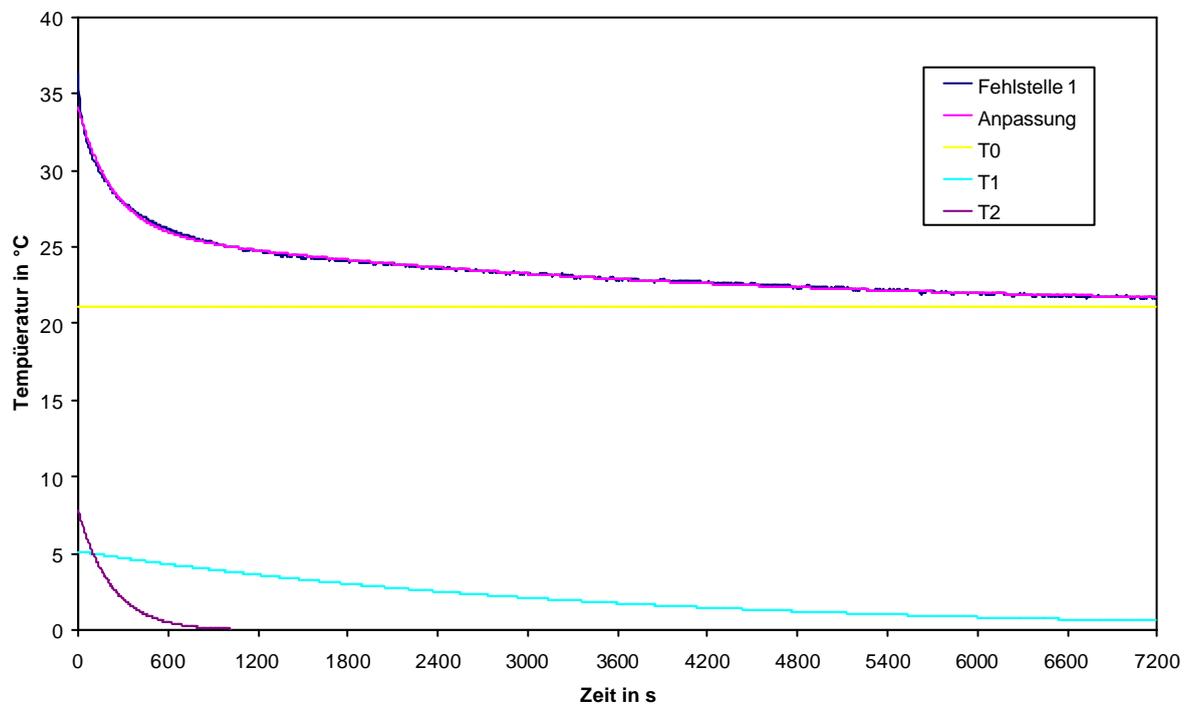


Abbildung 8.7 Temperatur-Zeit-Kurve des Probekörpers Pk1 über der Fehlstelle 1 sowie die Anpassungskurve und deren drei Funktionen T_0 , T_1 und T_2

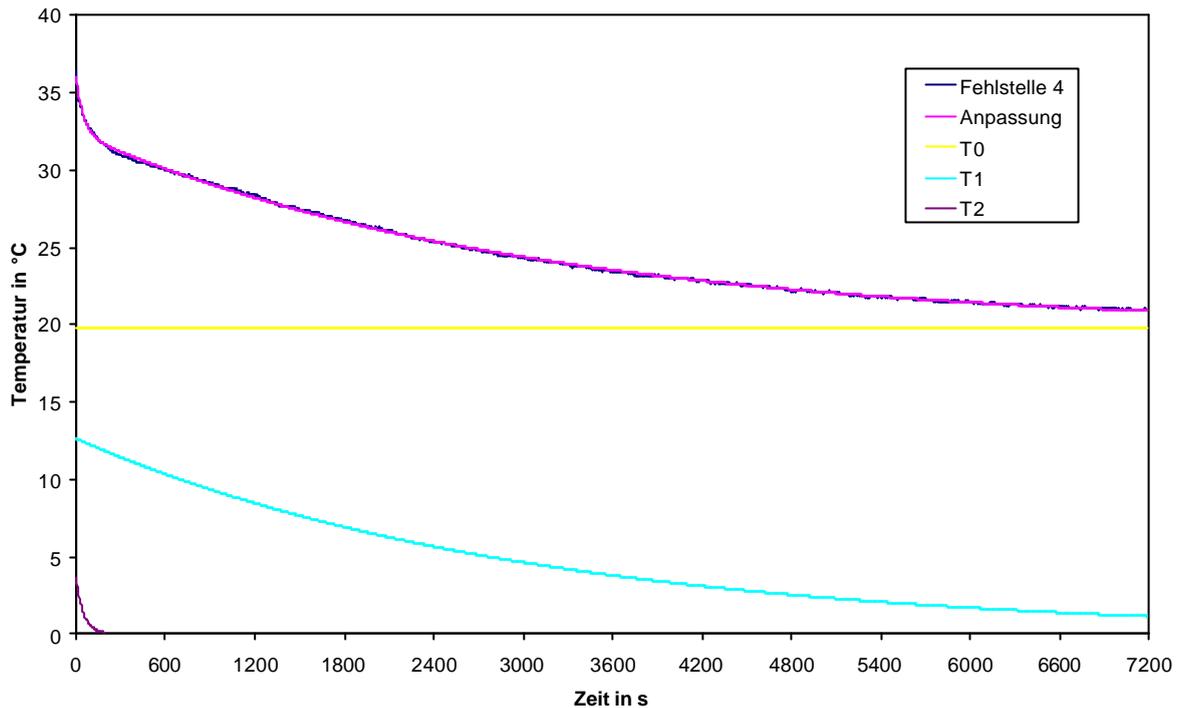


Abbildung 8.8 Temperatur-Zeit-Kurve des Probekörpers Pk1 über der Fehlstelle 4 sowie die Anpassungskurve und deren drei Funktionen T_0 , T_1 und T_2

Bei einem Vergleich der drei Einzelfunktionen T_0 , T_1 und T_2 lassen sich die größten Unterschiede bei der Funktion T_1 feststellen, die für die tiefe Fehlstelle 1 deutlich langsamer abklingt als für die Referenzstelle 1 und die bei der flachen Fehlstelle 4 zudem mit einem höheren Temperaturwert startet. Die Funktionen T_2 unterscheidet sich für die Referenzstelle 1 und die Fehlstelle 1 dagegen kaum und weicht nur für die Fehlstelle 4 ab.

Die Werte der einzelnen Parameter sind für alle Referenz- und Fehlstellen des Probekörpers Pk1 und eine Erwärmungszeit von 900 s in der Tabelle 8.13 aufgelistet. Die vier jeweils miteinander vergleichbaren Referenzstellen weisen für alle fünf Parameter eine gute Übereinstimmung auf, während sich die Parameter für die Fehlstellen vergleichsweise deutlich von jenen unterscheiden.

Der Abkühlungsprozess des Probekörpers Pk1 wurde bei den experimentellen Messungen, wie bereits in Kapitel 4 erwähnt, generell 7200 s betrachtet. Die Simulationsrechnungen wurden aber nur für die großen Fehlstellen 1 bis 4 ($0,20 \times 0,20 \times 0,10 \text{ m}^3$) mit einer so langen Zeit berechnet. Für die kleinen Fehlstellen 5 bis 8 ($0,10 \times 0,10 \times 0,10 \text{ m}^3$) wurde nur bei Bedarf die Betrachtungszeit von 3600 s verlängert. Für die Vergleichbarkeit der Anpassungsparameter A_0 , A_1 , A_2 , t_1 und t_2 zwischen experimentellen Messungen und Simulationsrechnungen wurde die Anpassung bei den kleinen Fehlstellen daher auch bei den experimentellen Messungen nur für die ersten 3600 s der Abkühlungsphase durchgeführt.

	Betrachtungszeit in s	Tiefe aus Radarmessungen in cm	A_0	A_I	A_2	t_I	t_2
Referenz 1	7200	-	21,28	6,01	7,37	1890,44	219,46
Fehlstelle 1	7200	9,2	21,11	5,16	7,86	3380,63	223,38
Referenz 2	7200	-	21,31	5,84	7,32	2002,75	234,79
Fehlstelle 2	7200	7,6	20,55	6,39	7,13	4784,17	212,18
Referenz 3	7200	-	20,67	5,84	7,16	1987,93	230,82
Fehlstelle 3	7200	4,0	20,28	8,33	5,55	3433,68	128,84
Referenz 4	7200	-	20,56	5,96	7,01	1973,26	223,11
Fehlstelle 4	7200	1,0	19,75	12,62	3,67	2985,17	49,91
Referenz 5	3600	-	21,76	7,59	6,14	1133,49	138,50
Fehlstelle 5	3600	3,5	21,57	12,61	4,42	1363,54	53,11
Referenz 6	3600	-	21,91	7,43	6,39	1129,29	140,62
Fehlstelle 6	3600	4,3	21,85	11,20	4,48	1480,61	81,02
Referenz 7	3600	-	22,00	7,00	5,74	1133,54	133,52
Fehlstelle 7	3600	3,0	22,20	14,72	3,06	1155,53	39,86
Referenz 8	3600	-	21,62	7,83	6,15	1099,98	126,66
Fehlstelle 8	3600	4,3	21,63	10,69	4,91	1504,18	81,61

Tabelle 8.13 Parameter A_0, A_I, A_2, t_I und t_2 für alle Fehl- und Referenzstellen des Probekörpers Pk1 sowie die Tiefe der Fehlstellen aus Radarmessungen

Aufgrund der geringen Datenmenge ist die Beschreibung der Abhängigkeit der einzelnen Parameter von der Tiefe allein für die experimentellen Messungen schwierig. Zum Vergleich wurden daher Anpassungen auch für Simulationsrechnungen mit definierten Fehlstellentiefen von 0,01 m bis 0,10 m durchgeführt. Die Parameter A_0, A_I, A_2, t_I und t_2 sind in Abhängigkeit der jeweiligen Tiefe in Abbildung 8.9, Abbildung 8.10, Abbildung 8.11 und Abbildung 8.12 zusammengefasst.

In der Tabelle 8.13 sind zudem die mit Radar gemessenen Tiefen der einzelnen Fehlstellen eingetragen. In Abbildung 8.9, Abbildung 8.10, Abbildung 8.11 und Abbildung 8.12 sind auch die Parameter aus den experimentellen Messungen in Abhängigkeit dieser Tiefenwerte zum Vergleich dargestellt. Wie aus den Abbildungen entnommen werden kann, stimmen die Parameter für die experimentellen Ergebnisse und die Simulationsrechnungen im allgemeinen gut überein besonders unter der Berücksichtigung der Genauigkeit von $\pm 0,01$ m der mit Hilfe von Radarmessungen ermittelten Tiefen des realen Probekörpers.

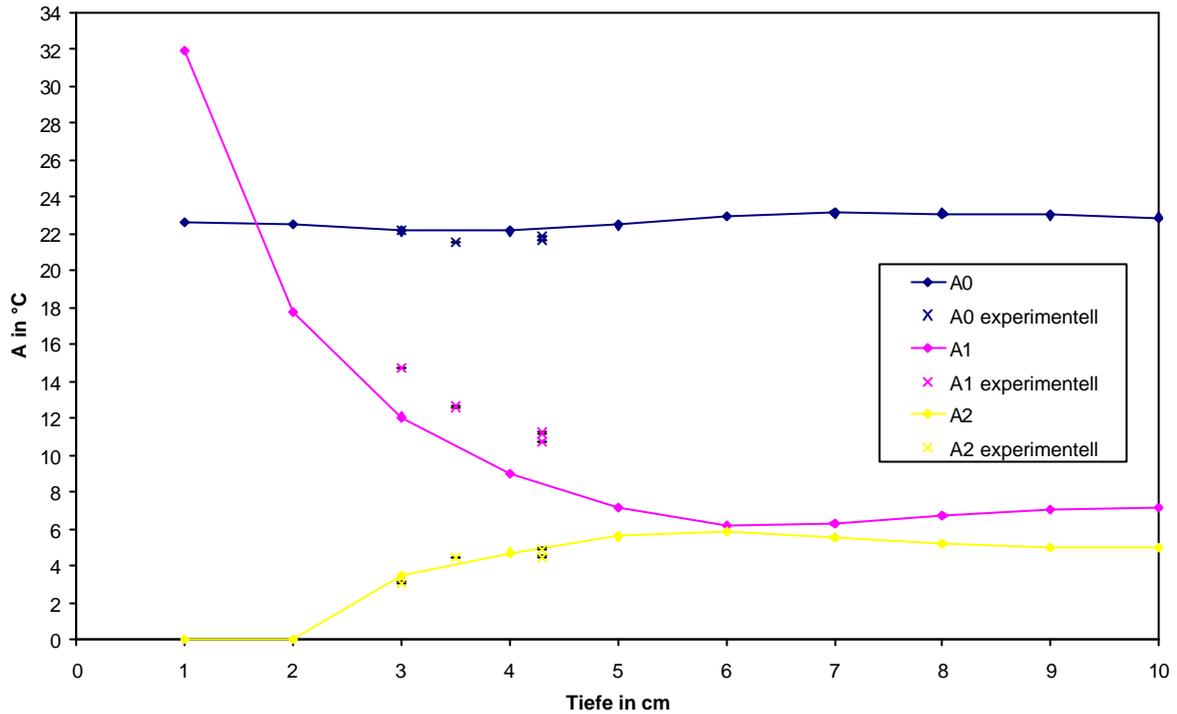


Abbildung 8.9 Parameter A_0 , A_1 und A_2 in Abhängigkeit der Fehlstellentiefe für $0,10 \times 0,10 \times 0,10 \text{ m}^3$ große Fehlstellen aus Simulationsrechnungen und für Fehlstellen 5 bis 8 aus experimentellen Messungen

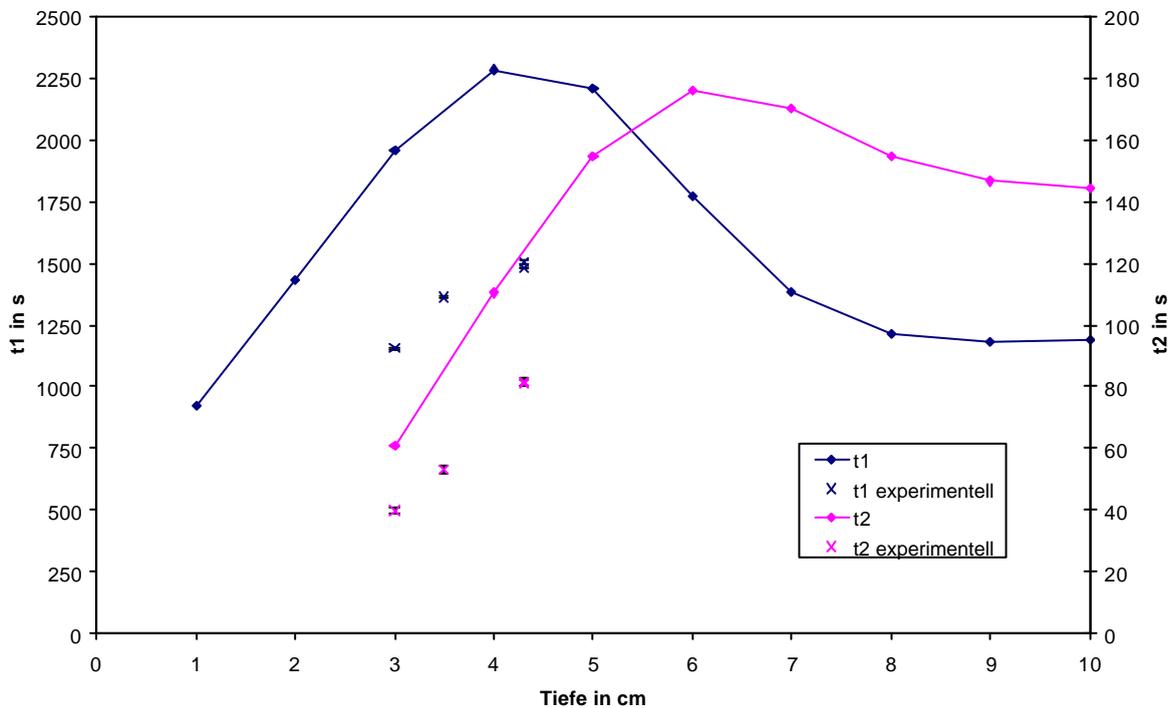


Abbildung 8.10 Parameter t_1 und t_2 in Abhängigkeit der Fehlstellentiefe für $0,10 \times 0,10 \times 0,10 \text{ m}^3$ große Fehlstellen aus Simulationsrechnungen und für Fehlstellen 5 bis 8 aus experimentellen Messungen

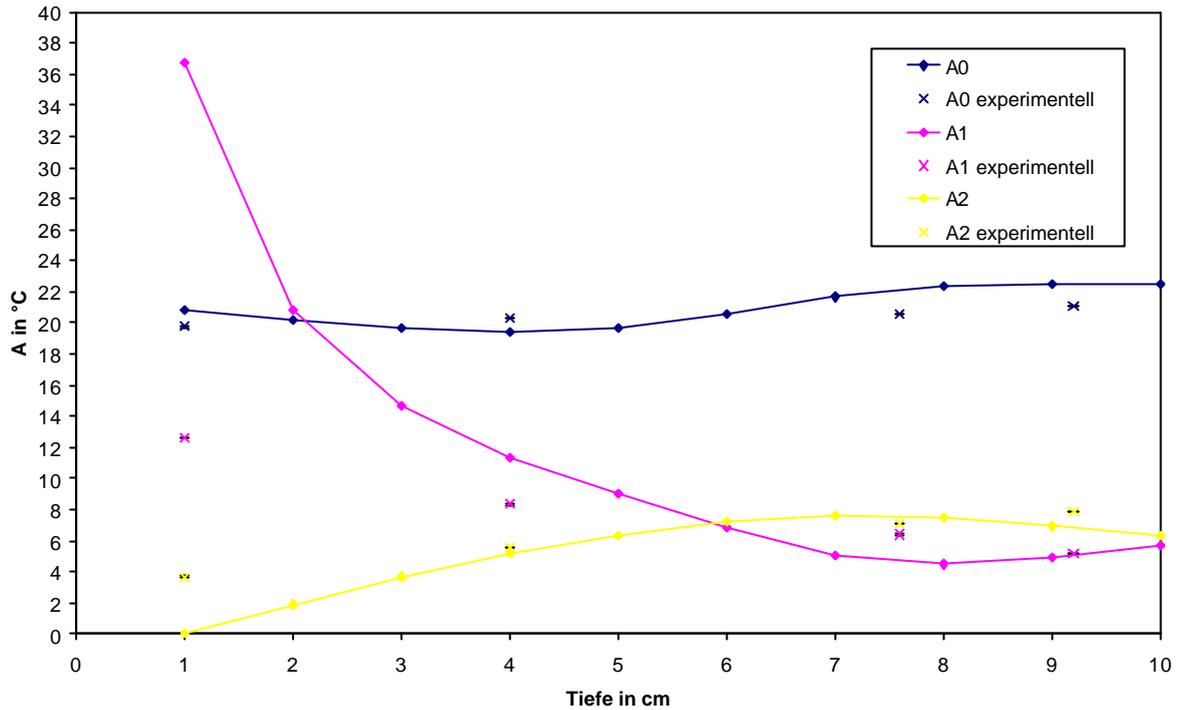


Abbildung 8.11 Parameter A_0 , A_1 und A_2 in Abhängigkeit der Fehlstellentiefe für $0,20 \times 0,20 \times 0,10 \text{ m}^3$ große Fehlstellen aus Simulationsrechnungen und für Fehlstellen 1 bis 4 aus experimentellen Messungen

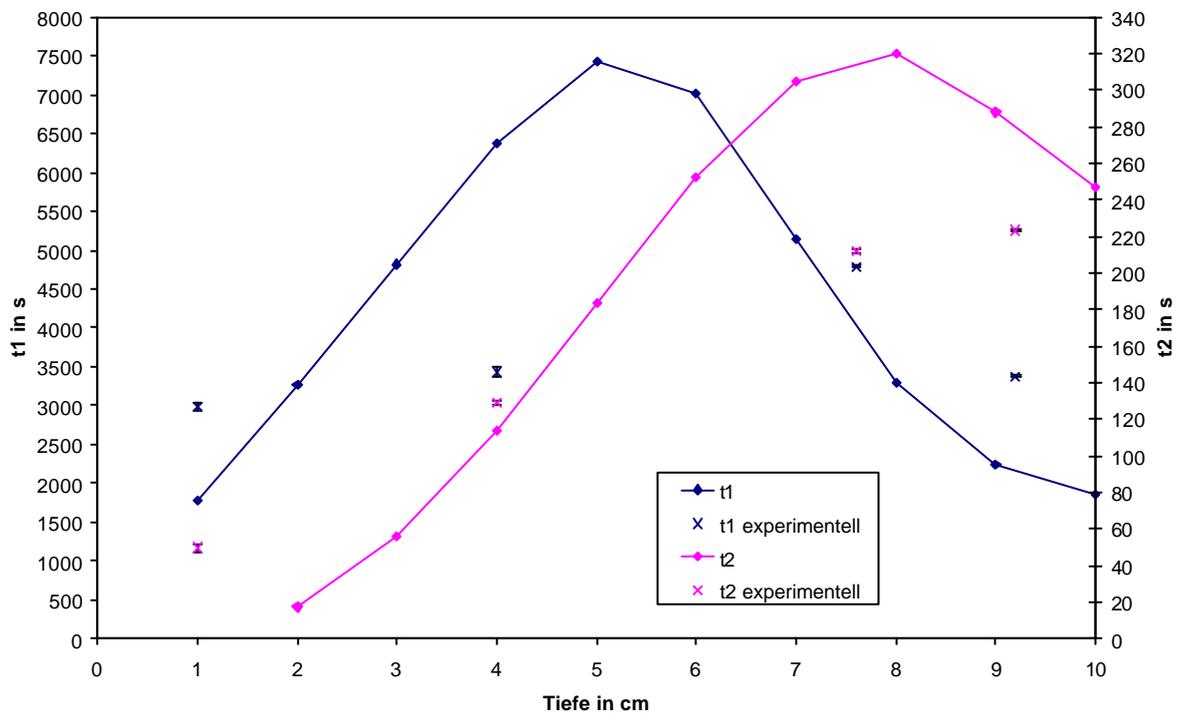


Abbildung 8.12 Parameter t_1 und t_2 in Abhängigkeit der Fehlstellentiefe für $0,20 \times 0,20 \times 0,10 \text{ m}^3$ große Fehlstellen aus Simulationsrechnungen und für Fehlstellen 1 bis 4 aus experimentellen Messungen

Der qualitative Verlauf der fünf Parameter in Abhängigkeit der Fehlstellentiefe ist für beide Fehlstellengrößen jeweils sehr ähnlich. Erwartungsgemäß sind der Parameter A_0 quasi und der Parameter A_2 nahezu unabhängig von der Fehlstellentiefe, da sie die konstante

Umgebungstemperatur bzw. den äußeren Wärmeabfluss widerspiegeln. Der Parameter A_1 weist wie vermutet eine große Abhängigkeit gegenüber der Fehlstellentiefe auf, weil der innere Wärmeabfluss natürlich maßgeblich von der Inhomogenität beeinflusst wird. Die beiden Parameter t_1 und t_2 haben qualitativ eine ähnliche, wenn auch leicht versetzte Abhängigkeit zur Tiefe. Quantitativ ist sie für t_1 jedoch deutlich größer als für t_2 , was die bisherigen Interpretationen stützt.

Die Parameter A_0 , A_1 , A_2 , t_1 und t_2 können also ungefähr den Geometrie- und Materialparametern zugeordnet werden, da die Einflussparameter der einzelnen Funktionen T_0 , T_1 und T_2 qualitativ bekannt sind. Für die Charakterisierung von Fehlstellen eignen sich besonders die beiden Parameter A_1 und t_1 , während anhand der Parameter A_2 und t_2 eher Aussagen über die Homogenität der Oberfläche getroffen werden können. Eine genauere quantitative Aussage ist mit der Verwendung eines theoretischen Modells zur Zeit aber nicht möglich.

Die Anpassung mit Hilfe der ausgewählten Funktion kann jedoch bei der Bildauswertung angewendet werden, um zusätzliche Informationen zu erhalten, indem die Anpassung für jeden einzelnen Oberflächenpunkt während der betrachteten Abkühlungsphase durchgeführt wird. Eine solche Auswertung eines Thermografiefilms wird beispielhaft für eine Erwärmungszeit von 900 s in Abbildung 8.13 gezeigt.

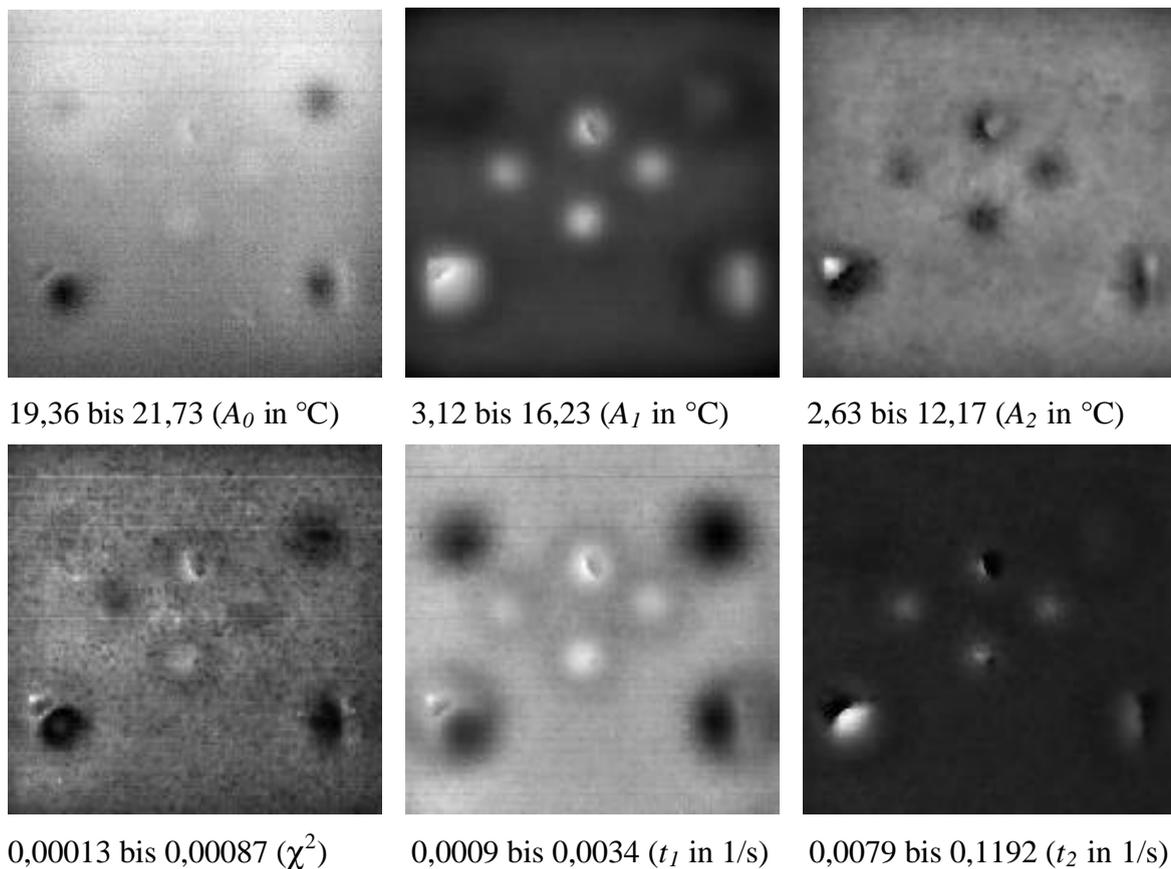
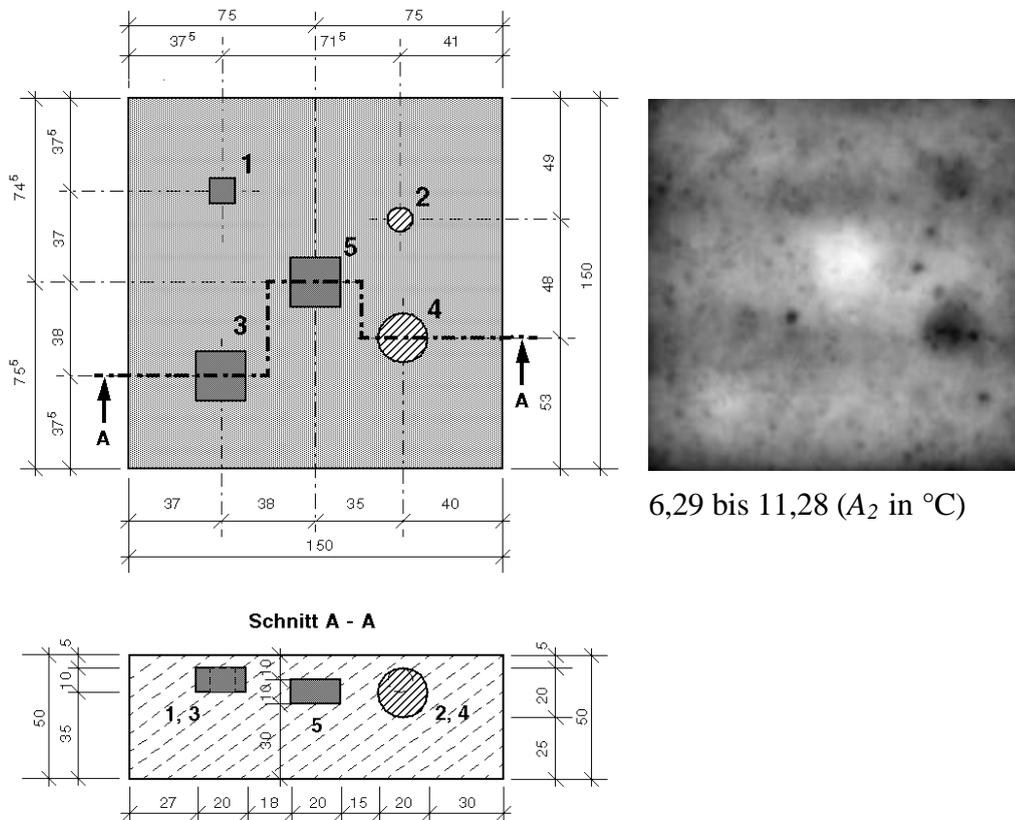


Abbildung 8.13 **Darstellung der Anpassungsparameter A_0 , A_1 , A_2 , t_1 und t_2 für die Messung des Probekörpers Pk1 mit 900 s Erwärmung**

Die Qualität der Anpassung wird durch den χ^2 -Wert dokumentiert. Der Parameter A_0 ist wie erwartet nahezu konstant für den gesamten Probekörper. Die Parameter A_1 und t_1 zeigen deutlich alle Fehlstellen, was die Vermutung stützt, dass die Funktion T_1 den inneren Wärmeabfluss beschreibt. Die Parameter A_2 und t_2 zeigen die Fehlstellen weniger klar, dafür sind aber trotz nachträglicher auf den Probekörper aufgebrachtter Schlämme bei Parameter A_2 Oberflächenstrukturen andeutungsweise auszumachen. Bei einem analog untersuchten

Probekörper, der nicht mit Schlämme bestrichen wurde und der in Abbildung 8.14 links schematisch dargestellt ist, sind die Oberflächenstrukturen bei Parameter A_2 deutlich zu erkennen, wie in Abbildung 8.14 rechts gezeigt wird.



6,29 bis 11,28 (A_2 in $^{\circ}\text{C}$)

Abbildung 8.14 Ansicht und Schnitt eines Probekörpers aus Beton mit den Fehlstellen 1, 3 und 5 aus Polystyrol-Extruderschaum sowie 2 und 4 aus Polystyrol-Extruderschaum-Kies-Gemischen (links) und der Anpassungsparameter A_2 für eine Messung dieses Probekörpers mit 1800 s Erwärmung (rechts)

9 Zusammenfassung

Im Rahmen der Arbeit wurden qualitative und quantitative Möglichkeiten der Impuls-Thermografie als zerstörungsfreies Prüfverfahren im Bauwesen dargelegt. Es konnte aufgezeigt werden, inwiefern sich die Impuls-Thermografie zur Lösung des inversen Problems eignet.

Einleitend wurden dazu die Anwendungsmöglichkeiten der zerstörungsfreien Prüfung im allgemeinen und der Impuls-Thermografie im speziellen angesprochen und daraus die Motivation für diese Arbeit abgeleitet.

Der Hauptteil der Arbeit beginnt mit der Vorstellung der passiven und den verschiedenen aktiven Thermografieverfahren und ihrer Bedeutung für das Bauwesen. Insbesondere das in der Arbeit angewendete Verfahrensprinzip wurde ausführlich erläutert.

Anschließend wurden die im Labor durchgeführten experimentellen Untersuchungen beschrieben. Dabei wurden zunächst der experimentelle Aufbau bestehend aus der Infrarotkamera, der Erwärmungseinheit und einem Rechnersystem vorgestellt und die für die Messungen wichtigen Spezifikationen der Infrarotkamera und der Erwärmungseinheit genannt. Als sinnvollste Variante zur Erwärmung der Oberfläche erwiesen sich linienförmig angeordnete Infrarotstrahler, die senkrecht zu ihrer Anordnungsrichtung bewegt werden können.

Die experimentellen Untersuchungen wurden an drei verschiedenen Probekörpern durchgeführt, welche mit einem engen Bezug zur Praxis hergestellt wurden. Im einzelnen wurden Hohlstellen in Betonbauteilen (Pk1), Putzablösungen auf Betonkonstruktionen (Pk2) und unzureichende Vermörtelungen von im Dickbettverfahren verlegten Spaltklinkern auf Betonwänden (Pk3) geprüft.

Die experimentellen Messungen dienten dem qualitativen Nachweis der Anwendbarkeit der Impulsthermografie als zerstörungsfreies Prüfverfahren im Bauwesen. In Kapitel 4 werden die Durchführung, die digitale Aufzeichnung der thermischen Bilddaten als Filme und die anschließende Auswertung der Messdaten detailliert erklärt und ihre Ergebnisse für alle drei Probekörper ausführlich dargestellt. Insbesondere die Auswirkungen auf die maximale Temperaturdifferenz über einer Fehl- und einer Referenzstelle und deren Zeitpunkt des Auftretens wurden analysiert. Die Ergebnisse belegen die Eignung der Impulsthermografie für die zerstörungsfreie Prüfung im Bauwesen.

Neben den experimentellen Untersuchungen wurden als Schwerpunkt der Arbeit numerische Simulationen durchgeführt. Dafür wurde zunächst ein Programm auf Basis der finiten Differenzen entwickelt. Die Methode, die zu berücksichtigenden Randbedingungen wie z. B. die Ausgangstemperatur und der Aufbau des Simulationsprogramms werden in der Arbeit beschrieben.

Mit Hilfe des Programms wurde eine umfangreiche Variation aller Einflussparameter für den Probekörper Pk1 vorgenommen. Die Arbeit zeigt, dass mit steigendem Weginkrement der Fehler zwischen Experiment und Simulation linear wächst, während die Ergebnisse bei Einhaltung des Stabilitätskriteriums unabhängig von der Größe des Zeitinkrements sind.

Die Betrachtung der Randbedingungen ergab, dass die Erwärmungsart und die Ausgangstemperatur nahezu keinen Einfluss auf die maximale Temperaturdifferenz und ihren Zeitpunkt haben. Den Zeitpunkt betreffend gilt dieses auch für die aufgebrachte Wärmestromdichte, welche allerdings die maximale Temperaturdifferenz linear beeinflusst. Die Auswirkungen der Erwärmungszeit und der äußeren Wärmeverluste sind nicht so einfach zu beschreiben. Beide Werte sollten daher möglichst genau in die Simulation einfließen.

Das gleiche trifft auch für die Materialparameter zu. Zwar lässt sich zwischen der Rohdichte bzw. der spezifischen Wärmekapazität und dem Zeitpunkt der maximalen Temperaturdifferenz eine lineare Beziehung feststellen, aber für die Temperaturdifferenz selbst ist der Einfluss logarithmisch und bei der Wärmeleitfähigkeit von höherer Ordnung die Temperaturdifferenz und exponentiell ihren Zeitpunkt betreffend.

Bei den Geometrieparametern haben die Dicke des Probekörpers sowie die Tiefenausdehnung der Inhomogenität nur für sehr kleine Werte einen Einfluss auf die maximale Temperaturdifferenz und ihren Zeitpunkt. In Abhängigkeit der Tiefe der Fehlstelle jedoch fällt die maximale Temperaturdifferenz exponentiell ab, während der Zeitpunkt des Auftretens quadratisch anwächst.

Die flächenhafte Ausdehnung der Inhomogenität beeinflusst den Zeitpunkt der maximalen Temperaturdifferenz bereichsweise linear, bevor sich der Wert asymptotisch einem Höchstwert angleicht. Die maximale Temperaturdifferenz selbst nähert sich in Abhängigkeit der seitlichen Fehlstellenausdehnung exponentiell einem Maximalwert an.

Nach der Parametervariation wurden analog zu den experimentellen Untersuchungen für alle drei Probekörper numerische Simulation durchgeführt und mit den Ergebnissen der Messungen verglichen. Während die Messungen und Simulationen für den Probekörper Pk1 relativ gut übereinstimmen, weichen die Ergebnisse bei den anderen beiden Probekörpern teilweise doch erheblich voneinander ab. Mögliche Gründe für diese Unterschiede werden im Kapitel 7 angegeben.

Im Hinblick auf die quantitativen Möglichkeiten der Impuls-Thermografie wurden im Rahmen dieser Arbeit zwei Ansätze betrachtet. Zum einen wurden die Simulationsergebnisse für den Probekörper Pk1 systematisch ausgewertet, mit den experimentellen Ergebnissen verglichen und aus dem Vergleich die Tiefen der einzelnen Fehlstellen des Probekörpers bestimmt. Zum anderen wurden die experimentellen und simulierten Temperatur-Zeit-Kurven an ein theoretisches empirisches Modell angepasst.

Die systematische Auswertung der Simulationen liefert für die Bestimmung der Tiefen der Inhomogenitäten gute Ergebnisse, falls die wesentlichen Einflussparameter der experimentellen Messungen bei den numerischen Simulationen entsprechend angepasst werden, und eignet sich demzufolge als quantitative Auswertungsmöglichkeit der Impuls-Thermografie.

Die Anpassung von experimentellen und simulierten Temperatur-Zeit-Kurven an ein theoretisches Modell bietet die Möglichkeit Geometrie- und Materialparameter tendenziell zu beschreiben. Genauere quantitative Aussagen sind zur Zeit nicht erzielbar. Die Anpassung kann jedoch bei der Bildauswertung benutzt werden, um zusätzliche Informationen zu gewinnen.

Insgesamt belegt die Arbeit die Eignung der Impuls-Thermografie als qualitatives zerstörungsfreies Prüfverfahren, welches ohne weiteres direkt in der Praxis eingesetzt werden kann. Unter der Voraussetzung, dass sich zu untersuchende Bauteile aufgrund der jeweiligen Randbedingungen gezielt erwärmen lassen, ist die Methode für Strukturuntersuchungen im oberflächennahen Bereich bis zu einer Tiefe von 10 cm bis 15 cm geeignet. Eine Bestätigung der im Labor durchgeführten Arbeiten durch Versuche an realen Bauteilen muss jedoch noch erfolgen.

Die erfolgreiche Anwendung bei drei unterschiedlichen Probekörpern weist auf die Vielseitigkeit des Verfahrens hin, was weitergehende Untersuchungen im Rahmen des DFG-Forschungsprojekts „Struktur- und Feuchteuntersuchungen von Bauteil- und Bauwerksoberflächen mit der Impuls-Thermografie“ belegen.

Ferner zeigt die Arbeit Möglichkeiten auf, die Impuls-Thermografie auch quantitativ anzuwenden. In diesem Zusammenhang hat sich besonders der Einsatz von numerischen Simulationen bewährt, mit deren Hilfe eine Lösung für das inverse Problem gefunden werden konnte.

Weiterer Forschungsbedarf besteht bei der Anpassung von experimentellen und simulierten Temperatur-Zeit-Kurven an ein theoretisches Modell. Hier konnte zwar das Potential des Ansatzes angedeutet werden, quantitative Ergebnisse wurden hier wie bereits erwähnt nicht erzielt.

10 Danksagung

Mein Dank gilt der Deutschen Forschungsgemeinschaft, welche diese Arbeit durch die Förderung des Projekts „Struktur- und Feuchteuntersuchungen von Bauteil- und Bauwerksoberflächen mit der Impuls-Thermografie“ ermöglicht hat.

Persönlich danke ich Dr. Christiane Maierhofer, Prof. Dr.-Ing. Bernd Hillemeier und Dr. Herbert Wiggenhauser für die intensive Betreuung, Prof. Dr. Erich Cziesielski als Prüfungsvorsitzendem, Matthias Röllig für die gute Zusammenarbeit, meinen Kolleginnen und Kollegen insbesondere Kerstin Borchardt, Dr. Camilla Colla, Andre Gardei, Marco Lange, Ernst Niederleithinger, Dieter Schaurich, Dr. Friederike Weritz und Gerd Wilsch für ihre Unterstützung, meinen Eltern Carmen und Dr.-Ing. Kurt Brink für alles, was sie mir ermöglicht haben, meinem Bruder Thore und meinen Freundinnen und Freunden für die notwendige Ablenkung zwischendurch und meiner Freundin Anke für den Rückhalt, den sie mir gegeben hat.

11 Literatur

- [1] Brink, A., Maierhofer, Ch., Röllig, M. und Wiggenhauser, H.: Struktur- und Feuchteuntersuchungen von Bauteil- und Bauwerksoberflächen mit der Impuls-Thermografie, Zwischenbericht zum DFG-Projekt, 2001, unveröffentlicht.
- [2] Hillemeier, B., Scheel, H., Rieck, C. und Westphal, B.: Struktur- und Feuchteuntersuchungen von Bauteil- und Bauwerksoberflächen mit der Impuls-Thermografie, Zwischenbericht zum DFG-Forschungsprojekt, 2001, unveröffentlicht.
- [3] Hurley, T. L.: Infrared techniques for electric utilities, in: Maldague, X. P. V.; Infrared methodology and technology, Gordon and Breach, New York, 1994, S. 265-317.
- [4] Holmsten, D. und Houis, R.: High-resolution thermal scanning for hot-strip mills, in: Semanovich, S. A.; Thermosense XII, SPIE Proceedings, 1313 (1990), S. 322-331.
- [5] Schickert, G.: Infrarot-Thermografie als Hilfsmittel für bautechnische Untersuchungen, Amts- und Mitteilungsblatt der BAM 12, Berlin, 1982, S. 336.
- [6] Petterson, B. und Axen, B.: Thermography; Testing of the thermal insulation and airtightness of buildings, Swedish Council for Building Research, Spangbergs Tryckerier AB, Stockholm, 1980, S. 227.
- [7] Maldague, X. P. V.: Nondestructive evaluation of materials by infrared thermography, 1. Auflage, Springer-Verlag, London, 1993.
- [8] Wyss, P., Lüthi, T., Primas, R. und Zogmal, O.: Factors affecting the detectability of voids by infrared thermography, in: Proceedings of QIRT 1996, Stuttgart, 1996, Edizioni ETS, Pisa (1997), S. 227-232.
- [9] Cielo, P.: Pulsed photothermal evaluation of layered materials, in: J. Appl. Phys., 1984, Vol. 56, No. 1, S. 230-234.
- [10] Busse, G., Wu, D. und Karpen, W.: Thermal wave imaging with phase sensitive modulated thermography, in: J. Appl. Phys., 1992, Vol. 71, No. 8, S. 3962-3965.
- [11] Wu, D.: Lockin-Thermografie für die zerstörungsfreie Werkstoffprüfung und Werkstoffcharakterisierung, Dissertation am IKP der Universität Stuttgart, Stuttgart, 1996.
- [12] Maldague, X. P. V., Couturier, J.-P., Marinetti, S., Salerno, A. und Wu, D.: Avances in pulsed phased thermography, in: Proceedings of QIRT 1996, Stuttgart, 1996, Edizioni ETS, Pisa (1997), S. 377-382.
- [13] Bjegovic, D., Mikulic, D. und Sekulic, D.: Non-destructive methods for monitoring of reinforcing steel in concrete, in: Forde, M. C.: Proceedings of X. International Conference of Structural Faults & Repair 2001, 4.-6. July 2001, London, UK, Engineering Technics Press, CD-ROM.
- [14] Stimolo, M.: Praktische Anwendung der Thermografie im Straßenbau und für Abdichtungssysteme, in: Thermografie-Kolloquium 2001, 22.09.2001, Universität Stuttgart, DGZfP-Berichtsband auf CD 77, 2001, Vortrag V06.
- [15] Lüthi, T., Meier, H., Primas, R. und Zogmal, O.: Infrared inspection of external bonded CFPR-sheets, in: Schickert, G. und Wiggenhauser, H.: Proceedings of the International Symposium on Non-Destructive Testing in Civil Engineering (NDT-CE), Berlin, 1995, DGZfP, Berlin (1995), Vol. 1, S. 689-696.

- [16] Nokes, J. P., Hawkins, G. F. und Johnson, E. C.: The non-destructive evaluation of composites in infrastructure applications, in: Proceedings of 7th Int. Conference on Structural Faults and Repair, Engineering Technics Press, 1997, Vol. 2, S. 79-81.
- [17] Weise, F., Arndt, D., Borchardt, K., Geyer, E., Henschen, J., Krause, M. und Niedack-Nad, M.: Non-Destructive Testing Methods for Determining the Built-in Position of Anchoring Elements at Curtain Facades, in: Schickert, G. und Wiggenhauser, H.: Proceedings of the International Symposium on Non-Destructive Testing in Civil Engineering (NDT-CE), Berlin, 1995, DGZfP, Berlin (1995), Vol. 1, S. 867-876.
- [18] Geyer, E., Arndt, D. und Vogel, L.: Bestimmung des Remissionsgrades von trockenen und befeuchteten Baustoffen im Wellenlängenbereich 1,3 bis 13 μm für die IR-reflektometrische Ermittlung von Oberflächenfeuchte, in Wiggenhauser, H., Müller, H. S. und Girlich, N.: Tagungsbericht Feuchtetag 21.09.1993, Berlin, 1993, DGZFP, Berlin (1993), S. 223-231.
- [19] Geyer, E., Arndt, D. und Günther, B.: Bestimmung der Reflexion von trockenen und befeuchteten Baustoffen im Wellenlängenbereich 0,3 bis 2,5 μm für die IR-optische Bestimmung der Feuchte, in: Wiggenhauser, H. und Müller, H. S.: Tagungsbericht Feuchtetag '95, Berlin, 1995, BAM, Berlin (1995), S. 176-184.
- [20] Vavilov, V., Kauppinen, T. und Grinzato, E.: Thermal characterization of defects in building envelopes using long square pulse and slow thermal wave techniques, in: Research Nondestructive Evaluation 9, New York, 1997, S. 181-200.
- [21] Faires, J. D. und Burden, R. L.: Numerische Methoden – Näherungsverfahren und ihre praktische Anwendung, Spektrum Akademischer Verlag, Heidelberg, 1994.
- [22] Michejew, M. A.: Grundlagen der Wärmeübertragung, VEB Verlag Technik, Berlin, 1962.
- [23] Schuster, N. und Kolobrodov, V. G.: Infrarotthermographie, WILEY-VCH Verlag, Berlin, 2000.
- [24] VDI-Wärmeatlas, 8. Auflage, Springer-Verlag, Berlin Heidelberg, 1997.
- [25] Churchill, S. W.: A comprehensive correlating equation for laminar, assisting, forced and free convection, in: AIChE Journal, Vol. 23 (1977) Nr. 1, S. 10-16.
- [26] Churchill, S. W. und Chu, H. H. S.: Correlating equations for laminar and turbulent free convection from a vertical plate, in: International Journal of Heat and Mass Transfer, Vol. 18 (1975) Nr. 11, S. 1323-1329.
- [27] Gnielinski, V.: Berechnung mittlerer Wärme- und Stoffübergangskoeffizienten am laminar und turbulent überströmten Einzelkörper mit Hilfe einer einheitlichen Gleichung, in: Forschung im Ingenieurwesen, Vol. 41 (1975), S. 145-153.
- [28] Carslaw, H. S. und Jaeger, J. C.: Conduction of heat in solids, 2. Auflage, Oxford University Press, Oxford, 1959.
- [29] Popov, Y. A., Pribnow, D. F. C., Sass, J. H., Williams, C. F. und Burkhardt, H.: Characterization of rock thermal conductivity by high-resolution optical scanning, in: Geothermics, Vol. 28 (1999), S. 253-276.
- [30] DIN 4801 Wärmeschutz im Hochbau, Teil 4: Wärme- und feuchteschutztechnische Kennwerte.
- [31] Dr. Eichler, F., Dr. Arndt, H.: Bautechnischer Wärme- und Feuchtigkeitsschutz, 2. Auflage, VEB Verlag für Bauwesen, Berlin, 1989.

[32] Grigull, U., Sandner, H.: Wärmeleitung, 2. Auflage, Springer-Verlag, Berlin, 1990.

12 Veröffentlichungen

- Brink, A., Maierhofer, C., Röllig, M. und Wiggenhauser, H.: Impulse thermography for the detection of defects in structural elements, in: Bergmeister, K.; Proceedings of the International PhD Symposium in Civil Engineering, Volume 1, Wien, 5.-7.10.2000, Fleck Druck GmbH, Wien (2000), S. 351–360.
- Maierhofer, C., Brink, A., Röllig, M. und Wiggenhauser, H.: Detection of shallow voids in concrete structures with impulse thermography and radar, in: Forde, M. C.; Proceedings of 9th International Conference of Structural Faults & Repair 2001, London, 4.-6.7.2001, Engineering Technics Press, Edinburgh (2001), CD.
- Maierhofer, C., Brink, A., Röllig, M. und Wiggenhauser, H.: Transient thermography for structural investigation of concrete and composites in the surface near region, 6th international workshop on Advances in Infrared Technology and Applications (6th AITA), Siena (Italien), 17.-19.9.2001.
- Brink, A., Maierhofer, C., Röllig, M. und Wiggenhauser, H.: Auswertungsmethoden der Impuls-Thermografie zur Ortung von Fehlstellen in Betonstrukturen, in: DGZfP-Berichtsband 77-CD; Thermografie-Kolloquium 2001, Stuttgart, 22.9.2001, CD.
- Brink, A., Maierhofer, C., Röllig, M. und Wiggenhauser, H.: Anwendung der Impuls-Thermografie als zerstörungsfreies Prüfverfahren im Bauwesen, in: DGZfP-Berichtsband 76-CD; Bauwerksdiagnose – Praktische Anwendungen Zerstörungsfreier Prüfungen, Leipzig, 25.-26.10.2001, CD.
- Maierhofer, C., Brink, A., Röllig, M. und Wiggenhauser, H.: Transient thermography for structural investigation of concrete and composites in the surface near region, in: Infrared Physics & Technology, 43 (2002), S. 271-278.
- Maierhofer, C., Brink, A., Röllig, M. und Wiggenhauser, H.: Anwendung der Impuls-Thermografie als quantitatives zerstörungsfreies Prüfverfahren im Bauwesen, in: DGZfP-Berichtsband 80-CD; DGZfP-Jahrestagung 2002, Weimar, 6.-8.5.2002, CD.
- Brink, A., Hillemeier, B., Maierhofer, C., Rieck, C., Röllig, M. und Wiggenhauser, H.: Untersuchung des Einflusses von Feuchtigkeit auf die Ortung von Hohlstellen in Betonstrukturen mit der Impuls-Thermografie, in: Kupfer, K. und Trinks, E.; 11. Feuchtetag 2002, Weimar, 18.-19.9.2002, CD.
- Brink, A., Maierhofer, C., Röllig, M. und Wiggenhauser, H.: Impulse thermography for locating voids and honeycombing in concrete structures supported by numerical simulations, in: Häupl, P. and Roloff, J.; 11. Bauklimatisches Symposium Tagungsbeiträge, Volume 1, Band 1, Dresden, 26.9.-30.9.2002, Eigenverlag der TU Dresden, Dresden (2002), S. 242–252.
- Brink, A., Maierhofer, C., Röllig, M. und Wiggenhauser, H.: Application of quantitative impulse thermography for structural evaluation in civil engineering – comparison of experimental results and numerical simulations, 6th international conference on Quantitative Infrared Thermography (QIRT 2002), Dubrovnik, 24.-27.9.2002.
- Maierhofer, C., Brink, A., Hillemeier, B., Rieck, C., Röllig, M. und Wiggenhauser, H.: Struktur und Feuchteuntersuchung in Betonstrukturen mit der Impuls-Thermografie, in: Bauphysik 25 (2003), Heft 1, S. 22-26.
- Maierhofer, C., Brink, A., Röllig, M. und Wiggenhauser, H.: Detection of shallow voids in concrete structures with impulse thermography and radar, in: NDT&E International, 36 (2003), S. 257-263.

Maierhofer, C., Brink, A., Röllig, M. und Wiggenhauser, H.: Transient thermography for non-destructive investigation of building structures in the near surface region, in: Binda, L und Vekey, R. C.; Proceedings of RILEM TC 177-MDT Workshop on on-site control and evaluation of masonry structures, Mantova (Italien), 13.-14.11.2001, RILEM Publications S.A.R.L., Bagnex (2003), S. 251-262.

Maierhofer, C., Wöstmann, J., Brink, A. und Röllig, M.: Ortung von Hohlstellen und Ablösungen in Betonkonstruktionen mit Radar und Impuls-Thermografie, in: VDI; GESA-Symposium 2003, Braunschweig, 12.-13.6.2003, VDI Verlag, Düsseldorf (2003), S. 281-292.

Brink, A., Maierhofer, C., Röllig, M. und Wiggenhauser, H.: Quantitative impulse-thermography as non-destructive testing method in civil engineering – experimental results and numerical simulations, in: Forde, M. C.; Proceedings of 10th International Conference of Structural Faults & Repair 2003, London, 1.-3.7.2003, Engineering Technics Press, Edinburgh (2003), CD.

Wedler, G., Brink, A., Maierhofer, C., Röllig, M., Weritz, F. und Wiggenhauser, H.: Active infrared thermography in civil engineering – quantitative analysis by numerical simulation, in: Proceedings of International Symposium on Non-Destructive Testing in Civil Engineering (NDT-CE) 2003, Berlin, 16.-19.9.2003, CD.

Weritz, F., Wedler, G., Brink, A., Maierhofer, C., Röllig, M. und Wiggenhauser, H.: Investigation of concrete structures with pulse phase thermography, in: Proceedings of International Symposium on Non-Destructive Testing in Civil Engineering (NDT-CE) 2003, Berlin, 16.-19.9.2003, CD.

Maierhofer, C., Brink, A., Röllig, M. und Wiggenhauser, H.: Quantitative numerical analysis of transient IR-experiments on buildings, 7th international workshop on Advances in Infrared Technology and Applications (7th AITA), Pisa (Italien), 9.-11.9.2001.

13 Anhang

Anlage 1 Materialparameter

Materialgruppe	Stoff bzw. Material	Rohdichte		Wärmeleitfähigkeit		spezifische Wärmekapazität		Wärmeindringzahl ^h $e = (\rho * \lambda * c)^{0,5}$ $W * s^{0,5} / (m^2 * K)$	Temperaturleitfähigkeit ^h $a = \lambda / (\rho * c)$ m^2 / s	Impedanz ^{h,i} $Z = - (1 + i) / (e * (2\omega)^{0,5})$ $(m^2 * K) / W$
		ρ kg / m ³	Quelle	λ W / (m * K)	Quelle	c J / (kg * K)	Quelle			
Mörtel und Putze	Kalkzementmörtel, Mörtel aus hydraulischem Kalk	1800 [30][31]	[31]	0,870 [30]	[30]	1050 [31]	[31]	1282	4,60E-07	-0,013507348
		1800 [30]	[30]	0,900 [31]	[31]	1050 [31]	[31]	1282	4,60E-07	-0,013507348
	1700 [31]	[31]	0,850 [31]	[31]	950 [31]	[31]	965	5,26E-07	-0,017950882	
	1400 [30]	[30]	0,700 [30][31]	[31]	1050 [31]	[31]	1715	6,67E-07	-0,010101525	
Beton	Zementmörtel	2000 [30][31]	[31]	1,400 [30]	[30]	850 [31]	[31]	597	3,43E-07	-0,028988552
	Gipsputz	1200 [30][31]	[31]	0,350 [30][31]	[31]	800 [31]	[31]	1189	6,12E-07	-0,014567914
	Mörtel	1900 [32]	[32]	0,930 [32]	[32]	1000 [30]	[30]	2245	8,75E-07	-0,007715167
	Normalbeton nach DIN 1045	2400 [30]	[30]	2,100 [30]	[30]	879 [32]	[32]	1573	6,62E-07	-0,011009051
Spaltklinker	Kiesbeton	2200 [32]	[32]	1,280 [32]	[32]	900 [31]	[31]	1375	5,83E-07	-0,012598816
	Spalt- und Klinkerplatten (Wand)	2000 [31]	[31]	1,050 [31]	[31]	1500 [30]	[30]			
	Polystyrol (PS)-Hartschaum 025	15 [30]	[30]	0,025 [30]	[30]	1500 [30]	[30]	26	1,33E-06	-0,666666667
	Polystyrol (PS)-Hartschaum 030	20 [30]	[30]	0,030 [30]	[30]	1500 [30]	[30]	32	1,17E-06	-0,534522484
Luft	Polystyrol (PS)-Hartschaum 035	30 [30]	[30]	0,035 [30]	[30]	1500 [30]	[30]	42	8,89E-07	-0,40824829
	Polystyrol (PS)-Hartschaum 040	40 [31]	[31]	0,040 [31]	[31]	1400 [31]	[31]	47	7,14E-07	-0,365962527
	extrudierte PS-Hartschaumplatten	1,149 [24]	[24]	0,026 [24]	[24]	1007 [24]	[24]	6	2,28E-05	-3,132112092

Tabelle 13.1 Materialparameter für ausgewählte Stoffe bzw. Materialien

^h Bei unterschiedlichen Werten der einzelnen Quellen wird der entsprechende Wert der DIN 4801 Teil 4 in der Berechnung verwendet.

ⁱ Für ω wird eine Frequenz von 1/600 Hz angenommen.

Anlage 2 Parametervariation für Pk3

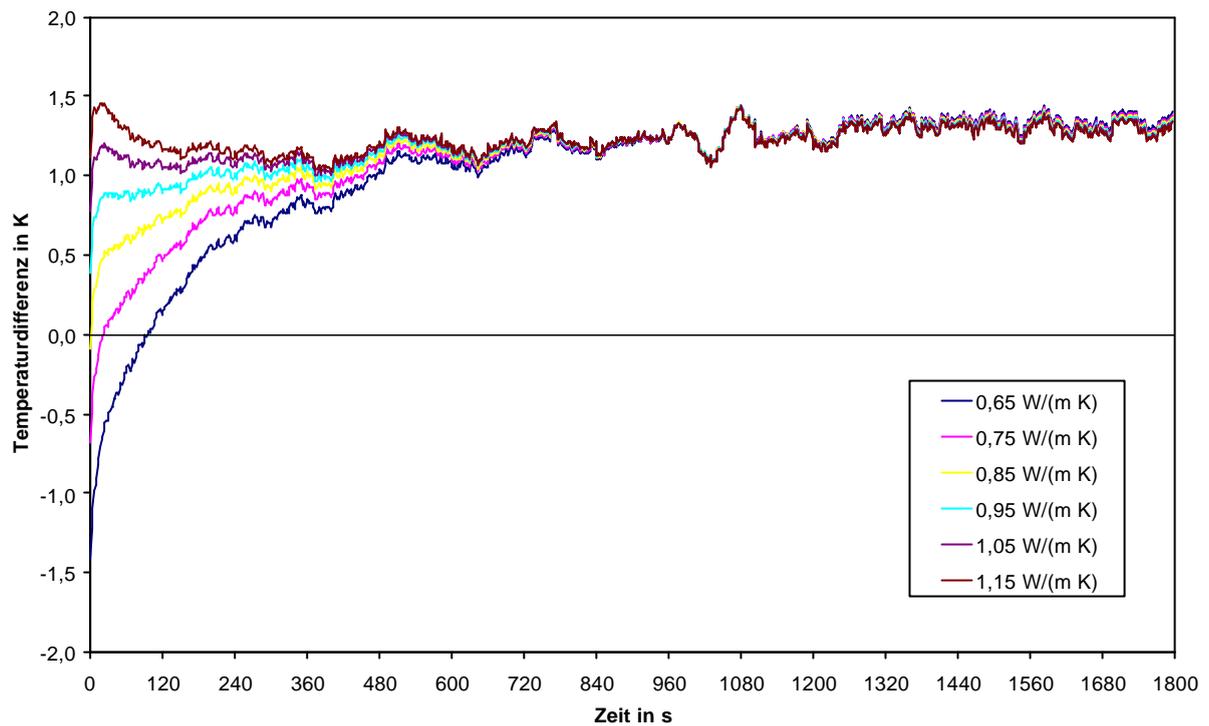


Abbildung 13.1 Differenzkurven der experimentellen Referenzkurve abzüglich der jeweiligen simulierten Referenzkurve für unterschiedliche Wärmeleitfähigkeiten der Spaltklinker

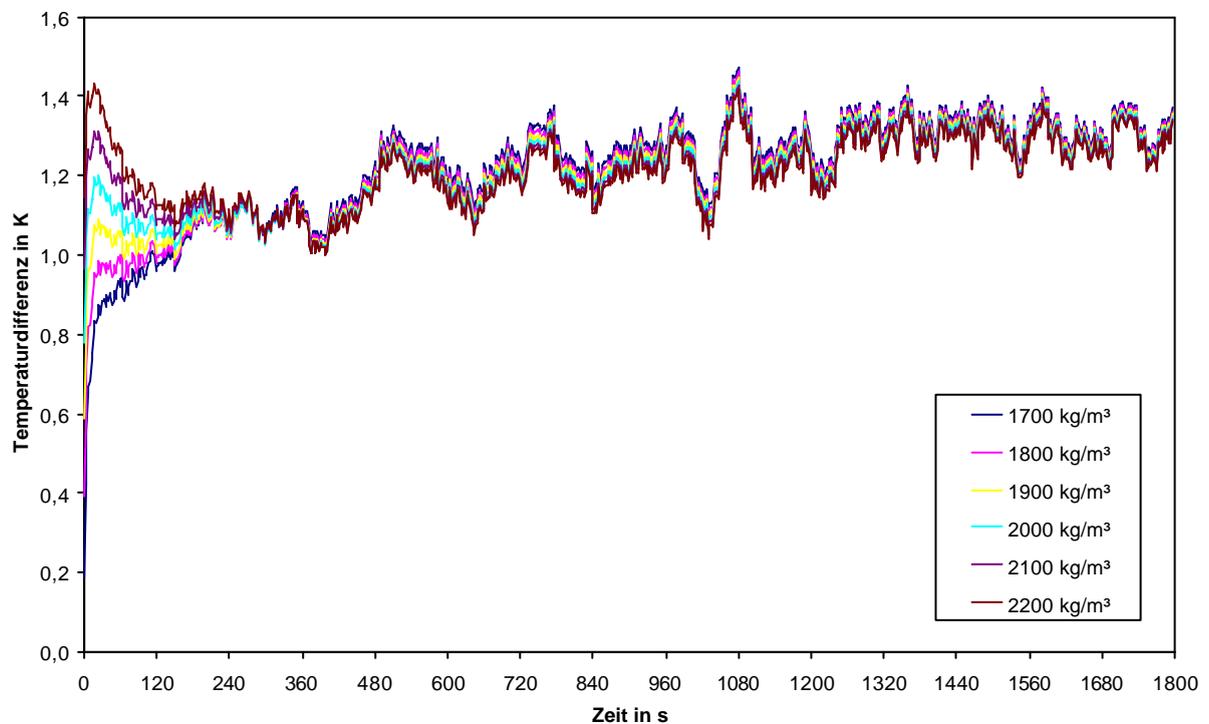


Abbildung 13.2 Differenzkurven der experimentellen Referenzkurve abzüglich der jeweiligen simulierten Referenzkurve für unterschiedliche Rohdichten der Spaltklinker

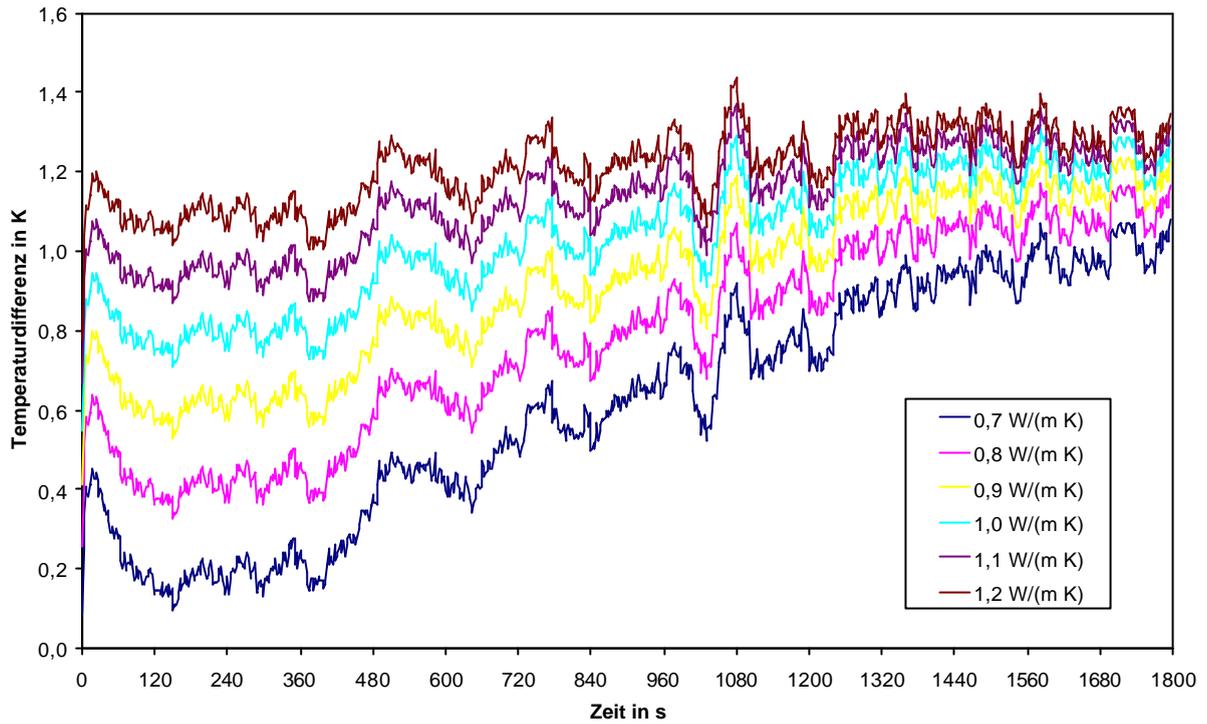


Abbildung 13.3 Differenzkurven der experimentellen Referenzkurve abzüglich der jeweiligen simulierten Referenzkurve für unterschiedliche Wärmeleitfähigkeiten des Zementmörtels

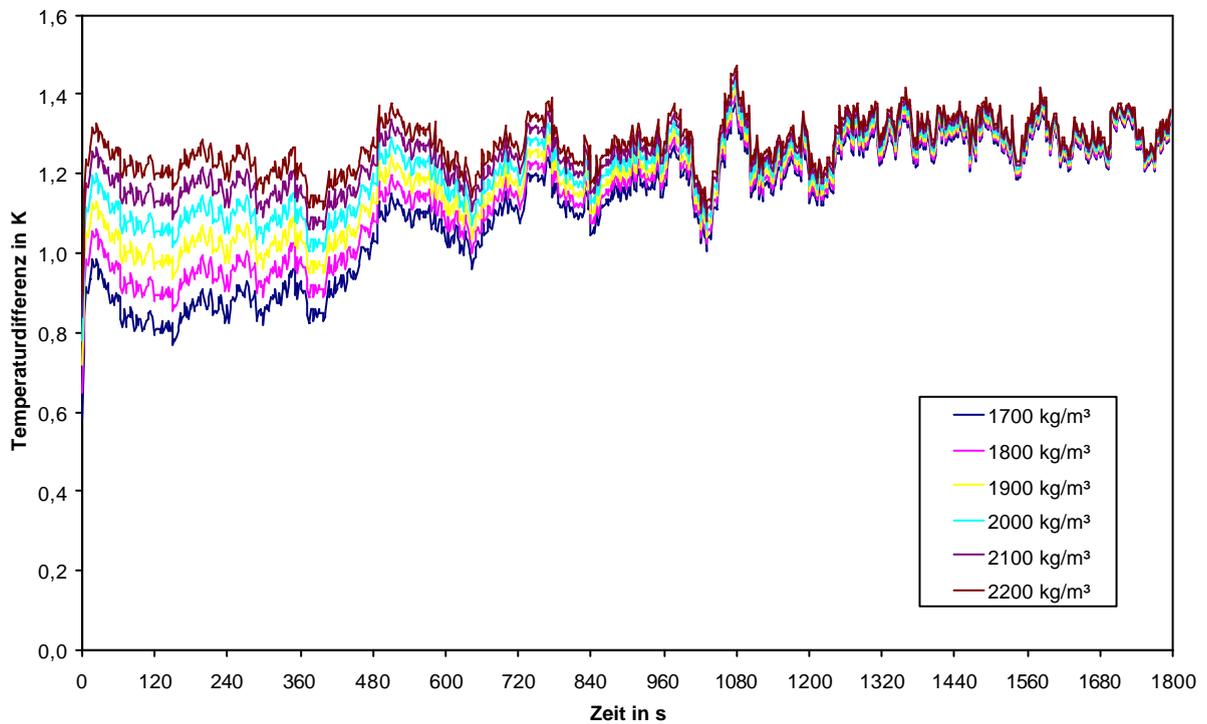


Abbildung 13.4 Differenzkurven der experimentellen Referenzkurve abzüglich der jeweiligen simulierten Referenzkurve für unterschiedliche Rohdichten des Zementmörtels

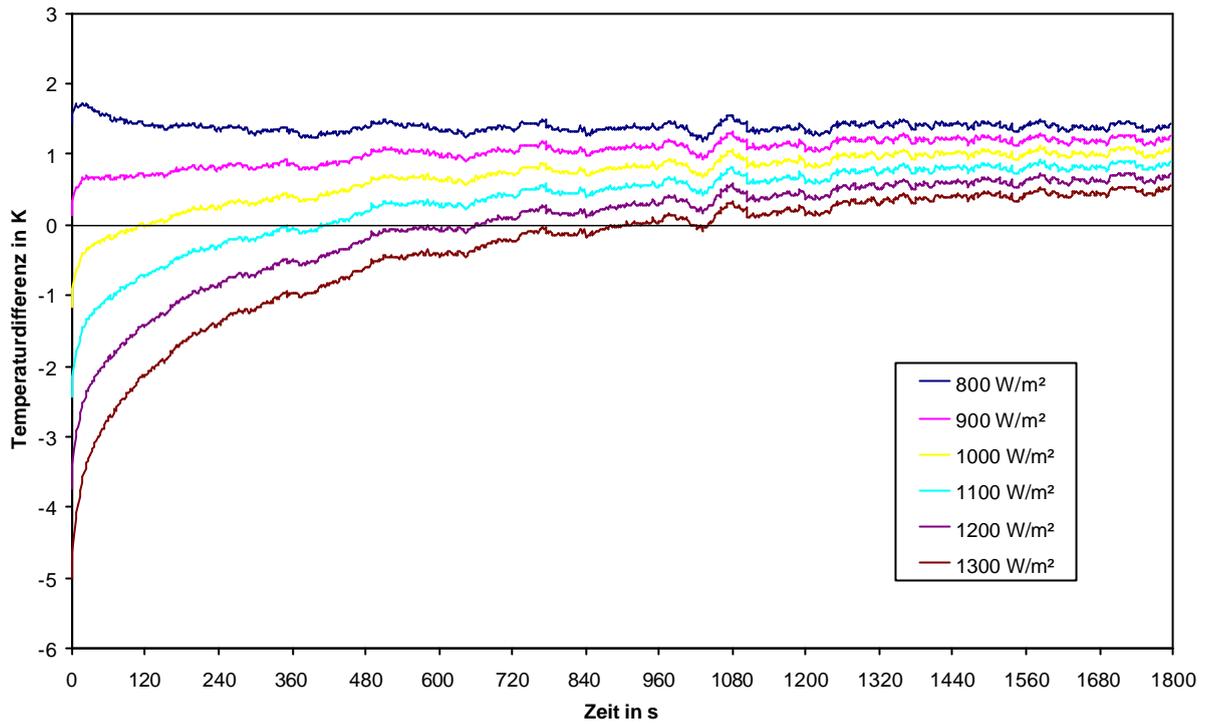


Abbildung 13.5 Differenzkurven der experimentellen Referenzkurve abzüglich der jeweiligen simulierten Referenzkurve für unterschiedliche Wärmestromdichten

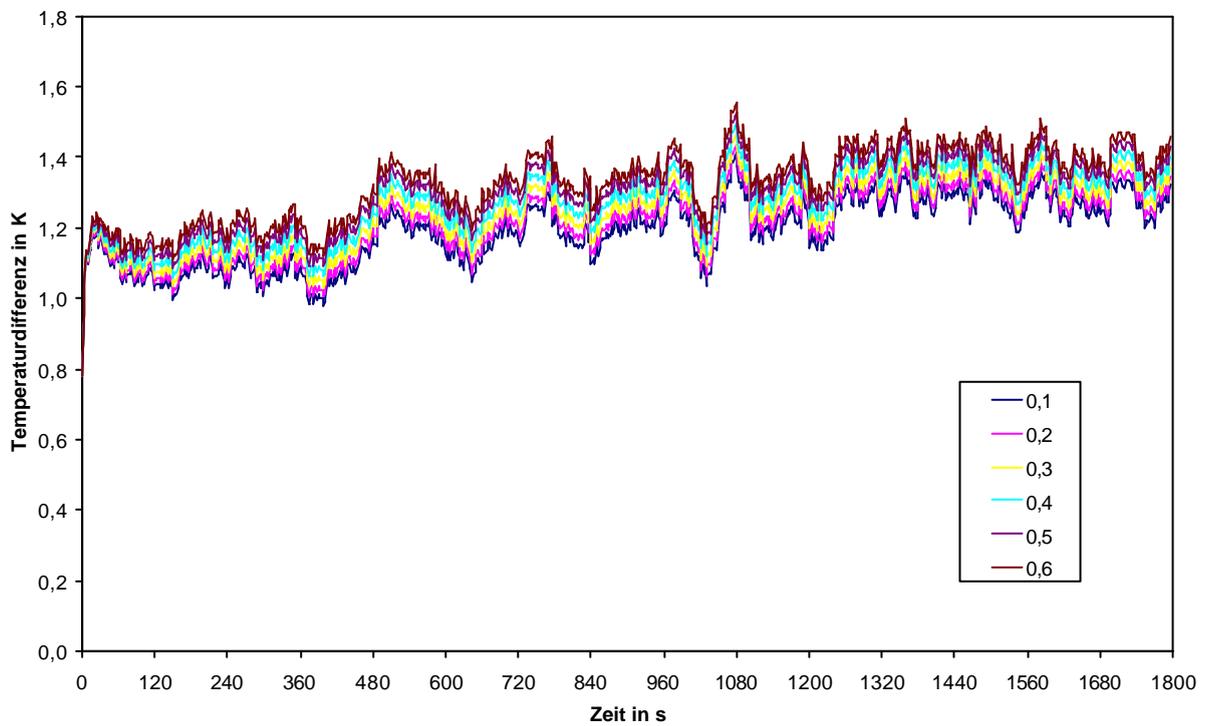


Abbildung 13.6 Differenzkurven der experimentellen Referenzkurve abzüglich der jeweiligen simulierten Referenzkurve für unterschiedliche Reynolds-Zahlen bei den konvektiven Wärmeverlusten