Rechteckimpuls-Thermografie im Frequenzbereich

Adaption der Puls-Phasen-Thermografie
für die qualitative und quantitative zerstörungsfreie Prüfung
oberflächennaher Strukturen im Bauwesen

von Diplom-Ingenieur
Ralf Arndt
aus Berlin

von der Fakultät VI - Planen Bauen Umwelt
der Technischen Universität Berlin
zur Erlangung des akademischen Grades

Doktor der Ingenieurwissenschaften

- Dr.-Ing. -

genehmigte Dissertation

Promotionsausschuss:

Vorsitzender: Prof. Dr. sc. techn. Mike Schlaich
Gutachter: Prof. Dr.-Ing. Bernd Hillemeier
Gutachterin: Dr. rer. nat. Christiane Maierhofer
Gutachter: Dr. rer. nat. Herbert Wiggenhauser

Tag der wissenschaftlichen Aussprache: 01. Juni 2007

Berlin 2007

D 83

Für meine Großeltern Irmgard und Willi Schlapper

Danksagung

Der Deutschen Forschungsgesellschaft und der Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung (BAM) danke ich für die finanziell - praktische und der Fakultät Planen Bauen Umwelt der TU Berlin für die die strukturell - idelle Unterstützung der Arbeit.

Mein persönlicher Dank gilt Prof. Bernd Hillemeier als Doktorvater und Betreuer der Arbeit und Dr. Christiane Maierhofer für die Betreuung in der BAM, für die Übernahme des Mitberichtes und beiden vor allem für die langjährige gute Zusammenarbeit sowie Dr. Herbert Wiggenhauser für seine Unterstützung und die Übernahme des Mitberichtes und Prof. Mike Schlaich für die Übernahme des Prüfungsvorsitzes und die freundliche Aufnahme am Fachgebiet Massivbau der TU Berlin.

Meinen Kollegen in der Fachgruppe "Zerstörungsfreie Schadensdiagnose und Umweltmessverfahren" der BAM, insbesondere Mathias Röllig, Sean Smith und - besonders in der Anfangsphase - Gerd Wedler danke ich für die hervorragende Zusammenarbeit, Thomas Kind und Christiane Trela für fachliche Diskussionen und Ihnen und Martin Friese, Kornelia Mittag, Doreen Streicher, Astrid Wendrich, Gerd Wilsch und Jens Wöstmann für ihre moralisch-praktische Unterstützung. Kerstin Borchardt, Diana Otto und Petra Zander danke ich für die praktische Hilfe in allen administrativen Lebenslagen des öffentlichen Dienstes und Marco Lange, Dieter Schaurich und Markus Stoppel für ihren nimmermüden technischen Support.

In der TU Berlin gilt mein besonderer Dank den Kollegen vom Fachgebiet "Baustoffe und Baustoffprüfung" für die langjährige hervorragende Zusammenarbeit sowie dem Fachgebiet "Massivbau" für die langjährige Unterstützung und freundliche Aufnahme - mein besonderer Dank gilt hier Markus Johow mit dem das Abenteuer Promotion seinen Anfang nahm sowie Achim Bleicher, Alexander Gaulke, Carsten Rieck und Wilfried Walkowiak.

Ganz besonders danken möchte ich auch Andrei Walther unter Anderem für die langjährige gute Zusammenarbeit und die inhaltliche Durchsicht der Arbeit und Christian Köpp unter Anderem für die sprachliche Durchsicht der Arbeit.

Weiterhin danken möchte ich Arndt Goldack und Karsten Schubert für ihre Hilfe und moralische Unterstützung in schwieriger Situation sowie Roman Palluthe für seine rege Anteilnahme. Ralf Hauffe und Boris Proppe danke ich für wertvolle Hinweise und anregende Diskussionen. Meiner Familie danke ich für alles, was sie mir ermöglicht hat.

Mein inniger Dank gebührt Annette Bögle, die mich immer wieder ermutigte meinen Weg zu verfolgen und meinem eigenen Urteil zu vertrauen für Anregungen und wertvolle Tipps.

„Je schwieriger die Aufgabe ist,
desto größer ist die Chance,
etwas bis dahin noch nicht Dagewesenes
zu erfinden.“,

Jörg Schlaich [BSF04], S. 12

Kurzreferat

In der folgenden als Promotionsschrift verfassten Arbeit wird ein methodischer Ansatz zur qualitativen und quantitativen zerstörungsfreien Prüfung von oberflächennahen Strukturen im Bauwesen mittels aktiver Thermografie entwickelt und erprobt.
Er adaptiert das aus der Werkstoffprüfung bekannte Verfahren der Puls-Phasen-Thermografie (PPT) für die besonderen Anforderungen im Bauwesen.
Das mit „Rechteckimpuls-Thermografie im Frequenzbereich“ bezeichnete Konzept gründet auf dem vom Fachgebiet „Baustoffe und Baustoffprüfung“ der Technischen Universität Berlin (TUB) und der Fachgruppe VIII.2 „Zerstörungsfreie Schadensdiagnose und Umweltmessverfahren“ der Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung (BAM) durchgeführten Forschungsvorhaben: „Struktur- und Feuchteuntersuchungen von Bauteil- und Bauwerksoberflächen mit der Impuls-Thermografie, Teil 1 und Teil 2“, gefördert durch die Deutsche Forschungsgemeinschaft (DFG).
Es werden zunächst die Grundlagen der elektromagnetischen Strahlung, der Wärmeübertragung, der Signalverarbeitung sowie der aktiven Thermografie dargestellt. Es folgt ein Kapitel über das Thermografie-Konzept von TUB und BAM.
Nach einer Zusammenfassung von bereits unter Mitwirkung des Verfassers veröffentlichten qualitativen Ergebnissen der Auswertung im Zeit- und Frequenzbereich wird ein neuer Ansatz für die Defekttiefenbestimmung im Frequenzraum mittels der *charakteristischen Frequenz* des maximalen negativen Phasen- und Amplitudenkontrastes zwischen Fehlstelle und ungestörtem Bereich entwickelt und anhand von systematischen Untersuchungen an Probekörpern der BAM überprüft. Die vom Verfasser in der Arbeit mit Rechteckimpuls-Spektral-Thermografie (RST) bezeichnete Methode, die auch als eine Rechteckimpuls-Thermografie (RIT) im Frequenzbereich oder eine durch Amplitudenauswertung ergänzte PPT für Rechteckimpulse verstanden werden kann, soll die aus der Literatur bekannten Ansätze ergänzen und bietet eine Alternative für die Tiefenbestimmung von Defekten bei Messungen mit langen Erwärmungs- und Beobachtungszeiten, wie sie im Bauwesen häufig vorkommen.
Die Arbeit wird vervollständigt durch analytische Untersuchungen über den angeregten Wärmefluss sowie ergänzende Simulationsrechnungen und die Beschreibung werkstoffübergreifender Praxisanwendungen zur Qualitätssicherung und zur Schadensdiagnose sowie zur Strukturuntersuchung von Kulturgütern im Bauwesen. Sie schließt ab mit möglichen Perspektiven der aktiven Thermografie im Bauwesen sowie mit einer Zusammenfassung.

Abstract

In the following work, written as doctoral thesis, a new methodical approach for qualitative and quantitative non-destructive testing of near-surface structures in civil engineering (CE) with active thermography is developed and tested.
It adopts the non-destructive testing (NDT) method of pulsed phase thermography (PPT) for the special requirements of CE.
The concept called „square pulse thermography (SPT) in frequency domain“ by the author, is based on the project “Structural and moisture investigations of surfaces of structural elements and buildings with pulse thermography, part 1 and part 2“ funded by the „Deutsche Forschungsgemeinschaft“ (DFG) and carried out by the „Institute of Building Materials and Building Material Testing“ of the Technical University of Berlin (TUB) and the Division VIII.2 „Non-Destructive Damage Assessment and Environmental Measurement Methods“ of the Federal Institute for Materials Research and Testing (BAM). For this purpose at first the basics of electromagnetic radiation, heat flow, signal processing and active thermography are described. It follows a presentation of the concept of thermography developed at TUB and BAM.
After a summary of the already published results of postprocessing in time and frequency domain the new quantitative approach of the characteristic frequency of the negative maximum phase and amplitude contrast (defect-reference) is introduced and tested by means of systematic investigations on specimens of BAM. The method might be understood as a square pulse thermography (SPT) in frequency domain or an amplitude-expanded PPT with square pulse heating. It is aimed to complement the established approaches for the defects depth calculation by using measurements with long heating and observation times, quite usual in NDT-CE.
The thesis is completed by an analytical analysis of the activated heat flow as well as numerical simulations and materials spanning applications for the quality control and for the assessment of cultural heritage buildings. The work finishes with possible perspectives of active thermography and a summary.

Inhaltsverzeichnis

Danksagung iii

Kurzreferat v

Abstract vii

1. Einführung 1
- 1.1. Ausgangsbasis . . . 1
- 1.2. Quantitativer Lösungsansatz . . . 3
- 1.3. Konzept . . . 6

2. Grundlagen der aktiven Thermografie 7
- 2.1. Grundlagen der elektromagnetischen Strahlung . . . 8
  - 2.1.1. Schwarzer Strahler und Emissivität . . . 8
  - 2.1.2. Strahlungsgesetze . . . 9
  - 2.1.3. Atmosphärische Absorption und Streuung . . . 10
- 2.2. Wärmetransport in Festkörpern . . . 12
  - 2.2.1. Wärmeleitung . . . 12
  - 2.2.2. Wärmeübergänge . . . 14
  - 2.2.3. Bilanzgleichung für den Wärmetransport in Festkörpern . . . 19
- 2.3. Mathematische Grundlagen der Signalverarbeitung . . . 21
  - 2.3.1. Systeme der Informationsübertragung . . . 21
  - 2.3.2. Zeitkontinuierliche und zeitdiskrete Signale . . . 22
  - 2.3.3. Zeitdiskrete Signale im Frequenzraum . . . 27
  - 2.3.4. Grundbegriffe der Signalverarbeitung . . . 29

3. Stand der Technik 33
- 3.1. Thermografie-Konzepte . . . 34
  - 3.1.1. Impuls-Thermografie . . . 36
  - 3.1.2. Lockin-Thermografie . . . 39
  - 3.1.3. Puls-Phasen-Thermografie . . . 41
  - 3.1.4. Auswahl eines geeigneten aktiven Thermografie-Konzeptes für ZfPBau 44
- 3.2. Numerische Methoden zum Lösen der Bilanzgleichung für den Wärmefluss . . . 45
  - 3.2.1. Methode der Finiten Differenzen für Abkühlungsvorgänge . . . 46
  - 3.2.2. Methode der Finiten Elemente . . . 48
  - 3.2.3. Methode der Finiten Volumen . . . 49

4. Konzept der aktiven Thermografie in der ZfPBau **51**
4.1. Vorgehensweise . . . 52
4.2. Experimenteller Aufbau . . . 53
4.2.1. Verwendetes Kamerasystem (BAM) . . . 54
4.2.2. Verwendete Wärmequellen . . . 55
4.3. Probekörper . . . 56
4.4. Datenanalyse im Zeit- und Frequenzbereich . . . 59
4.4.1. Quantitative Methoden . . . 59
4.4.2. Größe der Fehlstelle . . . 60
4.5. Randbedingungen und Messparameter . . . 60
4.5.1. Messparameter . . . 61
4.5.2. Signal-zu-Rausch-Verhältnis . . . 62
4.6. Numerische Simulationen . . . 63

5. Qualitative Untersuchungen und Machbarkeitsstudien **65**
5.1. Experimentelle Versuchsdurchführung . . . 65
5.2. Ablösungen und Minderdicken . . . 66
5.2.1. Spaltklinker auf Beton [MAR+03], [WWB+03], [Bri05] . . . 66
5.2.2. CFK auf Beton [AHM+04] . . . 68
5.2.3. Putz auf Beton [AMR+04a], [AMR+04b] . . . 69
5.2.4. Putz auf Mauerwerk [AMR+04a], [AMR+04b] . . . 71
5.3. Hohlstellen und Verdichtungsmängel [MAR+03], [Bri05], [AHM+04] u. a. . . . 72
5.4. Untersuchung des Einflusses unterschiedlicher Oberflächenverunreinigungen [RAM05] 74
5.5. Einfluss von Materialparametern [Bri05], [MAR+05b] oder [MAR05a] . . . 76
5.5.1. Einfluss des Reifegrades . . . 77
5.5.2. Einfluss von Dichte, Porosität und Stahlfaseranteil . . . 77
5.5.3. Einfluss des Bewehrungsgrades . . . 78
5.6. Untersuchungen der TUB [RH03], [WAM+05a] oder [HRWS05] . . . 79
5.7. Resümee . . . 80

6. Ein neuer Ansatz für die quantitative Rechteckimpuls-Spektral-Thermografie **83**
6.1. Experimenteller Aufbau . . . 84
6.2. Die charakteristische Frequenz des maximalen Phasenkontrastes - ein einführender Rückblick . . . 85
6.2.1. Nachtrag: Untersuchung der Porenbetondefekte . . . 89
6.3. Möglichkeiten und Grenzen einer Amplitudenauswertung bei der inversen Lösung 91
6.3.1. Ergänzende Untersuchungen mit 45 und 60 min Erwärmung . . . 93
6.4. Resümee . . . 95

7. Untersuchung des angeregten Wärmeflusses **97**
7.1. Lösungen der Bilanzgleichung für den Wärmetransport in einem halbunendlichen Körper . . . 98
7.1.1. Anregung mit einem idealen Wärmepuls . . . 98

7.1.2. Konstante Erwärmung . . . 99
7.1.3. Rechteckimpuls . . . 100
7.1.4. Wärmewellen . . . 101
7.2. Lösungen der Bilanzgleichung für den Wärmetransport in einer idealen Platte . 102
7.2.1. Wärmepuls . . . 102
7.2.2. Rechteckimpuls . . . 103
7.3. Einfluss der Periodizität der Erwärmung auf den angeregeten Wärmefluss . . . 103
7.4. Dirac- und Rechteckimpuls im Vergleich . . . 104
7.4.1. Blitzanregung . . . 106
7.4.2. Einfluss der Energiedichte . . . 107
7.5. Realer Temperaturverlauf der RIT . . . 109
7.6. Resümee . . . 111

8. Parameterstudien einer quantitativen RST 113
8.1. Einflussgrößen der Datenerfassung und -verarbeitung . . . 113
8.1.1. Abtastintervall und Taktrate . . . 114
8.1.2. Die Taktrate und das Verhältnis von Erwärmungs- zu Beobachtungszeit 115
8.2. Einfluss der Fehlstelle . . . 117
8.2.1. Fehlstellenmaterial . . . 117
8.2.2. Größe der Fehlstelle . . . 118
8.2.3. Lage des untersuchten Punktes . . . 118
8.2.4. Schräglage der Fehlstellen . . . 119
8.2.5. Weitere Einflussgrößen . . . 119
8.3. Einfluss von Material der untersuchten Bauteile . . . 119
8.3.1. Ablösungen und Minderdicken . . . 119
8.3.2. Einfluss des Bewehrungsgrades . . . 121
8.3.3. Einfluss durch Zugabe von Blähton . . . 123
8.3.4. Beton mit Luftporenbildner . . . 125
8.3.5. Beton mit Stahlfasern . . . 125
8.4. Resümee . . . 126

9. RIT und RST in der Praxis 129
9.1. Messeinsätze und Machbarkeitsstudien . . . 129
9.1.1. Ablösungen unter Natursteinfußboden . . . 129
9.1.2. Stahl und Mauerwerk hinter Putz . . . 130
9.1.3. Ablösungen von Epoxidharz auf Beton . . . 131
9.1.4. Untersuchung von Asphaltbelägen unter Ausnutzung der Sonne als Energiequelle . . . 134
9.2. Messeinsätze zur Erhaltung von historischen Kulturgütern . . . 135
9.2.1. Altes Museum in Berlin - Ablösungen an Sandsteinsäulen . . . 136
9.2.2. Wartburg - Ortung von Mauerwerk hinter Putz . . . 140
9.2.3. Neues Palais in Potsdam - Strukturanalyse an Marketerieboden . . . 143
9.3. Resümee . . . 147

10. Perspektiven **149**
10.1. Verfahrenskombination, Datenfusion und Fotogrammetrie 149
10.2. Automatisierung für aktive Thermografie-Untersuchungen vor Ort 150
10.3. Qualitätssicherung in der Fertigung 151
10.4. Strukturmechanik und Lebensdauerbemessung von Bauwerken 152

11. Zusammenfassung **155**

Nomenklatur **163**

Literaturverzeichnis **165**

A. Machbarkeitsstudien und systematische Laboruntersuchungen **I**

B. Quantitativer Ansatz der RAT **III**

C. Parameterstudien **VII**

D. Neues Palais **XI**

Abbildungsverzeichnis

2.1. Emissivität unterschiedlicher Baustoffoberflächen mit für alle dargestellten Wellenlängen grauem und schwarzem Strahler (L. Walther und D. Gerber (1983) nach [Inf]) . . . 9
2.2. Planck'sches Strahlungs- und Wien'sches Verschiebungsgesetz . . . 10
2.3. Spektraler Transmissionsgrad von Luft in Abhängigkeit von der Wellenlänge λ (10 m, 25 °C, 1013 mbar, 85% r.F., Walther und Gerber (1983) nach [Inf]) . . 11
2.4. Wärmetransportmechanismen . . . 12
2.5. Wärmeströme j_{qi} im Volumen $dV = dx \cdot dy \cdot dz$ nach [HMS92] . . . 13
2.6. Wärmeübertragungsarten . . . 14
2.7. Das System der Informationsübertragung nach Read [Rea04], angewendet auf Thermografiemessungen . . . 21
2.8. Zeitkontinuierliches (oben) und zeitdiskretes Signal (unten) . . . 22
2.9. Sinussignal g(t) als Kurvenverlauf (links) und als Rotationszeiger(rechts) . . . 23
2.10. Grafische Darstellung des überlagerten Signals g(t) . . . 23
2.11. Periodische Signale im Frequenzraum . . . 24
2.12. Periodisches Signal . . . 24
2.13. Harmonische der Fourier-Reihe am Rotationszeiger . . . 25
2.14. Rechteckimpuls g(t) und seine Fourier-Transformierte G(f) . . . 26
2.15. Zeitbegrenzte Signale im Zeitbereich (oben) und im Frequenzbereich nach FT (unten). Aus Symmetriegründen wurde im Frequenzbereich nur das halbe Amplituden- und Phasenspektrum dargestellt . . . 27

3.1. Einordnung der ZfP-Verfahren nach [Wu96] . . . 33
3.2. Anwendungsbeispiele passiver Thermografie . . . 36
3.3. Prinzip der IT . . . 36
3.4. Anregungsarten der IT, Rieck aus [AHM$^+$04] . . . 37
3.5. Normierte Transienten von Bereichen oberhalb einer Fehlstelle (rot) und eines ungestörten Referenzbereiches (schwarz) sowie des normierten Temperaturkontrastes (blau) als Differenz dieser Transienten zur Ermittlung des maximalen Temperaturkontrastes [RAM05] . . . 38
3.6. Prinzip der Lockin-Thermografie nach [Wu96] . . . 40
3.7. Prinzip der PPT nach [VM00] . . . 41
3.8. Exemplarische Phasenkontrastkurve mit f_b, f_b' und f_{ch} . . . 43

4.1. Versuchsaufbau für Labormessungen (links) und für CFK-Untersuchungen mit einem Scannersystem (rechts) (BAM) [HMR$^+$06] . . . 51

4.2. Transiente mit Arbeitsschritten der aktiven Thermografie nach [ICM04a] . . . 52
4.3. Foto (links) und Nullbild (rechts) eines Probekörpers 53
4.4. Prinzipskizze der automatisierten IR-Strahler-Erwärmungseinheit [BMRW02]. . 55
4.5. Probekörper PK I_1 vom Typ I (links) und PK II_1 vom Typ II (rechts) aus Beton mit Fehlstellen aus Polystyrol und Porenbeton in verschiedenen Tiefenlagen [BMRW02] beziehungsweise [MAR+05b], Zeichnung: Borchard, BAM 56
4.6. Breite der Fehlstelle, RIT-Auswertung für F1 (und F2) von PK I_1 für $\Delta T_{max,F1} =$ 3225 (bzw. 2445) s nach 15 min Erwärmung 60
4.7. Temperaturdifferenzkurven der Fehlstellen F1 bis F4 einer Messung an PK II_1 mit 30 min Erwärmung und 120 min Aufnahmezeit mit Bestimmung des Signal-zu-Rausch-Verhältnisses für die Tiefenbestimmung von Fehlstelle F2 (vergleiche Abbildung 4.5, rechts) 62
4.8. Linienauswertung (schwarz) der IT mit dreifachem Gauß-Fit (rot) und dazugehörigem Rauschen (grün) mit Bestimmung des Signal-zu-Rausch-Verhältnises für die Größenbestimmung der Fehlstellen F2 und F4 von PK II_1 für den Zeitpunkt $t_{2,max} = 1075$ s 63
4.9. Simulierte Differenzenkurven für PK II_1 mit 30 min Erwärmung mit den gleichen Randbedingungen wie in Abbildung 4.3 und 4.7 64
4.10. Simuliertes Nullbild für PK II_1 mit den gleichen Randbedingungen wie in Abbildung 4.3 und 4.7 64

5.1. Probekörper PK I_2 mit Spaltklinkern im Mörtelbett; Fehlstellen Nr. 1 bis 9: fehlender Mörtel; Fehlstellen Nr. 10 bis 12: Papierstreifen zwischen Mörtel und Beton, Zeichnung: Borchard, BAM [MAR+03] 66
5.2. Thermogramme nach 0/17,2/25,8 min Abkühlung des Betonprobekörpers mit Spaltklinkern nach einer Erwärmungszeit von 3 min (oben, von links nach rechts) und Phasenbilder bei unterschiedlichen Frequenzen (unten) [MAR+03]. 67
5.3. Unbewehrter Betonprobekörper PK I_3 mit CFK-Verstärkung und flächigen Ablösungen unterschiedlicher Ausdehnung, Zeichnung: Borchard, BAM [AHM+04] 68
5.4. Thermogramm nach 0 s Abkühlung des Probekörpers nach 1 min Erwärmungszeit (links oben), Amplitudenbild bei 0 Hz (rechts oben), Phasenbilder bei unterschiedlichen Frequenzen (unten); Breite und Höhe eines jeden Bildes entsprechen einem Ausschnitt von 132,5 x 126,5 cm^2 [AHM+04] 69
5.5. Betonprobekörper PK I_4 ohne Bewehrung (150 x 150 x 50 cm^3); Gipsputz mit Ablösungen unterschiedlicher Ausdehnung simuliert durch gelochte und ungelochte Papierstreifen (alle Angaben in cm), Zeichnung: Borchard, BAM. . 70
5.6. Thermogramme nach 10, 100 und 500 s Abkühlung (oben, von links nach rechts) und zugehörige Phasenbilder bei ausgewählten Frequenzen (unten) [AMR+04a] 71
5.7. Großer Mauerwerksprobekörper der BAM [WKM04] 71
5.8. Thermogramme nach 0, 50 und 500 s Abkühlung (von links nach rechts, oben) und zugehörige Phasenbilder bei ausgewählten Frequenzen (unten) 72
5.9. Thermogramme nach 0 und 6000 s Abkühlung (oben), Amplituden- (Mitte)und Phasenbilder (unten) zu unterschiedlichen Frequenzen von PK I_1 (links oben) 74

5.10. Skizze von Probekörper PK II_1b mit Fehlstellen aus Polystyrol und Porenbeton in verschiedenen Tiefenlagen mit Oberflächenmodifikation, Zeichnung: Borchard (links) und Foto: (rechts) [RAM05] 75
5.11. Thermogramm mit maximalem Temperaturkontrast (links) für die Fehlstelle F2 nach 900 s Abkühlung (Temperaturbereich von 27 bis 39 °C) und Phasenbild mit maximalem Phasenkontrast für die Fehlstelle F2 bei einer Frequenz von 2,463 x 10^{-4} Hz (rechts) von PK II_1b [RAM05] 75
5.12. Skizze von Probekörper PK II_1 bis PK II_4 mit unterschiedlichen Materialeigenschaften und Fehlstellen aus Polystyrol und Porenbeton in verschiedenen Tiefenlagen [BMRW02], [MAR+05b] 76
5.13. Maximale Temperaturdifferenz ΔT_{max} und Zeitpunkt der maximalen Temperaturdifferenz t_{max} der Fehlstelle F2 von PK II_1 (Abbildung 4.5, rechts) als Funktion der Würfeldruckfestigkeit während der Hydratation [MAR05a] 77
5.14. Temperaturkontrastkurve für Fehlstellen mit 6 cm Betondeckung bei Normalbeton (PK II_1, schwarz) und Beton mit porösem Zuschlag (PK II_2, rot) ΔT_{max} nimmt um ca. 1 K zu und t_{max} um 500 s [MAR05a] 78
5.15. Probekörper PK I_5 mit schlaffer Bewehrung und Polystyrolfehlstellen mit 6 cm Betondeckung, Zeichnung: Borchard, BAM (links), Foto direkt vor dem Betonieren (rechts) [MAR05a] 78
5.16. Temperaturscan über Fehlstellen mit 6 cm Betondeckung bei Normalbeton (PK I_5, schwarz) mit unterschiedlichem Bewehrungsgrad (linke Seite) und ohne Bewehrung (rechte Seite, Referenz) [MAR05a] 79
5.17. Versuchsaufbau: Die Elektroden des Transformators sind mit Kupferdraht an die Spanndrähte angeschlossen, Walther, TUB [AHM+04]. 80
5.18. Temperaturverteilung 23 min nach Abschalten der Wärmequelle (weiß: Temperatur > 16,0 °C, schwarz: Temperatur < 14,5 °C). Die sechs Verpressfehler sind kälter als die verpressten Bereiche der zwei horizontal verlaufenden Spannglieder, Walther, TUB [AHM+04]. 80

6.1. Phasenkontrastkurven für die Polystyrolfehlstellen F1, F2, F5 bis F8 von PK I_1 und F1, F2 von PK II_1 mit markierten f_{ch} für 30 min Erwärmung mit der automatisierten Erwärmungseinheit aus Tabelle 4.1. Lediglich bei den tiefen Fehlstellen PK I_1 F1, F2 und PK II_1 F1 sind auch f_b und f_b' eindeutig bestimmbar und für PK I_2 F2 wenigstens f_b'. 85
6.2. Phasenkontrastkurven für die Polystyrolfehlstellen F1, F2, F5 bis F8 von PK I_1 und F1, F2 von PK II_1 für 30, 15, 10 und 5 min Erwärmung mit der automatisierten Erwärmungseinheit aus Tabelle 4.1. Es wird eine starke Ähnlichkeit besonders bei f_{ch} deutlich, lediglich die Größe des Kontrastes $\Delta\phi$ variiert, besonders bei den 5 min Erwärmung (siehe Tabelle 6.3 und [AMR06]). 86
6.3. Korrelation z zu $\sqrt{\alpha/f_{ch}}$ für die Polystyrolfehlstellen in PK I_1 und PK II_2 für variable Erwärmungszeiten mit dem automatisierten IR-Stahler und eine Aufnahmezeit von 120 min [AMR06] 87

6.4. Phasenkontrastkurven für die Fehlstellen von PK II_1 nach Erwärmung mit Rechteckimpulsen von 1800, 900, 600 und 300 s und einer Leistung von 1800 W/m^2. Oben sind die Polystyrol- und unten die Porenbetonfehlstellen dargestellt, links die Fehlstellen in 6, rechts die in 10 cm Tiefe. Die 10 cm tiefen Fehlstellen konnten bei 10 und 5 min Erwärmung nicht detektiert werden. 90
6.5. Amlituden- und Phasenkontrastkurven für 30 min (oben) und 15 min (unten) Erwärmung von PK II_1 für 6 (links) und 10 cm (rechts) Betondeckung der Fehlstellen 91
6.6. Amplitudenkontrastkurven für die Polystyrolfehlstellen F1, F2, F5 bis F8 von PK I_1 für 15 min Erwärmung mit der automatisierten Erwärmungseinheit aus Tabelle 4.1 92
6.7. Phasen- (links) und Amplitudenkontrastkurven (rechts) für eine 45- (oben) und eine 60-minütige (unten) Erwärmung von PK I_1 mit der automatisierten IR-Erwärmungseinheit 94

7.1. Erwärmungsarten nach [VB01] 97
7.2. Temperaturentwicklung für $\alpha_B = 8,75 \times 10^{-7} \frac{m^2}{s}$ für $Z = 0 - 10$ cm nach Erwärmung der Oberfläche mit einem Dirac-Impuls nach Gleichung 7.1 und 7.2 98
7.3. Temperaturentwicklung für $\alpha_B = 8,75 \times 10^{-7} \frac{m^2}{s}$ [din02] in unterschiedlicher Tiefe z infolge konstanter Erwärmung der Oberfläche mit 1250 W/m^2 nach Gleichung 7.4 und 7.5 99
7.4. Temperaturentwicklung für $\alpha_B = 8,75 \times 10^{-7} \frac{m^2}{s}$ für $z = 0$ infolge von konstanter Erwärmung (Gleichung 7.5) und Rechteckimpulsen unterschiedlicher Länge (1800, 900, 600 und 300 s) mit $Q = 1800$ W/m^2 (Gleichung 7.7) 100
7.5. Temperaturentwicklung für $\alpha_B = 8,75 \times 10^{-7} \frac{m^2}{s}$ für $z = 0 - 10$ cm nach Erwärmung mit einem Rechteckimpuls von 30 min mit 1250 W/m^2 nach Gleichung 7.8 und 7.7 101
7.6. Temperaturentwicklung für $\alpha_B = 8,75 \times 10^{-7} \frac{m^2}{s}$ für eine adiabatische Platte mit $d = 0 - 10$ cm nach Erwärmung mit einem Dirac-Impuls nach Gleichung 7.12 102
7.7. Vergleich der Temperaturentwicklung infolge Rechteckimpuls für 1800 s mit 1250 W/m^2 (links) und Dirac-Puls gleicher Energie rechts 104
7.8. Vergleich der Temperaturentwicklung infolge Rechteckimpuls für 900 s mit 1250 W/m^2 (links) und Dirac-Puls gleicher Energie (rechts) 105
7.9. Vergleich der Temperaturentwicklung infolge Rechteckimpuls mit 600 s mit 1250 W/m^2 (links) und Dirac-Puls gleicher Energie (rechts) 105
7.10. Vergleich der Temperaturentwicklung infolge Rechteckimpuls mit 300 s mit 1250 W/m^2 (links) und Dirac-Puls gleicher Energie (rechts) 105
7.11. Errechnete Abklingkurven für $z = 0 - 10$ mm nach Erwärmung einer adiabatischen halbunendlichen Normalbetonplatte mit einer im Handel üblichen Blitzlampe: Dirac-Puls, 12000 J [NZ03] 107
7.12. Rechnerische Differenzkurven von Abklingkurven unterschiedlicher Leistung ($T_{1800W/m^2} - T_{1250W/m^2}$) nach Anregung mit Rechteckimpulsen von 1800, 900, 600 und 300 s für PK vom Typ I und II 108

7.13. Differenzen zwischen Rechteckimpulsen der Länge 1800, 900, 600 und 300 s und Dirac-Puls gleicher Energie für $z = 0$ cm mit 1250 W/m^2 (links) und 1800 W/m^2 (rechts) . . . 108
7.14. Differenzen zwischen Rechteckimpulsen der Länge 1800, 900, 600 und 300 s und Dirac-Puls gleicher Energie mit 1250 W/m^2 und 1800 W/m^2 für $z = 5$ cm (links) und $z = 10$ cm (rechts) . . . 109
7.15. Abklingkurven und Differenzkurven für PK II_1 und 30 min Erwärmung mit der automatisierten IR-Erwärmungseinheit . . . 110
7.16. Abklingkurven und Temperaturkontrastkurven für PK II_1 . . . 111

8.1. Phasen-Kontrast-Kurve der FFT (einfaches Zero-Padding) gemittelt über 10 Werte (schwarz) und über 40 Werte (m40 - rot). Es sind auch noch die DFT für m40 (grün) und m40 mit nächsthöherem 2^n abgebildet (blau). . . . 114
8.2. Skizze von PK I_2 für Ablösungen zwischen Spaltklinker und Dickbettmörtel und Dickbettmörtel und Beton, Zeichnung: Borchard, BAM . . . 115
8.3. Phasen- und Amplitudenkontrastkurven von PK I_2 für Ablösungen zwischen Spaltklinker und Dickbettmörtel und Dickbettmörtel und Beton für 6 min Erwärmung und 30 min Aufnahmezeit . . . 116
8.4. Links: FE-Netz, Draufsicht, Ränder adiabatisch, $\alpha_k = 0,1$, Knoten auf Schnitt (rote Linie) von rechts unten (Knoten 1581) nach links oben (Knoten 1976), Rechts: Simulierte Amplitudenkontrastkurven für F2 von PK II_2 nach 15 min Erwärmung [Mau07] . . . 118
8.5. Betonprobekörper PK I_4 ohne Bewehrung (150 x 150 x 50 cm^3); Gipsputz mit Ablösungen unterschiedlicher Ausdehnung simuliert durch gelochte und ungelochte Papierstreifen (alle Angaben in cm), Zeichnung: Borchard, BAM ´(links) und erstes Phasenbild (rechts). . . . 120
8.6. Skizze von Probekörper PK I_5, zeichnung: Borchard, BAM (links), und Radar-C-Scan von PK I_5 in 9 cm Tiefe, Radargramm: Zacher, BAM (rechts), mit Bewehrung und 6 Fehlstellen in 6 cm Tiefe . . . 122
8.7. Thermogramm nach 500 s (links) und Phasenbild von PK II_2 (rechts) mit der besonders Phasenbild deutlich erkennbaren inhomogenen Struktur des Probekörpers, die eine Detektion der Fehlstellen erschwert und einen quantitativen Nachweis, außer für sehr lange Erwärmungszeiten, fast unmöglich macht . . . 124

9.1. Skizze des Messbereichs mit Messfeld 11, Zeichnung: Borchard, BAM (links), und Foto des Messbereichs zwischen Glaswand und Schalter (rechts) . . . 130
9.2. Foto von Messbereich 11 (ca. 1 m^2, links), das zugehörige Thermogramm zum Zeitpunkt des maximalen Temperaturkontrastes (Mitte) und fotogrammetrisch entzerrte Überlagerung, Hemmleb, BAM (rechts) [MAR06a] . . . 130
9.3. Foto eines untersuchten Raumabschnittes (links) und zugehöriges Phasenbild der RPT (rechts) . . . 130
9.4. Messfelder 1 bis 4 in Faulschlammbehälter bei Berlin . . . 131

9.5. Foto (links), Thermogramm nach 0 s Abkühlung (Mitte) und erstes Amplitudenbild bei 0 Hz (rechts) von M1 . . . 132
9.6. Erstes Phasenbild bei $1,67x10^{-3}$ Hz (links oben), Temperaturkontrast(rechts oben), Amplituden- (links unten) und Phasenkontrastverläufe (rechts unten) für Auffälligkeit F1, F2, F3 und F4 (schwarz, rot, grün und blau), bezogen auf Referenzstelle R . . . 132
9.7. Foto (links) und Phasenbild bei $8,35x10^{-3}$ Hz mit mittels RST untersuchten Positionen (rechts) . . . 133
9.8. Phasen- (links) und Amplitudenkontrastverläufe (rechts) für M4 für Auffälligkit F1, F2, F3 und F4 (schwarz, rot, grün und blau), bezogen auf Referenzstelle R 133
9.9. Messaufbau mit Infrarotkamera und Gerüst zur Abschattung der Sonnenstrahlung zur Ortung von Asphaltablösungen . . . 134
9.10. Thermogramm (10:00 Uhr Sommerzeit am 23.6.2005) eines 1 m^2 großen Bereiches auf einer Autobahnbrücke mit Fehlstelle (links) und simulierte Differenzkurve zwischen angenommener Referenz- und Störstelle in 7 cm Tiefe (rechts, Walther, TUB) [MAR+06b] . . . 135
9.11. Altes Museum in Berlin, Nordansicht, Foto: Köpp BAM . . . 135
9.12. Nord-Süd-Schnitt (links) und Rotunde des Alten Museums in Berlin, Foto: Köpp, BAM . . . 136
9.13. Versuchsaufbau für die Fallstudie Altes Museum (links) und Foto eines untersuchten Säulenabschnittes (rechts) . . . 137
9.14. Thermogramm mit Temperaturskala von 20 bis 30 °C (links) und Phasenbild bei $5.56x10^{-4}$ Hz (rechts) des in Abbildung 9.13 dargestellten Säulenabschnittes . 137
9.15. Fotos (links), Thermogramme (Mitte) und Phasenbilder (rechts) einer Säule in der Rotunde des Alten Museums nach 5 min Erwärmung und 15 min Aufnahme 138
9.16. Fotos (links), Thermogramme (Mitte) und Phasenbilder (rechts) einer Säule in der Rotunde des Alten Museums nach 1 min Erwärmung und 5 min Aufnahme 139
9.17. Amplitudenkontrastkurve für eine Fehlstelle in der Säule der Rotunde des Alten Museums in Berlin . . . 140
9.18. Wartburg mit dem Palas, Ostansicht, Foto: Köpp, BAM . . . 141
9.19. Grundriss des Palas der Wartburg mit dem Landgrafenzimmer . . . 141
9.20. Treppenhausseitiges Foto der untersuchten Wand bei streifendem Lichteinfall . 142
9.21. Treppenhausseitiges Phasenbild bei $f = 2,46x10^{-4}$ Hz, Ausschnitt ca. 1 m^2 . . 142
9.22. Neues Palais in Potsdam, Foto: Köpp, BAM . . . 143
9.23. Aufbau der Merkantierdecke nach Endoskopie bei Messfeld M2, Zeichnung: Borchard, BAM . . . 144
9.24. Skizze des Tassenkopfzimmers, Thermografie-Messfelder (grün) und Radarmessspuren (rot und blau) [Borchard, BAM] . . . 145
9.25. Messfelder M3 und M4 . . . 146
9.26. Thermogramme (oben), Amplitudenbilder (Mitte) und Phasenbilder (unten) von M3 (links) und M4 (rechts) . . . 146

10.1. Entzerrung und multispektrale Überlagerung von M3 mit Thermo-Passpunkt, Neues Palais Potsdam, Hemmleb, BAM 150
10.2. Prototyp des BAM-Thermoscanners [HMR+06] 151
10.3. Foto, Thermogramm und Temperaturentwicklung während der Verdichtung an drei ausgewählten Punkten in einem Messfeld 152
10.4. Stele mit Riss 153

A.1. Einfluss des Abstandes des Heizstrahlers auf die Gleichmäßigkeit der Erwärmung [BMRW02], links: Thermogramme, rechts: Linienscans I

B.1. Amplituden- und Phasenkontrastkurven für 10 min Erwärmung von PK II_1 für 6 cm Betondeckung der Fehlstellen. Die Fehlstellen mit ${}_{nom}c = 10$ cm konnten nicht detektiert werden. III
B.2. Amplituden- und Phasenkontrastkurven für 5 min Erwärmung von PK II_1 für 6 cm Betondeckung der Fehlstellen. Die Fehlstellen mit ${}_{nom}c = 10$ cm konnten nicht detektiert werden. IV
B.3. Amplitudenkontrastkurven für die Polystyrolfehlstellen F1, F2, F5 bis F8 von PK I_1 für 30 min Erwärmung mit der automatisierten Erwärmungseinheit aus Tabelle 4.1. Die Werte für F5 bis F8 sind in dem Maßstab nicht erkennbar, aber da quasi kein Rauschen vorliegt, eindeutig numerisch bestimmbar. IV
B.4. Amplitudenkontrastkurven für die Polystyrolfehlstellen F1, F2, F5 bis F8 von PK I_1 für 10 min Erwärmung mit der automatisierten Erwärmungseinheit aus Tabelle 4.1 V
B.5. Amplituden-Kontrast-Kurven für die Polysterol-Fehlstellen F1, F2, F5 bis F8 von PK I_1 für 5 min Erwärmung mit der automatisierten Erwärmungseinheit aus Tab. 4.1 V

C.1. Phasen- und Amplitudenkontrastkurven von PK I_2 für Ablösungen zwischen Spaltklinker und Dickbettmörtel und Dickbettmörtel und Beton mit 6 min Erwärmung und 12 min Aufnahmezeit VII
C.2. Phasen- und Amplitudenkontrastkurven von PK I_2 für Ablösungen zwischen Spaltklinker und Dickbettmörtel und Dickbettmörtel und Beton mit 12 min Erwärmung und 24 min Aufnahmezeit VIII
C.3. Amplituden- und Phasenkontrastkurven der Auswertung von PK I_4 mit 12 min Erwärmung und 24 min Aufnahme, $\Delta t = 1$ s VIII
C.4. Amplituden- und Phasenkontrastkurven der Auswertung von PK I_4 mit 6 min Erwärmung und 15 min Aufnahme, $\Delta t = 1$ s IX
C.5. Amplituden- und Phasenkontrastkurven der Auswertung von PK I_4 mit 3 min Erwärmung und 10 min Aufnahme, $\Delta t = 1$ s IX

D.1. Ergebnisse Messfeld 1, links oben: Digitalbild von M1, obere Reihe: Thermogramme nach 0, 66 und 132 s, mittlere Reihe: 1., 2. und 3. Amplitudenbild, untere Reihe: 1., 2. und 3. Phasenbild XI

D.2. Ergebnisse Messfeld 2, links oben: Digitalbild von M2, obere Reihe: Thermogramme nach 0, 100 und 150 s, mittlere Reihe: 1., 2. und 3. Amplitudenbild, untere Reihe: 1., 2. und 3. Phasenbild XII
D.3. Ergebnisse Messfeld 3, links oben: Digitalbild von M3, obere Reihe: Thermogramme nach 0, 50 und 100 s, mittlere Reihe: 1., 2. und 3. Amplitudenbild, untere Reihe: 1., 2. und 3. Phasenbild XIII
D.4. Ergebnisse Messfeld 4, links oben: Digitalbild von M4, obere Reihe: Thermogramme nach 0, 50 und 100 s, mittlere Reihe: 1., 2. und 3. Amplitudenbild, untere Reihe: 1., 2. und 3. Phasenbild XIV

Tabellenverzeichnis

1.1. Thermografie-Konzepte in der ZfPBau, die Begriffe mit * sind Definitionen des Verfassers für diese Arbeit 5

2.1. Elektromagnetisches Spektrum nach [SK00] 8
2.2. Emissionsvermögen ϵ von Baustoffen für langwellige und kurzwellige Strahlung [Fou98] 20

3.1. Thermografie-Konzepte und ihre Anwendungsgebiete nach [Mal01a] 35

4.1. Experimentelle Aufbauten zu unterschiedlichen Prüfproblemen (BAM) 54
4.2. Probekörper der BAM aus Teil 1 und 2 des oben genannten Projektes 57

5.1. Durch Radar ermittelte Betonüberdeckung der Fehlstellen von PK I_1 73

6.1. Korrekturfaktor k_c für variierende Erwärmungszeiten 86
6.2. Frequenzauflösung nach Gleichung 6.1 und daraus resultierende Fehlerspanne für eine Beobachtungszeit $T = 7200$ s, ein Abtastintervall $\Delta t = 5$ s, $N_f = 2^{11}$ Bilder im Frequenzbereich sowie eine Taktrate von $\Delta f = 4,8828 \times 10^{-5}$ Hz . . 88
6.3. Zusammenstellung der Parameter für die quantitative RPT an PK I_1 und PK II_1 für Erwärmungszeiten t_E von 30, 15, 10 und 5 min und $\alpha_{Beton} = 8,75x10^{-7}$ m^2/s; die *kursiven Werte* wurden gefittet, Abweichung gegenüber dem Sollwert in %. 89
6.4. SNR für den quantitativen Nachweis bei unterschiedlichen Erwärmungszeiten . 89
6.5. Zusammenstellung der Parameter für die quantitative RAT mit Amplitudenwerten an PK I_1 und PK II_1 für Erwärmungszeiten t_E von 30, 15, 10 und 5 min und $\alpha_{Beton} = 8,75x10^{-7}$ m^2/s; die *kursiven Werte* wurden gefittet, Abweichung gegenüber dem Sollwert in %. 93
6.6. Zusammenstellung der Parameter für die quantitative RST mit Phasen- und Amplitudenwerten an PK I_1 für Erwärmungszeiten Ez von 60 und 45 min und $\alpha_{Beton} = 8,75x10^{-7}$ m^2/s 94

8.1. Zusammenstellung der Parameter für die quantitative RST an PK I_2 für $\alpha_{res} = 6,00x10^{-7}$ m^2/s und Parameter a ($t_E = 6$ und $T = 30$ min), b ($t_E = 6$ und $T = 12$ min) und c ($t_E = 12$ und $T = 24$ min), Abweichung gegenüber dem Sollwert in %. 117

8.2. Zusammenstellung der Parameter für die quantitative RST an PK I_4 für $\alpha_{Gipsputz} = 2,917x10^{-7}$ m^2/s und Parameter a ($t_E = 12$ und $T = 24$ min), b ($t_E = 6$ und $T = 15$ min) und c ($t_E = 3$ und $T = 10$ min), Abweichung gegenüber dem Sollwert in %. 121
8.3. Zusammenstellung der Parameter für die quantitative RST an PK II_4 für Erwärmungszeiten t_E von 30, 15, 10 und 5 min und $\alpha_{Beton} = 8,75x10^{-7}$ m^2/s, Abweichung gegenüber dem Sollwert in %. Die * stehen für je eine Bewehrungslage über der Fehlstelle. 123
8.4. Zusammenstellung der Parameter für die quantitative RST an PK II_2 für Erwärmungszeiten t_E von 30, 15, 10 und 5 min und $\alpha_{Beton} = 1,00x10^{-6}$ m^2/s, Abweichung gegenüber dem Sollwert in %. 124
8.5. Zusammenstellung der Parameter für die quantitative RST an PK II_3 für Erwärmungszeiten t_E von 30, 15, 10 und 5 min und $\alpha_{Beton} = 9,21x10^{-7}$ m^2/s, Abweichung gegenüber dem Sollwert in %. 125
8.6. Zusammenstellung der Parameter für die quantitative RST an PK II_4 für Erwärmungszeiten t_E von 30, 15, 10 und 5 min und $\alpha_{Beton} = 8,75x10^{-7}$ m^2/s, Abweichung gegenüber dem Sollwert in %. 126

1. Einführung

Von ihren Anfängen in der zweiten Hälfte des 20. Jahrhunderts an hat sich die zerstörungsfreie Prüfung (ZfP) in vielen Bereichen der Werkstoffprüfung zur Qualitätssicherung während und nach der Fertigung etabliert. Maßgebend für diese Entwicklung ist nach Meinung des Verfassers allerdings nicht ein wachsendes idealistisches Qualitätsbewusstsein, sondern vielmehr eine wachsende Einsicht vieler Verantwortlicher, dass sich die Verwendung kostenintensiver Prüfmethoden finanziell lohnt, da kostenintensivere Nachbesserungen oder Reparaturen so vermieden beziehungsweise auf ein notwendiges Minimum reduziert werden können. Dabei ergibt sich die Wahl des Verfahrens aus der größtmöglichen Schnittmenge von Anforderung, Möglichkeiten und Kostenersparnis.
Neben anderen Verfahren wie beispielsweise Radiologie, Ultraschall, Wirbelstrom oder Radar [ecn06] hat sich die aktive Thermografie einen festen Platz in der ZfP speziell von dünnen Schichten oder oberflächennahen Defekten erworben. So wird sie zum Beispiel bei der Flugzeuginspektion, in der Elektroindustrie, in der Metall verarbeitenden Industrie und der Papierherstellung erfolgreich zur Qualitätssicherung eingesetzt [Mal01b]. Im Bauwesen wird insbesondere ihre passive Variante, die sogenannte passive Thermografie (IR), bei der Ortung von Wärmebrücken oder Leckagen, aber auch bei der Ortung von feuchten Bereichen verwendet [FR06]. Die aktive Thermografie ist hier dagegen kaum verbreitet.
Generell gilt für die Bauwerksdiagnose, dass sie mit dem zunehmenden Alter der Infrastruktur an Bedeutung gewinnt, immer da wo sie in der Lage ist „*zuverlässige Ergebnisse in dokumentierbarer Form zu liefern, um Aussagen zur Standsicherheit, Verkehrssicherheit und Dauerhaftigkeit treffen zu können*“. Dabei stehen die „*Entwicklung baustellentauglicher Geräte und anwenderfreundlicher Datenauswertung sowie deren bildgebende Darstellung ... im Vordergrund*“ ([Wig06], Vorwort des Herausgebers). Darüber hinaus trägt die Entwicklung von ZfPBau-Verfahren dazu bei, über eine Qualitätssicherung die Nachhaltigkeit unserer Infrastruktur zu verbessern, indem sie Bauherren und -trägern Kontrollmechanismen an die Hand gibt und ausführenden Unternehmen die Möglichkeit bietet, bereits bei Erbringen einer Bauleistung oder Instandsetzungsmaßnahme eine hochwertige Arbeit zu dokumentieren [Wig06].

1.1. Ausgangsbasis

Die Dissertation erfolgte im Rahmen des abgeschlossenen DFG-Verbundprojektes „Struktur- und Feuchteuntersuchungen von Bauteil- und Bauwerksoberflächen mit der Impuls-Thermografie, Teil 1 und Teil 2“ in Zusammenarbeit der Technischen Universität Berlin (TUB), Fachgebiet „Baustoffe und Baustoffprüfung“ von Prof. Hillemeier, mit der Bundesanstalt für Materialforschung und

-prüfung (BAM), Fachgruppe „Zerstörungsfreie Schadensdiagnose und Umweltmessverfahren“ von Dr. Wiggenhauser.
Das vorrangige Ziel des Projektes war die Erforschung des Potentials der aktiven Thermografie für die zerstörungsfreie Prüfung im Bauwesen. Zu diesem Zweck wurden im Vorfeld eine Reihe von Probekörpern zu verschiedenen praxisrelevanten Prüfproblematiken entworfen:

- Betonbauteile mit Verdichtungsmängeln und Fehlstellen sowie mit variierender Dichte, Porosität und variierendem Stahlfasergehalt
- Spaltplatten auf Beton mit Ablösungen und Minderdicken der Mörtelschicht
- CFK-Ablösungen auf Beton
- Gipsablösungen und -minderdicken auf Beton
- Stahlbeton mit variierenden Bewehrungsgraden
- Strukturuntersuchungen von Mauerwerk hinter Putz

Bei der Suche nach einer geeigneten Methodik wurden unter anderem Gespräche mit nationalen und internationalen Experten der Thermografie geführt, allen voran Herr Prof. Busse vom IKT in Stuttgart sowie den Herren Kaupinnen, Finnland, Prof. Vavilov, Russland, und Prof. Grinzato, Italien. Nach einer vielversprechenden Testphase verständigte man sich auf eine Adaption des Prinzips der Impuls-Thermografie (IT) für das Bauwesen, da sie sich aufgrund ihrer möglichen Flexibilität und hohen Energiedichte besonders gut für Anwendungen im Bauwesen eignet.

Zielsetzung

Beim Folgeantrag zu Teil 2 des Projektes wurde die IT durch die spezielle Auswertetechnik der Puls-Phasen-Thermografie (PPT) ergänzt, von der man sich eine verbesserte Nachweisempfindlichkeit und Tiefeninformation erhoffte. Die PPT wandelt für jeden Messpunkt die mit der IT ermittelten Temperatur-Zeit-Verläufe (Transienten) mittels Fourier-Transformation (FT) in Amplituden- und Phasen-Frequenz-Verläufe um [MM96]. Im Rahmen dieser Dissertation wurde die PPT in ihrer Eignung für die zerstörungsfreie Prüfung im Bauwesen als Ergänzung zur IT untersucht. Dafür galt es nicht nur ein besonderes Augenmerk auf deren qualitative Applikationen in der Praxis zu legen, sondern auch auf die spezielle Fragestellung eines quantitativen Ansatzes zur Bestimmung der Lage von Fehlstellen, der sogenannten *inversen Lösung* der Wärmeleitung nach Anregung mit einem Impuls beziehungsweise Rechteckimpuls einzugehen. Dies schien besonders erstrebenswert, da ein quantitativer Ansatz im Zeitbereich mittels IT und Erwärmung mit Rechteckimpulsen sich als äußerst kompliziert gestaltet (vergleiche hierzu Kapitel 3.1.1 und [Bri05]). Zur Erlangung dieser Ziele sollten Messungen im Labor und vor Ort durchgeführt werden sowie geeignete analytische und numerische Methoden zur Anwendung kommen.

1.2. Quantitativer Lösungsansatz

Schon in ihrer ersten Veröffentlichung [MM96] über die PPT beschreiben Maldague und Marinetti den Vorteil einer qualitativen PPT gegenüber der klassischen IT anhand des guten Phasenkontrastes $|\Delta\phi_{max}|$ beziehungsweise der $|\Delta\phi_{max}|$-Bilder (vergleiche Kapitel 3.1.3). Einen quantitativen Lösungsansatz geben sie zunächst nicht. Spätere quantitative Lösungsansätze basieren beispielsweise auf Auswertung der PPT-Daten mit neuralen Netzwerken [MLC98], statistischen Methoden [VM00] oder Wavelets [GM00] (vergleiche Kapitel 3.1.3). Diese Methoden sind aber zumeist kompliziert in der Handhabung mit langen Verarbeitungszeiten [IC05].
Als eine Begründung für die offensichtlichen Schwierigkeiten einer quantitativen PPT geben Galmiche und Maldague eine bekannte Eigenschaft der Fourier-Transformation an, dass im Frequenzbereich die Zeitinformationen verloren gehen: „*This means that the FT does not provide any information regarding the time evolution of spectral characteristics of the signal. Since in PT the time information is related to the depth of structural inhomogenities, it is difficult to obtain a quantitative information using the Fourier transform*“ ([GM00], Seite 194). In weiteren Veröffentlichungen begründen Galmiche, Vallerand und Maldague ([GVM00] nach [MG01]) die Schwierigkeiten einer quantitativen PPT auch damit, dass eine thermische Welle in das Prüfobjekt eindringe und vom Defekt wieder zurückgeworfen werde, der Weg also zweimal zurückgelegt werden müsse und die Auflösung im Frequenzbereich dadurch uneindeutig wäre: „*This ... demonstrates that the phase depth relationship is not one to one, which means that it is not possible to easily retrieve the depth from the phase. This problem is due to the fact that discontinuity depth appearance depends on travelling time of the thermal waves up to discontinuity and back on the surface*“ ([MG01], Seite 316). Erst durch Ibarra-Castanedo wurde über eine konsequente Verfolgung des Ansatzes über die sogenannte *Blindfrequenz* f_b, bei der ein Defekt gerade noch nachweisbar ist, analog zur Lockin-Thermografie (LT) [GM02], eine relativ einfache Lösung dieses Problems entwickelt [ICM04a].

Besonderheiten der aktiven Thermografie im Bauwesen - Schwierigkeiten und Chancen

Auch an der BAM [WWB+03] und unter Mitwirkung des Verfassers [WAM+05b], [RAM05] wurde dieser Ansatz mit vielversprechenden Ergebnissen verfolgt. Allerdings zeigte sich,

1. dass diese Ansätze und auch eine direkte Adaption der Lösung von Ibarra-Castanedo [RAM05] nur bedingt funktionierten, weil sich die *Blindfrequenz* f_b und die alternative *scheinbare Blindfrequenz* f_b' häufig nicht eineindeutig bestimmen lassen [AHMR06], wohingegen
2. die Verwendung des maxi- beziehungsweise minimalen Phasenkontrastes $\Delta\phi_{min}$ [AHMR06] und [AMR06] und sogar des minimalen Amplitudenkontrastes ΔA_{min} zu sehr guten Ergebnissen führt (siehe Kapitel 6 ff.).

Nach Meinung des Verfassers liegen beide Phänomene in den Besonderheiten aktiver Thermografie im Bauwesen begründet. Große Bauteildicken mit niedriger Temperaturleitfähigkeit resultieren

nicht nur in langen Erwärmungs- sondern auch in langen Reaktions- und Beobachtungszeiten. Ein Nebeneffekt dieser Vorgehensweise, das zu untersuchende Bauteil durch einen lang anhaltenden Rechteckimpuls mit Wärmeenergie „aufzuladen“, liegt darin, dass der Temperaturkontrast über Fehlstellen häufig nicht zu Null wird, da man zumeist nicht misst, bis ein *vollständiger* Ausgleich der Temperatur stattgefunden hat. Außerdem ist gerade bei flachen Fehlstellen bereits zu Aufnahmebeginn ein Temperaturkontrast vorhanden. Deshalb *kann* nach Ansicht des Verfassers der Ansatz über die Blindfrequenz unter den genannten Randbedingungen häufig gar nicht funktionieren.
Ein positiver Nebeneffekt dieser Vorgehensweise liegt darin, dass bei ausreichend langem Anregungsimpuls das Bauteil selbst als eine Art Wärmequelle fungiert und nicht nur als Reflektor. So wird das zweite in den obigen Zitaten angesprochene Problem gelöst und ein eindeutiger Frequenz-Tiefe-Bezug kann über $\Delta\phi_{min}$ und ΔA_{min} sowie die zugehörige charakteristische Frequenz f_{ch} hergestellt werden. Voraussetzung ist eine ausreichende Aufnahmezeit, um das Tiefensignal vollständig aufzuzeichnen. So kann auch die erste der beiden angesprochenen Schwierigkeiten gelöst werden, Dank der bekannten Eigenschaft der Fourier-Transformation, das ein zeitbegrenztes Signal einen umso stärkeren Ausschlag im Frequenzbereich erzeugt, je größer sein zeitlicher Anteil an der Aufnahmezeit ist (vergleiche Kapitel 2.3.2).
Aus dem Dargestellten und den im Rahmen dieser Arbeit durchgeführten Untersuchungen über den angeregten Wärmefluss (vergleiche Kapitel 7) folgt, dass man hier im Zeitbereich nicht mehr von einer IT sondern von einer Rechteckimpuls-Thermografie (RIT) sprechen sollte. Entsprechend transformiert sich im Frequenzbereich der Begriff PPT in Rechteckimpuls-Phasen-Thermografie (RPT). Auch wurde im Laufe der Untersuchungen deutlich, dass die Amplituden nicht zu vernachlässigende Informationen beinhalten und eine Rechteckimpuls-Amplituden-Thermografie (RAT) ergänzend zur RPT hinzutritt. Das neue Konzept der Synthese aus RPT und RAT im Frequenzbereich wird vom Verfasser mit Rechteckimpuls-Spektral-Thermografie (RST) bezeichnet. Diese ergänzt die RIT im Frequenzbereich wie die PPT die IT.
Da im Rahmen dieser Arbeit vom Verfasser einige neue Begriffe für Thermografie-Ansätze eingeführt werden, wird im Folgenden eine kurze Diskussion derselben vorgenommen (vergleiche hierzu auch Tabelle 1.1 mit den in dieser Arbeit verwendeten Thermografie-Konzepten in der ZfPBau). Eine Zusammenstellung der weiteren in dieser Arbeit verwendeten Abkürzungen und Parameter befindet sich im Abschnitt „*Nomenklatur*“ am Ende dieser Arbeit.

Exkurs über die eingeführten Begriffe

In der Literatur existieren je nach Fachgebiet unterschiedliche Definitionen darüber, wie ein Impuls definiert ist. Die langläufigste ist der aus der Mechanik bekannte Ansatz eines Impulses als vektorielle Größe aus dem Produkt von Masse und Geschwindigkeit [HMS92]. Im allgemeinen Sprachgebrauch wird ein Impuls als „*kurzzeitige Wirkung einer physikalischen Größe beziehungsweise ihre kurzzeitige Abweichung von einem Normal- oder Grundwert*“ ([Lex92]; Bd. 9, Seite 141) bezeichnet. Auch in der Impulstechnik wird ein Impuls als einzelner „*Strom- oder Spannungsstoß*“ ([MG56], Seite 988) betrachtet, wobei hier auch noch zwischen Trapezimpulsen, Rechteckimpulsen und Nadelimpulsen sowie zwischen Impuls und Puls (unter einem Puls wird

eine periodische Folge von Impulsen verstanden) unterschieden wird [MG56]. Und in der Signalverarbeitung wird mit Impuls eine sogenannte Delta-Funktion ohne zeitliche Komponente bezeichnet ([Rea04], Seite 25).
In der aktiven Thermografie beruht das Prinzip der Impuls-Thermografie auf einer kurzzeitigen thermischen Anregung und der anschließenden Aufnahme des Abkühlvorganges: „*Basically, pulse thermography consists of briefly heating the specimen and then recording the temperature decay curve.*“ ([Mal01c], Seite 310). Maldague gibt dort auch konkrete Angaben darüber, was unter kurzzeitiger Erwärmung zu verstehen ist:“ *... with duration(s) from about 3 ms for high conductivity material testing (such as metal parts) to about 4 s for low conductivity specimens (such as plastics and graphite epoxy laminates)*“ ([Mal01c], S. 310).
Der Begriff Rechteckimpuls-Thermografie ist dem Verfasser aus der Literatur nicht als eigenes Konzept bekannt. Das vom Verfasser so bezeichnete Konzept einer RIT aber schon. Es wird zumeist als Sonderform der IT mit langen Rechteckimpulsen betrachtet (vergleiche vor allem [VKG97]), wie auch in vielen Veröffentlichungen von BAM und TUB (vergleiche [WWB$^+$03] und [Bri05]), auch unter Beteiligung des Verfassers (vergleiche [WAM$^+$05b], [MAR05a], [MAR$^+$06c] und [MAR$^+$06b]). Der Begriff Rechteckimpuls-Erwärmung ist gleichzusetzen mit dem englischen Begriff *square pulse heating* [VB01] für eine Anregung einer gewissen Dauer t_E. Wie in Kapitel 7 beschrieben, kann für die IT näherungsweise der analytische Ansatz über einen idealen Impuls oder Dirac-Puls der Dauer $t_E \approx 0$ angenommen werden [AP96] und für die RIT der analytische Ansatz eines Rechteckimpulses mit $t_E >> 0$ [VB01], [Vav04].
Der Begriff *Spektral* in Rechteck-Spektral-Thermografie leitet sich aus der Signalverarbeitung und dem Begriff *Spektrum* ab, welcher den Frequenzumfang eines Signales bezeichnet ([Rea04], Seite24). In diesem Sinne wird auch von dem *Amplituden-* und *Phasenspektrum* eines Signals gesprochen ([MG56], Seite 1152)[1].

Tabelle 1.1.: Thermografie-Konzepte in der ZfPBau, die Begriffe mit * sind Definitionen des Verfassers für diese Arbeit

Konzept	**Kürzel**	**Dauer der Erwärmung**	**Auswertung**
Impuls-Thermografie	IT	$t_E \approx 0$	Temperatur im Zeitbereich
Puls-Phasen-Thermografie	PPT	$t_E \approx 0$	Phasen im Frequenzbereich
Rechteckimpuls-* Thermografie	RIT	$t_E >> 0$	Temperatur im Zeitbereich
Rechteckimpuls-Phasen-* Thermografie	RPT	$t_E >> 0$	Phasen im Frequenzbereich
Rechteckimpuls-Amplituden-* Thermografie	RAT	$t_E >> 0$	Amplituden im Frequenzbereich
Rechteckimpuls-Spektral-* Thermografie	RST	$t_E >> 0$	Phasen und Amplituden im Frequenzbereich

[1] Der Begriff Rechteckimpuls-Spektral-Thermografie (RST) ist auch angelehnt an die gleichfalls aus der ZfP bekannte Methode einer *Spektral Induzierten Polarisation* (SIP) bei der vergleichbare Untersuchungen zu den Amplituden- und Phasenspektren allerdings von elektrische Widerstandsmessungen durchgeführt werden [KN06].

1.3. Konzept

Um die oben genannten Ziele zu erreichen und das Erreichte zu dokumentieren, wird in dieser Arbeit die folgende Vorgehensweise gewählt:

- In dem einführenden Kapitel 2 werden die **Grundlagen** der elektromagnetischen Strahlung, der Wärmeausbreitung in Festkörpern und der Signalverarbeitung beschrieben.
- Es folgt das Kapitel 3 über den **Stand der Technik**, in dem die Grundlagen der aktiven Thermografie (mit einem letzen Abschnitt, in dem die Auswahl des verwendeten Konzeptes von BAM und TUB in der ZfPBau begründet wird) und numerische Methoden zum Lösen der Bilanzgleichung des Wärmetransportes in Festkörpern zusammengestellt sind.
- Im Kapitel 4 **Konzept der aktiven Thermografie in der ZfPBau** wird das in BAM und TUB unter Mitwirkung des Verfassers entwickelte Konzept der aktiven Thermografie vorgestellt, einschließlich der üblichen Vorgehensweise, des Messaufbaus, der untersuchten Probekörper, der verwendeten qualitativen und quantitativen Methoden und der verwendeten Software einschließlich der Simulationstools.
- Im Kapitel 5 **Qualitative Untersuchungen und Machbarkeitsstudien** werden die unter Mitwirkung des Verfassers bereits veröffentlichten qualitativen Ergebnisse von BAM und TUB zusammengefasst mit dem Fokus auf der Auswertung im Frequenzbereich. Diese Resultate sollen den Vorteil der RPT gegenüber RIT und RAT verdeutlichen und die große Bandbreite an Anwendungsmöglichkeiten einer aktiven Thermogafie im Bauwesen demonstrieren.
- **Ein neuer Ansatz für die quantitative Rechteckimpuls-Spektral-Thermografie** zur Tiefenbestimmung z von Defekten: $z = \sqrt{\frac{\alpha}{f_{ch}}}$ auf Grundlage der Temperaturleitfähigkeit α und der charakteristischen Frequenz f_{ch} wird in Kapitel 6 entwickelt und anhand von Untersuchungsergebnissen diskutiert. Auch die Möglichkeiten einer quantitativen Amplitudenauswertung werden diskutiert.
- Um ein besseres Verständnis des durch die verwendete Infrarot-Erwärmungseinheit zu bekommen, wird in Kapitel 7 der angeregte **Wärmefluss in einem halbunendlichen Körper** untersucht.
- **Parameterstudien einer quantitativen RST** mit zahlreichen Untersuchungen zu möglichen Einflussgrößen auf den quantitativen Nachweis runden schließlich die Untersuchungen in Kapitel 8 über das neue quantitative Nachweiskonzept ab.
- Im Kapitel 9 **RIT und RST in der Praxis** werden die Laboruntersuchungen durch reale Messeinsätze, auf die die entwickelten Methoden erfolgreich angewendet wurden, ergänzt.
- Die Arbeit schließt ab mit dem Kapitel 10 **Perspektiven** mit interessanten Neuentwicklungen in der Thermografie in der ZfPBau sowie einer
- **Zusammenfassung** der wichtigsten Ergebnisse in Kapitel 11.

2. Grundlagen der aktiven Thermografie

Einführung

Die Temperaturmessung infolge Strahlungs-Thermometrie (beziehungsweise *Infrarot-Thermografie* oder kurz IR), ist ein Teilbereich der allgemeinen *Thermometrie*, oder Temperaturmessung. Im Gegensatz zur Kontakt-Thermometrie, wo über einen direkten Kontakt die Temperatur des Messobjektes ermittelt wird, wird bei der Thermografie die von einer Oberfläche ausgehende spezifische Strahlung berührungslos gemessen und die Temperatur über entsprechende Kalibrierkurven rückgerechnet (vergleiche Abbildung 2.7).
Die IR lässt sich bis auf William Herschel zurückführen, der 1800 die für das menschliche Auge unsichtbare „Wärmestrahlung“ entdeckte. Es folgte die Entwicklung erster Thermoelemente von Nobili (1830), die von Melloni 1833 in Reihe geschaltet wurden, was eine Umwandlung von IR-Strahlung in ein elektrisches Signal erlaubte. In den Jahren 1870 bis 1920 wurden die ersten thermischen und Quantendetektoren entwickelt [SK00]. Die thermischen Detektoren blieben der zivilen Nutzung vorbehalten, während die Entwicklung der Quantendetektoren vom Militär, vor allem durch die *Großmächte* im *Kalten Krieg* vorangetrieben wurde. Begünstigt durch das Ende des *Kalten Krieges* und die zunehmende Verfügbarkeit von technischen Neuerungen wie Kühlungen aus Flüssigstickstoff sowie durch das Fortschreiten der Computertechnologie wurde ab Anfang der 90er Jahre des 20. Jahrhunderts zunehmend der zivile Markt erschlossen [SK00]. Durch die Entwicklung hoch auflösender Thermografie-Systeme gibt es heutzutage ein breites Anwendungsgebiet für IR im zivilen Bereich (vergleiche Kapitel 3).
In den folgenden Abschnitten werden die für diese Arbeit relevanten Grundlagen der aktiven Thermografie behandelt:

- die die Wärmestrahlung beschreibenden Strahlungsgesetze
- die Gesetze der Thermodynamik, sprich des Wärmetransportes im untersuchten Bauteil und an den Bauteilgrenzen beziehungsweise -oberflächen
- die mathematischen Grundlagen der Signalverarbeitung

Der Stand der Technik zu den in der zerstörungsfreien Werkstoffprüfung eingesetzten aktiven Thermografie-Konzepten ist in Kapitel 3 dargestellt.
Für die technischen Grundlagen von IR-Messgeräten sei auf die Literatur verwiesen (vor allem [SK00], [MO01], [Kap01])

2.1. Grundlagen der elektromagnetischen Strahlung

Alle Körper deren Oberflächentemperatur T_O über dem absoluten Nullpunkt liegt, emittieren elektromagnetische Strahlung. Das Spektrum der Strahlung und die Wellenlänge des Strahlungsmaximums sind abhängig von T_O. Bei der in der Thermografie gemessenen Infrarot-Strahlung handelt es sich um Wellenlängen zwischen 0,78 μm bis 1000 μm (vergleiche Tabelle 2.1).

Wellenart	**Wellenlänge in μm**
Radiowellen	1000 bis 1,00E+06
fernes Infrarot	14,0 bis 1000
langwelliges Infrarot	7,0 bis 14,0
mittelwelliges Infrarot	3,0 bis 7,0
nahes Infrarot	0,78 bis 1,4
sichtbares Licht	0,38 bis 0,78
Ultraviolett	1,00E-03 bis 0,38
Röntgenstrahlung	1,00E-06 bis 1,00E-03

Tabelle 2.1.: Elektromagnetisches Spektrum nach [SK00]

2.1.1. Schwarzer Strahler und Emissivität

Ein Maß für die emittierte Strahlung ist die spezifische Ausstrahlung der Oberfläche eines Körpers beziehungsweise Strahlers M(T) in W/(cm^2). Sie hängt von der Oberflächentemperatur T_O in K, der Oberflächenbeschaffenheit und der Wellenlänge λ ab.
Ein Maß für die Strahlungseigenschaften ist der temperatur- und wellenlängenabhängige Emissionsgrad ϵ. Er beschreibt das Abgabevermögen von elektromagnetischer Strahlung in Abhängigkeit von T_O und λ der Oberfläche. ϵ ist definiert als das Verhältnis von M(T) des Körpers zu M_b(T) in W/(cm^2) eines schwarzen Körpers bei einer absoluten Temperatur T [SK00]:

$$\epsilon = \frac{M(T)}{M_b(T)} \tag{2.1}$$

Ein *schwarzer Körper* besitzt für die betrachtete Temperatur beziehungsweise Wellenlänge einen Emissionsgrad von $\epsilon = 1$, alle nichtschwarzen Körper einen von $\epsilon < 1$.
Ist das Emmissionsvermögen eines Körpers konstant über den gesamten betrachteten Wellenlängenbereich, ist er also unabhängig von der Wellenlänge, spricht man von einem für diesen Wellenlängenbereich *grauen Strahler* (vergleiche auch Abbildung 2.1). So kann wenn ϵ bekannt ist, aus der gemessenen spektralen Strahldichte die Temperatur der Oberfläche bestimmt werden.
In Abbildung 2.1 sind die Emissivitäten verschiedener Baustoffe über der Wellenlänge bei einer Umgebungstemperatur T dargestellt, ergänzt durch ϵ(T, λ) von einem für alle betrachteten Wellenlängen schwarzen sowie für einen grauen Strahler.

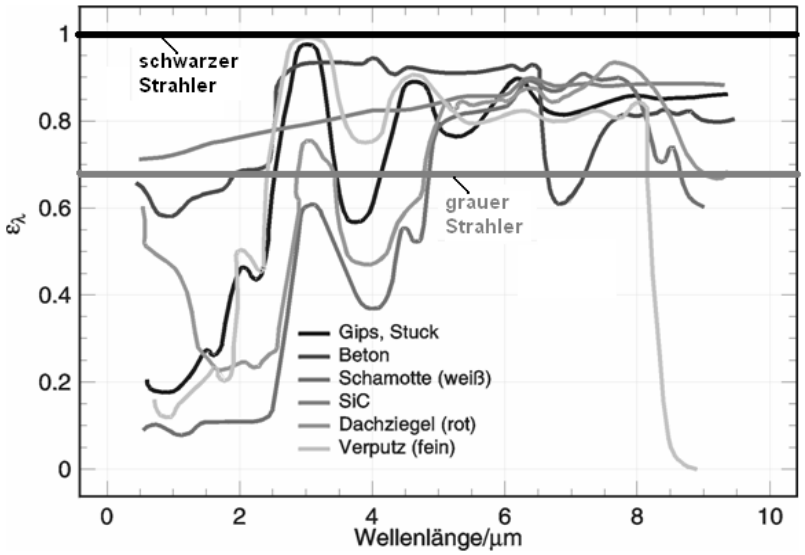


Abbildung 2.1.: Emissivität unterschiedlicher Baustoffoberflächen mit für alle dargestellten Wellenlängen grauem und schwarzem Strahler (L. Walther und D. Gerber (1983) nach [Inf])

2.1.2. Strahlungsgesetze

Weitere physikalische Grundlagen der Strahlungsmessung sind das *Kirchhoff'sche Gesetz*, das *Planck'sche Strahlungsgesetz*, das *Wien'sche Verschiebungsgesetz* und das *Stefan-Boltzmann-Gesetz* (nach [SK00] und [Sch04]):

- Das *Kirchhoff'sche Gesetz* besagt, dass auf einen Körper treffende Strahlung zu Teilen reflektiert, hindurchgelassen und absorbiert wird. Die Summe aus *Reflexionsgrad* ϱ, *Transmissionsgrad* τ und *Absorptionsgrad* α bei einer bestimmten Wellenlänge ist dabei immer gleich eins:

$$\varrho(\lambda) + \tau(\lambda) + \alpha(\lambda) = 1 \tag{2.2}$$

- Das *Planck'sche Strahlungsgesetz* gibt die spezifische spektrale Ausstrahlung eines idealen schwarzen Körpers M_λ in $W/(cm^2 \cdot \mu m)$ als eine Funktion der Wellenlänge λ in μm und der Temperatur T in K an:

$$M_{\lambda,T} = \frac{c_1}{\lambda^5} \cdot \left(e^{c_2/\lambda \cdot T} - 1\right)^{-1} \tag{2.3}$$

  mit den Strahlungskonstanten $c_1 = 3,742 \times 10^4$ W·cm^{-2}·μm^4 und $c_2 = 1,439 \times 10^4$ μ m·K.

- Setzt man die erste Ableitung des Planck'schen Strahlungsgesetzes gleich null, erhält man die Lage des Strahlungsmaximums für eine gegebene Temperatur T (gestrichelte Linie in Abbildung 2.2). Die Gleichung zur Ermittlung der Wellenlänge des Ausstrahlungsmaximums

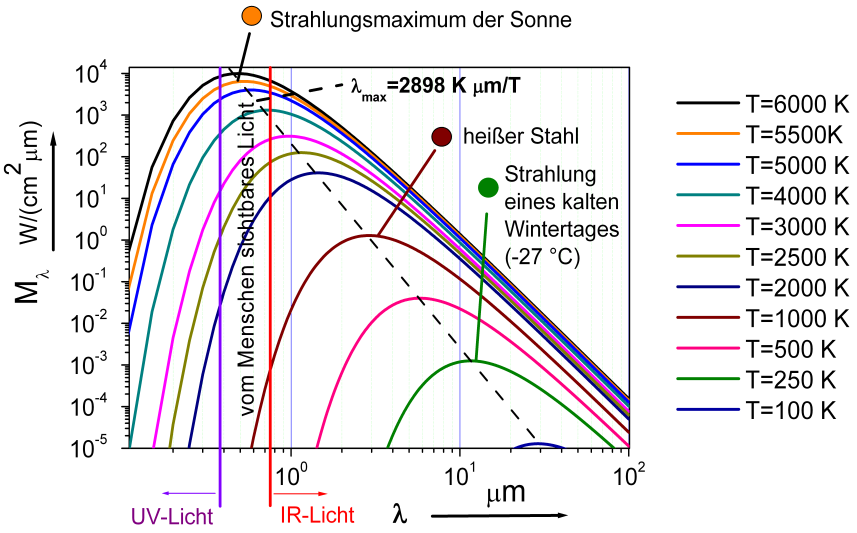


Abbildung 2.2.: Planck'sches Strahlungs- und Wien'sches Verschiebungsgesetz

λ_{max} wird das *Wien'sche Verschiebungsgesetz* genannt:

$$\lambda_{max} = \frac{2898\ K \cdot \mu m}{T} \tag{2.4}$$

In Abbildung 2.2 sind das *Planck'sche Strahlungs-* und das *Wien'sche Verschiebungsgesetz* für einen Wellenlängenbereich von 0,1 bis 100 μ m und verschiedene Temperaturen angegeben. Die zweitoberste (orangefarbene) Kurve gibt die spezifische spektrale Ausstrahlung der Sonne (T$\approx$ 5777 K unter der vereinfachten Annahme der Sonne als *schwarzer Strahler*) an. Das Strahlungsmaximum bei einer Wellenlänge von $\approx 0,5\ \mu$m liegt genau in der Mitte des sichtbaren Bereiches des menschlichen Auges. Die gestrichelte Linie verbindet die einzelnen Strahlungsmaxima nach Gleichung 2.4.

- Das *Stefan-Boltzmann-Gesetz* ist die Integration der *Planck'schen Strahlungskurve* (Gleichung 2.3) über der Wellenlänge und beschreibt den Zusammenhang der spezifischen Ausstrahlung eines Körpers M in W/cm^2 als Funktion seiner Temperatur und seines Emissionsgrades in Abhängigkeit von der sogenannten *Stefan-Boltzmann-Konstanten* $\sigma = 5,6686 \times 10^{-12}$ in W·cm^{-2}·K^{-4}:

$$M(T) = \epsilon(T) \cdot \sigma \cdot T^4 \tag{2.5}$$

2.1.3. Atmosphärische Absorption und Streuung

Einen wesentlichen Einfluss auf die Strahlungsausbreitung und damit auch auf den Einsatz von Wärmebildgeräten hat die Atmosphäre, da sie die transmittierende Strahlung abschwächt,

das heißt absorbiert und streut, beziehungsweise durch Eigenstrahlung den Strahlungskontrast verringert [SK00]. Diese Transmissionseigenschaften der Atmosphäre sind abhängig von der Messstrecke, der Zusammensetzung der Luft und damit von den Absorptionseigenschaften der einzelnen Gasmoleküle (CO, CH_4, N_2O, O_3, CO_2 und H_2O) sowie von der Wellenlänge. Für eine bestimmte Übertragungsstrecke lässt sich aus meteorologischen Daten in geringer Höhe über der Erdoberfläche die von λ abhängige Transmission $\tau_A(\lambda)$ im Wesentlichen auf drei Faktoren reduzieren [SK00]:

- die molekulare Absorption durch Wasserdampf $\tau_{H_2O}(\lambda)$,
- die molekulare Absorption durch Kohlendioxid $\tau_{CO_2}(\lambda)$ und
- die molekulare Streuung $\tau_s(\lambda)$,

was zu Gleichung 2.6 führt:

$$\tau_A(\lambda) = \tau_{H_2O}(\lambda) \cdot \tau_{CO_2}(\lambda) \cdot \tau_s(\lambda) \tag{2.6}$$

In Abbildung 2.3 ist beispielhaft der wellenlängenabhängige Verlauf der Transmission für bestimmte Randbedingungen dargestellt. Es ist erkennbar, dass der höchste Transmissionsgrad der Luft in den zwei sogenannten *atmosphärischen Fenstern* liegt, zwischen 3 und 5 beziehungsweise 8 und 12 μm. Deswegen sind Infrarotkameras überwiegend für diese Wellenlängenbereiche ausgelegt. Die Auswahl des geeigneten Fensters hängt mit der Messaufgabe zusammen. Will man zum Beispiel Thermografiemessungen bei Tage unter freiem Himmel durchführen, bietet sich der Messbereich zwischen 8 und 12 μm an, da hier die Eigenstrahlung auf der Erdoberfläche ihr Maximum aufweist, die spezifische spektrale Strahlung der Sonne hingegen nur etwa ein 1/470 ihrer Strahlung im sichtbaren Bereich hat und so das Hintergrundrauschen minimiert wird [SK00].

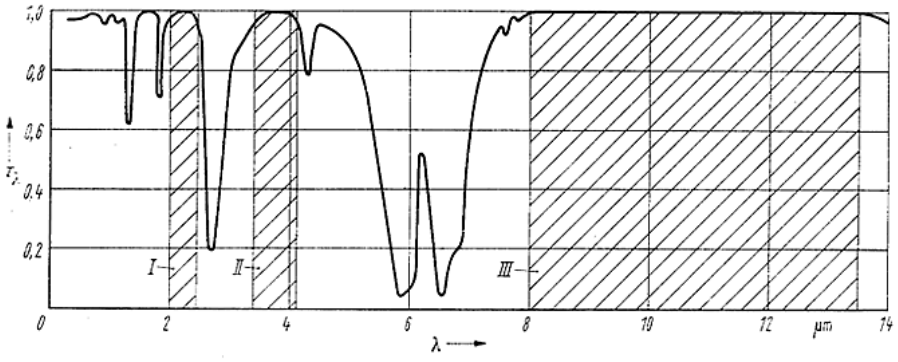


Abbildung 2.3.: Spektraler Transmissionsgrad von Luft in Abhängigkeit von der Wellenlänge λ (10 m, 25 °C, 1013 mbar, 85% r.F., Walther und Gerber (1983) nach [Inf])

2.2. Wärmetransport in Festkörpern

In der Thermodynamik wird die Bewegungsenergie von Molekülen der Materie, die zusätzlich zu den mechanischen Energieformen jedem Körper als innerer Energiezustand zugewiesen werden kann, mit Wärme bezeichnet. Der innere Energiezustand eines Körpers, auch Wärmeinhalt genannt, ist dabei proportional zu dessen Temperatur. In gekoppelten thermodynamischen Systemen wird Energie beziehungsweise Wärme von Systemen höherer Temperatur an solche niedrigerer Temperatur abgegeben.

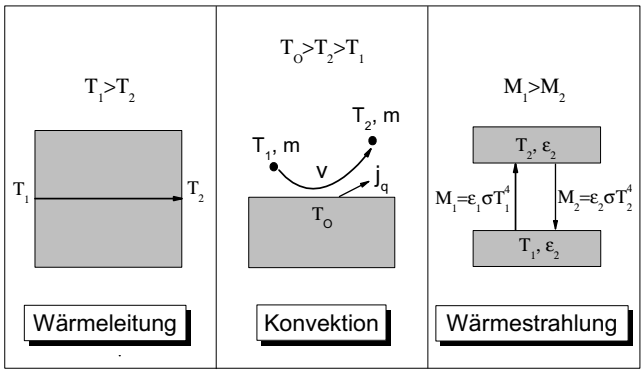


Abbildung 2.4.: Wärmetransportmechanismen

Die Wärmeübertragungsarten sind vielfältig (siehe Abbildung 2.6). Sie lassen sich aber auf drei Mechanismen zurückführen (siehe Abbildung 2.4), die je nach Übertragungsmedium in unterschiedlichem Maße vorhanden sind [CJ01]:

- Wärmeleitung (Konduktion): Wärmetransport in Festkörpern, in ruhenden Flüssigkeiten und in dünnen Gasschichten erfolgt in Form der Übertragung der Schwingungsenergie benachbarter Moleküle und kinetischer Energie der Leitungselektronen in Stoßprozessen (zum Beispiel bei Metallen).
- Konvektion: Die Wärmeenergie wird durch die Bewegung von Stoffteilchen übertragen, von Flüssigkeiten oder Gasen beziehungsweise bei Übergängen von einem Medium zu einem anderen, zum Beispiel Wärmeübergang Festkörper-zu-Flüssigkeit oder Festkörper-zu-Gas. Man unterscheidet zwischen *freier Konvektion* (die Stoffbewegung erfolgt über ein Temperaturgefälle) und *erzwungener Konvektion* (die Stoffbewegung erfolgt infolge einer äußeren Einwirkung, zum Beispiel über Pumpen oder Wind).
- Strahlung (Radiation): Der Wärmetransport erfolgt über elektromagnetische Wellen (siehe Kapitel 2.1).

2.2.1. Wärmeleitung

Nach dem ersten Satz der Thermodynamik ist die Zunahme der inneren Energie ΔE_i in J eines geschlossenen Systems oder Bilanzraumes dV in m^3 gleich der Summe der Zufuhr an Wärmeenergie

Q in J und der geleisteten Arbeit W in J (Mayer, 1842 nach [Mar02]):

$$\Delta E_i = Q + W \tag{2.7}$$

Unter konstantem Druck und für $W = 0$, falls also keine sonstige Arbeit geleistet wird, gilt:

$$\Delta E_i = Q \tag{2.8}$$

Für offene Systeme unter den gleichen Randbedingungen ist die Zunahme der inneren Energie $\Delta E_i = c \cdot dm \cdot \partial\vartheta/\partial t$ gleich der Energiezufuhr durch interne Wärmequellen $\dot{f}$ im Volumen dV abzüglich der Wärmeströme $j_q \cdot dA$, die durch die Oberflächen des Volumens eindringen [HMS92] (Vergleiche Abbildung 2.5):

$$\begin{aligned} c \cdot dm \cdot \frac{\partial\vartheta}{\partial t} = \dot{f} \cdot dV &- [j_q(x+dx) - j_q(dx)]dy \cdot dz \\ &- [j_q(y+dy) - j_q(dy)]dx \cdot dz \\ &- [j_q(z+dz) - j_q(dz)]dx \cdot dy \end{aligned} \tag{2.9}$$

mit

c: Spezifische Wärmekapazität in J/(kg·K)
dm: Masse in kg eines Volumenelementes $dV = dx \cdot dy \cdot dz$ m^3
$\dot{f}$: Energiedichte in W/m^3

j_q in W/m^2 ist die Wärmestromdichte, das heißt die in der Zeit Δt durch eine Grenzfläche A mit dem Temperaturgradienten $\partial\vartheta/\partial n$ in einer Richtung n transportierte Wärme ΔQ in W in

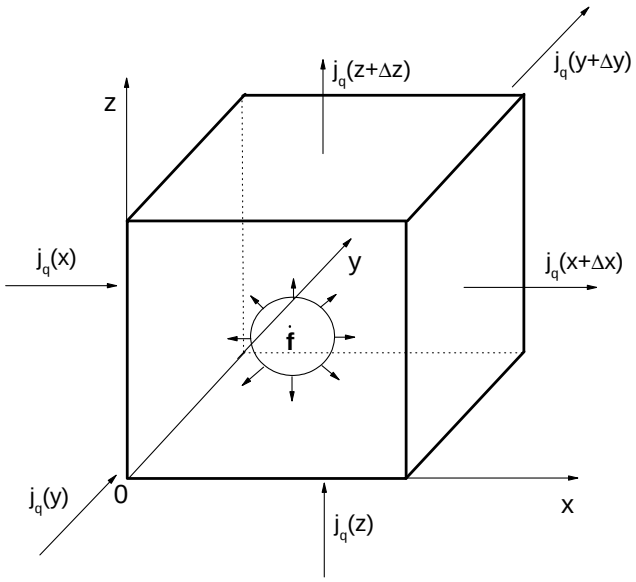


Abbildung 2.5.: Wärmeströme j_{qi} im Volumen $dV = dx \cdot dy \cdot dz$ nach [HMS92]

Abhängigkeit von der Wärmeleitfähigkeit λ in W/(m·K) [HMS92]:

$$j_q = \frac{\Delta Q}{A \cdot \delta t} = \frac{\dot{Q}}{A} = -\lambda \cdot \frac{\partial \vartheta}{\partial n} \tag{2.10}$$

In einem unendlich kleinen Volumen gilt für die Wärmestromdichte die Taylor-Reihe $j_q(i + di) = j_q(i) + (\partial j_{qi}/\partial i)di$ mit $i = x, y, z$. Eingesetzt in Gleichung 2.9, erhält man die *Fourier'sche Differentialgleichung* für die Wärmeleitung in Abhängigkeit von der Dichte ρ in kg/m^3 des Materials:

$$c \cdot \rho \frac{\partial \vartheta}{\partial t} = \dot{f} - \left\{ \frac{\partial j_{qx}}{\partial x} + \frac{\partial j_{qy}}{\partial y} + \frac{\partial j_{qz}}{\partial z} \right\} \tag{2.11}$$

Durch Einsetzen von Gleichung 2.10 in Gleichung 2.11 erhält man schließlich die Differentialgleichung für den räumlichen und zeitlichen Verlauf von *instationären* Temperaturfeldern [Cha74]:

$$c \cdot \rho \frac{\partial \vartheta}{\partial t} = \dot{f} + \lambda \cdot \left\{ \frac{\partial^2 \vartheta}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \vartheta}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \vartheta}{\partial z^2} \right\} \tag{2.12}$$

Betrachtet man einen von Wärmequellen freien Bereich, also ist $\dot{f} = 0$, und sind die Temperaturen zeitlich konstant, $\partial \vartheta / \partial t = 0$, spricht man von *stationären* Temperaturfeldern:

$$0 = \left\{ \frac{\partial^2 \vartheta}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \vartheta}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \vartheta}{\partial z^2} \right\} \tag{2.13}$$

2.2.2. Wärmeübergänge

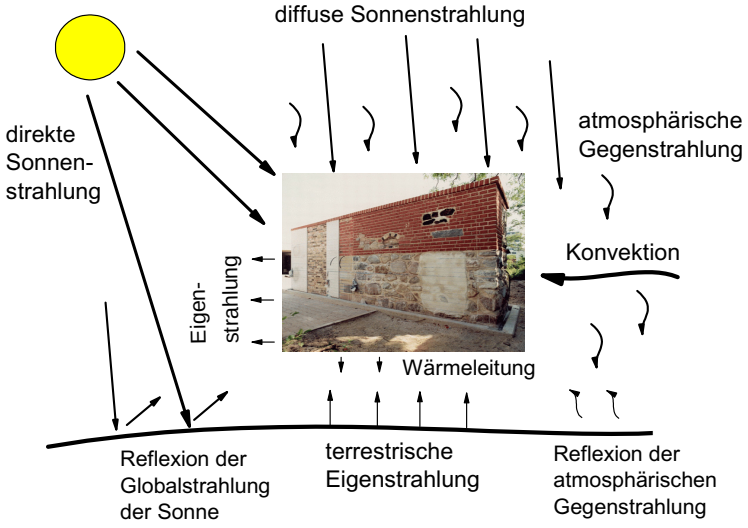


Abbildung 2.6.: Wärmeübertragungsarten

In einem Festkörper erfolgt der Wärmetransport über Wärmeleitung. An den Grenzflächen von Festkörpern können allerdings alle drei Mechanismen in unterschiedlichem Maße und gegebenenfalls auch gleichzeitig auftreten, je nach den Rand- und Übergangsbedingungen (vergleiche Abbildung 2.6).

Wärmeleitung

Berühren sich zwei Festkörper, wird die Wärmeenergie zwischen den Molekülen über direkten Kontakt infolge Reibung transportiert. Der Wärmestrom $\dot{Q}_{wlei}$ zu einem bestimmten Zeitpunkt t ist dabei abhängig von der Wärmeeindringzahl b in J/(m^2·K·s$^{1/2}$), der Größe der Kontaktfläche A und der Temperaturdifferenz $\Delta\vartheta = \vartheta_1 - \vartheta_2$ in K [Fou98]:

$$\dot{Q}_{wlei} = A \cdot \frac{1}{\sqrt{\pi}} \cdot b \cdot \frac{1}{\sqrt{t}} \cdot \Delta\vartheta \tag{2.14}$$

wobei

$$b = \sqrt{\lambda \cdot \rho \cdot c} \tag{2.15}$$

Die Wärmestromdichte j_{wlei}(t) in W/m^2 ermittelt sich entsprechend aus:

$$j_{wlei} = \dot{Q}_{wlei}/A \tag{2.16}$$

Konvektion

Bewegen sich zwei thermodynamische Systeme mit unterschiedlichem thermischem Niveau relativ zueinander, das heißt, erfolgt die Wärmeübertragung durch Massentransport, spricht man von Konvektion. Ist diese Bewegung auf thermische beziehungsweise durch Dichteunterschiede bedingte Auftriebs-Ausgleichs-Prozesse zurückzuführen, spricht man von *freier Konvektion* beziehungsweise *Strömung*.
Liegt ein äußerer Einfluss, wie zum Beispiel durch Pumpen oder Wind, vor, spricht man von *erzwungener Konvektion* oder *Zwangsströmung*. Des Weiteren kann man noch zwischen *laminarer* (reine Translation) und *turbulenter Strömung* (mit dominantem Rotationsanteil der Strömung) bei konvektivem Wärmetransport unterscheiden.
Erweitert man die Fourier-Gleichung 2.12 um die Strömungsgeschwindigkeit v in m/s, gilt [Mar02]:

$$c \cdot \rho \left\{ \frac{\partial\vartheta}{\partial t} + \left(v_x \cdot \frac{\partial\vartheta}{\partial x} + v_y \cdot \frac{\partial\vartheta}{\partial y} + v_z \cdot \frac{\partial\vartheta}{\partial z} \right) \right\} = \dot{f} + \lambda \cdot \left\{ \frac{\partial^2\vartheta}{\partial x^2} + \frac{\partial^2\vartheta}{\partial y^2} + \frac{\partial^2\vartheta}{\partial z^2} \right\} \tag{2.17}$$

An den Grenzflächen zwischen Festkörpern und Gasen gilt das *Fourier'sche Gesetz* für den Wärmeübergang j_k in W/m^2:

$$j_k(\alpha_k) = \alpha_k(\vartheta_U - \vartheta_O) = -\lambda \cdot \frac{\partial\vartheta}{\partial n} \tag{2.18}$$

mit dem Wärmeübergangskoeffizienten α_k in W/(m^2·K) sowie der Umgebungstemperatur ϑ_U und der Oberflächentemperatur ϑ_O in K der beiden angrenzenden Materialien.
Der Wärmeübergangskoeffizient α_k ist von verschiedenen Faktoren wie Windgeschwindigkeit, Temperaturunterschied und Material abhängig und lässt sich je nach Art der Konvektion verein-

facht ermitteln durch [Fou98]:

$$\alpha_k = \sqrt[3]{\alpha_{k,frei}^3 + \alpha_{k,zwang}^3} \tag{2.19}$$

Lösungen der Differentialgleichung 2.18 für laminare und turbulente Strömungen finden sich in der Literatur: [CJ01], [Cha74], [HMS92] oder [Bri05].
Die wichtigsten Kennziffern sind dabei die *Nußelt-Zahl Nu* für konvektive Übergänge:

$$Nu = \frac{\alpha_{K2} \cdot L_2}{\lambda_2} = \frac{\alpha_{K1} \cdot L_1}{\lambda_1} \tag{2.20}$$

und die *Reynolds-Zahl Re* für Strömungen unter Reibung:

$$Re = \frac{v_2 \cdot L_2}{\nu_2} = \frac{v_1 \cdot L_1}{\nu_1} \tag{2.21}$$

in Abhängigkeit von der Geschwindigkeit $v_{1,2}$, der charakteristischen Länge $L_{1,2}$ und der Viskosität $\nu_{1,2}$ der angrenzenden Systeme.
Weitere Kennziffern sind die *Grashof-Zahl Gr* für freie Konvektion für einen bestimmten Temperaturgradienten und die *Prandtl-Zahl Pr* als Wärmeübergangskenngröße des Fluids [Kla02].

Freie Konvektion

Für eine überschlägige Ermittlung von $\alpha_{k,frei}$ in W/(m^2·K) für Bauwerke gibt [Vav04] folgende vereinfachte Gleichung für geschlossene Räume an:

$$\alpha_{k,frei} = 6,28 + 0,73 \cdot \Delta\vartheta^{0,56} \tag{2.22}$$

mit $\Delta\vartheta$ in K.
Und [Fou98] hat folgende Systematik zusammengestellt:

- Senkrechte Wände:

$$\alpha_{k,frei} = 9,7 \sqrt[3]{\frac{\Delta\vartheta}{\vartheta_{Luft}}} \tag{2.23}$$

- Waagerechte Flächen nach oben:

$$\alpha_{k,frei} = 14,13 \sqrt[3]{\frac{\Delta\vartheta}{\vartheta_{Luft}}} \tag{2.24}$$

- Waagerechte Flächen nach unten:

$$\alpha_{k,frei} = 1,84 \sqrt[3]{\frac{\Delta\vartheta \cdot l_A^2}{\vartheta_{Luft}[m^2]}} \tag{2.25}$$

mit α_k jeweils in W/(m^2·K), der Lufttemperatur ϑ_{Luft} in K und $\Delta\vartheta = \vartheta_{Luft} - \vartheta_O$ in K, wobei ϑ_O die Oberflächentemperatur des Bauteiles darstellt. l_A ist die Anströmlänge der Luft in m.

Erzwungene Konvektion

Die erzwungene Konvektion steht primär in Abhängigkeit von der Windgeschwindigkeit v in m/s:

- $v \leq 5$:

$$\alpha_{k,Zwang} = \zeta \cdot v \tag{2.26}$$

- $v > 5$:

$$\alpha_{k,Zwang} = 7,15 \cdot v^{0,78} \tag{2.27}$$

ζ ist ein empirischer Faktor zwischen 4,0 und 5,0 [Fou98].

Wärmestrahlung

Der Wärmestrom zwischen zwei gleich großen *grauen* Oberflächen mit den Temperaturen ϑ_a und ϑ_b durch ein Vakuum, und näherungsweise auch durch einen mit Gas gefüllten Raum (vergleiche Kapitel 2.1), lässt sich nach Gleichung 2.28 ermitteln [Mic62]:

$$j_{Sab} = c_{Sab}\,(\epsilon_a, \epsilon_b, \phi_{ab}) \cdot A_1 \cdot \left((\frac{\vartheta_a}{100})^4 - (\frac{\vartheta_b}{100})^4 \right) \tag{2.28}$$

mit

j_{Sab}: Wärmefluss infolge Strahlung zwischen zwei Oberflächen in W/m^2
c_{Sab}: Strahlungsaustauschkoeffizient der Bauteiloberflächen in Abhängigkeit von den Emissivitäten ϵ_a und ϵ_b sowie dem Winkelverhältnis ϕ_{ab} in W/(m^2·K^4)
A_1: Größe der Bauteiloberflächen in m^2
$\vartheta_{a,b}$: Temperatur der Bauteiloberflächen in K

Für zwei ideale *schwarze Körper* mit $\epsilon_a = \epsilon_b = 1$ und zwei parallele Oberflächen gilt $c_{Sab} = c_S = \sigma \cdot 10^8$, wobei σ die Stefan-Boltzmann-Konstante ist und cS die Strahlungskonstante für schwarze Körper [Mic62] (siehe Gleichung 2.1 und 2.5 sowie 2.29 ff.).
Die Emissivität realer Baustoffe (siehe Abbildung 2.1) ist aber auch von der Wellenlänge abhängig, so dass man vereinfacht zwischen kurzwelliger und langwelliger ($T \leq 200$ °C) Strahlung auf eine Oberfläche unterscheiden kann (vergleiche Tabelle 2.2).

Kurzwellige Globalstrahlung der Sonne

Die Strahlung der Sonne erreicht eine IR-Kamera in unserer Atmosphäre auf drei Wegen:
1. auf direktem Weg über die Sonnenstrahlung, 2. auf indirektem Weg durch Streuung in der Atmosphäre und 3. auf indirektem Weg durch Reflexion, wobei man die indirekte Globalstrahlung auch mit dem Begriff der *diffusen Globalstrahlung* zusammenfasst (siehe Abbildung 2.6).
Der aus Gleichung 2.28 direkt abgeleitete und häufig in der Literatur angetroffene Ansatz für die Globalstrahlung mit dem Formfaktor f ist also nicht ganz zutreffend, aber oft für die Praxis ausreichend genau [Fou98]:

$$j_{Sglobal} = f \cdot \epsilon \cdot c_S \cdot \left((\frac{\vartheta_{Sonne}}{100})^4 - (\frac{\vartheta_{Oberfl}}{100})^4 \right) \tag{2.29}$$

beziehungsweise noch weiter vereinfacht zu:

$$j_{Sglobal} \approx f \cdot \epsilon \cdot c_S \cdot \left((\frac{\vartheta_{Sonne}}{100})^4 \right) \tag{2.30}$$

Ein genauer die physikalische Wirklichkeit berücksichtigender Ansatz findet sich in [Fou98] ausführlich dargestellt. Danach gilt:

$$j_{Sglobal} = \xi \cdot (G) = \xi \cdot (I + D) \tag{2.31}$$

ξ: Absorptions- beziehungsweise Emissionsvermögen der Oberfläche bezüglich Sonnenstrahlung (vergleiche Tabelle 2.2)
G: Globalstrahlung in W/m^2
I: Indirekter Anteil der Sonnenstrahlung in W/m^2
D: Direkter Anteil der Sonnenstrahlung in W/m^2

Langwellige Globalstrahlung

Die Temperatur der Atmosphäre und die gewöhnliche Umgebungstemperatur auf der Erde sind im Verhältnis zur Temperatur der Sonne niedrig und der Wellenlängenbereich entsprechend lang (vergleiche Abbildung 2.2). Deshalb spricht man von langwelliger Globalstrahlung im Gegensatz zur kurzwelligen Globalstrahlung der Sonne.
Die langwellige Globalstrahlung setzt sich aus verschiedenen Komponenten zusammen: der *atmosphärischen Gegenstrahlung*, der Reflexionsstrahlung der *atmosphärischen Gegenstrahlung* durch den Erdboden beziehungsweise das Wasser und der Eigenstrahlung der terrestrischen Umgebung (einschließlich Erdboden, Wasser, Bauwerke etc.):

- Die *atmosphärische Gegenstrahlung* ist die Emission von Wärmestrahlung ausgehend von Partikeln in der Atmosphäre in Abhängigkeit vom Bewölkungsgrad. Es gilt die Ångström'sche Formel [Fou98]:

$$j_A = \epsilon_A \cdot c_S \cdot \left((\frac{\vartheta_{Erde}}{100})^4 \right) \tag{2.32}$$

wobei:

j_A: Atmosphärische Gegenstrahlung in W/m^2
ϵ_A: Emissionszahl der Atmosphäre (in der Literatur stark variierend, je nach Autor und dort angenommenen Randbedingungen zwischen 0,5 und 0,94)
c_S: Strahlungskonstante für schwarze Körper $c_s = \sigma \cdot 10^8 = 5,6686 \times 10^{-4}$ in W·cm^{-2}·K^{-4}
ϑ_{Erde}: Temperatur der Erdoberfläche in K

- Die *Reflexionsstrahlung der atmosphärischen Gegenstrahlung* j_R und die *Eigenstrahlung der terrestrischen Umgebung* j_U lassen sich in einer Gleichung für die terrestrische Strahlung j_{UR} in W/m^2 zusammenfassen:

$$j_{UR} = j_U + j_R = (\epsilon_U + \epsilon_A \cdot (1 - \epsilon_U)) \cdot c_S \cdot \left((\frac{\vartheta_{Erde}}{100})^4 \right) \tag{2.33}$$

mit ϵ_U als der Emissionszahl der terrestrischen Umgebung (siehe Tabelle 2.2).
Gleichfalls zur langwelligen Globalstrahlung gezählt werdden kann noch die *Eigenstrahlung des Bauteiles* selber j_O (vergleiche Gleichung 2.28):

$$j_O = \epsilon_0 \cdot c_O \cdot (\frac{\vartheta_O}{100})^4 \tag{2.34}$$

mit

j_O: Wärmefluss infolge Emission in W/m^2
ϵ_0: Emissionszahl der Bauteiloberfläche
c_O: Strahlungskoeffizient der Bauteiloberfläche in W/(m^2·K^4)
ϑ_O: Temperatur der Bauteiloberfläche in K

ϵ_O ist in diesem Fall die Emissivität der Bauteiloberfläche (vergleiche auch Tabelle 2.2 und Abbildung 2.1) für langwellige Strahlung, nicht zu verwechseln mit dem Absorptionsvermögen für die kurzwellige Strahlung der Sonne. Ein wesentlicher Unterschied liegt auch darin, dass im Gegensatz zu letzterer erstere unabhängig von der Farbe der Oberfläche ist. So lässt sich zum Beispiel nicht mit bloßem Auge erkennen, was für eine Emissivität eine Oberfläche im langwelligen Bereich hat. Helle Flächen strahlen langwelliges Licht prinzipiell genauso wie dunkle desselben Materials und der selben Oberflächenstruktur ab.
Für eine ausführlichere Darstellung der elektromagnetischen Wellenausbreitung sei auf die Fachliteratur verwiesen [VG02] [Lan00].

2.2.3. Bilanzgleichung für den Wärmetransport in Festkörpern

Fasst man Gleichung 2.16 bis 2.34 zusammen, ergibt sich für den Wärmefluss j_q an den Grenzen eines Volumenelementes dV die folgende Gleichung:

$$j_q = j_{wlei} + j_k + j_{Sglobal} + j_A + j_{UR} - j_O \tag{2.35}$$

wobei:

j_q: Wärmefluss am Rand einer Materialschicht nach Gleichung 2.9 in W/m^2
j_{wlei}: Wärmefluss infolge eines konduktiven Wärmeüberganges in W/m^2
j_k: Wärmefluss infolge eines konvektiven Wärmeüberganges in W/m^2
$j_{Sglobal}$: Wärmefluss absorbierter Sonnenstrahlung in W/m^2
j_A: Wärmefluss infolge absorbierter atmosphärischer Gegenstrahlung in W/m^2
j_{UR}: Wärmefluss infolge terrestrischer Strahlung der Umgebung in W/m^2
j_O: Wärmefluss infolge Strahlungsemission der Oberfläche in W/m^2

Tabelle 2.2.: Emissionsvermögen ϵ von Baustoffen für langwellige und kurzwellige Strahlung [Fou98]

Material	**Emissionsvermögen** ϵ	
	Langwellige Strahlung T$\leq$ 200 °C	Kurzwellige Strahlung T$\approx$ 6000 °C
Schwarzer Körper	1,0	1,0
Aluminium (rau)	0,04 - 0,06	0,20 - 0,25
Aluminium (poliert)	0,07 - 0,09	0,30 - 0,35
Aluminium (Lack)	0,27 - 0,62	0,50
Asphalt	0,95	0,88
Beton (ungefärbt)	0,90	0,65
Eis	0,95 - 0,97	-
Gips	0,90	0,25
Glas	0,95 - 0,97	-
Holz (natur)	0,85 - 0,90	0,35
Lackfarbe (grün)	0,90	0,70 - 0,80
Lackfarbe (rot)	0,90	0,70 - 0,80
Lackfarbe (weiß)	0,90	0,30
Lackfarbe (schwarz)	0,90	0,90
Naturstein (weiß)	0,95	0,45
Papier (weiß)	0,90	0,30
Papier (schwarz)	0,95	0,95
Reif	0,96 - 0,98	0,01 - 0,05
Schiefer	0,92	0,90
Schnee	0,96 - 0,98	0,01 - 0,05
Stahl (poliert)	0,14 - 0,32	0,55 - 0,60
Stahl (oxidiert)	0,80 - 0,90	0,85 - 0,90
Stahl (verzinkt)	0,23 - 0,30	0,92
Wasser	0,95 - 0,97	-
Zement (weiß)	0,90	0,40
Ziegelstein (grau)	0,90	0,65
Ziegelstein (rot)	0,90	0,70
Ziegelstein (schwarz)	0,90	0,90

2.3. Mathematische Grundlagen der Signalverarbeitung

Jede Messung, egal mit welchem Verfahren, dient der Informationsbeschaffung über das zu untersuchende Objekt.
Die moderne aktive Thermografie als eine Methode der zerstörungsfreien Prüfung liefert eine große Menge Datenmaterial mit einer großen Anzahl von Einzelsignalen, die zunächst einmal technisch erfasst, gespeichert, bearbeitet, ausgewertet, beurteilt und vor allem dokumentiert werden müssen, was in einer den Anforderungen einer modernen Qualitätssicherung entsprechenden Art und Weise zu geschehen hat.
Die allgemeine Vorgehensweise, aber auch die notwendigen Prozesse und die verwendeten Begriffe entsprechen denen der allgemeinen Nachrichten- und Informationstechnik beziehungsweise sind aus dieser entlehnt und werden im Folgenden in aller Kürze in einer für die Thermografie relevanten Bandbreite dargestellt.

2.3.1. Systeme der Informationsübertragung

Ein Informationsaustausch kann als mehr oder weniger erfolgreiche Übertragung zwischen zwei oder mehr Teilnehmern definiert werden [Rea04]. Dabei durchläuft eine Information mehrere Stationen von der Informationsquelle (zum Beispiel ein Klang in Form einer mechanischen Schwingung) bis zur Informationssenke (zum Beispiel das menschliche Gehör). In der Informationstechnik werden Informationen in Form von Signalen übertragen, so dass man auch von einer Signalübertragung spricht. Zwis chen Informationsquelle und -senke wird also ein System von Sender, Kanal und Empfänger gesetzt (zum Beispiel Radiostation, Radiowellen und empfangenes Radio). Um aber zum Beispiel eine mechanische Schwingung (Klang) in ein elektrisches Signal (auch Nachrichtensignal) umzuwandeln, wird ein Quellenkodierer (beziehungsweise Wandler) dazwischengeschaltet (zum Beispiel ein Mikrofon). In ähnlicher Weise wird auf der Empfängerseite (Radio) ein Wandler oder Dekodierer verwendet (zum Beispiel Lautsprecher), der die Information wieder rücktransformiert (mechanische Schwingung zum Ohr des Hörers). Erst an diesem Punkt setzt die eigentliche Signalverarbeitung beziehungsweise Rücktransformation an. In Abbildung 2.7 ist das System der Datenübertragung auf die Thermografie angewendet worden.
In der Signalverarbeitung ist es unerlässlich das Spektrum (Frequenzumfang) eines Signals

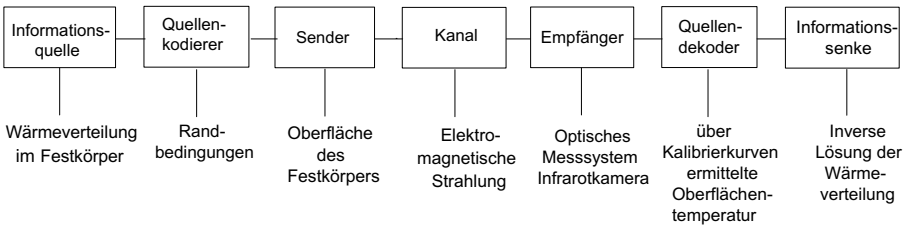


Abbildung 2.7.: Das System der Informationsübertragung nach Read [Rea04], angewendet auf Thermografiemessungen

zu kennen, um festzustellen, ob es zu dem eines Kanals passt, beziehungsweise wie es an die Bandbreite eines Kanals angepasst, also *transformiert* beziehungsweise *moduliert* werden muss (vergleiche Abbildung 2.7 und Kapitel 2.3.4). Zu diesem Zweck wird ein Zeitsignal in seine spektralen Anteile zerlegt beziehungsweise in den Frequenzraum transformiert (zum Beispiel mittels *Fourier-Transformation*). Ein weiterer Grund für die Anwendung der Fourier-Transformation ist, dass viele Zusammenhänge in der Signalverarbeitung im Frequenzbereich erheblich einfacher zu beschreiben sind [Gol].
Im folgenden Abschnitt wird eine kurze Einführung in die Grundlagen der Signalverarbeitung gegeben. Für nähere Informationen sei auf die verwendete und weiterführende Literatur verwiesen, vor allem aber auf [PFTV88].

2.3.2. Zeitkontinuierliche und zeitdiskrete Signale

Eine elektische Signalübertragung kann zeitlich kontinuierlich oder diskret erfolgen. Folgt das Signal g(t) der Informationsquelle kontinuierlich, spricht man von einem Analogsignal. Erfolgt die Informationsabfrage (*Abtasten*) zeitdiskret in gleichmäßigen zeitlichen Abständen mit der Periode T, spricht man von einem digitalen Signal mit der Abtastfrequenz $f = 1/T$ in Hz beziehungsweise 1/s (siehe Abbildung 2.8). Signale werden auch digitalisiert, zumeist in binärer Form, um sie durch Computer oder Mikroprozessoren mit Hilfe numerischer Methoden bearbeiten zu können.

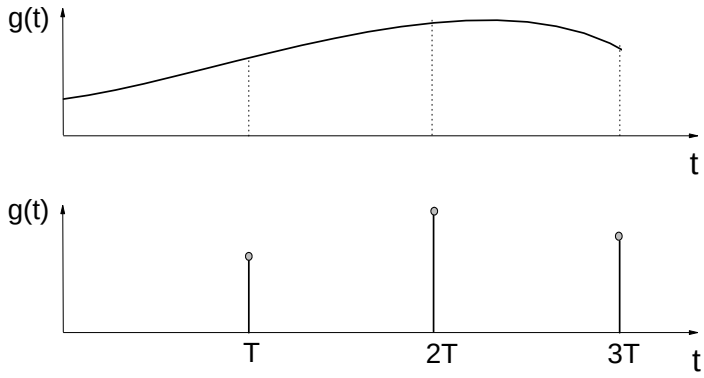


Abbildung 2.8.: Zeitkontinuierliches (oben) und zeitdiskretes Signal (unten)

Signale weisen oft komplizierte Verläufe auf. Periodische Signale lassen sich jedoch häufig hinreichend genau durch eine oder mehrere Sinus- beziehungsweise Kosinusfunktionen abbilden. Die allgemeine Form eines Sinussignals g(t) ist gegeben durch:

$$g(t) = A \cdot \sin(\omega \cdot t + \phi) \tag{2.36}$$

mit der Amplitude A, der Kreisfrequenz ω in rad/s und der Phasenverschiebung ϕ in rad. Für die Frequenz des Sinussignals ($f = 1/T$) gilt entsprechend $f = \omega/(2 \cdot \pi)$.

In Abbildung 2.9 ist die Sinusfunktion g(t) beispielhaft grafisch dargestellt und in Abbildung 2.10 die überlagerte Funktion $g(t) = g_a(t) + g_b(t)$ der Einzelsignale $g(t) = A \cdot \sin(\omega \cdot t + \phi_a)$ und $g_b(t) = B \cdot \sin(\omega \cdot t + \phi_b)$, wobei $T_b = 3 \cdot T_a = T(t)$.

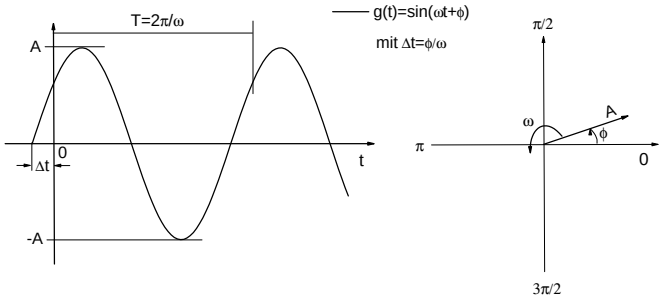


Abbildung 2.9.: Sinussignal g(t) als Kurvenverlauf (links) und als Rotationszeiger(rechts)

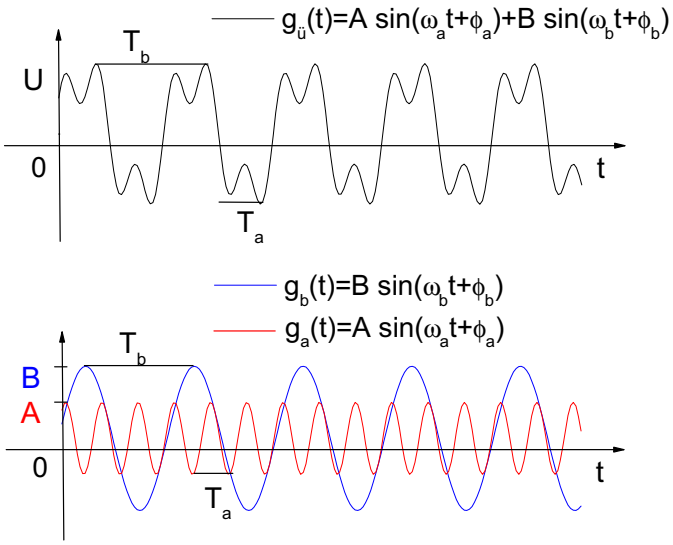


Abbildung 2.10.: Grafische Darstellung des überlagerten Signals g(t)

Ist f die Frequenz eines periodischen Signals, wird die Summe der in einem Signal enthaltenen periodischen Anteile als das Frequenzspektrum dieses Signals bezeichnet. Das Frequenzspektrum eines periodischen Signals kann über eine *Fourier-Reihe* dargestellt werden. Will man das Spektrum eines aperiodischen Signals bestimmen, eignet sich die *Fourier-Transformation* (und ist es möglich, ein Signal ohne *Modulation* in einen Kanal einzuspeisen, spricht man von *Basisbandbetrieb* [Rea04]).
Abbildung 2.11 zeigt die Funktion $g_1(t) = A \cdot \sin(\omega \cdot t + \phi)$ und $g_2(t) = A_2 \cdot \sin(\omega_a \cdot t + \phi_a) + B \cdot \sin(\omega_b \cdot t + \phi_b)$ im Frequenzbereich mit ihrem jeweiligen diskreten Spektrum. Die Phasenverschiebung spielt hier zunächst keine Rolle. Eine Besonderheit der Beziehung $f = 1/T$ liegt darin, dass im Zeitbereich kontinuierliche Signale im Frequenzbereich diskret sind und umgekehrt.

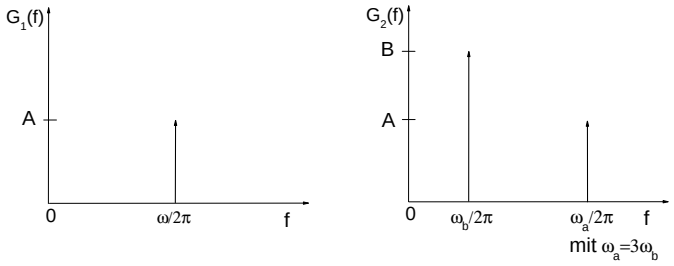


Abbildung 2.11.: Periodische Signale im Frequenzraum

Fourier-Reihe periodischer Signale

Signale sind oft beliebig kompliziert und selten so einfach wie in Abbildung 2.10, wo die Perioden der überlagerten Signale Vielfache voneinander sind. Ein periodisches Signal g(t) mit der Periode T und der Frequenz $f = 1/T$, wie das in Abbildung 2.12 dargestellte, lässt sich über eine Fourier-Reihe der folgenden Form ausdrücken:

$$g(t) = a_0 + \sum_{n=1}^{\infty} a_n \cdot \cos(n \cdot \omega \cdot t) + \sum_{n=1}^{\infty} b_n \cdot \sin(n \cdot \omega \cdot t) \tag{2.37}$$

wobei die Frequenz $f = \omega/(2 \cdot \pi)$ des ersten Koeffizientenpaares a_1, b_1 gleich der Frequenz des Gesamtsignals ist und *Grundfrequenz* f_0 der Fourier-Reihe genannt wird. a_0 ist der sogenannte *Gleichspannungsterm*, der Mittelwert des Signals. Die folgenden Komponenten haben die doppelte Frequenz und werden *zweite Harmonische* genannt und die darauffolgenden bei dreifacher Grundfrequenz *dritte Harmonische* usw.

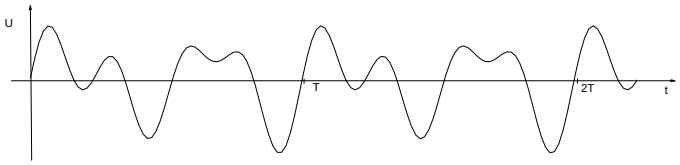


Abbildung 2.12.: Periodisches Signal

In Abbildung 2.13 ist der Zusammenhang von Amplitude, Phase und Fourier-Koeffizienten am Rotationszeiger dargestellt. Danach lässt sich Gleichung 2.37 weiter vereinfachen zu:

$$g(t) = c_0 + \sum_{n=1}^{\infty} c_n \cdot \sin(n \cdot \omega \cdot t + \phi_n) \tag{2.38}$$

wobei c_n die Amplitude:

$$c_n = \sqrt{a_n^2 + b_n^2} \tag{2.39}$$

und ϕ_n die Phase des Zeitsignals ist:

$$\phi_n = \arctan \frac{a_n}{b_n} \tag{2.40}$$

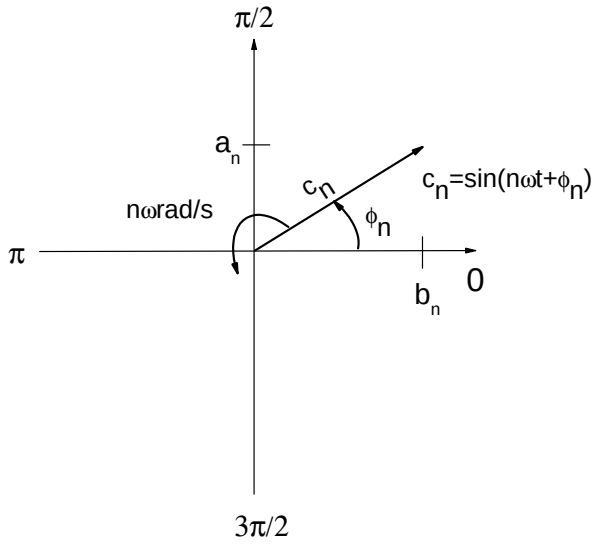


Abbildung 2.13.: Harmonische der Fourier-Reihe am Rotationszeiger

Die einzelnen Fourier-Koeffizienten lassen sich durch die folgenden Gleichungen bestimmen:

$$a_0 = c_0 = \frac{1}{T}\int_0^T g(t) \cdot dt \tag{2.41}$$

$$a_n = \frac{2}{T}\int_0^T g(t)\cos(n \cdot \omega \cdot t) \cdot dt \tag{2.42}$$

$$b_n = \frac{2}{T}\int_0^T g(t)\sin(n \cdot \omega \cdot t) \cdot dt \tag{2.43}$$

Durch die Integration über die Zeit und die Beziehung $f_0 = \omega/(2 \cdot \pi)$ wird aus der zeitabhängigen Funktion g(t) die frequenzabhängige Funktion G(f), die sich wie in Abbildung 2.11 als eine Reihe von diskreten Signalen im Frequenzraum darstellt [Rea04].

Fourier-Transformation aperiodischer Signale

Mit der im vorhergehenden Abschnitt beschriebenen Fourier-Reihe lässt sich das Spektrum eines kontinuierlichen periodischen Signals g(t) mit $-\infty \leq t \leq \infty$ beschreiben. Um das Spektrum eines aperiodischen Signals zu finden, eignet sich die *Fourier-Transformation*. Deren komplexe Form ist [Azi87]:

$$G(f) = \int_{-\infty}^{\infty} g(t) \cdot e^{-j2\pi f t} \cdot dt \tag{2.44}$$

und die trigonometrische Form der Fourier-Transformation ist:

$$G(f) = \int_{-\infty}^{\infty} g(t) \cdot (\cos 2\pi f t - j \sin 2\pi f t) \cdot dt \tag{2.45}$$

Für die *inverse Fourier Transformation* gilt:

$$g(t) = \int_{-\infty}^{\infty} G(f) \cdot e^{j2\pi f t} \cdot df \tag{2.46}$$

In Abbildung 2.14 ist links das Rechtecksignal g(t) und rechts die resultierende Fourier-Transformierte G(f) des Impulses dargestellt. Für g(t) gilt:

$$g(t) = \left\{ \begin{array}{cc} 0 & t < -T/2 \\ 1 & -T/2 \leq t \leq T/2 \\ 0 & t > T/2 \end{array} \right\} \tag{2.47}$$

Durch Einsetzen von Gleichung 7.15 in Gleichung 2.44 folgt die folgende Fourier-Transformation:

$$\begin{aligned} G(f) &= 1 \cdot \textstyle\int_{-T/2}^{T/2} e^{-j2\pi f t} \cdot dt \\ &= \tfrac{-1}{j2\pi f} \cdot \left[e^{-j2\pi f t} \right]_{-T/2}^{T/2} \\ &= \tfrac{2}{2\pi f} \cdot \left[\tfrac{e^{(j2\pi f T/2)} - e^{(-j2\pi f T/2)}}{2j} \right] \\ &= T \cdot \left[\tfrac{\sin(\pi f T)}{(\pi f T)} \right] \\ &= T \cdot sincfT \end{aligned} \tag{2.48}$$

mit $\sin\theta = \frac{e^{j\theta} - e^{-j\theta}}{2j}$ und $sinc(x) = \sin(x)/x$.

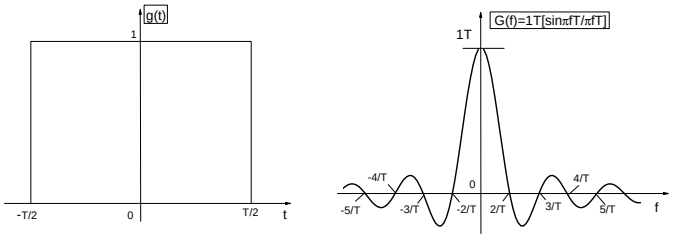
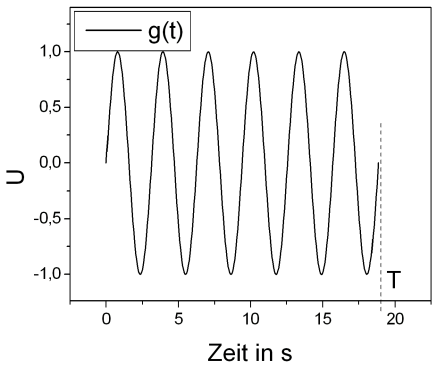
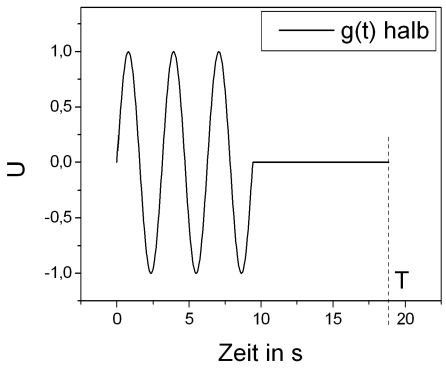


Abbildung 2.14.: Rechteckimpuls g(t) und seine Fourier-Transformierte G(f)

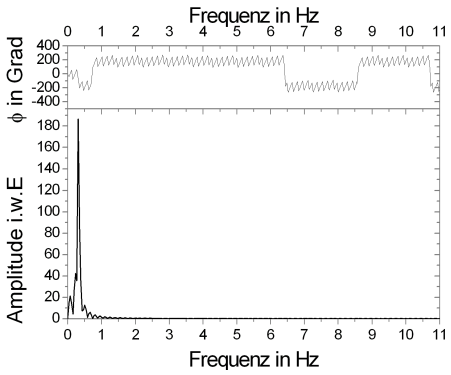
Ein für diese Arbeit bedeutsamer Zusammenhang bei sogenannten *zeitbegrenzten Signalen* besteht darin, dass nicht nur die Amplitude des Zeitsignals das Signal im Frequenzbereich beeinflusst, sondern auch der zeitliche Anteil, den ein Signal an der Aufnahmezeit T eines Signales hat, wie in Abbildung 2.15 am Ende dieses Kapitels vor allem bei den Amplituden deutlich wird. Dort verläuft das Signal $g_(t) = sin(t)$ einmal durchgängig über die Aufnahmezeit T (links oben) und einmal nur bis T/2 (rechts oben). Die zugehörigen Amplituden- und Phasenspektren im Frequenzbereich sind jeweils darunter dargestellt (aus Symmetriegründen nur bis $f_{max}/2$).



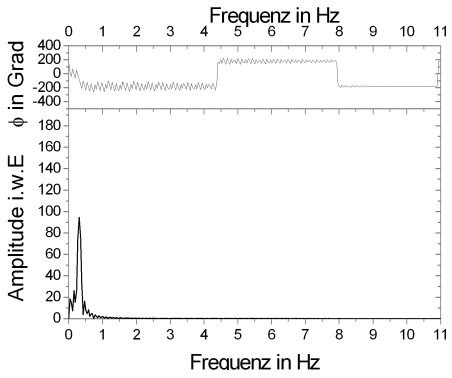
(a) Signal g(t)



(b) Signal g(t) bis T/2



(c) Phase und Amplitude von G(f)



(d) Phase und Amplitude von G(f)-halbe

Abbildung 2.15.: Zeitbegrenzte Signale im Zeitbereich (oben) und im Frequenzbereich nach FT (unten). Aus Symmetriegründen wurde im Frequenzbereich nur das halbe Amplituden- und Phasenspektrum dargestellt

2.3.3. Zeitdiskrete Signale im Frequenzraum

Die bisher dargestellten Zusammenhänge betrafen im Zeitbereich analoge Signale. Für periodische diskrete Signale ergibt sich quasi kein Unterschied. Die Transformation vom Zeit- in den Frequenzbereich kann über eine *Fourier-Reihen-Entwicklung* erfolgen (siehe Gleichungen 2.37 ff.). Auch das Vorgehen für aperiodische diskrete Signale entspricht dem für zeitkontinuierliche Signale, nur dass das Fourier-Integral durch eine Reihenentwicklung analog zur *Fourier-Reihe* ersetzt wird. Aus Gleichung 2.44 wird dann:

$$G(f) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} g(nT) \cdot e^{-j2\pi nTf} \tag{2.49}$$

wobei g(nT) eine reelle diskrete Funktion mit dem Zeitintervall T und dem Zähler n ist, dabei ist der Definitionsbereich unendlich ($-\infty \leq n \leq \infty$).

Und für die inverse Beziehung gilt [Azi87]:

$$g(nT) = \frac{1}{F} \int_0^F G(f) \cdot e^{j2\pi nTf} \cdot df \tag{2.50}$$

mit $F = 1/T$.

Diskrete Fourier-Transformation

Mit der diskreten Fourier-Transformation (DFT) werden Signale oder Signalabschnitte mit einem endlichen Definitionsbereich ($0 \leq n \leq N-1$) verarbeitet, in dem das Signal für ($-\infty \leq n \leq \infty$) periodisch fortgesetzt wird [Azi87] mit $N = T_0/T$, wobei T_0 die Periode und T das Abtastintervall des Signals ist. Die DFT hat die folgende Form:

$$G(n) = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} g(k) \cdot e^{-j2\pi nk/N}, n = 0, 1, ..., N-1 \tag{2.51}$$

mit der Zeitverknüpfung $t = kT$.
Für die inverse diskrete Fourier-Transformation gilt:

$$g(n) = \sum_{k=0}^{N-1} G(k) \cdot e^{j2\pi nk/N}, n = 0, 1, ..., N-1 \tag{2.52}$$

Schnelle Fourier-Transformation

Die Auswertung der N Koeffizienten einer DFT erfordert N^2 komplexe Multiplikationen. Um den Rechenaufwand zu minimieren, wurde die *schnelle Fourier-Transformation* (kurz FFT nach dem englischen Begriff *Fast Fourier-Transformation*) entwickelt. Für N Koeffizienten werden nur noch N/2·ld(N) komplexe Multiplikationen benötigt, was zum Beispiel im Fall von $N = 1024$ eine Reduzierung des Rechenaufwandes von über 99% bedeutet [Gol].
Die Ergebnisse einer FFT entsprechen dabei vollständig denen einer „normalen“ DFT [Azi87]. Eine Nebenbedingung der FFT liegt allerdings darin, dass N eine Potenz von 2 ist, was sich mit sogenanntem *Zero-Padding* erreichen lässt. Für nähere Informationen und die programmtechnische Umsetzung der FFT sei auf die Literatur und vor allem auf [PFTV88] verwiesen.

Zero-Padding

Beim *Zero-Padding* wird eine Folge mit N Werten durch Anfügen von Nullwerten bis zu einer Anzahl N' von Werten ergänzt, um für N' eine für die FFT notwendige Potenz von 2 zu erhalten.

$$g^{N'}(n) = \left\{ \begin{array}{cc} g^N(n) & \text{für } 0 \leq n \leq N-1 \\ 0 & \text{für } N < n \leq N'-1 \end{array} \right\} \; N' > N \tag{2.53}$$

Diese Erweiterung der N Werte durch N'-N Nullwerte im Zeitbereich stellt im Frequenzbereich lediglich eine Interpolation dar [Gol] und kann auch zur Glättung von Datensätzen verwendet werden.

Das Nyquist-Shannon'sche Abtasttheorem

Für die fehlerfreie Abtastung und Bearbeitung von Zeitdaten im Frequenzbereich ist die Einhaltung des sogenannten *Nyquist-Shannon'schen Abtasttheorems* erforderlich [Gol]. Es besagt,

1. dass oberhalb einer Grenzfrequenz alle Frequenzanteile null seien müssen (*Nyquist-Frequenz*) und

2. dass die Abtastfrequenz f mindestens doppelt so groß sein muss wie die zweifache Grenzfrequenz f_{max} des Signals:

$$f = \frac{1}{T} > 2f_{max} \tag{2.54}$$

Diese Punkte müssen auch bei der DFT eingehalten werden, um *Aliasing* zu vermeiden, das heißt das Auftreten von Frequenzen, die im Signal gar nicht enthalten sind.

2.3.4. Grundbegriffe der Signalverarbeitung

Weitere wichtige Grundbegriffe der Signalverarbeitung sind:

Rauschen

Rauschen ist ein anderer Begriff für ein ein Signal begleitendes Störsignal beziehungsweise Störsignale. Ein Maß für die Aussagekraft eines Signals ist sein Signal-zu-Rausch-Verhältnis (*signal to noise ratio*). Es ist der Quotient aus der mittleren Leistung des übertragenen Nutzsignals P_S (oder S) zur mittleren Leistung des Stör- beziehungsweise Rauschsignals P_N (oder N) und damit ein Maß für die Reinheit dieses Nutzsignals [Rea04]:

$$SNR = \frac{Signalleistung}{Rauschleistung} = \frac{P_S}{P_N} = \frac{S}{N} \tag{2.55}$$

Ursachen und Art des Rauschens sind vielfältig und hängen von der Art des Nutzsignals ab. In Kapitel 4.5.2 wird auf das Signal-zu-Rausch-Verhältnis bei Thermografiemessungen eingegangen.

Faltung

Die Faltung zweier Datensätze ist ein Vorgang, der sich für verschiedene Arten der Datenglättung, Signalbearbeitung oder Kantenerkennung einsetzen lässt [Ori]. Üblicherweise wird der Signal-Datensatz mit dem Antwort-Datensatz gefaltet, dabei entspricht eine Faltung $*$ im Frequenzbereich einer Multiplikation $\cdot$ im Zeitbereich und umgekehrt [Rea04]:

$$G(f) \cdot H(f) = g(t) * h(t) \tag{2.56}$$

und

$$g(t) \cdot h(t) = G(f) * H(f). \tag{2.57}$$

Eine Faltung ist definiert durch:

$$\begin{aligned} g(t) * h(t) &= \int_{-\infty}^{\infty} g(u) \cdot h(t-u) \cdot du \\ &= \int_{-\infty}^{\infty} g(t-u) \cdot h(u) \cdot du \end{aligned} \tag{2.58}$$

wobei u eine für die Faltung definierte Hilfsvariable ist.
Der Begriff Dekonvolution oder Entfaltung beschreibt die Umkehrung einer Faltung, um zum Beispiel die Unschärfe von Bildern rückgängig zu machen.

Filterung

Ein Filter ist ein System, das den *Durchlassbereich* eines Signals im Frequenzbereich einschränkt und alle Frequenzen, die nicht übertragen werden sollen, gezielt unterdrückt beziehungsweise *herausfiltert*. Man unterscheidet zwischen den folgenden Filtern:

- Hochpassfilter: Filtert Signale unter einer Sperrfrequenz f_e heraus.
- Tiefpassfilter: Filtert Signale über einer Sperrfrequenz f_e heraus.
- Bandpassfilter: Filtert Signale innerhalb eines Frequenzbandes f_e bis f_u heraus.
- Bandsperrfilter: Filtert Signale außerhalb eines Frequenzbandes f_e bis f_u heraus.

Modulation

Häufig entsprechen die Frequenzen eines Signals nicht denen des übertragenden Kanals. In diesen Fällen muss der Frequenzbereich des Signals in den des Kanals transformiert werden. Diese Transformation wird auch als *Modulation* bezeichnet. Man unterscheidet zwischen Amplituden- und Winkelmodulation, wobei letztere als Phasen- oder Frequenzmodulation durchgeführt werden kann [Rea04].

Kurvenanpassung

Lineare oder nichtlineare *Kurvenanpassung* (auch *Fitten*) ist ein häufig verwendetes Verfahren, um Daten an eine Funktion beziehungsweise einen Satz von Funktionen anzupassen, um das Signal-zu-Rausch-Verhältnis zu verbessern beziehungsweise für Daten eine mathematische Gesetzmäßigkeit zu definieren. Vorgänge in der Natur zum Beispiel können oft über eine beziehungsweise zwei E-Funktionen gefittet werden.

Lockin-Verstärkung

Eine Lockin-Verstärkung bezeichnet die Verstärkung eines zumeist schwachen Signals durch Modulierung mit einem Referenzsignal einer definierten Frequenz f und einer Phase ϕ. Es erfolgt eine Filterung anderer Frequenzen als der Modulationsfrequenz, einschließlich des Rauschens. Durch eine Lockin-Verstärkung kann so eine erhebliche Verbesserung des Signal-zu-Rausch-Verhältnisses erreicht werden.

3. Stand der Technik

Einführung

Das Prinzip der ZfP beruht im Wesentlichen darauf, mittels validierter physikalischer Methoden (vergleiche [TW06]) eine möglichst berührungslose Charakterisierung des zu untersuchenden Objektes auf Materialeigenschaften beziehungsweise auf die innere Struktur und mögliche Gefügestörungen hin zu untersuchen, ohne dass durch die Untersuchung selber das untersuchte Objekt geschädigt, dessen Nutzung beeinträchtigt oder sein Erscheinungsbild verändert wird.
Hierfür wurden in den letzten Jahren verschiedene Methoden entwickelt, die auf akustischen beziehungsweise mechanischen (zum Beispiel das Ultraschall- [MEW+04] [Has05] oder das Impact-Echo-Verfahren [Alg06]), elektromagnetischen (zum Beispiel Radar [KM04], Thermografie [Mai04][Wie06], elektrische Induktion [HS03], Potentialfeldmessung [Rau06], SIP [KN06]), optischen (zum Beispiel Laserscanner [HMWS06], Monitoring [HWNK03]) und/oder radiologischen Prinzipien [EZB05]) und vielen mehr (zum Beispiel LIBS [STWW06]) basieren. Sie stehen ergänzend oder alternativ neben den sogenannten zerstörungsarmen Methoden wie zum Beispiel der Bohrwiderstandsmessung, den zerstörenden Prüfverfahren und numerischen Simulationen (vergleiche Abbildung 3.1).

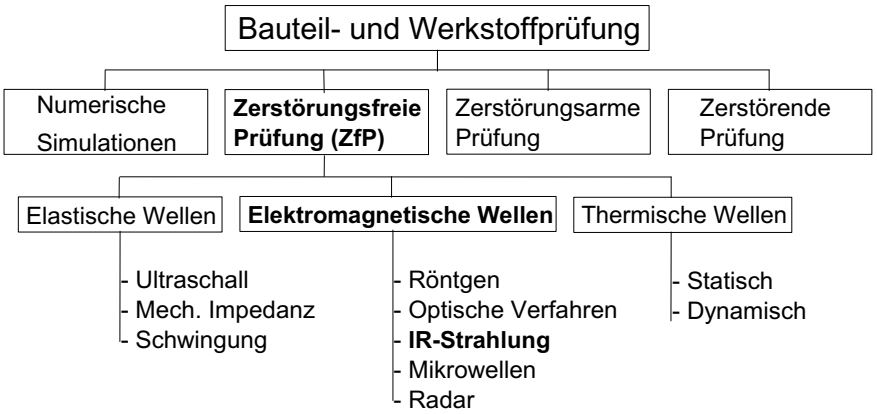


Abbildung 3.1.: Einordnung der ZfP-Verfahren nach [Wu96]

Die Prinzipien und die Anwendungen sind dabei vielfältig und häufig eignet sich auch die Kombination verschiedener Verfahren zur Diagnose eines Material-Bauteil-Komplexes [Str05], [KS06]. Die aktive Thermografie eignet sich gegenüber anderen ZfP-Verfahren besonders für die eher oberflächennahe Werkstoffprüfung, was sie zu einer guten Ergänzung von Radar und anderen Methoden werden lässt, die oft erst ab einer Tiefe von mehreren

Zentimetern zu verwertbaren Ergebnissen führen. Für die Vor- und Nachteile sowie die Grenzen der einzelnen Verfahren sei auf die zahlreiche Literatur und die entsprechenden Konferenzbände verwiesen.
Speziell für den Baubereich im deutschsprachigen Raum sind dies vor allem die von der DGZfP (*Deutsche Gesellschaft für zerstörungsfreie Prüfung e.V.*) und ihren Schwestergesellschaften in der Schweiz und Österreich organisierten Konferenzen (zum Beispiel die *Bauwerksdiagnose* [Wig06]), auf europäischer beziehungsweise internationaler Ebene zum Beispiel die *ECNDT* [ecn06], die *Structural Faults and Repair* [sfr06] und die *NDTCE* [ndt03] und andere, die turnusmäßig organisiert werden.
Ergänzt werden diese verfahrensübergreifenden Konferenzen durch verfahrensspezifische, die wiederum nicht auf den Bausektor beschränkt sind. Im Bereich der Thermografie findet alle zwei Jahre das von der DGZfP organisierte Thermografie-Kolloquium in Stuttgart [DGZfP05] im Wechsel mit der europäischen QIRT [qir06], der gleichfalls europäischen AITA [ait05] und der internationalen Thermosense [thech] statt.
Es gibt inzwischen auch eine Reihe von Hochschulen, Organisationen und Vereinen, die eine fachliche Ausbildung zum Thermografen anbieten (zum Beispiel IKP-Stuttgart, VATh oder DGZfP) und auch Leitlinien und Handbücher zu diesem Thema herausbringen (zum Beispiel [Sch04] oder das DGZfP-Merkblatt zu Thermografie [GA93]).
Zum Stand der Normung sei auf nationaler Ebene auf die DIN 52190 - Thermografische Prüfung, Teil 1 bis 3 [DIN 3], und die noch in der Entwurfsphase befindliche DIN 54162 - Qualifizierung und Zertifizierung von Personal im Verfahren Infrarot-Thermografie [DIN05] verwiesen. Auf europäischer Ebene liegen die DIN EN 473 - Zerstörungsfreie Prüfung, Qualifizierung und Zertifizierung von Personal der zerstörungsfreiem Prüfung [DIN06], Allgemeine Grundlagen sowie die DIN EN 13187 speziell für die Gebäudethermografie vor [din99].
Im folgenden Kapitel werden zunächst die gängigen Thermografie-Konzepte vorgestellt. Es folgen ein Kapitel über die die ZfP ergänzenden numerischen Methoden und ein kurzer Abschnitt über die speziellen Anforderungen der ZfPBau.

3.1. Thermografie-Konzepte

Die Infrarot-Thermografie (IR) wird seit Jahren zur zerstörungsfreien Werkstoffprüfung eingesetzt. Dabei wird zwischen *passiver* und *aktiver* Thermografie unterschieden.
Bei *passiver* Thermografie werden die „*für die Verteilung der Oberflächentemperatur relevanten Wärmequellen und Wärmeströme ... ausschließlich durch die Funktion des Bauteiles und seines natürlichen Umfeldes bestimmt*“ ([GA93], Seite 5), um zum Beispiel Wärmebrücken, Leckagen in Fußbodenheizungen oder Regionen mit erhöhter Feuchtigkeit mittels einer im infraroten Wellenlängenbereich sensitiven Kamera-Einheit zu detektieren (siehe Abbildung 3.2). Übliche Anwendungsgebiete liegen in der Anlagentechnik, der Bauphysik und der Denkmalpflege [HD04]. Es gilt zumeist die Fourier-Gleichung für den stationären Zustand (siehe Gleichung 2.12). Für eine ausführliche Darstellung der Möglichkeiten passiver

Tabelle 3.1.: Thermografie-Konzepte und ihre Anwendungsgebiete nach [Mal01a]

Konzept	**Anregung**	**Einsatzgebiete**	**Fehlerkennung**
passiv	keine	Industrielle Prozesskontrolle (z.B. Glas-, Metall- und Papierindustrie), Pipelines, Bauphysik etc.	Wärmebrücken, Leckagen, Feuchtigkeit, Minderdicken, Flüssigkeitspegel in Tanks etc.
Impuls-Thermografie	Puls	Flugzeuginspektion, Elektroindustrie, Schweißarbeiten, Kunstwerke, Bauwerke	Korrosion, Bewehrung, Risserkennung, Delaminationen, Impaktschäden, Geometrie von Fehlstellen, Anisotropie, thermodyn. Eigenschaften, Feuchtigkeit etc.
Lockin-Thermografie	moduliert	Flugzeuginspektion, Elektro- und Kunststoffindustrie, Schweißarbeiten,	Risserkennung, Delaminationen, Haftverbund, Impaktschäden, Anisotropie, thermodyn. Eigenschaften, Dickenbestimmung, Feuchtigkeit etc.
Puls-Phasen-Thermografie	Puls	siehe Impuls-Thermografie	siehe Impuls-Thermografie
Step-Heating-Thermografie	Stufenpuls	Papier, Speicherchips, Metallindustrie	Verklebungen und Schweißnähte etc.
Vibro-Thermografie	mechanisch	Fehleranalyse in Werkstoffprüfung	Risserkennung, Ermüdungen, Beschichtungen etc.

Thermografie, einschließlich Theorie, Anwendungsgebieten und der praktischen Umsetzung, sei auf [FR06] verwiesen.

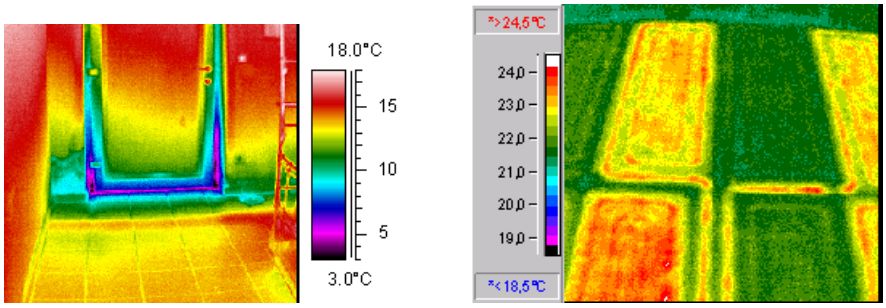
Um Inhomogenitäten oder Defekte in oberflächennahen Bereichen von Werkstoffen beziehungsweise Bauteilen zu detektieren, wurden in den letzten Jahren verschiedene *aktive Thermografie-Verfahren* entwickelt [Mal01a], die nach der Art ihrer Anregung unterschieden werden können (vergleiche Tabelle 3.1).

Allen aktiven Verfahren gemeinsam ist, dass zunächst ein Temperaturgradient erzeugt und der nachfolgende Ausgleichsprozess über einen relevanten Zeitraum beobachtet wird. Es gilt die Fourier-Gleichung für den instationären Zustand (siehe Gleichung 2.13).

Neben den in Tabelle 3.1 angegebenen Unterscheidungsmerkmalen lässt sich noch eine Einteilung in *qualitative* und *quantitative* Thermografie-Methoden vornehmen. Bei letzteren wird die Temperatur häufig nur gemessen, um über einen Temperaturkontrast eine Aussage über die Tiefenlage eines Defektes zu treffen oder eine Schichtdicke zu bestimmen. Meist sind die passiven Methoden rein *qualitativ* und die aktiven *qualitativ* und *quantitativ* anzuwenden.

Eine ausführlichere Beschreibung der für diese Arbeit relevanten Verfahren (IT, LT und vor

allem PPT) nach ihren Möglichkeiten *qualitative* und *quantitative* Ergebnisse zu erzielen, wird in den folgenden Kapiteln gegeben.



(a) Thermogramm eines feuchten Bereiches; Röllig, BAM

(b) Thermogramm einer Fußbodenheizung; Röllig, BAM

Abbildung 3.2.: Anwendungsbeispiele passiver Thermografie

3.1.1. Impuls-Thermografie

Die IT wird seit den 80er Jahren des 20. jahrhunderts zur Qualitätssicherung bei der Werkstoffprüfung metallischer und nichtmetallischer Mehrschichtsysteme eingesetzt, zum Beispiel [BR80], [Mal93], [AP96], [VKG97] oder [DSWB98], und hat in zunehmendem Maße national ([Hil80], [Sch82], [Wig91], [WAB+95], [HDEV01], [MBH+03], [AHM+04], [Bri05], [WAM+05a] etc.), aber auch international Eingang in das Bauwesen gefunden (zum Beispiel [LMPZ95], [WLPZ96], [VKG97], [GR01] etc.).
Die IT wird angewendet, um Hohlstellen und Inhomogenitäten in Bauteilen zu orten. Sie

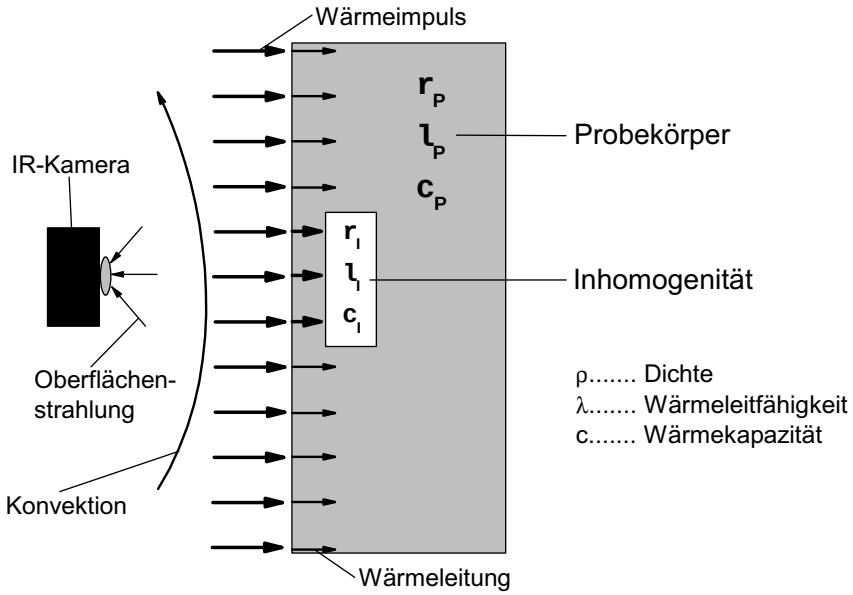


Abbildung 3.3.: Prinzip der IT

beruht auf dem Prinzip, das ein Bauteil durch einen inneren oder äußeren Energieimpuls in einen thermisch instationären Zustand gebracht wird (vergleiche Abbildung 3.3).
Zur Anregung wird bei der IT das untersuchte Objekt mit einem möglichst kurzzeitigen, aber energiereichen Puls angeregt (vergleiche Kapitel 7.1). Die thermische Anregung kann sowohl innerhalb des Bauteiles als auch außerhalb erfolgen und in einer Erwärmung oder einer Abkühlung resultieren. Die Wärmequellen für die IT sollten jedoch eine möglichst große, homogen verteilte Wärmestromdichte besitzen. In Abbildung 3.4 aus [AHM+04] sind die verschiedenen Anregungsarten der IT zusammengestellt.

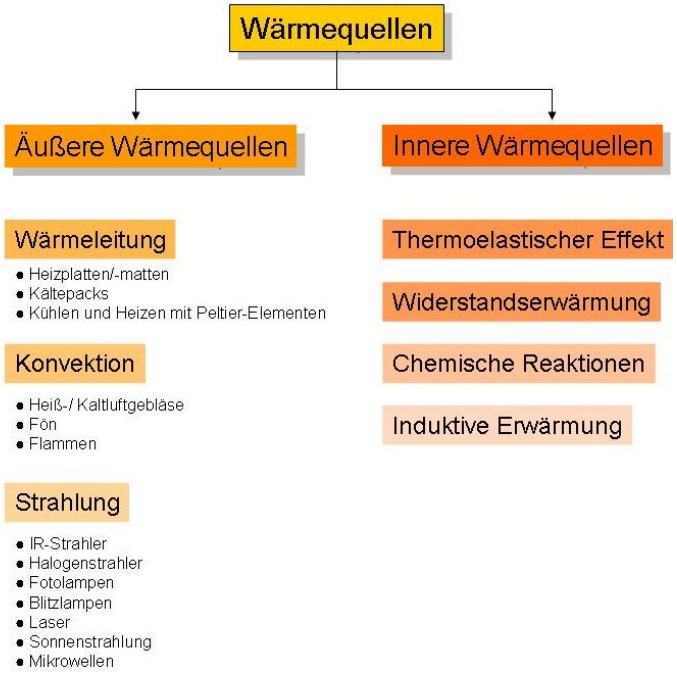


Abbildung 3.4.: Anregungsarten der IT, Rieck aus [AHM+04]

Der folgende Ausgleichsprozess, gegebenfalls auch der Anregungsvorgang, wird bildgebend mit einer Infrarotkamera aufgezeichnet. Im Falle einer äußeren Erwärmung staut sich die Wärme vor genügend oberflächennahen Fehlstellen, wenn sie einen geringeren Wärmeeindringkoeffizienten b in $J/(m^2 \cdot K \cdot \sqrt{s})$ (siehe 2.2.2) als das umgebende Material besitzen (siehe Abbildung 3.3). Es gilt:

$$b = \sqrt{\rho \cdot \lambda \cdot c_p} \tag{3.1}$$

mit der Wärmeleitfähigkeit λ in W/(m·K), der Dichte ρ in kg/m^3 und der spezifischen Wärmespeicherkapazität c_p in $J/(kg \cdot K)$. Je kleiner der Wärmeeindringkoeffizient b der Fehlstelle gegenüber dem des ungestörten Materials ist, desto besser bildet sich die Fehlstelle auf der Bauteiloberfläche als Bereich erhöhter Temperatur ab. Ist der Wärmeeindringkoeffizient der Fehlstelle größer als der des ungestörten Materials, so ist die Störung im Thermogramm als Bereich niedrigerer Temperatur zu erkennen. Ein Maß für die Nachweisbarkeit von Defekten ist der Temperaturkontrast C zu einem bestimmten Zeitpunkt t im Verhältnis zum Ausgangspunkt der Messung t_0. Nach [Mal93] gilt:

$$C(t) = \frac{T_i(t) - T_i(t_0)}{T_r(t) - T_r(t_0)} \tag{3.2}$$

wobei T die Temperatur in K ist und die Indizes i und r auf eine mutmaßliche Fehlstelle F beziehungsweise eine ungestörte Referenzstelle R hindeuten. Im Idealfall gilt $T_r(t_0) = T_i(t_0)$ vor Beginn der Erwärmung. Die anschließende Auswertung der gespeicherten Daten erfolgt mittels Differenzbildung der Transienten von gestörten und ungestörten Bereichen und dem Zeitpunkt des maximalen Temperaturkontrastes C_{max} (vergleiche Abbildung 3.5 und [Bri05]).

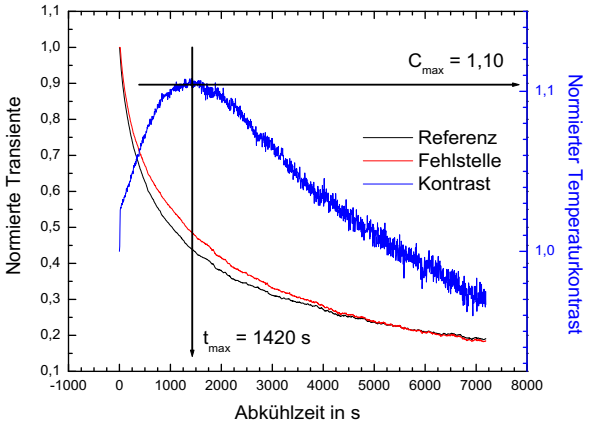


Abbildung 3.5.: Normierte Transienten von Bereichen oberhalb einer Fehlstelle (rot) und eines ungestörten Referenzbereiches (schwarz) sowie des normierten Temperaturkontrastes (blau) als Differenz dieser Transienten zur Ermittlung des maximalen Temperaturkontrastes [RAM05]

Quantitative Impuls-Thermografie

Tiefer liegende Hohlstellen werden zeitlich verzögert mit einem geringeren Temperaturkontrast C auf der Bauteiloberfläche sichtbar. Nach [Mal93] ist C umgekehrt proportional zur dritten Potenz der Fehlstellentiefe z in m:

$$C \propto 1/z^3 \tag{3.3}$$

und die Zeit t, die die Wärmefront zum Erreichen der Tiefe z eines Materials mit der Temperaturleitfähigkeit α benötigt, proportional zum Quadrat von z:

$$t \propto \frac{z^2}{\alpha} \tag{3.4}$$

Aus dem Zusammenhang zwischen maximalem Temperaturkontrast und Zeitpunkt schließlich lässt sich auf die Schichtdicke schließen [Bri05], [RAM05].

Auch für die Bestimmung von Materialkennwerten kann auf die IT zurückgegriffen werden. So nutzt ein häufig verwendeter Ansatz von 1961 (Parker et al. nach [Mal93]) für die Bestimmung der Temperaturleitfähigkeit α in Transmissionsanordnung den Zeitpunkt $t_{1/2}$, bei dem genau die Hälfte des maximalen Kontrastes C_{max} erreicht wird:

$$\alpha = \frac{1,38z^2}{\pi^2 \cdot t_{1/2}} \tag{3.5}$$

Für die sogenannte Echoanordnung, bei der nur eine Bauteilseite zugänglich ist beziehungsweise die Messung auf der Anregungsseite erfolgt, gilt entsprechend Gleichung 3.4 [OT04]:

$$t \propto \frac{z^2}{2\alpha} \tag{3.6}$$

Auch in der Echoanordnung kann die Temperaturleitfähigkit bestimmt werden. Hierfür wird allerdings nicht auf den Kontrast C, sondern auf die Abklingkurve in logarithmischer Darstellung zurückgegriffen. Der Zeitpunkt t*, zu dem die Abklingkurve horizontal wird, geht dafür in die folgende Gleichung ein (Delpech et al. 1990 nach [Mal93]):

$$\alpha = \frac{z^2}{\pi \cdot t*} \tag{3.7}$$

Die Schwierigkeiten einer quantitativen IT speziell im Bauwesen nach Erwärmung mit einem Rechteckimpuls unter wechselnden Randbedingungen wie Erwärmungszeit sowie Geometrie- und Materialparametern des untersuchten Bauteils sind ausführlich in [Bri05] beschrieben: „*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*“ ([Bri05], Seite 111).

3.1.2. Lockin-Thermografie

Wie die IT wird die LT angewendet, um Hohlstellen und Inhomogenitäten in Bauteilen zu orten. Bei der LT oder auch „phasenempfindlichen Modulationsthermografie“ [BWK92] werden kontinuierliche sinusförmige Signale einer definierten Frequenz zur Anregung verwendet und das so modulierte Antwortsignal mit einem Infrarotdetektor aufgezeichnet und bezüglich Zeitverzögerung (Phase) sowie die Amplitude im Frequenzbereich bezogen auf das Referenzsignal analysiert [Bus01]. In der LT erfolgt die Lockin-Technik über die digitale Fourier-Analyse von jeweils vier Messpunkten pro Periode für jedes Pixel des IR-Bildes; ein Lockin-Verstärker, wie in den Anfängen der Methode verwendet [BR80], ist nicht erforderlich [Wu96]. Nach Abbildung 3.6 bestimmen sich Phase ϕ und Amplitude A eines modulierten Signals durch:

$$\phi(x_1) = \arctan\left[\frac{S_1(x) - S_3(x)}{S_2(x) - S_4(x)}\right] \tag{3.8}$$

und

$$A(x_1) = \left\{ [S_1(x) + S_3(x)]^2 - [S_2(x) + S_4(x)]^2 \right\}^{1/2} \tag{3.9}$$

Von besonderem Interesse sind die Phasendaten, da sie von äußeren Störeinflüssen und Inhomogenitäten weitgehend unabhängig sind. Zudem liefern sie Informationen aus der bis zu zweifachen Tiefe von Temperatur- und Amplitudendaten [Wu96].

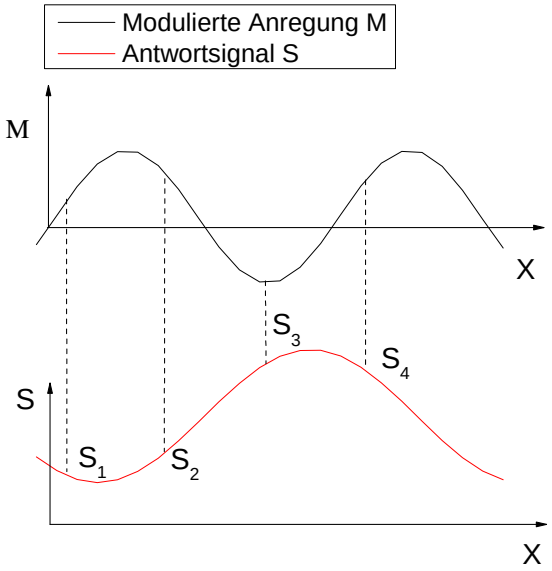


Abbildung 3.6.: Prinzip der Lockin-Thermografie nach [Wu96]

Quantitative Lockin-Thermografie

Der quantitative Nachweis bei der LT erfolgt über die Amplituden und die sogenannte thermische Eindringtiefe einer Wärmewelle μ. Sie ist definiert als die Strecke, auf der die Amplitude einer Wärmewelle auf e^{-1} ihres Anfangswertes abfällt [Wu96]:

$$\mu = \sqrt{\frac{2 \cdot \alpha}{\omega}} \tag{3.10}$$

mit der Kreisfrequenz $\omega = 2 \cdot \pi \cdot f$ in 1/s und der Temperaturleitfähigkeit α in m^2/s. f ist die Modulationsfrequenz. Über μ in m können auf diese Art direkt Informationen über Geometrie und Tiefenlage eines etwaig vorhandenen Defektes gewonnen werden.
Die Anregung kann nicht nur optisch-thermisch, sondern auch mechanisch oder elektromagnetisch erfolgen. Etabliert haben sich besonders die optisch angeregte und die ultraschallangeregte Lockin-Technik [Dil01] unter anderem zur Inspektion von CFK und GFK an Flugzeugteilen [ZDB00] beziehungsweise von Klebeverbindungen [HZD03]. Aber auch LT mittels Wirbelstromanregung beziehungsweise Induktion [RZB04] wird mit Erfolg eingesetzt.

Die LT eignet sich besonders für die ZfP an dünnen Beschichtungen, aber auch zu Untersuchungen an Kunstwerken oder im Bauwesen zur Ortung von Bereichen erhöhter Feuchtigkeit [Büs99]. Für übliche Baustoffe und Frequenzen im Bereich weniger Hertz ergeben sich Messtiefen von ca. 2 mm in Kunststoff, ca. 4 mm in CFK und ca. 10 mm in Metall [Uni].

3.1.3. Puls-Phasen-Thermografie

Die PPT wurde 1996 von Maldague und Marinetti als Verbindungsglied zwischen IT und LT eingeführt und sollte die Vorteile dieser beiden Verfahren vereinen [MM96]:

- IT: Schnelle Datenerfassung mit flexiblem Aufbau und mit hochenergetischem Puls für eine größere zu inspizierende Fläche

- LT: Bessere Tiefenauflösung, geringerer Einfluss von optischen und IR-Störeinflüssen, einfacher quantitativer Nachweis

Die PPT wendet entsprechend auf die nach dem Verfahren der IT (vergleiche Kapitel 3.1.1) gesammelten Daten die auch bei der LT verwendete Fourier-Transformation (FT) an, entweder in ihrer diskreten Form oder - bevorzugt, da schneller - als Fast Fourier-Transformation (FFT) (vergleiche Kapitel 2.3.3 und Abbildung 3.7). Die Ergebnisse der IT in der Zeit bleiben dabei vollständig erhalten und werden lediglich durch die Ergebnisse aus dem Frequenzraum ergänzt und vertieft.

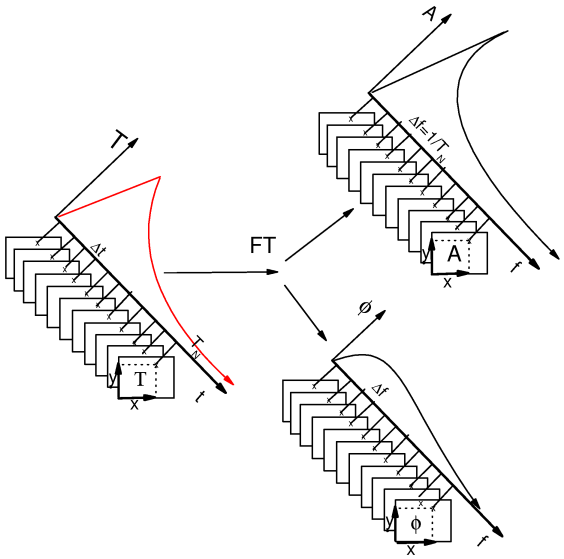


Abbildung 3.7.: Prinzip der PPT nach [VM00]

Mittels Fourier-Transformation nach Gleichung 2.51 der Transienten jedes Bildpunktes des Kamera-Arrays (vergleiche Gleichungen 3.12 und 3.13 [IC05])

$$G_n = \Delta t \sum_{k=0}^{N-1} g(k\Delta t) \cdot e^{-j2\pi nk/N} = \Re_n + \Im_n \tag{3.11}$$

mit dem Frequenzinkrement n, dem Abtastintervall Δt, dem Realteil $\Re_n$ und dem Imaginärteil $\Im_n$ der transformierten entstehen Amplituden- und Phasenverläufe (Gleichungen 3.12 und 3.13)

$$\phi_n = \arctan(\frac{\Im_n}{\Re_n}) \tag{3.12}$$

und

$$A_n = \sqrt{\Re_n^2 + \Im_n^2} \tag{3.13}$$

die analog zur LT ausgewertet werden können (vergleiche Kapitel 3.1.2). Dabei bestimmt das Abtastintervall Δt die maximale Frequenz des Spektrums $f_{max} = 1/2\Delta t$ (das Frequenzspektrum der Fourier-Transformation eines Zeitsignals ist symmetrisch, deswegen wird nur die Hälfte der Frequenzinkremente benötigt) und die Abtastzeit T die Frequenzauflösung (oder die Bandbreite jedes Kanals) $\Delta f = 1/T$, wobei die Anzahl der Frequenzinkremente N_f bei der Fast Fourier-Transformation durch *Zero-Padding* auf eine Potenz von 2 vergrößert wird (vergleiche Kapitel 2.3.3).

Quantitative PPT

Die bereits in [MM96] beschriebenen positiven Eigenschaften speziell der Phasenbilder mit maximalem Kontrast $|\Delta\phi_{max}|$ gegenüber der IT wurden im Laufe der Jahre durch zahlreiche Untersuchungen (zum Beispiel [MPWB99], [VM99], [Mal02] [VM00], [ICM04b] oder [AMR+04b] etc.) bestätigt.
Die Entwicklung einer quantitativen Methodik auf Grundlage der PPT erwies sich jedoch als echte Herausforderung. Nach Galmiche und Maldague liegen die offensichtlichen Schwierigkeiten einer quantitativen PPT in der bekannten Eigenschaft der Fourier-Transformation begründet, dass Zeitinformationen (die gleichgesetzt werden können mit Tiefeninformationen - vergleiche Kapitel 3.1.1) im Frequenzbereich verloren gehen, weswegen sie als Lösung des Problems eine Auswertung der Daten mit Wavelets vorschlagen [GM00]. Eine Vorgehensweise bei der jedoch ein aufwändiges weiterverarbeiten der Frequenzdaten erforderlich ist [IC05]. Vorhergehende indirekte Versuche das quantitative Problem der PPT zu lösen, beruhten auf der Auswertung der Phasen-Daten mit neuronalen Netzen [MLC98] und statistischen Methoden [VM00] mit bis zu 77 und 94 % Genauigkeit bei Aluminium [MG01] und waren noch aufwändiger in der Handhabung [IC05].
In weiteren Veröffentlichungen geben Galmiche, Vallerand und Maldague einen weiteren Grund für die Schwierigkeiten einer quantitativen PPT an. Er liegt in dem doppelten Weg eines Wärmestroms der in ein Prüfobjekt eindringt und vom Defekt wieder zurückgeworfen

wird, wodurch die Auflösung im Frequenzbereich uneindeutig wird ([GVM00] nach [MG01], vergleiche auch Kapitel 1). Es wurde weiter an einer Lösung gearbeitet.
Neuere quantitative Ansätze der Gruppe um Maldague [ICM04a] gründen schließlich auf den Konzepten der LT und der thermischen Eindringtiefe μ einer Welle beziehungsweise der mit μ zusammenhängenden sogenannten Blindfrequenz f_b, bei der ein Defekt auf den Phasenbildern gerade nicht mehr detektierbar ist [GM02]. Auch in der BAM und vom Verfasser wurde dieser Ansatz verfolgt [WWB+03], [WAM+05b], [RAM05]. Vergleichbar der Temperaturkontrastkurve (vergleiche Abbildung 3.5) bei der IT wird eine Phasenkontrastkurve gebildet. Der Schnittpunkt mit der Frequenzachse wird als f_b bezeichnet (siehe Abbildung 3.8).

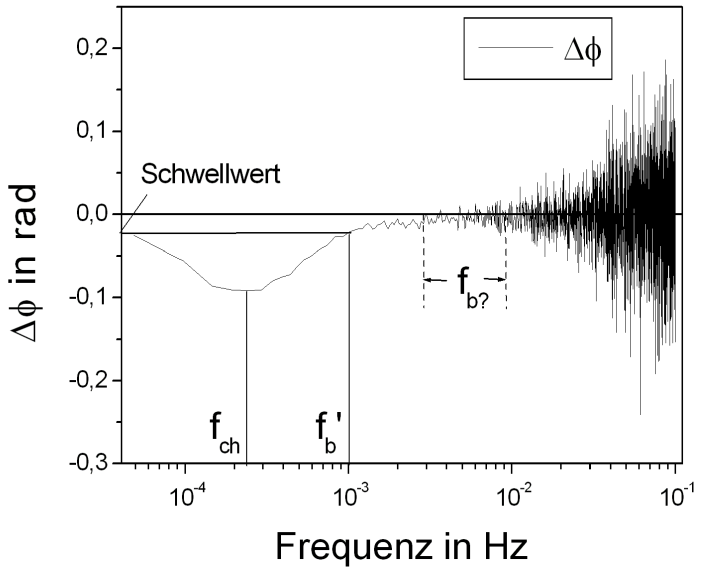


Abbildung 3.8.: Exemplarische Phasenkontrastkurve mit f_b, f_b' und f_{ch}

Mit der thermischen Eindringtiefe μ und der Temperaturleitfähigkeit α_r sowie der Phase ϕ_r des die Fehlstelle umgebenden Materials (Referenz) geben Ibarra-Castanedo und Maldague [ICM04b] folgende Definition für die Tiefe eines Defektes z in m zu f_b in Hz:

$$z \propto \phi_r \sqrt{\frac{\alpha_r}{\pi \cdot f_b}} \tag{3.14}$$

Und in seiner kürzlich erschienenen Dissertationsschrift schließlich gibt Ibarra-Castanedo folgende Gleichung zum Bestimmen der Tiefenlage einer Fehlstelle an [IC05]:

$$z = C_1 \cdot \sqrt{\frac{\alpha_r}{\pi \cdot f_b}} \tag{3.15}$$

mit dem vom Material abhängigen Regressionsfaktor C_1, den er für Stahl-, CFK- und GFK-Bauteile bestimmt ($C_{1,Stahl} = 1,72$, $C_{1,CFK} = 1,73$ sowie $C_{1,GFK} = 2,26$).
Für Daten schlechter Qualität, für die sich f_b nicht eindeutig bestimmen lässt, liefert er einen alternativen quantitativen Ansatz zur Bestimmung der Tiefe eines Defektes [IC05].

Dieser Ansatz beruht auf dem Zusammenhang der Phase ϕ mit dem Quotienten aus der Tiefenlage z eines Defektes und der thermischen Eindringtiefe des umgebenden Materials μ:

$$\phi = \frac{z}{\mu} \tag{3.16}$$

Als Eingangswerte definiert [IC05] die von ihm eingeführte *scheinbare Blindfrequenz* f_b', die minimale Phase des Defektes ϕ_{min} und den Regressionsfaktor C_1' (siehe Abbildung 3.8):

$$z = C_1' \cdot \phi_{min} \cdot \sqrt{\frac{\alpha_r}{\pi \cdot f_b'}} = C_1' \cdot \phi_{min} \cdot \mu' \tag{3.17}$$

mit der *scheinbaren thermischen Eindringtiefe* μ'. $f_{b'}$ wird bestimmt, indem man die Phasendifferenz von Referenz- und Fehlstellenbereich in Abhängigkeit von der Frequenz berechnet und beim Phasenkontrastminimum (Schwellwert oder englisch *threshold*) eine horizontale Gerade zeichnet. Diejenige Frequenz, die an der Schnittstelle zwischen Differenzkurve und Gerade liegt, ist die *scheinbare Blindfrequenz* f_b'.
Beide dargestellten Ansätze wurden erfolgreich an relativ dünnen Strukturen mit wenigen Millimetern Dicke unter Laborbedingungen erprobt.
Wie sich im Laufe der im Rahmen dieser Arbeit durchgeführten Untersuchungen herausstellte, funktionieren diese Ansätze selbst für die unter Laborbedingungen gewonnenen Daten unter den im Bauwesen herrschenden Randbedingungen, wie große Bauteildicken sowie lange Erwärmungs- und Reaktionszeiten, häufig nicht und wenn, dann unzuverlässig. Aus diesem Grund musste eine alternativer Ansatz entwickelt werden. Von diesem alternativen Ansatz für die ZfPBau auf Grundlage der charakteristischen Frequenz f_{ch} (vergleiche Abbildung 3.8) handeln Kapitel 6 ff. dieser Arbeit.

3.1.4. Auswahl eines geeigneten aktiven Thermografie-Konzeptes für ZfPBau

Für die aktive Thermografie im Bauwesen ergeben sich noch folgende zusätzliche Anforderungen, die nicht von allen in Kapitel 3.1 dargestellten Verfahren im gleichen Maße erfüllt werden [AHM+04]:

1. Viele der in in der Baupraxis verwendeten Baustoffe, wie zum Beispiel die in dieser Arbeit untersuchten Betone und Gipsputze, haben geringe Temperaturleitfähigkeiten (zum Beispiel Beton $\alpha_B = 8,75 \times 10^{-7}$ m^2/s oder Gipsputz $\alpha_{Gp} = 2,917 \times 10^{-7}$ m^2/s gegenüber Stahl $\alpha_S = 1,91 \times 10^{-5}$ m^2/s mit $\alpha = \lambda/(\rho \cdot c_p)$ nach Gleichung 7.16 sowie [din02] und [VG02]). Das führt zu längeren Erwärmungs- und Beobachtungszeiten infolge der langsamen Reaktion auf Temperaturänderungen bis zum Erreichen eines erneuten Gleichgewichtszustandes.

2. Bauwerke sind häufig schwer zugänglich.

3. Bauwerke sind ständig wechselnden Umweltbedingungen ausgesetzt, die einen starken Einfluss auf die Durchführung und Ergebnisse von Thermografiemessungen haben

können und häufig zu einer schlechteren Nachweisbarkeit von Defekten beziehungsweise einem sinkenden Signal-zu-Rausch-Abstand (SNR) führen sowie einer erschwerten quantitativen Auswertbarkeit der Daten (vergleiche Kapitel 4.5 beziehungsweise 4.5.2).

4. Vorhandene inhomogene Bauteiloberflächen führen gleichfalls zu einer ungleichmäßigen Erwärmung der Oberfläche und variierender Emissivität und dadurch ebenso zu einem sinkenden SNR.

Diese Überlegungen führten zur Entwicklung des im Kapitel 4 dargestellten aktiven Thermogra-fie-Konzeptes für die ZfP im Bauwesen in TUB und BAM. Es basiert auf den Prinzipien der IT[1] im Zeitbereich, wirksam für die Punkte 1 und 2 und der PPT[2] im Frequenzbereich, wirksam für die Punkte 3 und 4 in obiger Aufzählung.
Ergänzt wird das Thermografie-Konzept durch numerische Simulationsrechnungen basierend auf Prinzipien der Finiten Differenzen und der Finiten Elemente - vergleiche hierzu das folgende Kapitel 3.2 sowie [HSRW01], [BMRW02], [HRWS05], [MAR+05b]. Speziell in der TU kam die FEM zur Anwendung ([AHM+04], [WAM+05a]) und in der BAM die FDM [Bri05]. Im Rahmen dieser Dissertation kam überwiegend die FEM zum Einsatz (vergleiche Kapitel 3.2.2).

3.2. Numerische Methoden zum Lösen der Bilanzgleichung für den Wärmefluss

Physikalische Transportvorgänge können über partielle Differentialgleichungen beschrieben werden. Doch nur wenige Typen von Differentialgleichungen lassen sich analytisch lösen, oft können sie nur mit numerischen Methoden approximiert werden. Heutzutage sind numerische Verfahren zum Lösen partieller Differentialgleichungen in jedem technisch-naturwissenschaftlichen Bereich präsent und Alltagswerkzeug. Die gebräuchlichsten numerischen Verfahren zum Lösen der partiellen Differentialgleichung in der Strömungsmechanik sind zurzeit [Gru96]:

- Methode der Finiten Differenzen (FDM - *finite difference method*) [FB94], [Gru96], [Mar02], [Bri05]
- Methode der Finiten Elemente (FEM -*finite element method*) [Bat82],[Zie84]
- Methode der Finiten Volumen (FVM -*finite volume method*) [Gru96], [flu]

Eine weitere hier zu nennende Methode ist die vor allem aus der Elektronik bekannte Netzwerktheorie (*network engineering*), bei der verschiedene Bauelemente mit physikalischen Eigenschaften belegt und zu einem geschlossenen Netzwerk verknüpft werden [Cha74]. Wenn die Randbedingungen und physikalischen Eigenschaften der einzelnen Bauelemente bekannt sind, ist dieses eindeutig lösbar. Auf die Netzwerktheorie wird hier nicht näher

[1] beziehungsweise Rechteckimpuls-Thermografie (RIT), vergleiche Kapitel 1 und 6 ff.
[2] beziehungsweise Rechteckimpuls-Spektral-Thermografie (RST), vergleiche Kapitel 1 und 6 ff.

eingegangen, es sei auf die Literatur verwiesen [Cha74], [Tul04].
Mit allen genannten Methoden kann ein kontinuierliches physikalisches Problem in ein endliches diskretisiert, mit den dazugehörigen geometrischen Randbedingungen modelliert und schließlich als stationärer beziehungsweise instationärer Prozess gelöst beziehungsweise simuliert werden. Grundsätzlich kann eine mathematisch-numerische Modellierung zum besseren Verständnis physikalischer Phänomene dienen, sowie deren Veranschaulichung erleichtern. Auch zur Lösung inverser Probleme lassen sich Simulationsverfahren einsetzen[3].

3.2.1. Methode der Finiten Differenzen für Abkühlungsvorgänge

Die FDM ist die klassische numerische Methode zum Lösen partiellenr Differentialgleichungen und geht bis auf *Euler* zurück [Mar97]. In der *Fourier'schen Differentialgleichung* (Gleichungen 2.9 ff.) werden die Ableitungen durch Differenzenquotienten ersetzt. Dadurch wird die Differentialgleichung in eine Differenzengleichung umgewandelt, die eindeutig lösbar ist, wenn die Randbedingungen bekannt sind. Man unterscheidet zwischen dem *expliziten* beziehungsweise *aufsteigenden*, dem *impliziten* beziehungsweise *absteigenden Differenzenverfahren* (FDV) [Gru96],[Mar02].

Explizites Differenzenverfahren

Ausgehend von der dreidimensionalen Differenzengleichung

$$\frac{\partial \vartheta}{\partial t} = \alpha \cdot \left(\frac{\partial^2 \vartheta}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \vartheta}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \vartheta}{\partial z^2} \right) \tag{3.18}$$

mit der Temperaturleitfähigkeit $\alpha = \lambda/(\rho \cdot c)$ in m^2/s sowie den Ortsvariablen x, y und z ist die Temperatur für den nächsten Zeitschritt über einen Taylor'schen Polynom in einem diskreten Punkt in einem Gitternetz gegeben durch [Bri05]:

$$\vartheta_{x,y,z,t+\Delta t} = \vartheta_{x,y,z,t} + \alpha \cdot \Delta t \cdot \left(\frac{\vartheta_{x+\Delta x,y,z,t} - 2 \cdot \vartheta_{x,y,z,t} + \vartheta_{x-\Delta x,y,z,t}}{\Delta x^2} \right)$$
$$+\alpha \cdot \Delta t \cdot \left(\frac{\vartheta_{x,y\Delta y,z,t} - 2 \cdot \vartheta_{x,y,z,t} + \vartheta_{x,y-\Delta y,z,t}}{\Delta y^2} + \frac{\vartheta_{x,y,z\Delta z,t} - 2 \cdot \vartheta_{x,y,z,t} + \vartheta_{x,y,z-\Delta x,t}}{\Delta z^2} \right) \tag{3.19}$$

[3] Es sei darauf hingewiesen, dass im Vorfeld einer zerstörungsfreien Prüfung (ZfP) der Einsatz numerischer Methoden zur Simulation eines Prüfvorganges zur Optimierung einer Prüfanordnung verwendet werden kann. Für den speziellen Fall der Verwendung aktiver Thermografie in der ZfP kann die Möglichkeit einer vorhergehenden Strukturanalyse des Systems unter Belastung (künstliche Energiezu- beziehungsweise -abfuhr) von Vorteil sein, um die Verträglichkeit des erwärmten Materials mit der vorgesehenen Erwärmung abzuschätzen. Mögliche Anwendungsgebiete hierfür wären zum Beispiel Untersuchungen von historischen Reliefs oder von mit Putz beschichteten Systemen, um eine eventuelle Gefügeschädigung des Materials ausschließen zu können.
Zum beispielhaften Vorgehen für diesen Fall, unter Ausnutzung der Sonne als Energiequelle, siehe [AK05] und Kapitel 10.4.

mit dem Fehler F aus den Restgliedern des Taylor-Polynoms:

$$\begin{aligned} F = \frac{\partial^2 \vartheta_{x,y,z,\delta_t \cdot t}}{\partial t^2} \cdot \frac{\Delta t}{2} - \alpha^2 \cdot \frac{\partial^4 \vartheta_{\delta_x \cdot x,y,z,t}}{\partial x^4} \cdot \frac{\Delta x^2}{12} \\ -\alpha^2 \cdot \frac{\partial^4 \vartheta_{x,\delta_y \cdot y,z,t}}{\partial y^4} \cdot \frac{\Delta y^2}{12} - \alpha^2 \cdot \frac{\partial^4 \vartheta_{x,y,\delta_z \cdot z,t}}{\partial z^4} \cdot \frac{\Delta z^2}{12} \end{aligned} \tag{3.20}$$

wobei δ_t, δ_t , $\delta_x, \delta_y, \delta_z \in (0, 1)$ [FB94].
Bei dieser auch als aufsteigendes Differenzenverfahren bekannten Methode muss die folgende Stabilitätsbedingung eingehalten werden:

$$\alpha \cdot \frac{\Delta t}{\Delta x^2} \leq \frac{1}{6} \tag{3.21}$$

und analog für die y- und die z-Richtung.
Eine weitere Einschränkung des expliziten Differenzenverfahrens ist, dass die Netzabstände für alle drei Richtungen jeweils konstant sein müssen (siehe auch [Bri05]).
Die große Stärke dieser Methode liegt darin, dass sie relativ leicht zu programmieren ist und der Rechenaufwand minimiert ist.

Implizite Differenzenverfahren

Die auch als absteigende Differenzenverfahren bekannten impliziten Differenzenverfahren kommen ohne Stabilitätsbedingung aus, indem die Ortsableitungen nicht im i-ten, sondern im i+1-ten Zeitschritt durch Differenzenquotienten ersetzt werden. Sie sind aber wesentlich aufwändiger zu programmieren [Mar02].

Crank-Nicholson-Differenzenverfahren

Nur ein wenig aufwändiger und dafür wesentlich genauer ist die bereits 1947 von Crank und Nicholson entwickelte Differenzenmethode [Mar02]. Sie wird auch gemitteltes Differenzenverfahren genannt, da hier das aufsteigende im i-ten und das absteigende Differenzenverfahren im i+1-ten Zeitschritt gemittelt werden, was für den eindimensionalen Fall zu Gleichung 3.22 führt [FB94]:

$$\begin{aligned} \vartheta_{x,y,z,t+\Delta t} = \vartheta_{x,y,z,t} + \frac{\alpha \cdot \Delta t}{2} \cdot \left(\frac{\vartheta_{x+\Delta x,y,z,t} - 2 \cdot \vartheta_{x,y,z,t} + \vartheta_{x-\Delta x,y,z,t}}{\Delta x^2} \right) \\ + \frac{\alpha \cdot \Delta t}{2} \cdot \left(\frac{\vartheta_{x+\Delta x,y,z,t+\Delta t} - 2 \cdot \vartheta_{x,y,z,t+\Delta t} + \vartheta_{x-\Delta x,y,z,t+\Delta t}}{\Delta x^2} \right) \end{aligned} \tag{3.22}$$

Entsprechend aufwändiger ist die dreidimensionale Funktion und deren Lösungsalgorithmus (vergleiche zum Beispiel [FB94], [Gru96] und [Mar02]).

3.2.2. Methode der Finiten Elemente

Die FEM wurde in den 50er Jahren des 20. Jahrhunderts für die Problemlösungen der Strukturmechanik entwickelt (siehe zum Beispiel [Bat82], [Zie84] und [Meh95]). Ein zu untersuchendes Lösungsgebiet (zum Beispiel ein Körper) wird durch eine endliche (finite) Anzahl von Elementen idealisiert. Die Elemente bilden zusammen ein FE-Netz, wobei sich die Kanten beziehungsweise Flächen von angrenzenden Elementen die Elementknoten teilen. Die Kanten selber können einen linearen oder einen höherwertigen Ansatz haben. Dabei sind Größe und Form der Elemente innerhalb bestimmter Grenzen variabel, wodurch sich, anders als bei der FDM, beliebige Geometrien abbilden lassen. Die Temperatur jedes Elementes wird durch seine gewichteten Elementknotentemperaturen abgebildet, aus denen über die numerische Integralform der *Fourier'schen Differentialgleichungen* (siehe Gleichungen 2.9 ff.) die Temperaturgradienten und der Wärmestrom in jedem Element über die Lösung eines numerischen Gleichungssystems ermittelt werden können. Die allgemeine stationäre Form der Wärmestromgleichung in Matrizenschreibweise hat die allgemeine Form:

$$[K] \times \{\vartheta\} = [Q] \tag{3.23}$$

Für nichtstationäre Wärmeströme gilt:

$$[K] \times \{\vartheta\} + [C] \times \{\vartheta\} = [Q] \tag{3.24}$$

wobei K die Wärmeleitfähigkeitsmatrix, C die spezifische Wärmekapazitätsmatrix, ϑ der Knotentemperaturvektor und Q die Wärmestrommatrix ist [GM01]. Voraussetzung für die Lösbarkeit der Gleichungssysteme ist, dass die Materialparameter in allen Elementen und die Randbedingungen bekannt sind, bei stationären Problemen T und Q am Rand, bei instationären Problemen zusätzlich die Temperaturverteilung zum Zeitpunkt $t = 0$ s.
Die Vorgehensweise einer FE-Berechnung lässt sich nach [GM01] in die sechs folgenden Arbeitsschritte unterteilen:

1. Idealisierung: Wahl des Ansatzes und des Elementtyps
2. Diskretisierung: Aufbau der Geometrie mit zugehörigen Materialeigenschaften und Randbedingungen, zum Beispiel der Ausgangstemperatur bei instationären Prozessen, und anschließende Netzbildung (*meshing*)
3. Aufstellen des Gleichungssystems: Die Elementsteifigkeitsmatrizen und die Gesamtleitfähigkeitsmatrix werden aufgebaut.
4. Lösen: Lösen des Gleichungssystems und Bestimmen der Knotentemperaturen mit direkten (unter anderem Gauß'sches Elaminationsverfahren und Cholesky-Verfahren [Pah91]) oder iterativen Lösungsverfahren (unter anderem Gauß-Seidel-, Jakobi-Konjugate-Gradientverfahren [GM01])
5. Rückrechnung: Bestimmen der Temperaturgradienten und der Wämestromdichten je Element
6. Postprocessing: Auswertung der Ergebnisse und Kontrolle der Ergebnisse

Die dargestellte Vorgehensweise gilt speziell für die Ansys-Software, kann aber beispielhaft für andere FE-Methoden angenommen werden.
Die Vorteile der FEM gegenüber der FDM liegen in erster Linie in den Möglichkeiten der flexiblen Geometrieelementierung der FEM. Auch besteht die Möglichkeit von *Multiphysikanwendungen*[4], sprich eine Strukturanalyse der Geometrie auf etwaige Schädigungen durchführen zu können, nachdem eine Wärmestromanalyse vorangegangen ist (siehe zum Beispiel Kapitel 10.4). Die Lösung der Matrizen erfolgt vergleichbar dem oben dargestellten Gleichungssystem, allerdings mit einer Elementsteifigkeitsmatrix E (ersetzt K) und einem Dehnungsvektor ϵ (ersetzt ϑ (vergleiche [Meh95] sowie[GAP05]). Aus diesen Gründen kam im Rahmen dieser Arbeit die FE-Methode zur Verwendung.
Zur Anwendung kamen die kommerziellen Softwarepakete Diana (vergleiche [GAP05] sowie [Arn03]), Ansys (betreute Diplomarbeit der TUB [Mau07]) und Femlab (betreutes Praktikum an der BAM [Cue04]).

3.2.3. Methode der Finiten Volumen

In der aus der FEM entwickelten Methode der Finiten Volumen werden die für ein räumliches Kontrollvolumen formulierten Erhaltungssätze (*Navier-Stokes-Gleichungen*) näherungsweise für die einzelnen Zellen gelöst [Mar97]. Dabei ist die Wahl der Zellengeometrie und Größe ebenso frei wie bei der FEM die Elementwahl. Die FVM wurde für Probleme der Strömungsmechanik entwickelt und eignet sich entsprechend für die Modellierung konvektiver Prozesse der Wärmeübertragung (siehe zum Beispiel [flu]). Die Wechselwirkung von Fluid und durchströmtem Raum beziehungsweise zwischen Fluid und Festkörper stellt für die FDV allerdings ein Problem dar [Gru96], das zurzeit noch über die Kombination von FVM- und FEM-Programmen gelöst wird. Für Fragestellungen der ZfP im Wechselspiel zwischen Anregung (in unserem Fall durch Wärmeenergie) und Festkörper eignet sich die FVM nur sehr begrenzt, so dass sich entweder die leicht selbst zu generierende FDM für einfache oder umfangreiche FEM-Pakete mit Multiphysikanwendungen für geometrisch und physikalisch anspruchsvolle Fragestellungen anbieten.
Bahnbrechende Weiterentwicklungen der FVM für die akustische und elektromagnetische Wellenausbreitung in Festkörpern existieren in der *Finite Integrationstechnik* (FIT) (Weiland 1977 nach [Mar97]) beziehungsweise in der von der Gruppe um Langenberg entwickelten *Elastodynamischen Finiten Integrationstechnik* (EFIT) [Lan00].

[4] Eine Bezeichnung von Femlab, die hier übernommen wird.

4. Konzept der aktiven Thermografie in der ZfPBau

Einführung

In den letzten Jahren haben unterschiedliche Gruppen innerhalb Europas und den USA ihr eigenes aktives Thermografie-Konzept für das Bauwesen entwickelt (zum Beispiel Grinzato et al. in Italien [GR01], Kaupinnen et al. in Finnland [VKG97] oder Lüthi et al. in der Schweiz [LMPZ95]). Anwendungen umfassen das Orten von Verankerungselementen in Fassaden [BMS01], die Prüfung von Fahrbahnen und Abdichtungssystemen [Sti01] und Anwendungen in der geophysikalischen Naherkundung (siehe auch [Geb81] für geophysikalische Anwendungen in der DDR) und in der Denkmalpflege [CDMMR05]. Für die Ortung von Fahrbahnablösungen auf Brücken unter Ausnutzung der Sonnenenergie existiert ein ASTM-Standard [AST97].
Im folgenden Kapitel wird das Thermografie-Konzept vorgestellt, das in Zusammenarbeit der Fachgruppe „Zerstörungsfreie Schadensdiagnose und Umweltmessverfahren“ von Dr.Herbert Wiggenhauser (unter Federführung von Dr. Christiane Maierhofer) mit dem Fachgebiet „Baustoffe und Baustoffprüfung“ der TU Berlin (unter Leitung von Prof. Bernd Hillemeier) entwickelt wurde und die Grundlage dieser Dissertation bildet. Geprägt ist es durch das abgeschlossene von der DFG geförderte Forschungsvorhaben „Impuls-Thermografie zur zerstörungsfreien Strukturuntersuchung von Bauteilen und Bauwerksoberflächen“ ([BMRW02], [HSRW01], [MAR+05b], [HRWS05]) und durch die langjährige Erfahrung auf dem Gebiet der aktiven Thermografie in der ZfPBau der beteiligten Institutionen und Personen in TUB und BAM [Hil80], [Sch82], [Wig91][1].

Abbildung 4.1.: Versuchsaufbau für Labormessungen (links) und für CFK-Untersuchungen mit einem Scannersystem (rechts) (BAM) [HMR+06]

[1] Der in dieser Arbeit gleichfalls kurz vorgestellte Thermoscanner wurde im EU-Projekt „Sustainable Bridges“ in der BAM entwickelt [HMR+06].

4.1. Vorgehensweise

Ziel der aktiven Thermografie ist die berührungslose Messung von Temperaturänderungen nach einer gezielten Erwärmung zur Ortung von Inhomogenitäten im oberflächennahen Bereich des zu untersuchenden Bauteiles.
Die Vorgehensweise kann in sechs Arbeitsschritte unterteilt werden (siehe Abbildung 4.2 nach [ICM04a]). Zum Messaufbau siehe Abbildung 4.1 und Kapitel 4.2.

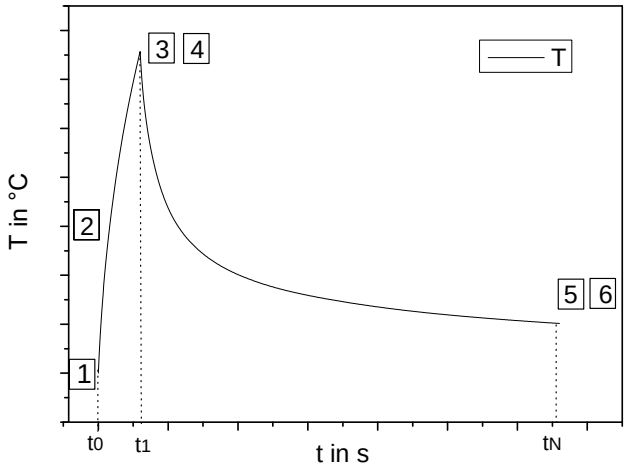


Abbildung 4.2.: Transiente mit Arbeitsschritten der aktiven Thermografie nach [ICM04a]

1. Aufnehmen eines Fotos und des sogenannten *Nullbildes* (siehe Abbildung 4.3 sowie Kapitel 4.5.1), eines *Thermogramms* (Temperaturbildes), aufgenommen vor Beginn der Anregung zum Zeitpunkt t_0, sowie Erfassen der Randbedingungen in einem Messblatt zur Dokumentation des *Nullzustandes* vor der Messung (vergleiche Kapitel 4.5.1). Die aufgenommenen Strahlungswerte werden in der Kamera über Kalibrierkurven in Temperaturwerte umgerechnet und auf dem Kameradisplay mittels farb- oder graukodierter Darstellung sichtbar gemacht.

2. Erwärmen des untersuchten Objektes mit einem Wärme- beziehungsweise Rechteckimpuls nach einer von der Wärmequelle, dem Versuchsaufbau (zum Beispiel dem Abstand der Wärmequelle und dem Übertragungsmedium) und den Materialeigenschaften des Bauteiles abhängigen Dauer - für Einzelheiten siehe Tabelle 4.1.

3. Aufnahmebeginn der Oberflächenstrahlung mit einer vom Versuchsaufbau abhängigen Zeitverzögerung von zumeist wenigen Sekunden.

4. Aufnahme während des Abkühlvorganges mit einer IR-Kamera. Die eingebrachte Wärme diffundiert durch das Objekt, während der Abkühlungsvorgang auf der Bauteiloberfläche beginnt. Eine im Objekt befindliche Inhomogenität verursacht durch ihre veränderten Materialeigenschaften gegenüber ungestörten Bereichen einen veränderten Wärmestrom, der bei einem genügend großen Verhältnis von Defektgröße d zu Defektüberdeckung t

($d/t \leq 1$) zu einer Temperaturdifferenz auf der Objektoberfläche führt. Bei einem genügend großen Signal-Rausch-Verhältnis werden gestörte Bereiche gegenüber ungestörten Bereichen bereits hier durch einen Temperaturkontrast ohne zusätzliche Bildverarbeitung sichtbar gemacht.

5. Übertragung der Daten zum Abspeichern und zur weiteren Bearbeitung auf einen PC. N Thermogramme werden in N-1 regelmäßigen Zeitabschnitten Δt bis zum Zeitpunkt $t_N = \Delta t \times (N-1)$ abgespeichert. Dadurch wird eine 3D-Daten-Matrix erzeugt. Die x- und die y-Koordinate der Matrix entsprechen der horizontalen beziehungsweise vertikalen Position des Detektors auf dem Kamera-Array und die z-Koordinate dem Aufnahmezeitpunkt t im Verhältnis zu Beginn der Aufnahme t_1. Die Werte der Matrix sind die von der Kamera ermittelten Temperaturen.

6. Die weitere Auswertung und Bearbeitung der gespeicherten Daten (Postprocessing) kann nun qualitativ und quantitativ im Zeitbereich über die Methoden der IT/RIT und im Frequenzbereich mittels PPT/RST erfolgen (vergleiche die folgenden Kapitel und Kapitel 3.1 zum allgemeinen Vorgehen), ergänzt durch numerische Simulationen. Dabei sind die Arbeitsschritte für IT, RIT, PPT und RST identisch, lediglich in Punkt 2, der Dauer der Erwärmung, und in Punkt 6, der Art der Auswertung, liegen charakteristische Unterschiede (vergleiche Tabelle 1.1 mit den in dieser Arbeit verwendeten Begriffen).

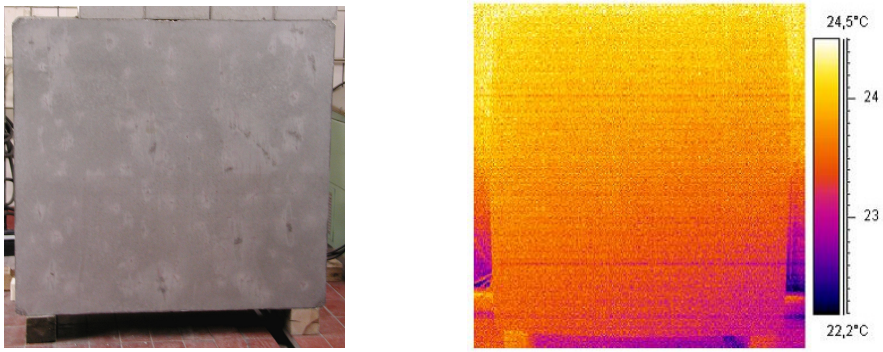


Abbildung 4.3.: Foto (links) und Nullbild (rechts) eines Probekörpers

4.2. Experimenteller Aufbau

Die Messapparatur setzt sich aus dem Infrarotkamerasystem (BAM: ThermaCAM SC1000, TUB: Varioscan compact LW 3011, InfraTec GmbH) sowie einer geeigneten Wärmequelle zusammen und variiert je nach Aufgabenstellung (siehe Tabelle 4.1). In Abbildung 4.1 sind der Messaufbau für Labormessungen (links) und für die CFK-Prüfung (rechts) dargestellt. Der Messaufbau für Fallstudien wird entsprechend der Prüfproblematik ausgewählt. Beispielhaft ist der Messaufbau für den Messeinsatz im Alten Museum in Berlin in Abbildung 9.13 in Kapitel 9.2.1 dargestellt. Zum Messaufbau der TUB, zum Beispiel zur Ortung von Fehlstellen in Spanngliedern mit Hilfe

elektrischer Widerstandsverluste, siehe Kapitel 5.6 beziehungsweise [RH03] und [WAM+05a].

Tabelle 4.1.: Experimentelle Aufbauten zu unterschiedlichen Prüfproblemen (BAM)

Parameter der Erwärmung				**Aufnahmeparameter**		
Erwärmungs-einheit	**Leistung [W]**	**Zeit [min]**	**Fläche [m²]**	**Zeit [min]**	**Taktrate [Hz]**	**Anwendung**
IR-Heizstrahler, automatisiert	3x2400	≤ 60	$\leq 2,25$	≤ 120	≤ 50	Hohlstellen, Kiesnester, Delaminationen etc. (Labor)
Heizlüfter, manuell	ca. 2000	≤ 5	$\leq 1,00$	≤ 30	≤ 50	Hohlstellen, Kiesnester, Delaminationen, Kulturgüter etc. (Fallstudien)
Halogenstrahler, automatisiert (Prototyp)	2x650	1/20	0,625	≥ 2	≤ 50	Beschichtungen, Delaminationen (zum Beispiel CFK) etc. (Labor, Fallstudien)
Blitzlampen, automatisiert (Prototyp)	2x1500	$\geq$ 1/600	0,625	≥ 2	≤ 50	Beschichtungen, Delaminationen (zum Beispiel CFK) etc. (Labor, Fallstudien)
Sonne	0-1400	var.	var.	var.	≤ 50	Beschichtungen, Delaminationen (zum Beispiel Asphalt) etc. (im Freien)

4.2.1. Verwendetes Kamerasystem (BAM)

Das verwendete IR-Kamerasystem der BAM besteht aus einer Infrarotkamera und einem Rechnersystem zur Echtzeiterfassung der digitalen Bilddaten. Für die Durchführung der Messungen wurde die ThermaCAM SC1000 IR-Kamera von Inframetrics (FLIR System GmbH) mit einem Focal-Plane-Array(FPA)-Detektor bestehend aus 256 x 256 Detektorelementen (PtSi-Schottky-Dioden) in CMOS-Bauweise mit Stirling-Mikrokühler und den folgenden technischen Daten verwendet:

- Spektralbereich 3,4 bis 5 μm
- 32°-, 16°- und 8°-Objektive
- Bildrate 50 Hz (PAL) Vollbild

- Temperaturauflösung techn. 0,07 K bei 30 °C

Die SC1000 kann gerätebedingt im Temperaturbereich von −20 °C bis +1200 °C messen. Im Bereich der Bauwerksoberflächen mit einem Temperaturbereich von −10 °C bis +50 °C sind die Nachweis- beziehungsweise Bestimmungsgrenzen entsprechend gekennzeichnet[2].
Für die von der TU verwendete Varioscan compact LW 3011 (InfraTec GmbH) siehe Kapitel 5.6 beziehungsweise [RH03] und [WAM+05a].

4.2.2. Verwendete Wärmequellen

Im Rahmen verschiedener Forschungsaktivitäten wurden unterschiedliche Wärmequellen zur direkten und indirekten Erwärmung der Bauteiloberfläche getestet.
Die in Frage kommenden Erwärmungseinheiten lassen sich nach Art des Energieeintrages, nach äußeren und inneren Wärmequellen und nach der Art des dominanten Übertragungsvorganges (Wärmestrahlung, Wärmeleitung und Konvektion) bei äußeren Wärmequellen untergliedern (siehe Kapitel 3.1.1 und Abbildung 3.4 sowie [BMRW02], [MAR+05b], [AHM+04] oder [Bri05]).
Bei inneren Wärmequellen ist eine Erwärmung über den thermoelastischen Effekt, zum Beispiel mit Hilfe von Ultraschall oder auch durch die induktive Erwärmung von Bewehrungseisen als Widerstandsheizung möglich [Hil80], [HSRW01], [RH03], [HRWS05] oder [WAM+05a].

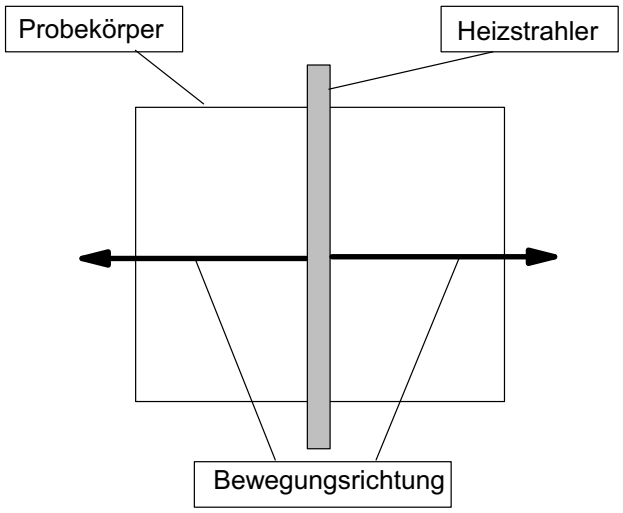


Abbildung 4.4.: Prinzipskizze der automatisierten IR-Strahler-Erwärmungseinheit [BMRW02].

Es zeigte sich, dass sich für die Labormessungen an Beton- und Mauerwerksprobekörpern besonders Infrarotstrahler aufgrund der eingebrachten Leistung und der gleichmäßigen Temperaturverteilung als externe Wärmequelle eignen [BMRW02]. Für den überwiegenden Anteil der in dieser Arbeit dargestellten Untersuchungsergebnisse wurden drei Module des Infrarotstrahlers MMS 2400 der Firma Heraeus zu einem linearen Array verschaltet. Über eine Fläche von 1,50 x 1,50 m^2 beziehungsweise 1,0 x 1,0 m^2 wird die Strahlungsquelle mit einer Schrittgeschwindigkeit

[2]Die nach Minimierung der meteorologischen Einflüsse verbleibende Empfindlichkeit liegt bei ca. 0,3 K.

von ca. 0,1 m/s in einem optimierten Abstand von 15 cm entlang der Oberfläche des Probekörpers verfahren (siehe auch Abbildung 4.4 und 4.1, zur Diskussion über den so angeregten Wärmefluss siehe Kapitel 7, links sowie Anlage A).
Besonders für empfindliche Untersuchungsobjekte in der Denkmalpflege (zum Beispiel Fresken), die empfindlich auf nur geringe Temperaturerhöhungen reagieren, aber auch für schwer zugängliche Prüfobjekte oder solche mit einer unregelmäßigen Oberfläche eignet sich ein leichter konventioneller Heizlüfter (siehe Abbildung 9.13 und Kapitel 9.2).
Weitere Erwärmungseinheiten sind ein leichter Heizstrahler zur manuellen Erwärmung und eine IR-Fußboden-Erwärmungseinheit zum gleichmäßigen Erwärmen horizontaler Oberflächen. Die Erwärmung erfolgt auch in diesem Fall manuell, kann aber leicht automatisiert werden. Für Labor- und Feldmessungen an CFK-verstärkten Oberflächen eignen sich besonders IR-Blitzlampen beziehungsweise Halogenscheinwerfer ([HMR+06], [AHMR06]) und für Messungen in unzugänglichen Bereichen beziehungsweise an ungleichförmigen Oberflächen Heizgebläse [AMR+04b], [AHM+04].
In Kapitel 10 wird kurz auf die Entwicklung des neuen Thermoscanners für Baustelleneinsätze eingegangen und in Tabelle 4.1 sind die verwendeten Erwärmungseinheiten zusammengefasst.
Speziell in der TUB wurde zur Ortung von Verpressfehlern in Spanngliedern ein Verfahren entwickelt, mit Hilfe konduktiver Widerstandserwärmung der Spannstähle in den Hüllrohren die Spannglieder zu erwärmen [RH03].
Für die von der TU verwendeten Erwärmungseinheiten siehe Kapitel 5.6 beziehungsweise [RH03] und [WAM+05a].

4.3. Probekörper

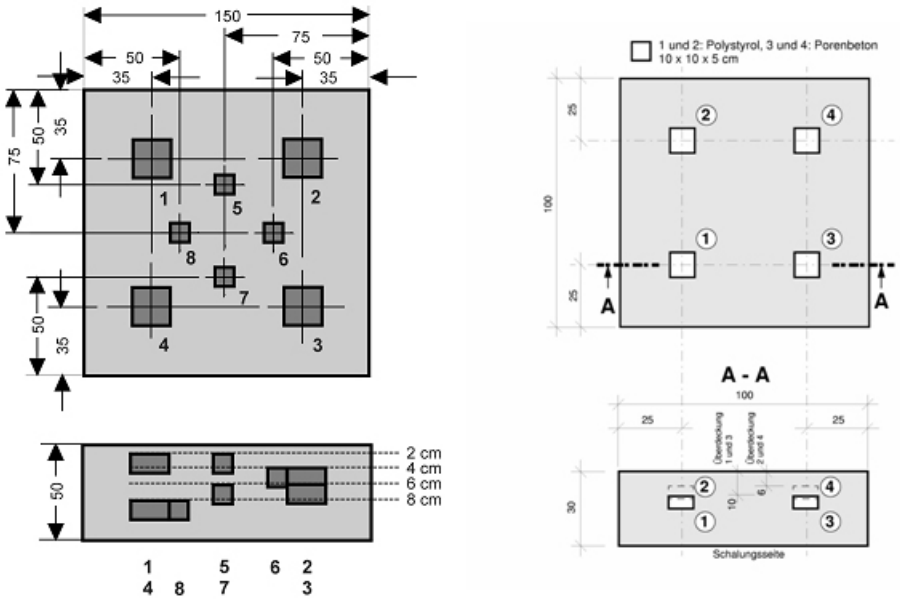


Abbildung 4.5.: Probekörper PK I_1 vom Typ I (links) und PK II_1 vom Typ II (rechts) aus Beton mit Fehlstellen aus Polystyrol und Porenbeton in verschiedenen Tiefenlagen [BMRW02] beziehungsweise [MAR+05b], Zeichnung: Borchard, BAM

Im Rahmen des DFG-Projektes wurden von BAM und TUB eine Reihe von Probekörpern (PK)

zu einer Vielzahl baupraktischer Konstruktionen und Fragestellungen errichtet: zum Beispiel zur Ortung von Ablösungen von Laminaten und Spaltklinkern auf Beton sowie Putz auf Beton und Mauerwerk, zu unverfüllten Fugen in Mauerwerk, zu Verpressfehlern in Spannkanälen, zu Rissen in Beton etc. [BMRW02], [HSRW01], [HRWS05] und [MAR+05b]. Die untersuchten PK der BAM kann man in zwei Typen-Klassen unterscheiden. Typ I hat die Maße $1,50x1,50x0,50$ m^3 und Typ II $1,00x1,00x0,30$ m^3. Zur Entwicklung des neuen quantitativen Konzeptes werden zunächst die in Abbildung 4.5 dargestellten PK I_1 (mit vier Polystyrolfehlstellen je zu $20x20x10$ und $10x10x10$ cm^3) und PK II_1 (mit je zwei Polystyrol- und Porenbetonfehlstellen zu $10x10x5$ cm^3 sowie 6 beziehungsweise 10 cm Betondeckung) herangezogen.
Die im Rahmen dieser Arbeit untersuchten Probekörper sind in Tabelle 4.2 zusammengefasst[3]. Der im Rahmen des EU-Projektes „Onsiteformasonry" errichtete große Mauerwerksprobekörper der BAM ist in Abbildung 5.7 abgebildet[4].
Zu den Probekörpern der TUB siehe Kapitel 5.6.

Tabelle 4.2.: Probekörper der BAM aus Teil 1 und 2 des oben genannten Projektes

Nr.	**Basiskörper**	**Beschichtung**	**Eingebrachte Defekte**	**Praxisbezogene Simulation**
I_1	Betonkörper ohne Bewehrung $150x150x50$ cm^3	keine	Einbau von Polystyrol-Hartschaum-Fehlstellen während der Herstellung in verschiedener Größen, Dicken und Tiefen	Verdichtungsmängel und Fehlstellen im Beton
I_2	Betonkörper ohne Bewehrung $150x150x50$ cm^3	Spaltplatten im Mörtelbett (Dickbettverfahren)	Bereiche mit mangelnder Vermörtelung werden gezielt erzeugt.	Bereiche mit mangelnder Vermörtelung
I_3	Betonkörper ohne Bewehrung $150x150x50$ cm^3	CFK-Laminate	Ablösungen unterschiedlicher Ausdehnung wurden gezielt erzeugt.	CFK-Ablösungen auf Beton

wird fortgesetzt

[3] Es sei darauf hingewiesen, dass die Erstellung der Probekörper überwiegend ohne Beteiligung des Verfassers erfolgte, vor seinem Arbeitsantritt in der BAM. Es sei an dieser Stelle Herrn Meinhold und seinen Kollegen im Betonlabor der Fachgruppe VII.1 sowie den Herren Brink, Lange, Röllig, Smith und Wedler aus der Fachgruppe VIII.2 gedankt, die hierbei Wesentliches geleistet haben.

[4] Herrn Kuritz, Herrn Lange und Frau Wendrich von der Fachgruppe VIII.2 sei gedankt für die Planung und Errichtung des großen Mauerwerksprobekörpers.

Fortsetzung

Nr.	Basiskörper	Beschichtung	Eingebrachte Defekte	Praxisbezogene Simulation
I_4	Betonkörper ohne Bewehrung 150x150x50 cm^3	Gipsputz	Ablösungen unterschiedlicher Ausdehnung wurden gezielt erzeugt.	Gipsputzablösungen auf Beton
I_5	Betonkörper mit Bewehrung 150x150x50 cm^3	keine	Hohlstellen aus Polystyrol und unterschiedliche Bewehrungsgrade	Detektierung von Bewehrung und Einfluss derselben auf die Nachweisempfindlichkeit
II_1a	Betonkörper ohne Bewehrung 100x100x30 cm^3	keine	Einbau von Polystyrol-Hartschaum-Fehlstellen während der Herstellung in verschiedenen Größen, Dicken und Tiefen	Einfluss des Reifegrades und des Feuchtegehaltes auf die Nachweisempfindlichkeit
II_1b	Betonkörper ohne Bewehrung 100x100x30 cm^3	verschiedene	Aufbringen von verschiedenen Beschichtungen auf PK II_1a	Einfluss verschiedener Beschichtungen auf die Nachweisempfindlichkeit
II_2	Betonkörper ohne Bewehrung 100x100x30 cm^3	keine	Hohlstellen aus Polystyrol und Ersetzung von Kieszuschlag durch Blähton	Einfluss der Dichte auf die Nachweisempfindlichkeit
II_3	Betonkörper ohne Bewehrung 100x100x30 cm^3	keine	Hohlstellen aus Polystyrol und Zusatz von Luftporenbildner	Einfluss der Porosität auf die Nachweisempfindlichkeit
II_4	Stahlfaserbeton ohne Bewehrung 100x100x00 cm^3	keine	Hohlstellen aus Polystyrol und unterschiedlicher Stahlfaseranteil	Detektierung des Stahlfaseranteiles und dessen Einflusses auf die Nachweisempfindlichkeit

4.4. Datenanalyse im Zeit- und Frequenzbereich

Die Datenaufnahme im Zeitbereich erfolgt nach den bereits beschriebenen Prinzipien der IT/RIT (siehe Kapitel 3.1.1). Die Auswertung kann im Zeitbereich mit der IT/RIT (siehe Kapitel 3.1.1) oder im Frequenzbereich mit der PPT/RST erfolgen (siehe Kapitel 3.1.3).
Für die Auswertung der durch lange Beobachtungszeiten großen Datenmenge wurde ein auf der Macro-Programmiersprache PVWave (Version 7.01, Visual Numerics Inc.) basierendes Auswertungsprogramm entwickelt [MAR+05b], das im Wesentlichen aus drei Fenstern besteht:

- Diagrammfenster 1: Darstellung eines ausgewählten Thermogramms, Phasen- oder Amplituden-Bildes aus dem ausgewählten Film. Mit einem Cursor können einzelne Datenpunkte und Schnitte (Temperaturverteilung entlang einer Linie) über ein pixelweises x-y-Koordinatensystem angewählt werden.

- Diagrammfenster 2: Darstellung der Transienten (Temperatur eines bestimmten Punktes auf der Oberfläche als Funktion der Zeit) beziehungsweise Phasen- oder Amplitudenverläufe über den gesamten ausgewählten Film für die ausgewählten Koordinaten.

- Diagrammfenster 3: Darstellung von Auswertungsergebnissen der Thermogramme (Histogramm, linearer Kontrast, Kantenfilterung, Signal-zu-Rausch-Verhältnis) und Transienten (Differenztransienten, Integral, Kurvenanpassung (fit) einer einzelnen Transienten oder einer Gruppe von Transienten aus einem Ausschnitt des Thermogramms).

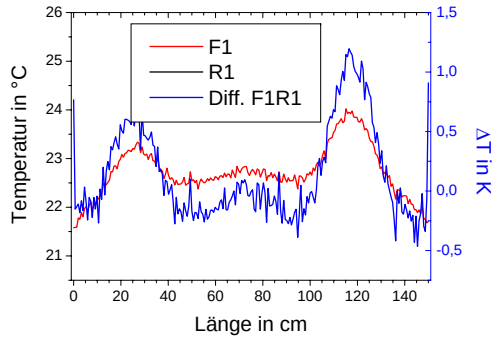
Weiterhin wurden kommerzielle Datenverarbeitungsprogramme eingesetzt. Die meisten Grafiken in dieser Arbeit wurden mit Origin (Version 6.0, OriginLab Corporation) erzeugt, das eine große Anzahl von Datenanalyse-Funktionen bietet.
Eine weitere Funktion, die Analyse mit Wavelets, führte nach ersten Tests zu keinem Vorteil gegenüber den anderen dargestellten Methoden.

4.4.1. Quantitative Methoden

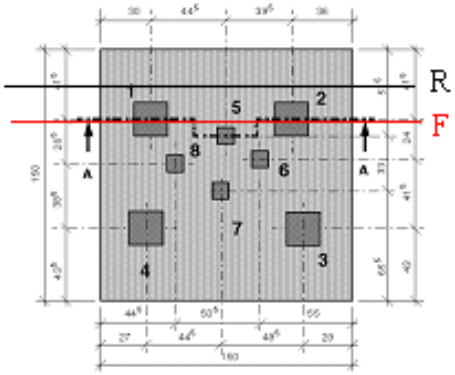
Die quantitativen Analysen im Zeitbereich erfolgten über Temperaturdifferenzkurven (gemittelt über vier Pixel für Referenz- und Fehlstellen) und den Zeitpunkt t_{max}. Siehe zum Beispiel Abbildung 4.7 und Kapitel 3.1.1 sowie [WBM+03] oder [MBR03]) aber vor allem die Dissertation von Brink [Bri05].
Ein neuer vielversprechender Ansatz zur quantitativen Tiefenbestimmung von Defekten auf Grundlage der Wärmeleitung für Platten und für halbunendliche Körper infolge eines Dirac-Impulses wurde von Röllig [RAM05] auf der Basis von [VB01] entwickelt.
Im Frequenzbereich erfolgten quantitative Untersuchungen über die Phasendifferenzenkurven und die thermische Eindringtiefe μ (vergleiche [WWB+03], [WM04] und [WAM+05b]) beziehungsweise über die Blindfrequenz f_b [RAM05] (vergleiche Kapitel 3.1.3). Der neue quantitative Ansatz für Rechteckimpulse wird ausführlich in Kapitel 6 dargestellt.

4.4.2. Größe der Fehlstelle

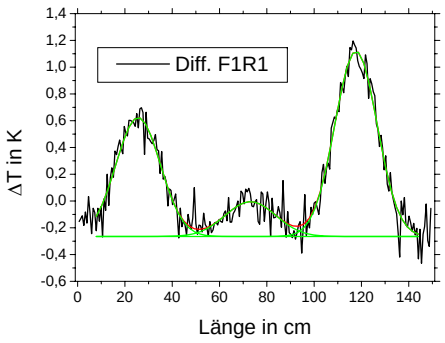
Im Rahmen des DFG-Projektes wurden auch zahlreiche Untersuchungen zur Bestimmung der Breite von Fehlstellen nach [Avd03] und [Lud02] durchgeführt, ergänzt durch Datenfits. Hierzu wurde das untersuchte Objekt mit einem Linienscan geschnitten und die Halbwertsbreite über eine angemessene Zahl von Gauß-Fits (bei einer Fehlstelle genügte zumeist ein Gauß-Fit, bei zwei Fehlstellen waren drei Gauß-Fits erforderlich, siehe Abbildung 7.16). Es zeigte sich, dass hier die RIT genaue Ergebnisse liefert, wenn man den Zeitpunkt des maximalen Temperaturkontrastes für seinen Linienscan auswählt. Entsprechend schien eine Untersuchung dieses Zusammenhanges für die RST im Rahmen dieser Arbeit nicht erforderlich zu sein.



(a) Temperatur- und Differenzkurven



(b) PK I_1 mit Linienscans



(c) Dreifacher Gauß-Fit der Differenzkurve

Vergleich der Ergebnisse der Geometrieauswertung				RIT
Fehlstelle	Breite in cm			
	dT_{max} F1	dT_{max} F2	Sollwert	Radar
dreifach Gauß von F1 (9,2 cm)	18,8	17,5	20	18
dreifach Gauß von F2 (7,6 cm)	17,8	17,2	20	19,5

(d) Ergebnistabelle

Abbildung 4.6.: Breite der Fehlstelle, RIT-Auswertung für F1 (und F2) von PK I_1 für $\Delta T_{max,F1} = 3225$ (bzw. 2445) s nach 15 min Erwärmung

4.5. Randbedingungen und Messparameter

Passive und aktive Infrarot-Thermografie-Messungen sind von einer Anzahl von Randbedingungen und Störeinflüssen abhängig. Zu den die Messergebnisse beeinflussenden Faktoren zählen zum Beispiel Umweltbedingungen wie Umgebungstemperatur, Luftbewegungen, Luftfeuchtigkeit,

Luftzusammensetzung, Lichtverhältnisse etc. (siehe hierzu Kapitel 2).
Einflüsse, die vom zu vermessenden Objekt selber ausgehen, sind zum einen dessen Materialeigenschaften, zum Beispiel Emissivität, Dichte, Wärmeleitfähigkeit und Wärmespeicherkapazität, und zum anderen dessen Geometrie, Oberflächenbeschaffenheit und Form (vergleiche Kapitel 5 und 8).
Weitere Randbedingungen sind durch die Messtechnik selber gegeben, zum Beispiel durch die Art der Erwärmung und, deren Leistung, durch die IR-Kamera und deren Spektralbereich, Auflösung und Aufnahmefrequenz sowie durch den Messrechner mit der vorhandenen Auswertesoftware (s.o. in diesem Kapitel) bis hin zur Erfahrung des ausführenden Messtechnikers oder Ingenieurs. All diese Faktoren beeinflussen letztlich das Signal-zu-Rausch-Verhältnis (vergleiche die Kapitel 2.3.4 und 4.5.2).

4.5.1. Messparameter

Die absolute (oder quantitative) Messunsicherheit der Temperatur wird durch Referenzmessungen mit Thermoelementen ermittelt.
Die bei der Messung herrschenden Randbedingungen und der Messaufbau werden im Messprotokoll erfasst. Das Versuchsprotokoll umfasst die folgenden Punkte:

- Beschreibung der Aufgabenstellung und der durchgeführten Messungen
- Messprinzip und Versuchsablauf
- Angabe von Messparametern wie Lufttemperatur, Luftfeuchtigkeit, Windgeschwindigkeit und -richtung, Lichtverhältnisse etc.
- Skizze des Probekörpers und der unmittelbaren Umgebung, von Fenstern, Heizkörpern etc.
- Beschreibung von Besonderheiten
- Fehlerabschätzung mit Beurteilung der Aussagekraft der Ergebnisse (zum Beispiel: welches Fehlstellenkriterium wurde warum ausgewählt?)
- Zusammenfassung

Zusätzlich wird vor jedem Messfilm die Oberfläche des Messobjektes im für das menschliche Auge sichtbaren Spektralbereich durch ein Digitalfoto und im Infrarot-Messbereich der IR-Kamera durch ein sogenanntes *Nullbild* (vergleiche Abbildung 4.3) erfasst und dokumentiert. Das Foto liefert hoch aufgelöste Informationen über die Oberflächenstruktur und das Nullbild einen Hinweis auf herrschende Randbedingungen wie Konvektion, Sekundärwärmequellen und die Emissivität der Prüfkörperoberfläche im stationären Nullzustand der Messung. Zur Ermittlung des Signal-zu-Rausch-Verhältnisses siehe den folgenden Abschnitt.

4.5.2. Signal-zu-Rausch-Verhältnis

Ein Maß für die Aussagekraft einer Messung liegt in ihrem Signal-zu-Rausch-Verhältnis, beziehungsweise -Abstand SNR (vergleiche Kapitel 2.3.4), dem Quotienten aus der mittleren Leistung des übertragenen Nutzsignals P_S (oder S) zur mittleren Leistung des Stör- beziehungsweise Rauschsignals P_N (oder N) [Rea04]. Bei der quantitativen IT/RIT handelt es sich bei dem Signal um ein Temperaturdifferenz-Signal $\Delta T(t)$ über die gesamte Aufnahmezeit T und im Fall der quantitativen PPT/RST um ein Amplitudendifferenz-Signal $\Delta A(f)$ beziehungsweise Phasendifferenz-Signal $\Delta\phi(f)$ über die Frequenz bis zur Grenzfrequenz f_{max}. Aus diesem Grund wird hier von der üblichen Vorgehensweise, das Rauschen durch Vergleich zweier aufeinanderfolgender Thermogramme beziehungsweise Phasenbilder (vergleiche zum Beispiel [Mal93] oder [BMRW02]) zu bestimmen, abgewichen und ein anderes Verfahren (nach Grinzato und Vavilov [GV98]) zum Bestimmen des Signal-zu-Rausch-Verhältnisses angewendet.
In Abbildung 4.7 sind die Temperaturdifferenzkurven für die Fehlstellen F1 bis F4 (siehe Abbildung 4.5, rechts) und die mittig im ungestörten Bereich auf der gleichen Horizontalachse liegenden Referenzstellen R1 und R2 von PKII_1 dargestellt. Mit abgebildet ist die beispielhafte Bestimmung des SNR für die Tiefenbestimmung von Fehlstelle F2.
Es ergeben sich folgende Signal-zu-Rausch-Verhältnisse für die ausgewählten Punkte: $SNR(F1R1) \cong 5,6$; $SNR(F2R2) \cong 14,6$; $SNR(F3R1a) \cong 4,5$ und $SNR(F4R2a) \cong 5,8$.

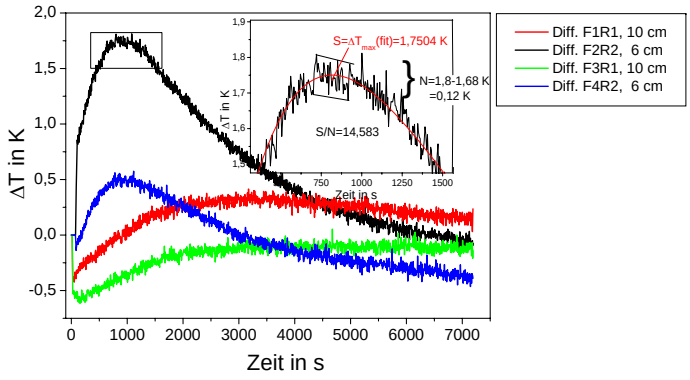


Abbildung 4.7.: Temperaturdifferenzkurven der Fehlstellen F1 bis F4 einer Messung an PK II_1 mit 30 min Erwärmung und 120 min Aufnahmezeit mit Bestimmung des Signal-zu-Rausch-Verhältnisses für die Tiefenbestimmung von Fehlstelle F2 (vergleiche Abbildung 4.5, rechts)

Der Versuch wurde mit dem in Tabelle 4.1 oben beschriebenen Messaufbau durchgeführt, mit 1800 s Erwärmung durch die automatisierte IR-Erwärmungseinheit (siehe auch Abbildung 4.1, links). Die Abkühlung wurde über einen Zeitraum von zwei Stunden mit der SC 1000 IR-Kamera aufgenommen.
Will man das Signal-zu-Rausch-Verhältnis für eine Größenbestimmung und nicht eine Tiefenbestimmung eines Defektes vornehmen, bietet sich ein anderes Vorgehen an. Da hier nicht ein bestimmter Punkt auf der Oberfläche, sondern ein ganzer Linienscan erforderlich ist, kann das

Rauschen über den ganzen Scan gemittelt werden. Zu diesem Zweck werden Linienscans durch vermutete Fehlstellen und Referenzbereiche gezogen und der Temperaturkontrastverlauf für ausgewählte Zeitpunkte durchgeführt, so zum Beispiel in Abbildung 4.8 zum in Abbildung 4.7 ermittelten Zeitpunkt $t_{2,max} = 1075$ s. In Abbildung 4.8 ist die Ermittlung des Signal-zu-Rausch-Verhältnises für die resultierenden Linienscans dargestellt. Vom gefitteten Signal (rote Linie F) wird der Untergrund (schwarze Referenzlinie R) abgezogen und so die (blaue) Differenzlinie bestimmt. Das Signal-zu-Rausch-Verhältnis ergibt sich dann als Differenz des Gauß-Peaks und der mittleren Amplitude des Rauschens (grüne Linie, vergleiche Abbildung 4.8). Für diese Art des Nachweises ergibt sich ein niedrigeres Signal-zu-Rausch-Verhältnis: $SNR(F2R2) \cong 3,5$ und $SNR(F4R2a) \cong 2,33$.

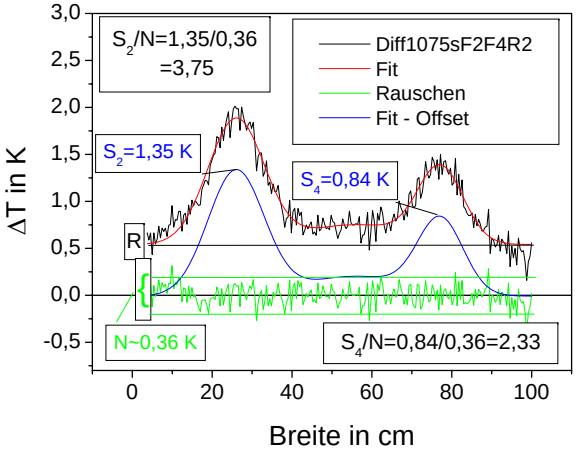


Abbildung 4.8.: Linienauswertung (schwarz) der IT mit dreifachem Gauß-Fit (rot) und dazugehörigem Rauschen (grün) mit Bestimmung des Signal-zu-Rausch-Verhältnises für die Größenbestimmung der Fehlstellen F2 und F4 von PK II_1 für den Zeitpunkt $t_{2,max} = 1075$ s

4.6. Numerische Simulationen

Vor allem die quantitative Auswertung im Zeitbereich wurde ergänzt durch numerische Simulationen. Im weiter oben dargestellten Wave-Programm der BAM wurde auch ein Simulationstool auf Basis der Finiten-Differenzen integriert. Die Dissertation von Brink [Bri05] geht ausführlich auf diesen Punkt ein (siehe auch [WBM+03] oder [MBR03]).
Von der TUB wurden umfangreiche Finite-Elemente-Simulationen (siehe zum Beispiel [RH03] oder [AHM+04]) zur Simulation der Aufwärm- und Abkühlvorgänge durchgeführt.
„*Ziel dieser Simulationen war die Ermittlung der optimalen Messparameter für die Untersuchungen im Labor und am Bauwerk sowie Parameterstudien zur Bestimmung des Einflusses der Material- und Strukturparameter und zur Abschätzung der Grenzen des Verfahrens. Untersucht wurde unter anderem der Einfluss der Größe und Dauer des eingeprägten Wärmestroms, der Größe und Tiefe der Fehlstelle beziehungsweise Ablösung, der thermischen Materialparameter*“ ([MAR+05b], Seite 12).

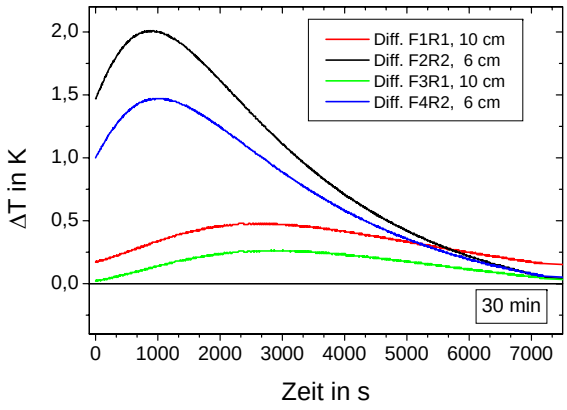


Abbildung 4.9.: Simulierte Differenzenkurven für PK II_1 mit 30 min Erwärmung mit den gleichen Randbedingungen wie in Abbildung 4.3 und 4.7

Wie bereits in 3.2.2 dargestellt, kamen aus den angegebenen Gründen im Rahmen dieser Arbeit vor allem FEM-Programme zum Einsatz, es wurden jedoch auch vergleichende FDM-Simulationen durchgeführt.
Die besten Näherungen erzielte der Verfasser mit Näherungen, die nicht nur die klimatischen Bedingungen während der Messung, sondern bereits den Nullzustand der Messung mit berücksichtigten. Dies war erforderlich, da aufgrund der klimatischen Bedingungen in der Werkhalle der BAM sich bereits vor der Anregung ein Gradient in den Probekörpern ausgebildet hatte, der zwischen 2 und 8 K liegen konnte. Vergleiche hierzu das Nullbild von PK II_1 in Abbildung 4.3 mit dem simulierten Nullbild in Abbildung 4.10 und die Differenzkurven der Fehlstellen in Abbildung 4.10 mit simulierten in Abbildung 4.9.

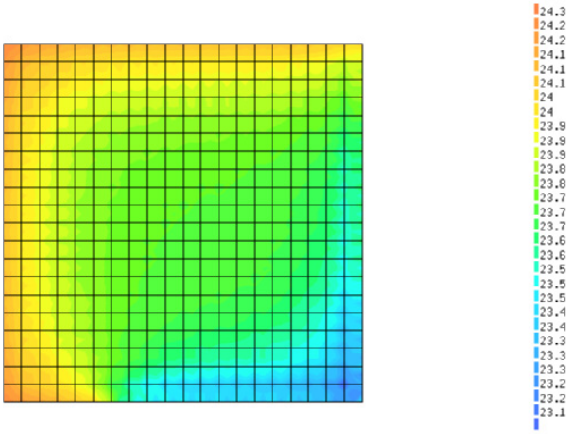


Abbildung 4.10.: Simuliertes Nullbild für PK II_1 mit den gleichen Randbedingungen wie in Abbildung 4.3 und 4.7

5. Qualitative Untersuchungen und Machbarkeitsstudien

Einführung

Von der BAM und der TUB wurden noch unter dem Namen IT und PPT systematischen Laboruntersuchungen und Machbarkeitsstudien durchgeführt. Diese Untersuchungen in ihrer ganzen Bandbreite geben in Verbindung mit den in Kapitel 9 dargestellten Praxisanwendungen einen guten Einblick in die große Bandbreite einer zerstörungsfreien Prüfung von oberflächennahen Strukturen mittels aktiver Thermografie im Bauwesen.
Die meisten der hier dargestellten Ergebnisse wurden bereits anderweitig von der Arbeitsgruppe „Elektromagnetische Verfahren für die Bauwerksdiagnose; Entwicklung und Bewertung“ in der BAM und dem Fachgebiet „Baustoffe und Baustoffprüfung“ der TUB veröffentlicht. Vom Verfasser stammen zumeist die Beiträge über die Ergebnisse der Auswertung im Frequenzbereich.
Die Veröffentlichung der Ergebnisse der TUB geschieht mit freundlicher Genehmigung von Prof. Bernd Hillemeier und der Herren Carsten Rieck und Andrei Walther.
Zur Deutung der dargestellten Abbildungen sei erwähnt, dass hohe Temperaturen in Thermogrammen und Amplitudenbildern durch ein helles Grau abgebildet werden und niedrige dunkler erscheinen. Bei den Phasenbildern ist eine solche Aussage nicht eindeutig zu treffen.

5.1. Experimentelle Versuchsdurchführung

Die Versuchsdurchführung erfolgte nach den Prinzipien der IT/RIT (vergleiche Kapitel 3.1.1). Für die Messungen der BAM wurde der Versuchsaufbau von Abbildung mit automatisierter IR-Erwärmungseinheit (siehe Abbildung 4.1, links, und Kapitel 4.2) verwendet. Die Erwärmungs- und die Aufnahmezeit sowie die Aufnahmefrequenz variierten je nach Aufgabenstellung (vergleiche auch Tabelle 4.1). Der gewählte Abstand der Erwärmungseinheit zum Probekörper von 15 cm erbrachte eine eingebrachte Wärme von ca. 1250 W/m^2 für die Probekörper vom Typ I und von ca. 1800 W/m^2 für die vom Typ II (vergleiche Kapitel 4.2 und Abbildung 4.5) auf der Oberfläche des Probekörpers. Der Abstand der Kamera von der Bauteiloberfläche betrug ca. 2,80 m für die großen und 2,0 m für die kleinen Probekörper. Die Auswertung der Daten erfolgte im Zeitbereich nach den Prinzipien der IT/RIT und im Frequenzbereich nach denen der PPT/RST.
Für den Messaufbau der TUB siehe Kapitel 5.6.

5.2. Ablösungen und Minderdicken

Die aktive Thermografie eignet sich besonders zur Ortung von Grenzflächen oder Störungen im oberflächennahen Bereich von Bauteilen. Zu diesem Fragenkomplex wurden in der BAM eine Anzahl von Probekörpern errichtet (vergleiche Kapitel 4.2 und Tabelle 4.2). Die wichtigsten Untersuchungsergebnisse wurden zu einem großen Teil bereits veröffentlicht [BMRW02], [HSRW01], [MAR+03], [MAR+03], [AHM+04], [Bri05], [MAR+05b], [MAR05a], [RAM05], [WAM+05a], [MAR+06c], [MAR+06b] etc. Im folgenden Abschnitt sind die wichtigsten Ergebnisse und Schlussfolgerungen kurz zusammengefasst.

5.2.1. Spaltklinker auf Beton [MAR+03], [WWB+03], [Bri05]

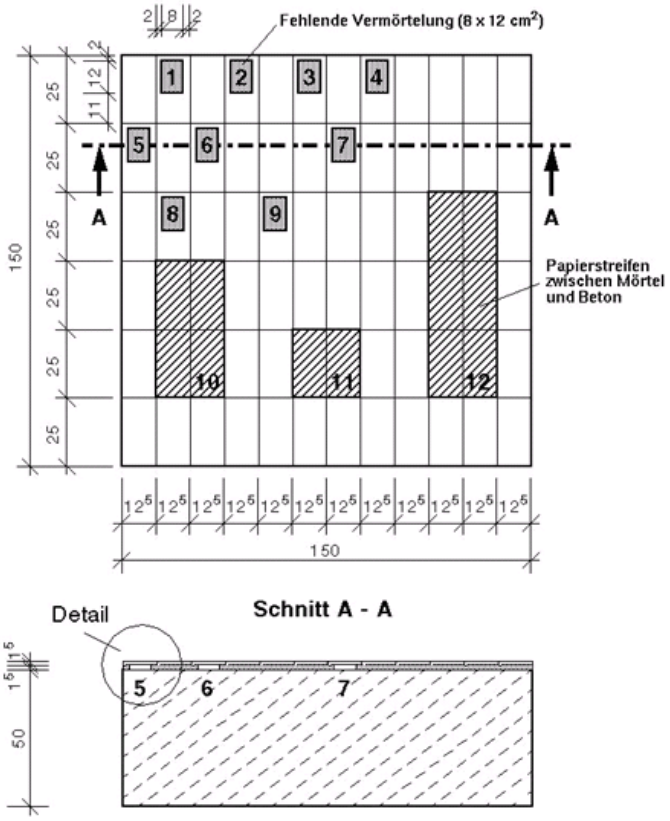


Abbildung 5.1.: Probekörper PK I_2 mit Spaltklinkern im Mörtelbett; Fehlstellen Nr. 1 bis 9: fehlender Mörtel; Fehlstellen Nr. 10 bis 12: Papierstreifen zwischen Mörtel und Beton, Zeichnung: Borchard, BAM [MAR+03]

Auf die Oberfläche eines unbewehrten Betonprobekörpers mit den Maßen 150 x 150 x 150 cm^3 wurden Spaltklinker, wie sie zur Auskleidung von Tunneln verwendet werden, in einem ca. 20 mm dicken Mörtelbett verlegt (siehe Abbildung 5.1).
Die Spaltklinker sind 10 bis 15 mm dick und haben eine geriffelte Unterseite, um einen guten Haftverbund zum Mörtel zu gewährleisten. In dieses aus drei Schichten bestehende System (Spaltklinker, Mörtel, Beton) wurden Ablösungen zwischen Spaltklinkern und Mörtel (Fehlstellen

Nr. 1 bis 9 in Abbildung 5.1, Einbautiefe 10 bis 15 mm) sowie zwischen Mörtel und Beton (Fehlstellen Nr. 10 bis 12, Einbautiefe ca. 30 mm) eingebaut.
Die Messungen wurden wie in Kapitel 4.2 beschrieben durchgeführt (siehe Abbildung 4.1), die Erwärmungszeiten wurden auf 3, 6 und 12 min beschränkt.

Untersuchungsergebnisse

In Abbildung 5.2 sind ausgewählte Thermogramme (obere Reihe) abgebildet. Die zugehörigen Phasenbilder für verschiedene Frequenzen sind darunter zu sehen (Abbildung 5.2, unten). Amplitudenbilder werden nicht abgebildet, da sie den Thermogrammen vergleichbare Ergebnisse liefern.
Die tiefen Fehlstellen zeichnen sich in den Phasenbildern wesentlich kontrastreicher ab als in den Thermogrammen (und den Amplitudenbildern). Die Fugen dagegen sind in den Thermogrammen (und Amplituden) sehr deutlich zu erkennen, während sie in den Phasenbildern nur sehr schwach zu sehen sind.
Des Weiteren ist eine gewisse Abhängigkeit der Tiefenlage von Fehlstellen und der Frequenz, bei der sie sichtbar sind, zu erkennen. Auf den Phasenbildern der niedrigen Frequenzen sind nur die tief liegenden Fehlstellen Nr. 10 bis 12 deutlich zu erkennen, während die flacheren Fehlstellen erst mit zunehmender Frequenz erscheinen.

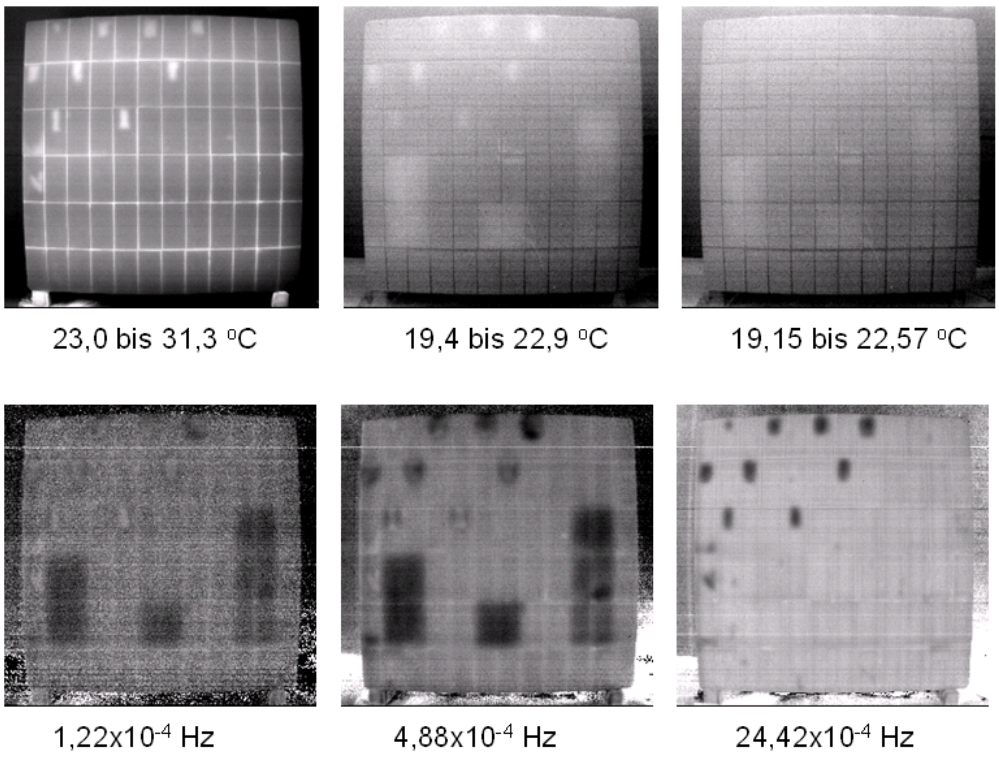


Abbildung 5.2.: Thermogramme nach 0/17,2/25,8 min Abkühlung des Betonprobekörpers mit Spaltklinkern nach einer Erwärmungszeit von 3 min (oben, von links nach rechts) und Phasenbilder bei unterschiedlichen Frequenzen (unten) [MAR+03].

5.2.2. CFK auf Beton [AHM+04]

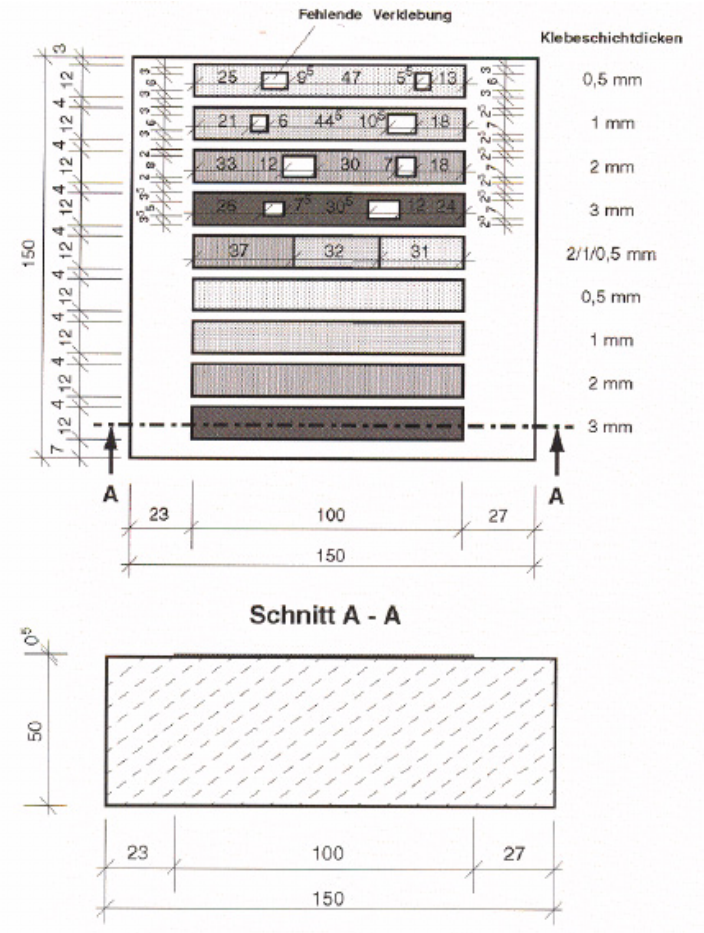


Abbildung 5.3.: Unbewehrter Betonprobekörper PK I_3 mit CFK-Verstärkung und flächigen Ablösungen unterschiedlicher Ausdehnung, Zeichnung: Borchard, BAM [AHM+04]

Das nachträgliche Aufbringen von CFK-Laminaten durch Verkleben stellt ein in den letzten Jahren verwendetes Verfahren zum nachträglichen Verstärken von Stahlbetonkonstruktionen dar. Um die Eignung der RIT und der RST für eine nachfolgende zerstörungsfreie Qualitätskontrolle von Klebeverbindungen zwischen Laminat und Beton zu prüfen, wurde für das Projekt ein Betonprobekörper von $1,50x1,50x0,50$ m^3 nachträglich mit im Handel üblichen CFK-Laminaten fachgerecht verklebt. Dabei wurde die Schichtdicke des Klebers zwischen 0,5 und 3 mm variiert und Ablösungen zwischen Laminat und Beton durch Aussparungen von Flächen von $0,05x0,10$ und $0,10x0,10$ m^2 Größe simuliert (siehe Abbildung 5.3).
Es wurde der Versuchsaufbau von Abbildung 4.1 verwendet. Die Erwärmungszeit betrug 1 min und die Aufnahmezeit 5 min.
Die Auswertung der Daten folgte im Zeitbereich den Prinzipien der IT/RIT und im Frequenzbereich denen der PPT/RST.

Untersuchungsergebnisse

In Abbildung 5.4 sind ein Temperaturkontrastbild aus der IT/RIT (links oben), ein Amplitudenbild (rechts oben) sowie die aus der RST gewonnenen Phasenbilder des untersuchten Probekörpers abgebildet. Es zeigt sich, dass die eingebrachten Fehlstellen ausnahmslos zu erkennen sind. Auch die bei der Verarbeitung unabsichtlich erzeugten Ablösungen, besonders an den Rändern der Laminate, sind gut zu erkennen. Die relative Dicke der Kleberschicht lässt sich qualitativ auf allen Bildern erkennen, am deutlichsten jedoch auf dem Amplitudenbild. Den schärfsten Kontrast der Fehlstellen liefern die Phasenbilder[1].

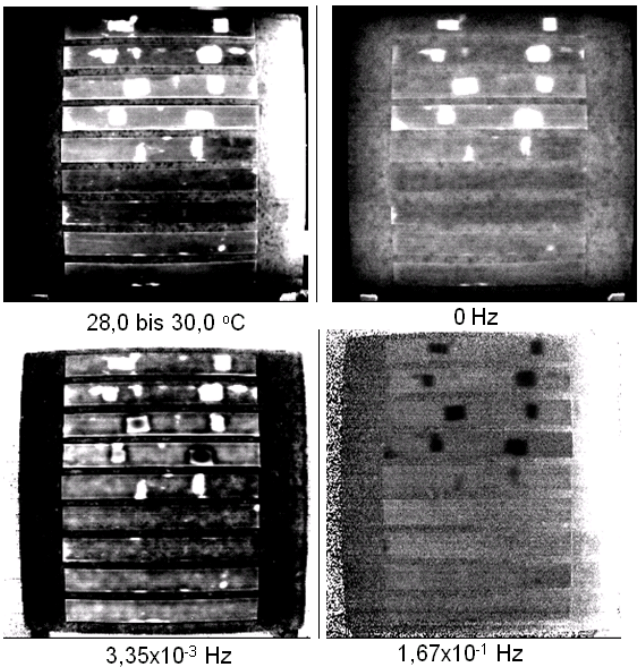


Abbildung 5.4.: Thermogramm nach 0 s Abkühlung des Probekörpers nach 1 min Erwärmungszeit (links oben), Amplitudenbild bei 0 Hz (rechts oben), Phasenbilder bei unterschiedlichen Frequenzen (unten); Breite und Höhe eines jeden Bildes entsprechen einem Ausschnitt von 132,5 x 126,5 cm^2 [AHM+04]

5.2.3. Putz auf Beton [AMR+04a], [AMR+04b]

Die Messungen erfolgten an einem verputzten Betonprobekörper ($1,50x1,50x0,50$ m^3) mit Gipsputzschichten unterschiedlicher Dicke (unten links: 10 mm, oben: 15 mm, unten rechts: 20 mm), der definierte Ablösungen zwischen Beton- und Putzschicht aufweist. Diese wurden bei der Herstellung des Probekörpers durch gelochte und ungelochte Papierstreifen (variierend zwischen 0,10 x 0,10 und 0,20 x 0,20 m^2) realisiert (siehe Abbildung 5.5).

[1] Aufgrund der hier dargestellten guten Ergebnisse werden im Rahmen des EU-Projektes „Sustainable Bridges“ (Projektakronym) weiterführende Untersuchungen durchgeführt mit dem Ziel, mit Hilfe eines optimierten Prüfkonzeptes, einschließlich Erwärmungseinheit und IR-Kamera, ein einheitliches Konzept für die Vor-Ort-Qualitätssicherung von CFK-Applikationen an Stahlbetonbauteilen zu entwickeln. Diese Zusammenhänge sind nicht Teil der Dissertation und werden anderweitig untersucht (vergleiche [HMR+06] oder [AHMR06]).

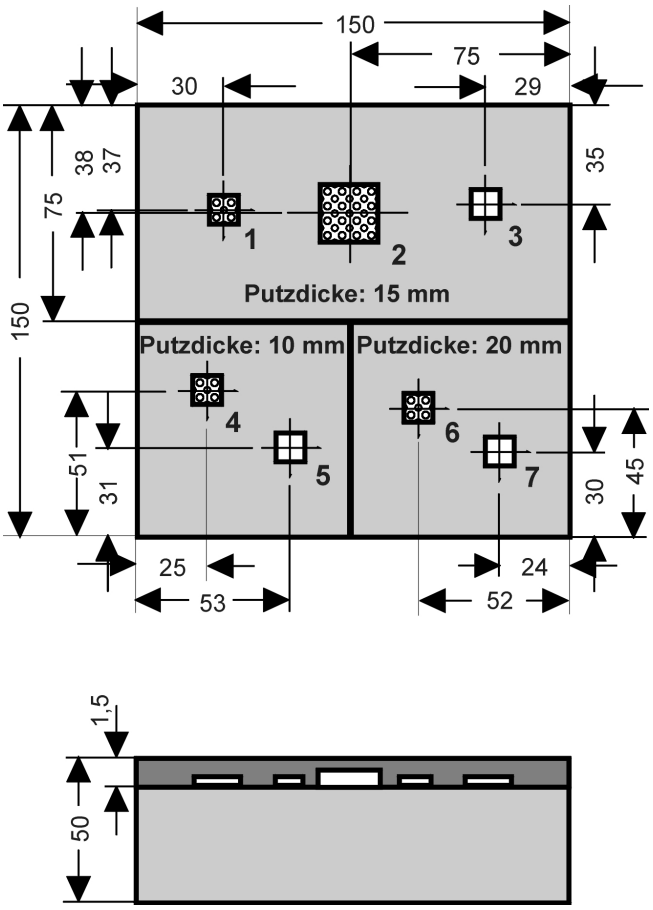


Abbildung 5.5.: Betonprobekörper PK I_4 ohne Bewehrung (150 x 150 x 50 cm^3); Gipsputz mit Ablösungen unterschiedlicher Ausdehnung simuliert durch gelochte und ungelochte Papierstreifen (alle Angaben in cm), Zeichnung: Borchard, BAM.

Der Probekörper wurde für die Messungen auf der Putzseite mit der automatisierten IR-Erwärmungseinheit erwärmt (siehe Abbildung 4.1). Die Erwärmungszeit betrug 12 min und die nachfolgende Beobachtungszeit 24 min. Die Auswertung erfolgte im Zeit- (IT/RIT) und im Frequenzbereich (PPT/RST).

Untersuchungsergebnisse

Ausgewählte Messergebnisse sind in Abbildung 5.6 zusammengefasst. Die obere Bildreihe zeigt Thermogramme nach 10, 100 und 500 s Abkühlung. Deutlich ist der Einfluss der in den Randzonen inhomogenen Erwärmung zu erkennen. Die untere Reihe zeigt Phasenbilder bei 6,94 x 10^{-4} Hz (Periodendauer 1440 s), 6,94 x 10^{-3} Hz und 3,47 x 10^{-2} Hz. Da die Amplitudenbilder gegenüber den Thermogrammen und Phasenbildern keine zusätzlichen Informationen enthalten, werden sie an dieser Stelle nicht weiter thematisiert. Neben den Fugen sind die Bereiche unterschiedlicher Putzdicke gut zu lokalisieren. Im ersten Phasenbild, bei einer Frequenz von 6,94 x 10^{-4} Hz, erscheint die Putzschicht mit 10 mm hell, die mit 15 mm hellgrau und die mit 20 mm dunkel. Auch gut auf den Phasenbildern sind Ablösungen in der 20 mm dicken Schicht zu erkennen. Lediglich die ungelochten Papierfehlstellen waren zu detektieren.

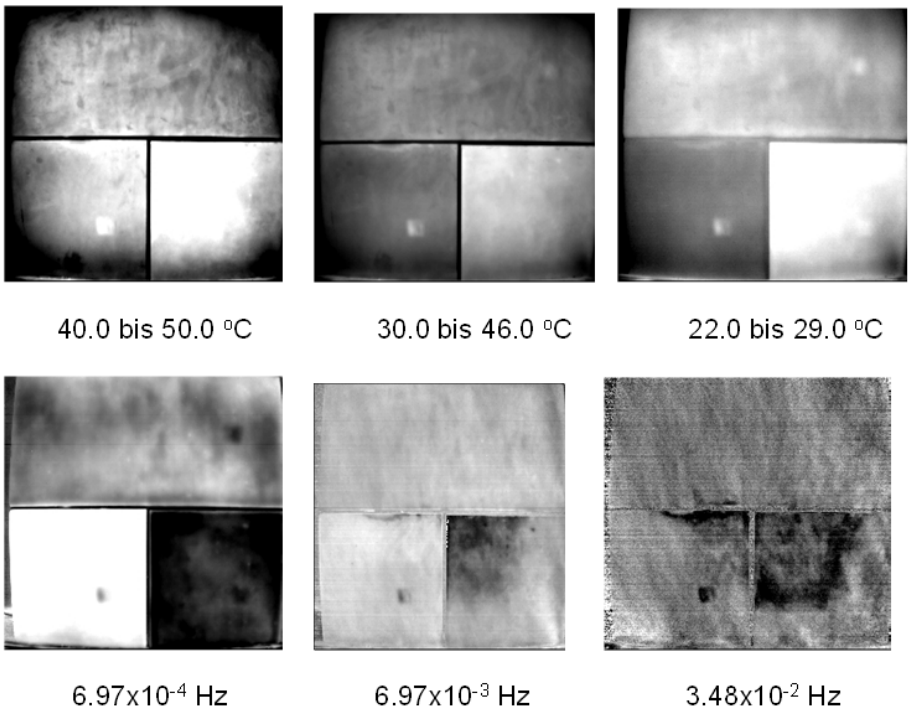


Abbildung 5.6.: Thermogramme nach 10, 100 und 500 s Abkühlung (oben, von links nach rechts) und zugehörige Phasenbilder bei ausgewählten Frequenzen (unten) [AMR+04a]

5.2.4. Putz auf Mauerwerk [AMR+04a], [AMR+04b]

Abbildung 5.7.: Großer Mauerwerksprobekörper der BAM [WKM04]

Im Rahmen eines EU-Projektes (Projektakronym: „Onsiteformasonry“) wurde in der BAM ein großformatiger Probekörper für Strukturuntersuchungen an historischem Mauerwerk erstellt (siehe Abbildung 5.7). Dieser wurde aus sorgfältig ausgewählten Materialien nach traditioneller Bauweise aufgebaut, um typische baupraktische Fragestellungen bei historischen Bauwerken untersuchen zu können [WKM04]. Untersucht wurden die drei verputzten Bereiche in Abbildung 5.7. Feld 3 (rechtes Feld in Abbildung 5.7), das hier repräsentativ untersucht wird, besteht aus Feldsteinen unterschiedlicher Größe, die mit einer Kalkputzschicht variierender Dicke (0,0 bis ca.

3,5 cm) verputzt sind. Im oberen Bereich wurde in 3 cm Tiefe eine Mauerwerkssäule eingebaut. Das untersuchte Messfeld hat eine Größe von ca. 1,0 x 1,0 m^2. Die Oberfläche wurde 12 min mit der automatisierten Erwärmungseinheit (siehe Abbildung 4.1) erwärmt. Die Aufnahmezeit betrug 30 min. Im Anschluss an die Datenerfassung (IT/RIT) wurde eine FT (PPT/RST) der Daten durchgeführt.

Untersuchungsergebnisse

Ausgewählte Thermogramme und Phasenbilder zeigt Abbildung 5.8. Auf die Darstellung der Amplitudenbilder wird aufgrund des fehlenden zusätzlichen Informationsgehaltes erneut verzichtet. In den Phasenbildern (Abbildung 5.8, unten) sind die Feldsteine und die Struktur der eingebrachten Mauerwerkssäule klarer zu erkennen als in den Thermogrammen (5.8, oben). Mit zunehmender Frequenz der Phasenbilder nimmt die Informationstiefe ab und umgekehrt.

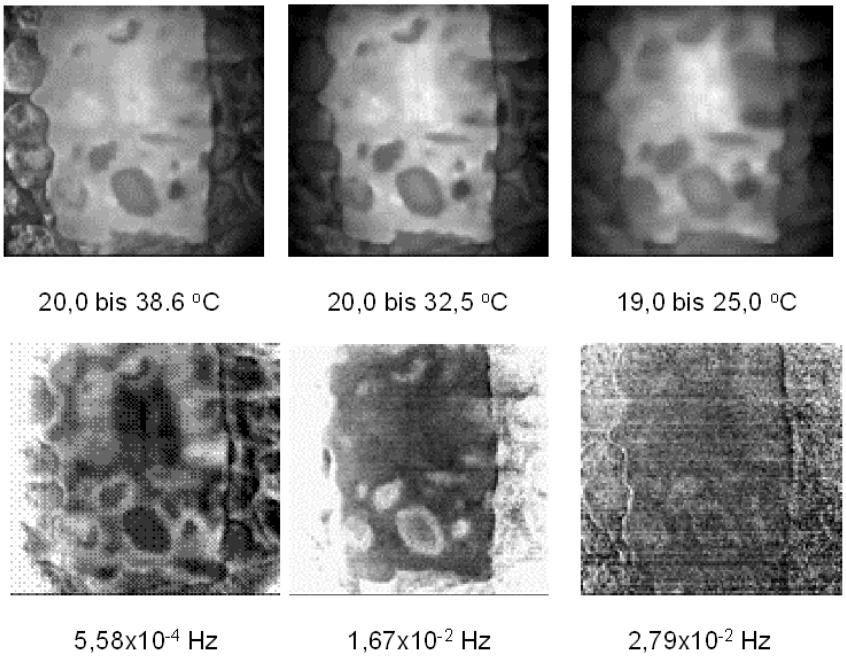


Abbildung 5.8.: Thermogramme nach 0, 50 und 500 s Abkühlung (von links nach rechts, oben) und zugehörige Phasenbilder bei ausgewählten Frequenzen (unten)

5.3. Hohlstellen und Verdichtungsmängel [MAR+03], [Bri05], [AHM+04] u. a.

Zum Thema „Ortung von Verdichtungsmängeln und Fehlstellen in Beton“ wurden im Rahmen des DFG-Projektes eine Anzahl von Probekörpern errichtet (siehe Tabelle 4.2) und eine Reihe von Untersuchungen und Simulationsrechnungen [Bri05] durchgeführt. Die wichtigsten Untersuchungsergebnisse wurden zu einem großen Teil bereits veröffentlicht [BMRW02], [HSRW01],[MAR+03],

[MAR+03], [AHM+04], [Bri05], [MAR+05b], [MAR05a], [RAM05], [WAM+05a], [MAR+06c], [MAR+06b] etc.

Im folgenden Abschnitt werden die wichtigsten Ergebnisse und Schlussfolgerungen kurz am Probekörper 1 vom Typ I, einem Probekörper aus Normalbeton mit den Kantenlängen 150x150x50 cm^3, erläutert. Es wurden vorab acht Fehlstellen aus Polystyrol-Hartschaum in unterschiedlichen Tiefen eingebracht (Fehlstellen F1 bis F4 20x20x10 cm^3 und Fehlstellen F5 bis F8 10x10x10 cm^3 groß) und fixiert. Abbildung 4.5, links (siehe auch Abbildung 5.9, links oben), zeigt eine schematische Skizze des Probekörpers und der Fehlstellen. Eine interessante Besonderheit von PK I_1 ist, dass die eingebauten Polystyrolfehlstellen nicht ordentlich fixiert waren und beim Betonieren aufschwammen. Die Fehlstellen F3 und F4 liegen besonders schräg und teilweise sichtbar an der Oberfläche, so dass sie für Thermografiemessungen nicht relevant sind. Die übrigen wurden mit Radar eingemessen. Die so ermittelten Betondeckungen sind in Tabelle 5.1 zusammengestellt. Die thermografischen Messungen zu den in Abbildung 5.9 dargestellten

Fehlstelle	F1	F2	F3	F4	F5	F6	F7	F8
Betondeckung ± 1 cm	9,2	7,6	-	-	3,0	4,3	3,5	4,3

Tabelle 5.1.: Durch Radar ermittelte Betonüberdeckung der Fehlstellen von PK I_1

Ergebnissen fanden ein Jahr nach der Herstellung statt. Die Erwärmungszeit betrug 30 min, die Beobachtungszeit 120 min. Weitere Einzelheiten zum Messaufbau sind Tabelle 4.1 und Abbildung 4.1 in Kapitel 4.2 zu entnehmen.

Untersuchungsergebnisse

In Abbildung 5.9 sind oben zwei Thermogramme direkt nach der Erwärmung und nach Abkühlzeiten von ca. 100 min dargestellt. In der Mitte sind zwei Amplituden- und unten zwei Phasenbilder bei unterschiedlichen Frequenzen abgebildet. Die Grauwerte in Abbildung 5.9 sind auf Maximum (weiß) und Minimum (schwarz) von Temperatur, Amplitude und Phase skaliert. In den Thermogrammen sind bereits direkt nach der Erwärmung die oberflächennahen Fehlstellen Nr. 3 bis 8 in Tiefen von 1 bis 4 cm gut zu erkennen. Die tieferen Fehlstellen Nr. 1 und 2 werden erst nach ca. 30 min nachweisbar und sind auch nach 100 min noch gut zu erkennen, wohingegen die kleinen und flachen Fehlstellen Nr. 5 bis 8 nicht mehr zu sehen sind. Es ist deutlich zu erkennen, dass die Fehlstellen Nr. 3 und 4 schief eingebaut wurden und zum Teil tiefer liegen als die geplanten 2 cm. In den Amplituden- und in den Phasenbildern sind bei niedriger Frequenz alle Fehlstellen zu erkennen. Mit zunehmender Frequenz sind nur noch die flachen Fehlstellen sichtbar, wobei diese in den Phasenbildern bei deutlich höheren Frequenzen als in den Amplitudenbildern zu beobachten sind. Die tiefen Fehlstellen Nr. 1 und 2 sind in den Phasenbildern wesentlich besser zu erkennen als in den Amplitudenbildern und auch besser als in den oben dargestellten Thermogrammen. Auch treten in den Phasenbildern keine Streifen durch inhomogene Erwärmung auf wie im Thermogramm nach 0 min Abkühlung und wie in den Amplitudenbildern. Gut zu erkennen ist auch die Schieflage der Fehlstellen F2 und F4 anhand von Phasensprüngen, besonders im ersten Phasenbild.

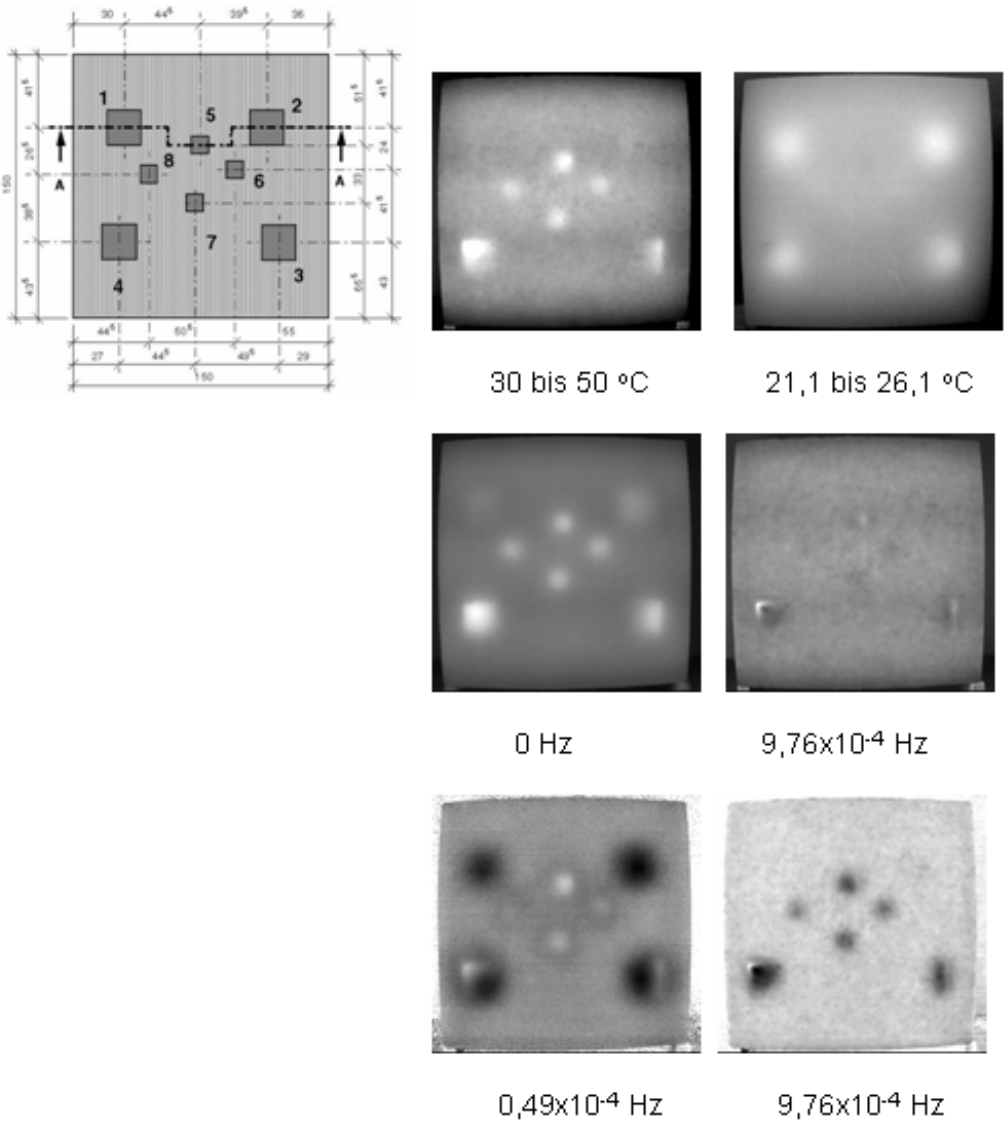


Abbildung 5.9.: Thermogramme nach 0 und 6000 s Abkühlung (oben), Amplituden- (Mitte)und Phasenbilder (unten) zu unterschiedlichen Frequenzen von PK I_1 (links oben)

5.4. Untersuchung des Einflusses unterschiedlicher Oberflächenverunreinigungen [RAM05]

In den Probekörper II_1 mit den Abmaßen 100*x*100*x*30 cm^3 wurden vier Fehlstellen der Größe 10*x*10*x*5 cm^3 in Tiefen von 6 und 10 cm eingebaut (siehe Abbildung 4.5, rechts, beziehungsweise 5.12). Jeweils zwei Fehlstellen wurden durch Polystyrol-Hartschaum und Porenbeton simuliert. Diese Fehlstellen wurden so fixiert, dass ein Aufschwimmen während des Betonierens verhindert wurde. Ein Jahr nach der Herstellung wurden an diesem Probekörper Messungen mit Erwärmungszeiten von 5, 10, 15 und 30 min durchgeführt. Der Abkühlungsprozess wurde über einen Zeitraum von zwei Stunden mit einer Bildaufnahmefrequenz von 2 Hz beobachtet. Zwei Jahre nach der Herstellung wurde der Probekörper zur Untersuchung des Einflusses von Oberflächenverunreinigungen, Anstrichen und Inhomogenitäten modifiziert. Wie in Abbildung 5.10, links,

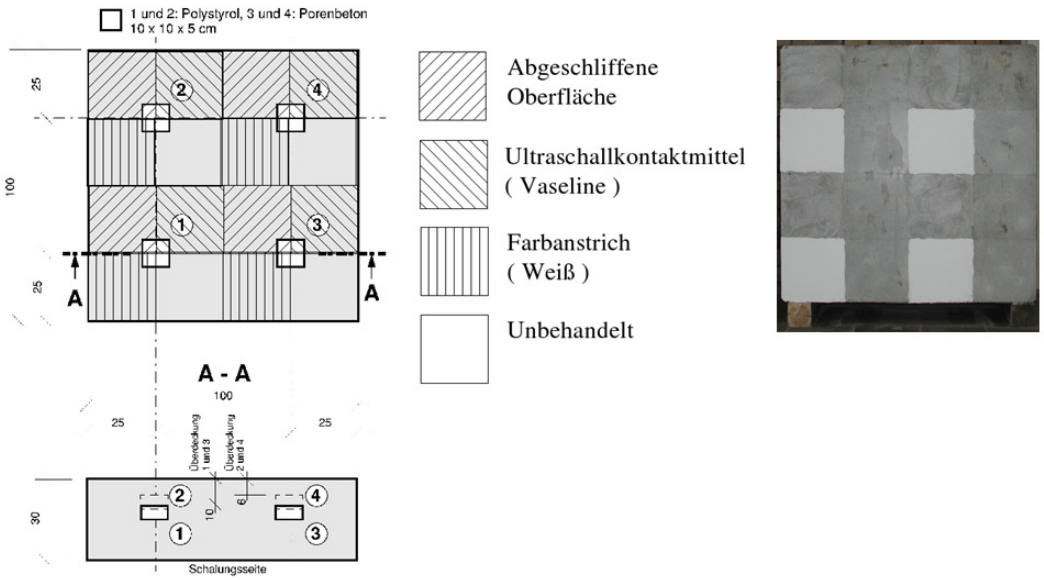


Abbildung 5.10.: Skizze von Probekörper PK II_1b mit Fehlstellen aus Polystyrol und Porenbeton in verschiedenen Tiefenlagen mit Oberflächenmodifikation, Zeichnung: Borchard (links) und Foto: (rechts) [RAM05]

dargestellt, wurden Teile der Oberfläche angeschliffen, mit einem weißen Farbanstrich versehen oder mit Vaseline (Kontaktmittel für Ultraschalluntersuchungen) verunreinigt. Ein Foto der so veränderten Oberfläche des Probekörpers zeigt Abbildung 5.10, rechts. Messungen erfolgten hier ebenfalls nach Erwärmungszeiten von 5, 10, 15 und 30 min über einen Zeitraum von jeweils zwei Stunden mit einer Bildwiederholrate von 2 Hz.

Untersuchungsergebnisse

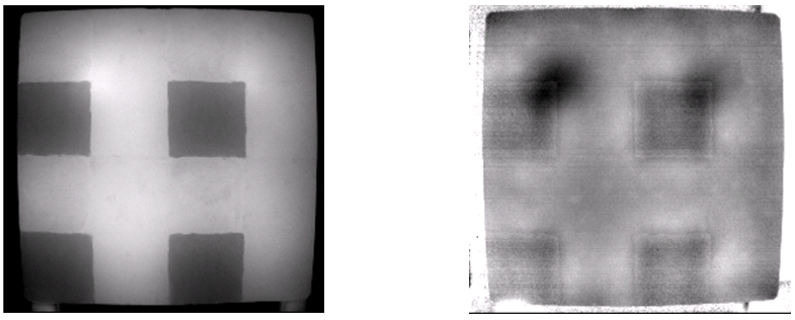


Abbildung 5.11.: Thermogramm mit maximalem Temperaturkontrast (links) für die Fehlstelle F2 nach 900 s Abkühlung (Temperaturbereich von 27 bis 39 °C) und Phasenbild mit maximalem Phasenkontrast für die Fehlstelle F2 bei einer Frequenz von 2,463 x 10^{-4} Hz (rechts) von PK II_1b [RAM05]

Thermogramm und Phasenbild bei jeweils maximalem Kontrast der Fehlstelle F2 des durch unterschiedliche Oberflächenbehandlungen modifizierten Probekörpers B sind in Abbildung 5.11 dargestellt. Im Thermogramm ist besonders deutlich der weiße Farbanstrich zu erkennen, der

die Emissivität der Oberfläche verändert. Dahinter sind die Fehlstellen nur noch sehr undeutlich sichtbar. Die Bereiche mit angeschliffener Oberfläche beziehungsweise mit Verunreinigungen durch Vaseline unterscheiden sich nicht eindeutig von den unbehandelten Bereichen.
Im Phasenbild ist der Einfluss des Farbanstriches wesentlich geringer als im Thermogramm. Die darunter liegenden Fehlstellen sind viel deutlicher zu erkennen. Auch hier unterscheiden sich die Bereiche mit Anschliff und Vaseline nicht eindeutig von der Umgebung.

5.5. Einfluss von Materialparametern [Bri05], [MAR$^+$05b] oder [MAR05a]

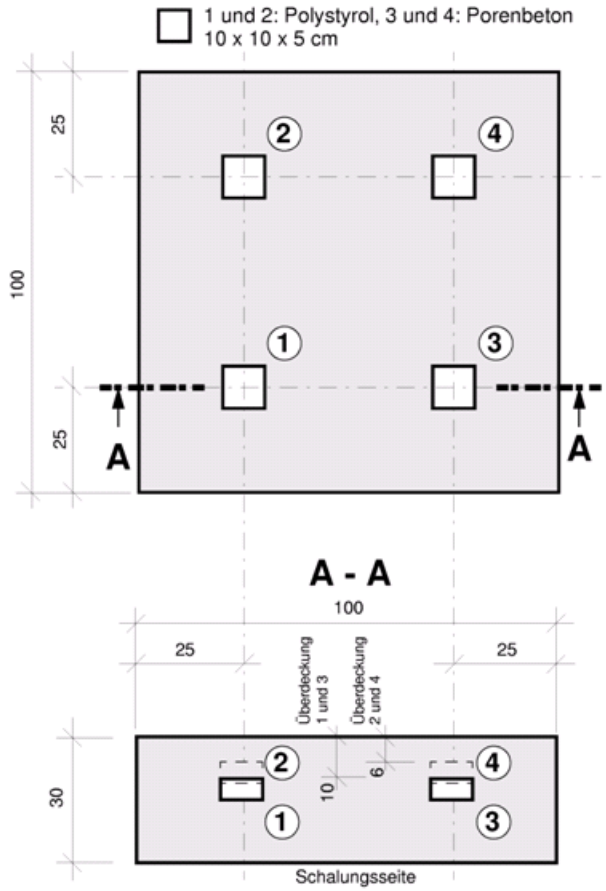


Abbildung 5.12.: Skizze von Probekörper PK II_1 bis PK II_4 mit unterschiedlichen Materialeigenschaften und Fehlstellen aus Polystyrol und Porenbeton in verschiedenen Tiefenlagen [BMRW02], [MAR$^+$05b]

Ein Forschungsschwerpunkt von Teil 2 des DFG-Projektes war die Untersuchung des Einflusses von Betonalter (Hydratisierungsgrad), Porengehalt in der Zementsteinmatrix, Porengehalt in den Zuschlagstoffen und Dichte der Bewehrung auf die Ortung von Fehlstellen mit der aktiven Thermografie. Zu diesem Zweck wurden vier Probekörper vom Typ II (vergleiche Abbildung 5.12, rechts) mit einer Korngrößenverteilung von A/B 16 und einem Wasser-Zement-Wert von 0,6 erstellt (siehe auch Tabelle 4.2). Systematische Untersuchungen zur Fehlstellengröße und Betonüberdeckung

wurden simuliert und experimentell untersucht (siehe vor allem die Dissertation von Brink [Bri05]). Es konnten folgende Schlussfolgerungen gezogen werden [MAR+05b]:

5.5.1. Einfluss des Reifegrades

Im Verlaufe der Hydratation werden die thermischen Eigenschaften des Betons verändert. Simulationen zeigten und Versuche bestätigten, dass mit zunehmender Reife des Betons sich der Temperaturkontrast ΔT_{max} verringert (bei einer 6 cm tiefen Fehlstelle von 1,78 auf 1,55 K), während der Zeitpunkt des maximalen Kontrastes sich auf spätere Zeitpunkte verschiebt (von 900 auf 1100 s), was einer gleichzeitigen Abnahme der Wärmeleitfähigkeit entspricht (vergleiche Abbildung 5.13).

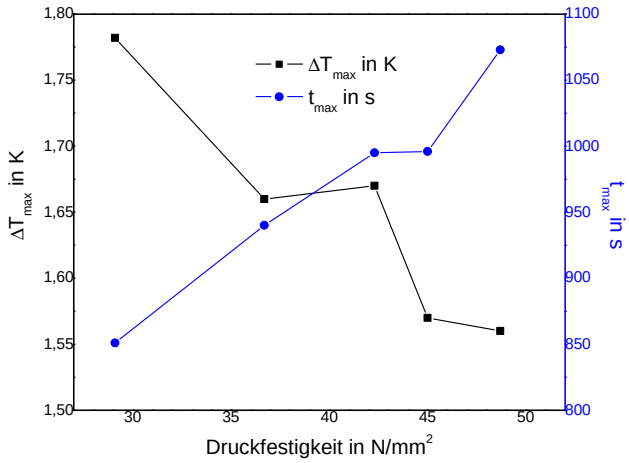


Abbildung 5.13.: Maximale Temperaturdifferenz ΔT_{max} und Zeitpunkt der maximalen Temperaturdifferenz t_{max} der Fehlstelle F2 von PK II_1 (Abbildung 4.5, rechts) als Funktion der Würfeldruckfestigkeit während der Hydratation [MAR05a]

5.5.2. Einfluss von Dichte, Porosität und Stahlfaseranteil

Sowohl beim im Probekörper II_2 mit porigen Zuschlägen als auch bei PK II_3 mit Luftporenbildner zeigten sich veränderte thermische Eigenschaften des Betons. Die durchgeführten Untersuchungen sowie der Vergleich mit den numerischen Simulationen zeigen, dass bei PK II_2 im Wesentlichen die Reduzierung der Dichte einen Einfluss auf die Messergebnisse hat, während sich bei PK II_3 die Einflüsse der Änderung der Dichte und der Änderung der Wärmeleitfähigkeit überlagern (vergleiche 5.14). Die eingebrachten Stahlfasern in PK II_4 führten indirekt zu einem stärkeren Aufheizen des Probekörpers durch zusätzlich eingebrachte Luftporen und die dadurch verringerte Dichte und Wärmeleitfähigkeit [MAR+05b].

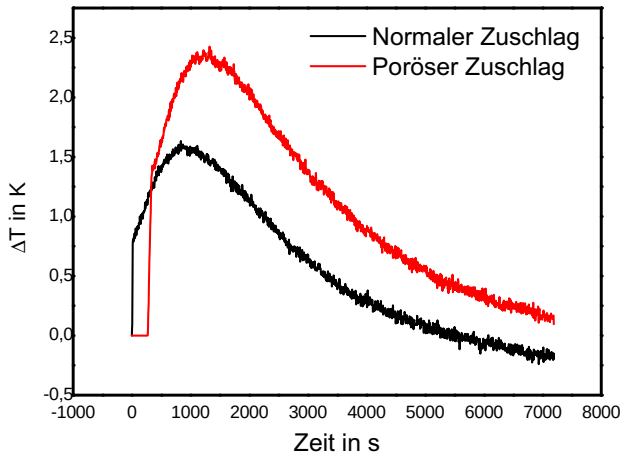


Abbildung 5.14.: Temperaturkontrastkurve für Fehlstellen mit 6 cm Betondeckung bei Normalbeton (PK II_1, schwarz) und Beton mit porösem Zuschlag (PK II_2, rot) ΔT_{max} nimmt um ca. 1 K zu und t_{max} um 500 s [MAR05a]

5.5.3. Einfluss des Bewehrungsgrades

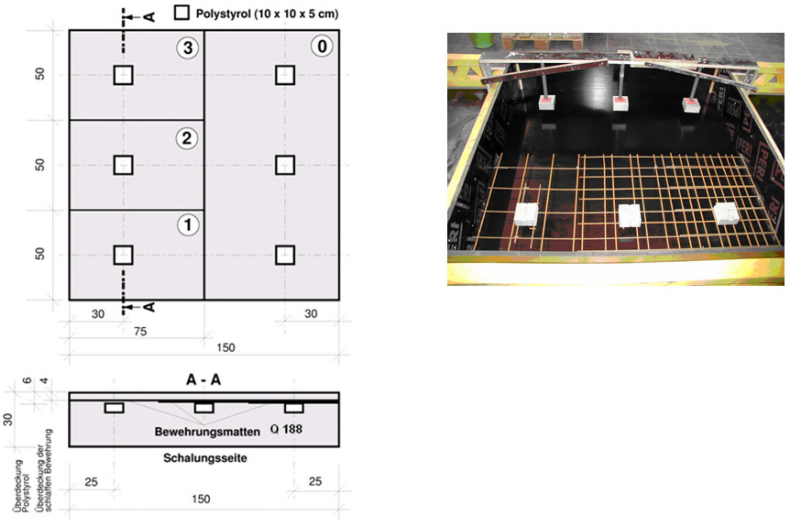


Abbildung 5.15.: Probekörper PK I_5 mit schlaffer Bewehrung und Polystyrolfehlstellen mit 6 cm Betondeckung, Zeichnung: Borchard, BAM (links), Foto direkt vor dem Betonieren (rechts) [MAR05a]

Untersuchungen an PK I_5 (siehe Abbildung 5.15) ergaben, dass der Bewehrungsgrad einen geringen Einfluss auf die Nachweisempfindlichkeit von Defekten im Zeitbereich hat beziehungsweise dass schlaffe Bewehrung nur sehr schwer bis gar nicht zu detektieren ist (siehe Abbildung 5.16). Zu den Untersuchungen von PK I_5 im Frequenzbereich siehe Kapitel 8.3.2.

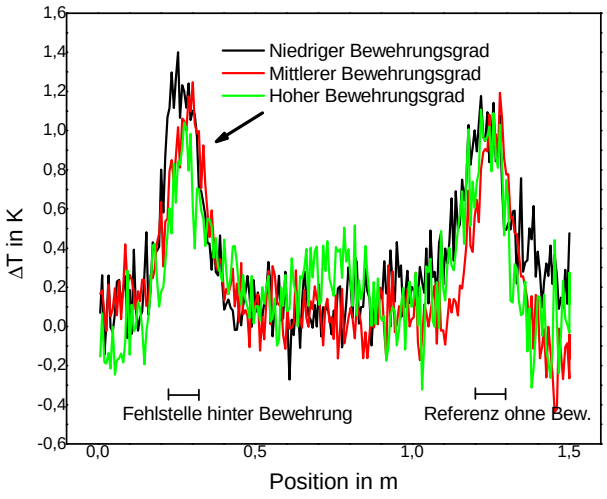


Abbildung 5.16.: Temperaturscan über Fehlstellen mit 6 cm Betondeckung bei Normalbeton (PK I_5, schwarz) mit unterschiedlichem Bewehrungsgrad (linke Seite) und ohne Bewehrung (rechte Seite, Referenz) [MAR05a]

5.6. Untersuchungen der TUB [RH03], [WAM+05a] oder [HRWS05]

Von der TUB wurde unter anderem die Anwendbarkeit der Impuls-Thermografie zur Ortung unverpresster Bereiche in Spanngliedern untersucht [RH03]. Auch zur Ortung von Rissen in Beton- und Stahlbetonbauteilen wurde die IT/RIT erfolgreich eingesetzt [WAM+05a]. Im folgenden Abschnitt werden bereits veröffentlichte Untersuchungen an Hüllrohren dargestellt.

Hüllrohre und Verpressfehler in Spannbetonbauteilen (Hillemeier, Rieck und Walther [AHM+04])

Um die Anwendbarkeit der Impuls-Thermografie auf die Detektion von Verpressfehlern in Hüllrohren zu untersuchen, wurden 3,50 m lange Probekörper aus Stahlbeton mit zwei Spanngliedern hergestellt, die eine Betondeckung von 5 cm auf der einen und von 8 cm auf der anderen Seite aufweisen.
In die Hüllrohre der Spannglieder vom Durchmesser 80 mm wurden jeweils drei unverpresste Bereiche von je 45 cm eingebaut. Die Wärmeenergie wurde auf drei unterschiedliche Arten eingebracht.

1. Nutzen der Hydratationswärme des Verpressmörtels beim Erhärten: Die Lage der Hüllrohre und die Lage der Verpressfehler war schon wenige min nach dem Verpressen gut zu erkennen.

2. Der Spannbetonprobekörper wurde von außen durch Infrarotstrahler mit einer elektrischen Anschlussleistung von 5200 W 15 min lang erwärmt. Nur die Verpressfehler in den Hüllrohren mit geringer Betondeckung (c = 5 cm) konnten sicher detektiert werden.

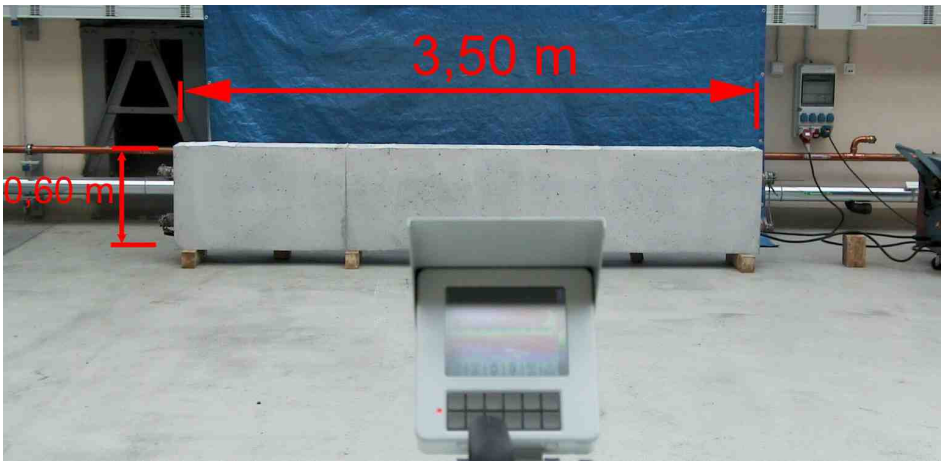


Abbildung 5.17.: Versuchsaufbau: Die Elektroden des Transformators sind mit Kupferdraht an die Spanndrähte angeschlossen, Walther, TUB [AHM+04].

3. Die Erwärmung erfolgte durch eine konduktive Widerstandserwärmung der Spannstähle in den Hüllrohren. Mit Hilfe eines Transformators wurde ein Strom von 25 A 15 min lang durch die Spannstähle geleitet (Abbildung 5.17).

Die unverpressten Bereiche in den Hüllrohren sind auf dem Thermogramm in Abbildung 5.18 gut als Bereiche geringer Temperatur zu erkennen (Betondeckung der Hüllrohre = 8 cm). Die elektrischen Kontakte zeigen sich wegen des erhöhten Übergangswiderstands als wärmste Stellen. Der mit Thermoelementen gemessene Temperaturanstieg innerhalb der Hüllrohre betrug ca. 5 K. Das Wärmebild in Bild 5.18 wurde etwa 40 min nach dem Beginn des Erwärmens aufgenommen. Die PPT/RST kam nicht zum Einsatz.

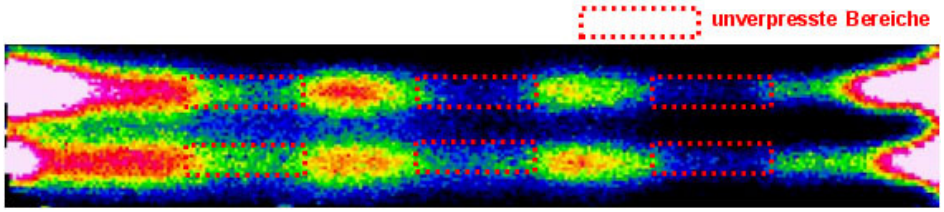


Abbildung 5.18.: Temperaturverteilung 23 min nach Abschalten der Wärmequelle (weiß: Temperatur > 16,0 °C, schwarz: Temperatur < 14,5 °C). Die sechs Verpressfehler sind kälter als die verpressten Bereiche der zwei horizontal verlaufenden Spannglieder, Walther, TUB [AHM+04].

5.7. Resümee

Aus den vorhergehenden qualitativen Untersuchungen ergeben sich die folgenden Ergebnisse und Schlussfolgerungen:

- Die Phasenauswertung im Frequenzbereich (RPT) führt häufig zu einer verbesserten Nachweisempfindlichkeit tiefer Fehlstellen, einer kontrastreicheren Darstellung und einer

größeren Unabhängigkeit von Oberflächeneffekten sowie einer ungleichmäßigen Erwärmung.

- Bei den Phasen ist ein Zusammenhang zwischen der Frequenz bei der eine Fehlstelle gut detektierbar ist und ihrer Tiefe erkennbar geworden. Je tiefer die Fehlstelle desto niedriger ist die Frequenz bei der sie detektierbar ist und umgekehrt.
- Auf eine vergleichende Untersuchung mittels Amplituden (RAT) und im Zeitbereich sollte jedoch nicht verzichtet werden, da auch hier wichtige Informationen enthalten sein können (vergleiche Kapitel 5.2.2 mit den Untersuchungsergebnissen an CFK auf Beton).
- Durch die langen Erwärmungs- und Beobachtungszeiten können Defekte einer Tiefenlage von bis zu 10 cm nachweislich detektiert werden, was mit einer reinen Impulsanregung nicht möglich wäre.
- Die verwendeten Verfahren eignen sich zur zerstörungsfreien Prüfung einer Vielzahl baupraktischer Fragestellungen, die sowohl bei der Qualitätssicherung als auch im Rahmen von Bauwerksprüfungen bis hin zu Standsicherheitsbewertungen anfallen können. Sie wurden unter anderem erfolgreich eingesetzt bei der Ortung von [MAR+05b]:
  - Hohlstellen und Ablösungen hinter Beschichtungen (zum Beispiel Spaltklinker und CFK-Laminate auf Beton, Putz auf Beton oder Mauerwerk)
  - Hohlstellen und Kiesnestern in Beton
  - unverfüllten Fugen in Mauerwerk
  - Spanngliedern und Verpressfehlern in Hüllrohren

Fazit: Die RST ist eine ideale Ergänzung der RIT bei der qualitativen zerstörungsfreien Prüfung oberflächennaher Strukturen im Bauwesen. Weiterführende quantitative Untersuchungen erscheinen gerade bei den Phasen vielversprechend und werden im folgenden durchgeführt.

6. Ein neuer Ansatz für die quantitative Rechteckimpuls-Spektral-Thermografie

Einführung

In Kapitel 3.1.3 wurden die Schwierigkeiten einer quantitativen PPT beschrieben. Sie bestehen

1. in der Eigenschaft der Fourier-Transformation, das die Zeit-Tiefenzuordnung der Temperaturkontrastkurven im Frequenzbereich nicht vorhanden ist [GM00] und
2. in dem doppelten Weg einer „Wärmewelle“[1] zu einem Defekt und zurück zur Oberfläche, wodurch die Frequenzauflösung uneindeutig wird (nach [MG01], Seite 316).

Desweiteren wurde dort gesagt, dass die aus der Literatur bekannten Lösungen einer quantitativen PPT über die thermische Eindringtiefe μ und die Blindfrequenz f_b und scheinbare Blindfrequenz f_b' (vergleiche Abbildung 3.8) für Anwendungen im Bauwesen nur bedingt funktionieren.
In Kapitel 5 wurde allerdings festgestellt, dass ein Zusammenhang zu bestehen scheint, zwischen der Frequenz, bei der ein Defekt gut detektierbar ist, und seiner Tiefe.
Im folgenden Kapitel wird das inverse Problem der quantitativen aktiven Thermografie im Bauwesen gelöst, indem es auf die Grundlagen einer Rechteckimpuls-Thermografie (RIT) im Zeitbereich zurückgeführt wird. Auf die so gewonnenen Daten werden die Prinzipien der PPT angewendet und die Daten mittels Fourier-Transformation in den Frequenzbereich in Amplitudenspektren (Rechteckimpuls-Amplituden-Thermografie) und Phasenspektren (Rechteckimpuls-Phasen-Thermografie) transformiert. Dabei werden nicht nur wie in der klassischen PPT die Phasendaten (RPT), sondern auch die Amplituden (RAT) für einen quantitativen Nachweis verwendet, was schließlich zum neuen Ansatz einer quantitativen Rechteckimpuls-Spektral-Thermografie (RST) auf Grundlage der charakteristischen Frequenz f_{ch} des maximalen Phasen- beziehungsweise Amplitudenkontrastes führt[2].
Das von Galmiche, Vallerand und Maldague ([GVM00] nach [MG01]) bezeichnete zweite Grundproblem der des doppelten Weges eines an der Oberfläche angeregten Wärmestroms bei der quantitativen PPT wird dadurch lösbar, dass in der RIT im Bauwesen der untersuchte Probekörper

[1] Auf das Konzept von Wärmewellen wird hier nicht weiter eingegangen. Im Sinne einer Anregung mit einem Wärmepuls ist auch der Verfasser der Meinung, man sollte besser von einem Diffusionsvorgang beziehungsweise Wärmefluss sprechen, da eben keine periodische Anregung vorliegt.

[2] Die Begriffe Rechteckimpuls-Amplituden-Thermografie (RAT) und Rechteckimpuls-Phasen-Thermografie (RPT) sind Schöpfungen des Verfassers. Ihm sind keinerlei andere Veröffentlichungen bekannt, die diese Ansätze thematisieren würden. Sie sind abgeleitet von der verwendeten Rechteckimpuls-Erwärmung (RI), abgeleitet aus dem englischen *square pulse heating* [VB01], der IT und der PPT. Der gleichfalls vom Verfasser hier eingeführte Begriff RST bildet die Synthese von RAT und RPT im Frequenzbereich und kann auch als RIT im Frequenzbereich verstanden werden. Vergleiche hierzu die Einführung dieser Arbeit.

so stark mit Wärmeenergie aufgeladen wird, dass er selber als Wärmequelle fungiert und nicht mehr nur als Reflektor des eingeprägten Wärmepulses (vergleiche Kapitel 1).
Grundvoraussetzung des neuen Ansatzes ist, das die Aufnahmezeit ausreichend lang ist, um das Tiefensignal aufzuzeichnen. Aus der von der Impuls-Thermografie bekannten Beziehung $t \propto \frac{z^2}{\alpha}$ (Gleichung 3.4) und der einfachen Wechselbeziehung $t = 1/f$ leitet sich mit Hilfe der Fourier-Transformation die Beziehung $z \propto \sqrt{\frac{\alpha}{f}}$ in der in Gleichung 6.1 angegebenen Form ab. Dabei macht man sich die bekannte Eigenschaft der Fourier-Transformation zu Nutze, das ein zeitbegrenztes Signal einen umso stärkeren Ausschlag im Frequenzbereich erzeugt, je größer sein zeitlicher Anteil an der Aufnahmezeit ist (vergleiche Abbildung 2.15 in Kapitel 2.3.4). So löst man gleichzeitig das erste von Galmiche und Maldague benannte Problem einer quantitativen PPT, das Zeitinformationen nach einer Fourier-Transformation im Frequenzbereich verloren gehen [GM00].
Um die Problematik zu veranschaulichen, wird zunächst auf die bereits anderweitig vom Verfasser noch unter dem Namen der PPT veröffentlichten Zusammenhänge über die *charakteristische Frequenz* f_{ch} des negativen Maximums des Phasenkontrastes $\Delta\phi_{min}$ eingegangen (vergleiche Abbildung 3.8 und [AHMR06], [AMR06]). Es folgen Abschnitte über RAT im Vergleich zu RPT beim quantitativen Nachweis und eine Diskussion über den durch einen Rechteckimpuls angeregten Wärmefluss in einem halbunendlichen Körper in einem gesonderten Kapitel (Kapitel 7). In einem weiteren Kapitel schließlich werden systematische Untersuchungen und Simulationen durchgeführt in denen der neue Ansatz auf seine Wirksamkeit geprüft und verifiziert wird (Kapitel 8).

6.1. Experimenteller Aufbau

Die Untersuchungen erfolgten mit dem in Kapitel 4 dargestellten Konzept mit der automatisierten IR-Erwärmungseinheit (siehe Kapitel 4.2, Tabelle 4.1 und Abbildung 4.1) anhand der Probekörper I_1 und II_1 (siehe Abbildung 4.5 und Tabelle 4.2).
Beide Probekörper wurden mit der automatisierten Erwärmungseinheit angeregt, die periodisch mit einer Schrittgeschwindigkeit von ca. 0,1 m/s verfahren wird. PK I_1 mit drei Strahlern mit einer mittleren Leistung von ca. 1250 W/m^2 und PK II_1 mit zwei Strahlern mit einer mittleren Leistung von ca. 1800 W/m^2. Die Ermittlung der Strahlerleistung erfolgte über eine Kalibrierung der gemessenen Erwärmung an einem schwarzen Körper (siehe [BMRW02] und [Bri05]).
Weitere Parameter, soweit nicht anders angegeben, sind:

- Aufnahmezeit $T = 7200$ s
- Abtastintervall $\Delta t = 5$ s
- $f_{max} = 1/2\Delta t = 0,1$ Hz
- *Zero-Padding* mit $N_f = 2^{11} = 2048$ Bildern
- Resultierende Abtastrate $\Delta f = f_{max}/N_f = 4,8828 \times 10^{-5}$ Hz
- Temperaturleitfähigkeit des Betons $\alpha_{Beton} = 8,75 \times 10^{-7}$ m^2/s nach Gleichung 7.16

Es wurden in [AHMR06] und [AMR06] aus Gründen der Vergleichbarkeit zunächst nur Polystyrolfehlstellen betrachtet. Die Ergebnisse der Untersuchungen an den Porenbetonfehlstellen von PK II_1 werden in einem Nachtrag diskutiert.

6.2. Die charakteristische Frequenz des maximalen Phasenkontrastes - ein einführender Rückblick

In [AHMR06] erläuterte der Verfasser, dass die aus der Literatur bekannten quantitativen Ansätze der PPT auf Grundlage der *thermischen Eindringtiefe* μ ([GM02], [WWB+03]) beziehungsweise der *Blindfrequenz* f_b, bei der ein Phasenkontrast zu null wird [ICM04b], oder der *scheinbaren Blindfrequenz* f_b' für Daten schlechter Qualität [IC05] nur bedingt für Anwendungen im Bauwesen einsetzbar sind. So konnte bei vielen Untersuchungen weder die Blindfrequenz f_b noch die scheinbare Blindfrequenz f_b' mit ausreichender Genauigkeit bestimmt werden (siehe Abbildung 3.8 im Vergleich zu Abbildung 6.1 und 6.2)[3], wohingegen der mit negativem Vorzeichen maximale Phasenkontrast immer eindeutig verifizierbar war (siehe hierzu auch Abbildung 6.2 mit den Phasendifferenzkurven für 30, 15, 10 und 5 min Erwärmung). Auch eine Systematik wurde

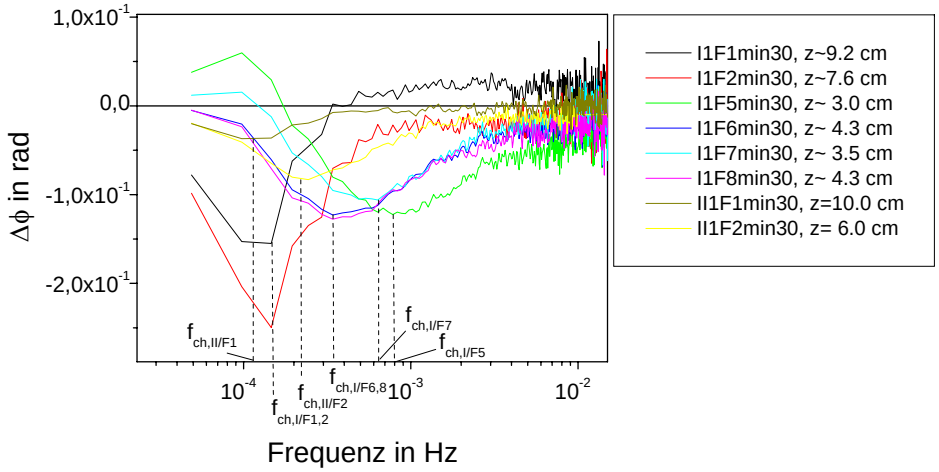


Abbildung 6.1.: Phasenkontrastkurven für die Polystyrolfehlstellen F1, F2, F5 bis F8 von PK I_1 und F1, F2 von PK II_1 mit markierten f_{ch} für 30 min Erwärmung mit der automatisierten Erwärmungseinheit aus Tabelle 4.1. Lediglich bei den tiefen Fehlstellen PK I_1 F1, F2 und PK II_1 F1 sind auch f_b und f_b' eindeutig bestimmbar und für PK I_2 F2 wenigstens f_b'.

[3] Den Grund für die Unmöglichkeit, in vielen Fällen f_b und sogar f_b' eindeutig zu bestimmen, sah der Verfasser zunächst in den im Verhältnis zur Werkstoffprüfung schlechten Randbedingungen bei der ZfP im Bauwesen. Diese Aussage kann im Rahmen dieser Arbeit relativiert werden. So konnte f_b sehr wohl an den Probekörpern mit Ablösungen in Grenzschichten bestimmt werden (siehe hier vor allem die Untersuchungen an PK I_2 in Kapitel 8), aber eben nicht bei den Probekörpern, die von umgebendem Material umschlossen sind.

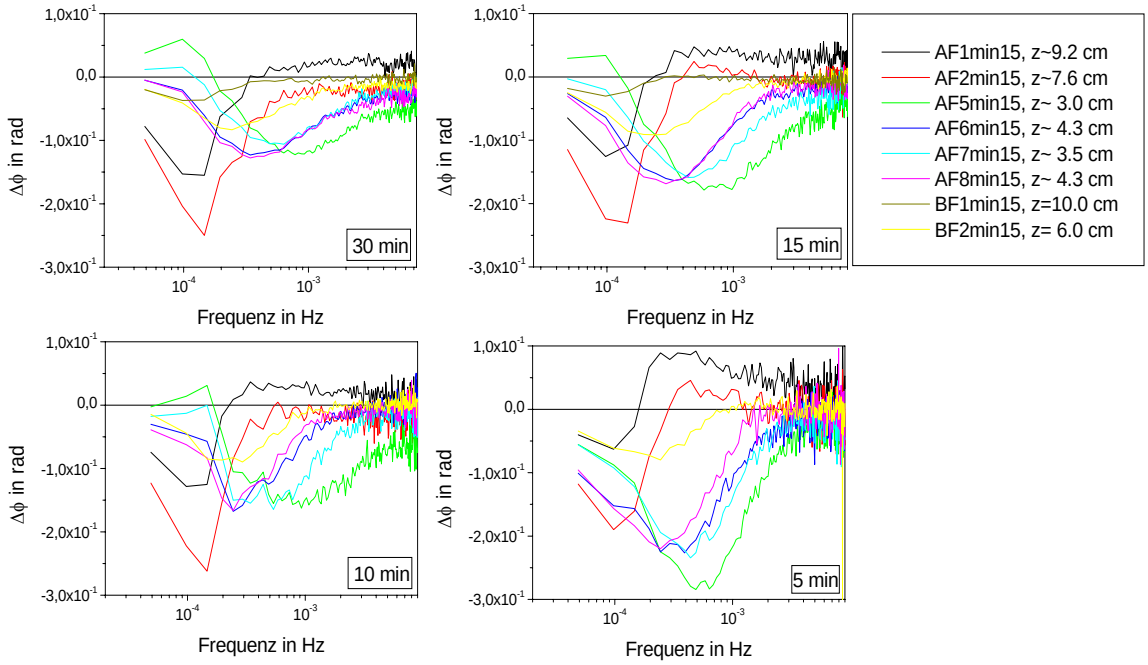


Abbildung 6.2.: Phasenkontrastkurven für die Polystyrolfehlstellen F1, F2, F5 bis F8 von PK I_1 und F1, F2 von PK II_1 für 30, 15, 10 und 5 min Erwärmung mit der automatisierten Erwärmungseinheit aus Tabelle 4.1. Es wird eine starke Ähnlichkeit besonders bei f_{ch} deutlich, lediglich die Größe des Kontrastes $\Delta\phi$ variiert, besonders bei den 5 min Erwärmung (siehe Tabelle 6.3 und [AMR06]).

erkennbar: je tiefer die Fehlstelle, desto niedriger die charakteristische Frequenz f_{ch} und umgekehrt. Sogar eine gewisse Unabhängigkeit gegenüber der Erwärmungsdauer war zu bemerken (siehe Abbildung 6.2 und Tabelle 6.3).
Dies führte zu folgendem quantitativem Ansatz auf Grundlage des maximalen Phasenkontrastes [AHMR06] mit dem Korrekturfaktor k_c:

$$z = f(\sqrt{\frac{\alpha}{f_{ch}}}) = k_c \cdot \sqrt{\frac{\alpha}{f_{ch}}}. \tag{6.1}$$

Der erwartete Einfluss der Erwärmungszeit und variierender Materialparameter (wie von der PPT bekannt, vergleiche hierzu [IC05] und Kapitel 3.1.3 dieser Arbeit mit den dort beschriebenen

Erwärmungszeit	30 min	15 min	10 min	5 min
Korrekturfaktor k_c	1,22	1,21	1,02	0,96

Tabelle 6.1.: Korrekturfaktor k_c für variierende Erwärmungszeiten

Korrelationsfaktoren für unterschiedliche Materialien) sollte über den Korrekturfaktor k_c berücksichtigt werden (vergleiche Tabelle 6.1).
Weiterführende Untersuchungen mit den gleichen Probekörpern und Fehlstellen, aber mit variie-

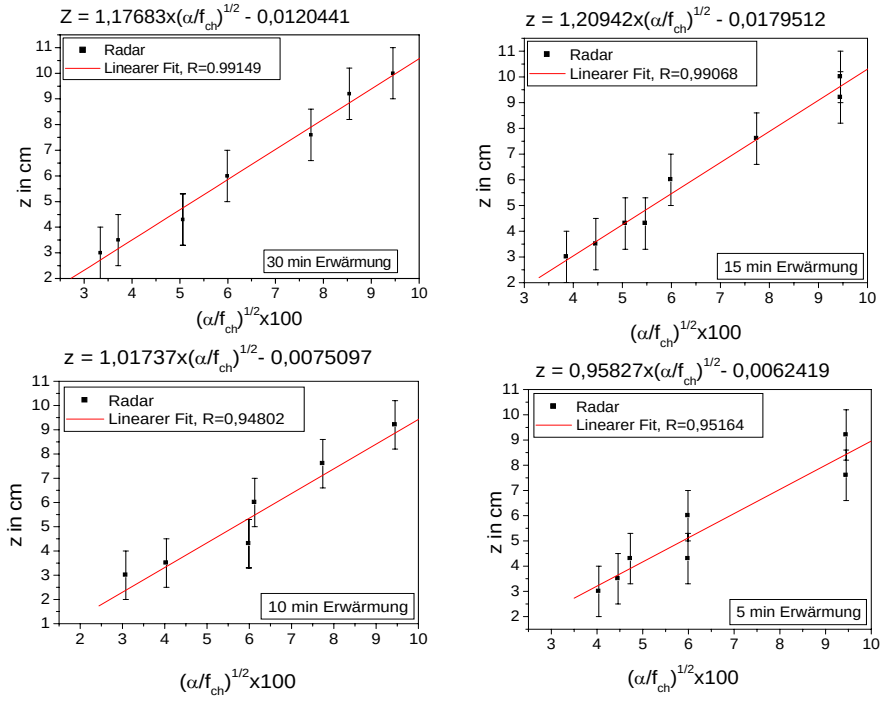


Abbildung 6.3.: Korrelation z zu $\sqrt{\alpha/f_{ch}}$ für die Polystyrolfehlstellen in PK I_1 und PK II_2 für variable Erwärmungszeiten mit dem automatisierten IR-Stahler und eine Aufnahmezeit von 120 min [AMR06]

render Erwärmungszeit zeigten [AMR06], dass die Erwärmungszeit nur einen geringen Einfluss auf die Ergebnisse, aber vor allem auf das Signal-zu-Rausch-Verhältnis (SNR) hat. Je kürzer die Erwärmungszeit, desto schlechter das SNR, was sich beginnend bei den Ergebnissen mit 10 min besonders bei den Ergebnissen mit 5 min Erwärmung bemerkbar machte.
Tabelle 6.3 am Ende dieses Abschnittes zeigt die Ergebnisse der Untersuchungen mit f_{ch} und der ermittelten Tiefe nach Gleichung 6.1, zunächst ohne Berücksichtigung von k_{ch}. Tabelle 6.4 schließlich zeigt das resultierende Signal-zu-Rausch-Verhältnis (bestimmt nach Kapitel 4.5.2).
Tabelle 6.1 sowie Abbildung 6.3 schließlich zeigen die resultierenden Korrekturfaktoren und Korrelationsgeraden für die unterschiedlichen Erwärmungszeiten. Dabei ließ sich folgender Zusammenhang erkennen: je länger die Erwärmungszeit, desto größer k_c und der y-Achsen-Abschnitt.

Auflösungsgrenzen

Als einziger Nachteil dieser Methode wurde die schlechte Frequenzauflösung bei tiefen Fehlstellen bezeichnet [AHMR06]. In Tabelle 6.2 ist für die durchgeführten Versuche die resultierende Tiefenauflösung nach Gleichung 6.1 angegeben. Zieht man dies in Betracht, ist es bemerkenswert, wie genau die Methode gerade bei den tiefen Fehlstellen ist.

Es wurden in Anlehnung an [IC05] auch drei Möglichkeiten angegeben, die Frequenzauflösung zu verbessern: 1. durch eine Verlängerung der Aufnahmezeit (mit $\Delta f = 1/T$), 2. durch eine Erhöhung des Aufnahmeintervalls Δt im Zeitbereich und damit eine Verringerung von $f_{max} = 1/\Delta t$ und 3. durch *Zero-Padding*.

Tabelle 6.2.: Frequenzauflösung nach Gleichung 6.1 und daraus resultierende Fehlerspanne für eine Beobachtungszeit $T = 7200$ s, ein Abtastintervall $\Delta t = 5$ s, $N_f = 2^{11}$ Bilder im Frequenzbereich sowie eine Taktrate von $\Delta f = 4,8828 \times 10^{-5}$ Hz

Phasenbild n	1	2	3	4	5	6	7 ...
Frequenz in Hz $\times 10^{-4}$	0,488	9,764	1,465	1,953	2,444	2,930	3,418 ...
Tiefe nach Gl. 6.1 in cm	13,39	9,47	7,73	6,69	5,99	5,47	5,06 ...
Fehlerspanne in cm	∞	2,83	1,39	0,87	0,61	0,47	0,37 ...

Einfluss der Erwärmung

Der Einfluss der Energiedichte wurde auch bei den tief liegenden Fehlstellen deutlich. Die Ergebnisse für die 10 cm tief liegende Fehlstelle F2 in PK II_1 waren bei 30 und den 15 min Erwärmung äußerst akkurat, ganz im Gegensatz zu den Ergebnissen an PKI _1, und das obwohl gerade die 10 cm breiten Fehlstellen in 10 cm Tiefe genau an der Nachweisgrenze für Defekte liegen (siehe Kapitel 4.1).
Ein weiterer interessanter Gesichtspunkt ist die relativ große Abweichung bei den flachen Fehlstellen von PK I bei 5 min Erwärmung in Abbildung 6.3, rechts unten: 4, 04 statt $3,0 \pm 1$, 4, 46 statt $3,5 \pm 1$ und vor allem 5, 99 statt $4,3 \pm 1$ cm. Es ergibt sich zunächst ein scheinbarer Widerspruch zu dem bisher Gesagten (vergleiche auch Tabelle 6.3). Denn eine kurzzeitige Erwärmung müsste auch zu verhältnismäßig guten Ergebnissen bei den flachen Fehlstellen führen. Dieser Widerspruch erhellt sich etwas, wenn man sieht, dass die Tiefe von 6 cm bei PK II_1 exakt bestimmt wurde, mit einem sehr guten Signal-zu-Rausch-Verhältnis (siehe Tabelle 6.4). Die Vermutung drängt sich auf, dass hier die aufgebrachte Leistung ein wesentlicher Faktor ist, da die durchschnittliche Leistung bei den kleinen Probekörpern etwa 1,5-mal größer war als bei den großen. Auch ist ein Einfluss der Periodizität der Erwärmung nicht auszuschließen.
All dies sind Gründe genug, den Wärmefluss in den Probekörpern nach Anregung mit der automatisierten IR-Erwärmungseinheit etwas genauer zu untersuchen (siehe Kapitel 7). Doch zunächst werden die Ergebnisse der restlichen Untersuchungen zu PK I_1 und PK II_1 dargestellt, zu den Porenbetonfehlstellen von PK II_1 in einem Nachtrag sowie die vergleichenden RAT-RPT-Untersuchungen, ergänzt durch Untersuchungen mit längeren Erwärmungszeiten von 45 und 60 min, in einem gesonderten Kapitel.

Tabelle 6.3.: Zusammenstellung der Parameter für die quantitative RPT an PK I_1 und PK II_1 für Erwärmungszeiten t_E von 30, 15, 10 und 5 min und $\alpha_{Beton} = 8,75x10^{-7}$ m^2/s; die *kursiven Werte* wurden gefittet, Abweichung gegenüber dem Sollwert in %.

t_E	**30 min**	**15 min**	**10 min**	**5 min**	**30 min**	**15 min**	**10 min**	**5 min**	$\mathbf{c_{radar}}$ **bzw.** $_{nom}\mathbf{c}$
Fehlstelle	$\mathbf{f_{ch}}$ **in Hz x** 10^{-4}				$\sqrt{\frac{\alpha}{f_{ch}}}$**x 100 in cm**				**in cm**
PK I_1/F1	*1,2*	0,98	0,98	0,98	*8,54* 0%	9,45 0%	9,45 0%	9,45 0%	$9,2 \pm 1,0$ Radar
PK I_1/F2	1,46	1,46	1,46	0,98	7,74 0%	7,74 0%	7,74 0%	9,45 +10%	$7,6 \pm 1,0$ Radar
PK I_1/F5	7,81	5,86	9,28	*5,44*	3,34 0%	3,86 0%	3,08 0%	*4,01* 0%	$3,0 \pm 1,0$ Radar
PK I_1/F6	3,42	3,42	2,44	3,91	5,06 0%	5,06 0%	5,99 +13%	4,73 0%	$4,3 \pm 1,0$ Radar
PK I_1/F7	6,35	4,39	5,37	4,39	3,71 0%	4,46 0%	4,04 0%	4,46 0%	$3,5 \pm 1,0$ Radar
PK I_1/F8	3,42	2,93	2,44	2,44	5,06 0%	5,47 +3%	5,99 +13%	5,99 +13%	$4,3 \pm 1,0$ Radar
PK II_1/F1	0,98	0,98	–	–	9,45 -6%	9,45 -6%	–	–	10
PK II_1/F2	2,44	2,44	2,93	2,44	5,99 0%	5,99 0%	5,47 -10%	5,99 0%	6
PK II_1/F3 Porenbeton	1,46	0,98	–	–	7,74 -29%	9,45 -6%	–	–	10
PK II_1/F4 Porenbeton	2,93	2,93	*1,70*	2,93	5,47 -10%	5,47 -10%	7,17 +20%	5,47 -10%	6

Tabelle 6.4.: SNR für den quantitativen Nachweis bei unterschiedlichen Erwärmungszeiten

Probekörper	**PK I_1**						**PK II_1**			
Fehlstelle	F1	F2	F5	F6	F7	F8	F1	F2	F3	F4
30 min	2,87	3,98	2,74	2,80	2,65	2,80	≈1,0	16,21	0,49	1,21
15 min	1,68	2,90	2,79	2,63	2,43	2,82	0,55	1,92	0,40	1,22
10 min	1,51	2,61	2,24	2,18	2,23	2,24	–	1,58	–	0,93
5 min	0,44	≈1,0	2,15	1,64	1,76	1,66	–	8,67	–	0,48

6.2.1. Nachtrag: Untersuchung der Porenbetondefekte

In Abbildung 6.4 sind die Phasenkontrastkurven für PK II_1 und dieer verschiedenen Erwärmungszeiten von 30, 15, 10 und 5 min zusammengestellt, einschließlich der für die Porenbetonfehlstellen. Es wurden die gleichen Aufnahmeparameter verwendet ($\Delta t = 5$ s, $T = 7200$ s, Zero-Padding mit $N_f = 2^{11}$ und $f_{max} = 0,1$ Hz). Für die 10 cm tiefen Fehlstellen F1 und F3 konnte für die 10-

und 5-minütige Erwärmung keine Fehlstelle nachgewiesen werden (vergleiche auch Tabelle 6.3). Folgende Schlussfolgerungen lassen sich daraus ableiten:

1. Sind die Materialeigenschaften der Fehlstellen näher an denen des umgebenden Materials, äußert sich dies über ein kleineres $\Delta\phi$ beziehungsweise ein kleineres SNR[4].

2. Das Fehlstellenmaterial hat über das geringe SNR auch einen indirekten Einfluss auf f_{ch}. Die Resultate schwanken mehr als bei den Polystyrolfehlstellen und sind im Durchschnitt deutlich größer (siehe Tabelle 6.3).

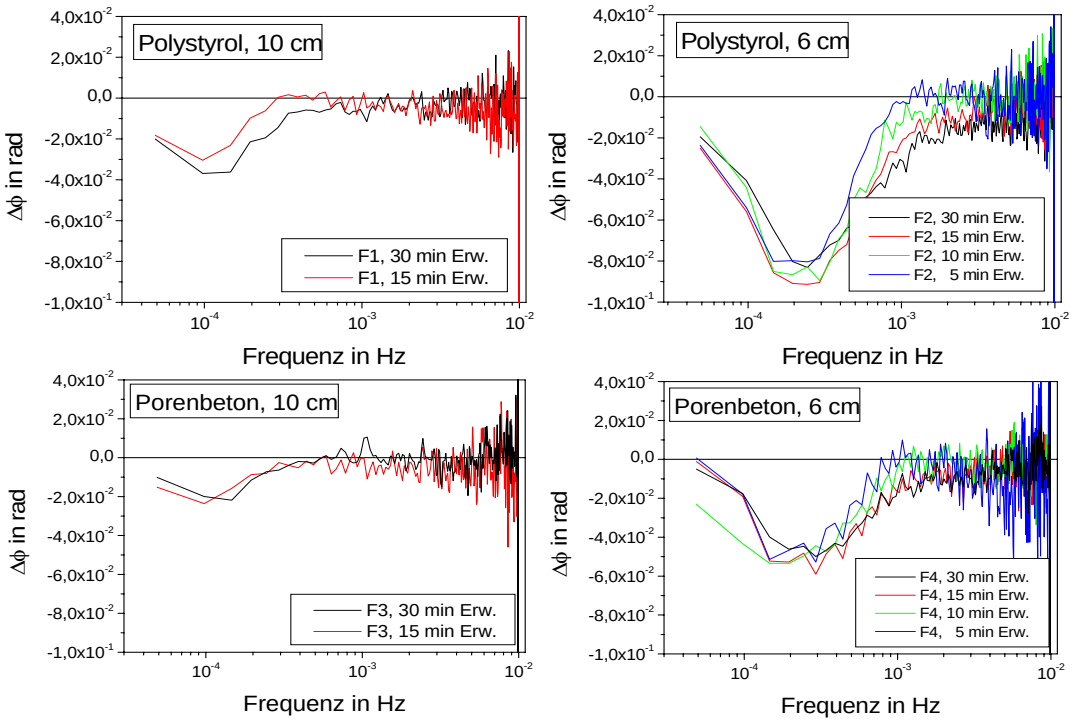


Abbildung 6.4.: Phasenkontrastkurven für die Fehlstellen von PK II_1 nach Erwärmung mit Rechteckimpulsen von 1800, 900, 600 und 300 s und einer Leistung von 1800 W/m^2. Oben sind die Polystyrol- und unten die Porenbetonfehlstellen dargestellt, links die Fehlstellen in 6, rechts die in 10 cm Tiefe. Die 10 cm tiefen Fehlstellen konnten bei 10 und 5 min Erwärmung nicht detektiert werden.

[4] Letzeres gilt auch für die Fehlstellengröße. Je kleiner die Fehlstelle, desto schlechter das SNR und desto kleiner $\Delta\phi$, wie im vorhergehenden Abschnitt zu sehen war.

6.3. Möglichkeiten und Grenzen einer Amplitudenauswertung bei der inversen Lösung

Die Auswertungen der Amplituden werden in der Literatur und wurden bisher vom Verfasser im Rahmen dieser Arbeit und in bisherigen Veröffentlichungen zumeist vernachlässigt. Der Grund liegt in den bereits erläuterten und vielfach illustrierten Vorteilen der Phasen gegenüber den Amplituden (siehe Kapitel 3).

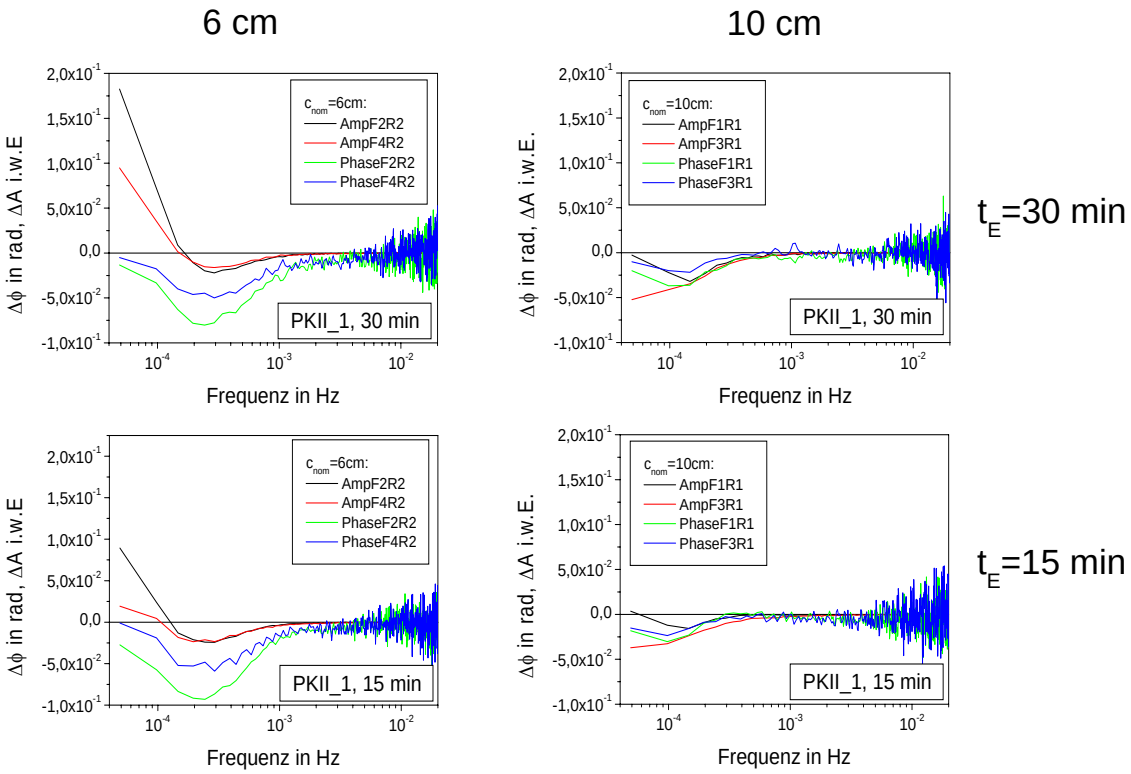


Abbildung 6.5.: Amlituden- und Phasenkontrastkurven für 30 min (oben) und 15 min (unten) Erwärmung von PK II_1 für 6 (links) und 10 cm (rechts) Betondeckung der Fehlstellen

Dabei haben die Amplituden auch einen eigenen Informationsgehalt. So erfolgt zum Beispiel die Definition der thermischen Eindringtiefe μ über die Amplitude (vergleiche Gleichung 3.6 und [Wu96]).

Im Rahmen dieser Untersuchungen wurde zunächst der Versuch unternommen, einen quantitativen Nachweis über μ durchzuführen[5].

Auch hierfür wurden Ergebnisse von PK II_1 herangezogen, diesmal um die thermische Eindringtiefe μ zu bestimmen: $\mu = \sqrt{\alpha/(\pi \cdot f_{\Delta A_{max} \times e^{-1}})}$ über die Frequenz, bei der der Anfangsamplitudenkontrast ΔA_{max} auf e^{-1} seines Wertes abfällt. Lediglich für die Fehlstellen mit 6

[5] Ein Nachweis über f_b ist nicht möglich, da die Amplitudendifferenz sich null nur immer weiter annähert, ohne es zu erreichen. Und ein Nachweis über f_b' ist gleichfalls nicht möglich, da zumeist gilt: $\Delta A(0Hz) > 0$. Diese Nachweise wurden gezielt für die Phasen entwickelt, vergleiche Kapitel 3.1.3 beziehungsweise [IC05].

cm Betondeckung ließen sie sich auf diese Weise ermitteln und auch nur mit einer starken Abhängigkeit vom Fehlstellenmaterial.
Dahingegen ergibt sich bei einem Nachweis über die charakteristische Frequenz f_{ch} und ΔA_{min} auch bei den Amplituden eine sehr gute Übereinstimmung mit den realen Werten, die teilweise sogar die Werte der Phasenauswertung übertrifft (vergleiche Tabelle 6.5).
In Abbildung 6.5 sind die Amplitudenkontrastkurven von PK II_1 für 30 und 15 min den zugehörigen Phasenkontrastkurven gegenübergestellt, einschließlich der Porenbetonfehlstellen. Und in Abbildung 6.6 exemplarisch die Amplitudenkontrastkurven von PK I_1 für 15 min Erwärmung. Die Phasen unterscheiden sich lediglich durch einen stärkeren Kontrast von den Amplituden, so dass zum Beispiel $f_{ch,Phase}$ für die Porenbetonfehlstelle F3 mit ${}_{nom}c = 10$ cm bei 30 min Erwärmung über die Phasen noch nachweisbar ist, aber über die Amplitude und $f_{ch,Amplitude}$ nicht mehr (siehe Abbildung 6.5, rechts). Dafür ist das Rauschen bei den Amplituden quasi nicht vorhanden (vergleiche Abbildung **??**).

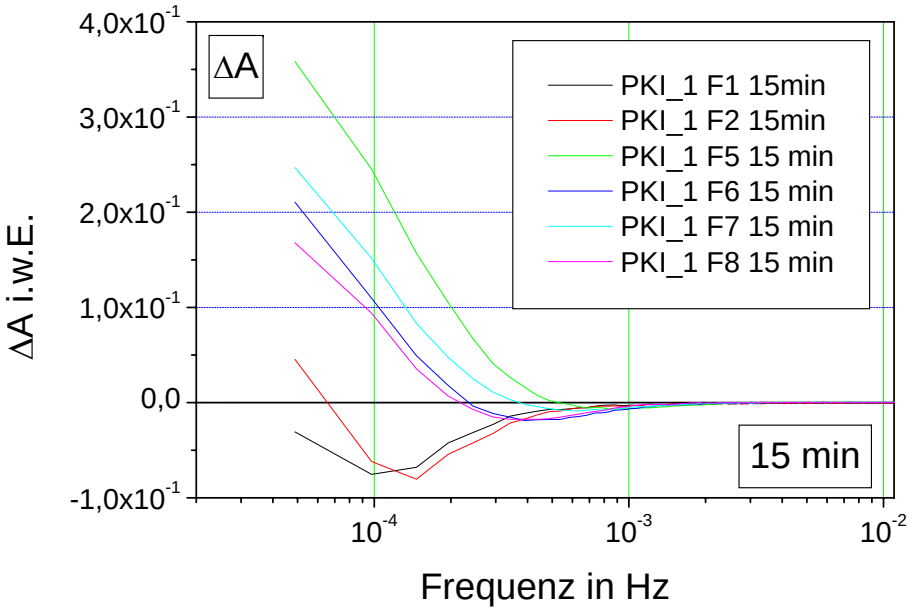


Abbildung 6.6.: Amplitudenkontrastkurven für die Polystyrolfehlstellen F1, F2, F5 bis F8 von PK I_1 für 15 min Erwärmung mit der automatisierten Erwärmungseinheit aus Tabelle 4.1

In Tabelle 6.5 sind die Ergebnisse der quantitativen RAT für PK I_1 und PK II_1 zusammengefasst. Es ergibt sich erneut eine sehr gute Übereinstimmung zwischen $f_{ch,Amplitude}$ und $f_{ch,Phase}$ sowie der errechneten mit der „realen“ Betondeckung. Auch zeigt sich, dass die bisher in der aktiven Thermografie so vernachlässigten Amplitudenkontrastkurven hervorragende Ergebnisse für die charakteristische Frequenz liefern.
In Anlage B sind die übrigen Amplitudenkontrastkurven für PK I_I dargestellt sowie die Gegenüberstellung der Phasen- und der Amplitudenkontrastkurven von PK II_I mit 10 und 5 min Erwärmung.

Tabelle 6.5.: Zusammenstellung der Parameter für die quantitative RAT mit Amplitudenwerten an PK I_1 und PK II_1 für Erwärmungszeiten t_E von 30, 15, 10 und 5 min und $\alpha_{Beton} = 8,75x10^{-7}$ m^2/s; die *kursiven Werte* wurden gefittet, Abweichung gegenüber dem Sollwert in %.

t_E	**30 min**	**15 min**	**10 min**	**5 min**	**30 min**	**15 min**	**10 min**	**5 min**	c_{radar} **bzw.** $_{nom}c$
Fehlstelle	**f_{ch} in Hz x** 10^{-4}				$\sqrt{\frac{\alpha}{f_{ch}}}$ **x 100 in cm**				**in cm**
PK I_1/F1	*1,20*	0,98	0,98	0,98	*8,54* 0%	9,45 0%	9,45 0%	9,45 0%	$9,2 \pm 1,0$ Radar
PK I_1/F2	1,46	1,46	1,46	0,98	7,74 0%	7,74 0%	7,74 0%	9,45 +10%	$7,6 \pm 1,0$ Radar
PK I_1/F5	10,74	8,79	8,79	7,81	2,85 0%	3,16 0%	3,16 0%	3,34 0%	$3,0 \pm 1,0$ Radar
PK I_1/F6	5,38	3,91	3,91	3,91	4,04 0%	4,73 0%	4,73 0%	4,73 0%	$4,3 \pm 1,0$ Radar
PK I_1/F7	7,81	6,35	5,38	3,91	3,35 0%	3,71 0%	4,03 0%	4,73 +5%	$3,5 \pm 1,0$ Radar
PK I_1/F8	4,39	4,39	4,73	*2,92*	4,46 0%	4,46 0%	5,06 0%	*5,47* +3%	$4,3 \pm 1,0$ Radar
PK II_1/F1	1,46	1,46	–	–	7,74 -29%	7,74 -29%	–	–	10
PK II_1/F2	2,93	2,93	2,44	2,44	5,74 -10%	5,47 -10%	5,99 0%	5,99 0%	6
PK II_1/F3 Porenbeton	–	–	–	–	–	–	–	–	10
PK II_1/F4 Porenbeton	2,93	*2,44*	1,95	2,44	5,47 -10%	5,99 0%	6,70 +12%	5,99 0%	6

6.3.1. Ergänzende Untersuchungen mit 45 und 60 min Erwärmung

Zur Vertiefung und als Ergänzung wurden von PK I_1 zusätzliche Untersuchungen mit 45 und 60 min Erwärmung durchgeführt. PK II_1 wurde nicht untersucht, da schon die 30 min Erwärmung zu einer so starken Erwärmung der Oberfläche führten, dass der verwendete Messbereich der genutzten IR-Kamera von -20 bis 50 °C überschritten wurde. Die Ergebnisse für die quantitative Phasen- und Amplitudenauswertung sind in Abbildung 6.7 dargestellt und in Tabelle 6.6 zusammengefasst. Im Gegensatz zu den Phasen, die bei der starken Erwärmung keine brauchbaren Ergebnisse für den quantitativen Nachweis der flachen Fehlstellen liefern, sind die Amplituden weitgehend unabhängig davon und liefern auch hier gute Ergebnisse (Abweichung von 0%, außer für die Fehlstellen mit 9,2 cm Betondeckung). Allen Ergebnissen ist gemeinsam, was sich schon bei den 30 min abzeichnete: Für lange Erwärmungszeiten wird die Betondeckung der tiefen Fehlstelle F1 konstant unterschätzt (-19%). Dies gilt für die RAT wie die RPT gleichermaßen.

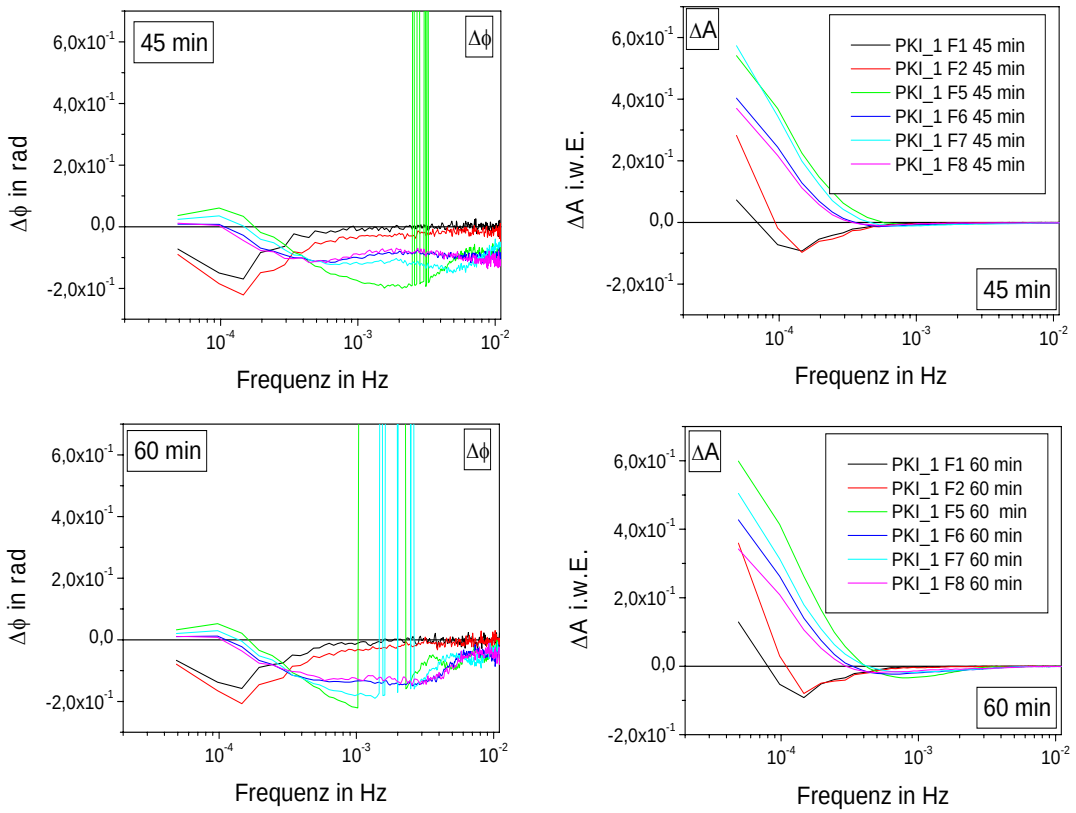


Abbildung 6.7.: Phasen- (links) und Amplitudenkontrastkurven (rechts) für eine 45- (oben) und eine 60-minütige (unten) Erwärmung von PK I_1 mit der automatisierten IR-Erwärmungseinheit

Tabelle 6.6.: Zusammenstellung der Parameter für die quantitative RST mit Phasen- und Amplitudenwerten an PK I_1 für Erwärmungszeiten Ez von 60 und 45 min und $\alpha_{Beton} = 8,75x10^{-7}$ m^2/s

Ez	**60 min**	**45 min**	**60 min**	**45 min**	**60 min**	**45 min**	**60 min**	**45 min**	c_{radar}
	f_{ch} in Hz x 10^{-4}				$\sqrt{\frac{\alpha}{f_{ch}}}$ x 100 in cm				**in cm**
Fehlstelle	Phasen		Amplituden		Phasen		Amplituden		
PK I_1/F1	1,46	1,46	1,46	1,46	7,74	7,74	7,74	7,74	$9,2 \pm 1,0$
PK I_1/F2	1,46	1,46	1,46	1,46	7,74	7,74	7,74	7,74	$7,6 \pm 1,0$
PK I_1/F5	–	20,99	8,30	11,23	–	2,04	3,24	2,79	$3,0 \pm 1,0$
PK I_1/F6	25,87	6,35	5,86	5,37	1,84	3,71	3,86	4,04	$4,3 \pm 1,0$
PK I_1/F7	–	49,31	9,38	8,30	–	1,33	3,07	3,24	$3,5 \pm 1,0$
PK I_1/F8	25,39	5,83	4,85	*5,37*	1,86	3,87	4,23	*4,04*	$4,3 \pm 1,0$

6.4. Resümee

Die RST stellt einen Ansatz dar, das inverse Problem der aktiven Thermografie im Frequenzbereich zu lösen. Dafür werden Phasen- (RPT) und Amplitudeninformationen (RAT) verwendet. Im einzelnen sind die folgenden Ergebnisse der vorhergehenden Untersuchungen hervorzuheben:

- Der neue quantitative Nachweis über die charakteristische Frequenz f_{ch} bei der RPT eignet sich für Fehlstellen einer Tiefenlage zwischen 3 und 10 cm für Erwärmungszeiten zwischen 5 und 30 min und eine Beobachtungszeit von 120 min und liegt dort überwiegend im Rahmen der Messgenauigkeit des Radars mit einer Abweichung zwischen 0 und 13% für Polystyrol- und zwischen 0 und 30 % für Porenbetonfehlstellen. Für Erwärmungszeiten von 45 und 60 min eignet sich eine quantitative RPT nicht.

- Der neue quantitative Nachweis über die charakteristische Frequenz bei der RAT eignet sich für Fehlstellen einer Tiefenlage zwischen 3 und 9,2 cm (Abweichung gegenüber Radar und $_{nom}$c zwischen 0 und 12%) für Erwärmungszeiten zwischen 5 und 30 min und für Erwärmungszeiten von 45 und 60 min für eine Tiefenlage von 3 bis 8 cm (Abweichung 0%).

- Ein Nachweis kann und sollte sowohl über die RPT als auch die RAT erfolgen, da beide über sich ergänzende Eigenschaften verfügen. Bei tiefen Fehlstellen weisen die Phasenkontrastkurven einen klaren Vorteil auf (vergleiche Tabellen 6.3 und 6.5). Die Amplitudenkontrastkurven sind rauscharm und liefern auch bei längeren Erwärmungszeiten genaue Ergebnisse, wo im Vergleich die Phasen wegen des hohen Rauschens keine quantitativen Informationen liefern (vergleiche Tabelle 6.6).

- RAT und RPT gemeinsam ist, dass für Erwärmungszeiten $t_E \geq 30$ min die tiefen Fehlstellen $z \geq 9{,}2$ cm tendenziell zu flach erscheinen. Für kurze Erwärmungszeiten lassen sie sich zu meist akkurat bestimmen. Für die 5 min Erwärmung und die flachen Fehlstellen gilt das Umgekehrte. Eine mögliche Erklärung für Ersteres könnte sein, dass die Beobachtungszeiten zu kurz waren, um das gesamte Tiefensignal aufzuzeichnen. Eine mögliche Erklärung für Letzteres könnte die niedrige Wärmeleistung bei den großen Probekörpern sein, da dieses Problem nur bei diesen auftritt (siehe den nächsten Punkt des Resümees)[6].

- Die aufgebrachte Wärmeleistung scheint einen nicht unerheblichen Einfluss auf das Ergebnis zu haben: je größer die Leistung, desto genauer das Ergebnis.

- Materialeigenschaften der Fehlstellen machen sich über den Kontrast und das Signal-zu-Rausch-Verhältnis bemerkbar, nicht jedoch bei der charakteristischen Frequenz.

- Gleiches gilt für die Größe der Fehlstelle.

[6] Es bleibt hier auch anzumerken, dass die 10 cm breiten Fehlstellen in 10 cm Tiefe an der Nachweisgrenze der aktiven Thermografie liegen und ein niedriges $SNR \approx 1$ besitzen. Des Weiteren ist die Frequenzauflösung bei dieser tiefen Frequenz sehr ungenau (vergleiche Tabelle 6.2).

- Ein Nachweis über die thermische Eindringtiefe μ und den Anfangsamplitudenkontrast ($f = 0$) kann aus den angegebenen Gründen nicht empfohlen werden.
- Die Verwendung des eingeführten Korrekturfaktors k_c war bisher nicht erforderlich und kann für die untersuchten Parameter mit dem Wert $k_c = 1$ belegt werden.

Fazit: Weiterführende Untersuchungen über den Wärmefluss und Parameterstudien sind erforderlich und folgen in den anschließenden Kapiteln.

7. Untersuchung des angeregten Wärmeflusses

In den vorangehenden Untersuchungen wurde ein gewisser Einfluss der Wärmeleistung der Erwärmung auf den quantitativen Nachweis im Frequenzbereich deutlich (vergleiche Kapitel 6). Auch wurde die Vermutung geäußert, der wesentliche Unterschied zwischen PPT und RST läge in den langen Erwärmungs- und Beobachtungszeiten der RIT im Vergleich zur IT begründet. Auch konnte ein Einfluss der Periodizität der Erwärmung mit der automtisierten IR-Erwängungseinheit auf das Ergebnis nicht ausgeschlossen werden. Im folgenden Kapitel wird deshalb der Wärmefluss untersucht, der durch Anregung mit der automatisierten IR-Erwärmungeinheit der BAM in den Probekörpern erzeugt wird. Dafür werden zunächst die Lösungen der Differentialgleichung am halbunendlichen Körper und an der Platte für Anregungen mit einem Dirac-Puls (idealer Puls mit $\delta t \approx 0$ s), einer konstanten Erwärmung ($\delta t = \infty$), für einen Rechteckimpuls ($\delta t = t_E$ s) und für eine anhaltende periodische Erwärmung zusammengestellt (siehe Abbildung nach [VB01]).

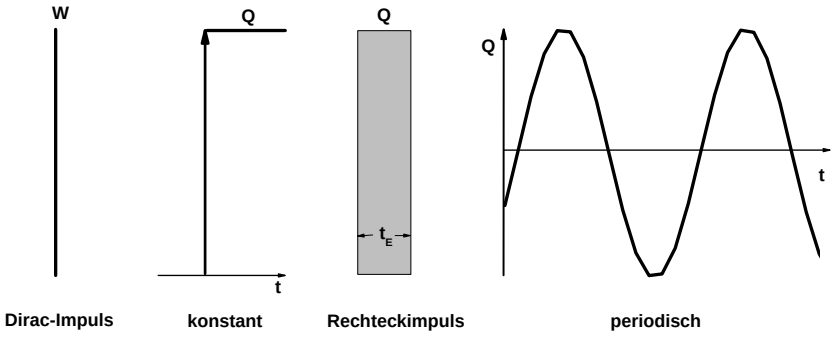


Abbildung 7.1.: Erwärmungsarten nach [VB01]

Im Anschluss werden die einzelnen Parameter der Erwärmung anhand dieser Lösungen und von Versuchsergebnissen der Rechteckimpuls-Thermografie (RIT) untersucht.
Die wichtigsten Begriffe der folgenden Betrachtungen sind [CJ01], [VB01], [Vav04]:

- die Temperaturleitfähigkeit für Beton $\alpha_B = 8,75x10^{-7}$ m^2/s (vergleiche Gleichung 7.16)
- die Fourier-Zahl $Fo_z = \alpha \cdot t/z^2$ mit der Zeit t in s und der Tiefe z in m
- der Wärmeeindringkoeffizient b in J/(m^2· K·$\sqrt{s}$)
- der Übergangskoeffizient α_k in W/(m^2·K)
- die Temperatur T und die Ausgangstemperatur T_0 in K
- die Fehlerfunktion: $Erf(x) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \cdot \sum_{n=0}^{\infty} \frac{-1^n x^{2n+1}}{(2n+1)n!}$

- die komplementäre Fehlerfunktion:
  $Erfc(x) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \cdot \int_x^{\infty} e^{-T^2} = 1 - Erf(x) = 1 - \frac{2}{\sqrt{\pi}} \cdot \sum_{n=0}^{\infty} \frac{-1^n x^{2n+1}}{(2n+1)n!}$

7.1. Lösungen der Bilanzgleichung für den Wärmetransport in einem halbunendlichen Körper

Es folgen zunächst die Lösungen für einen halbunendlichen Körper.

7.1.1. Anregung mit einem idealen Wärmepuls

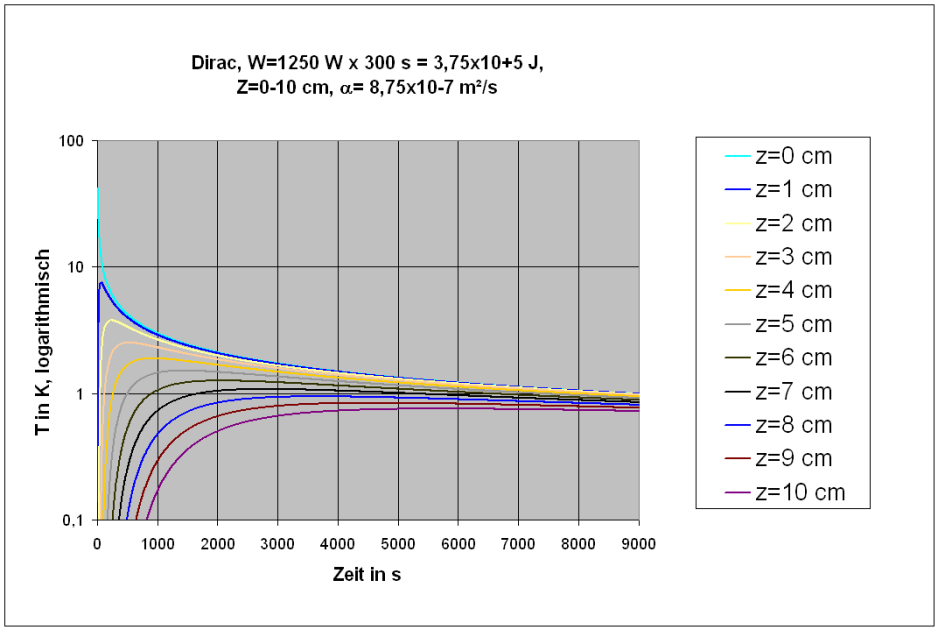


Abbildung 7.2.: Temperaturentwicklung für $\alpha_B = 8,75 \times 10^{-7} \frac{m^2}{s}$ für $Z = 0 - 10$ cm nach Erwärmung der Oberfläche mit einem Dirac-Impuls nach Gleichung 7.1 und 7.2

Für die Temperatur T zum Zeitpunkt t in der Tiefe $z = 0$ unter adiabatischen Randbedingungen ($\alpha_k = 0$) nach Anregung der Oberfläche mit einem Wärmeimpuls W in J/m^2 ($\delta t \approx 0$) gilt [VB01]:

$$T(0,t) = T_0 + \frac{W}{b\sqrt{\pi t}} \tag{7.1}$$

Und für $z > 0$ [VB01] gilt:

$$T(z,t) = T_0 + \frac{W \cdot \alpha}{\lambda \cdot z} \frac{1}{\sqrt{\pi \cdot Fo_z}} \times \exp(-\frac{1}{4 \cdot Fo_z}) \tag{7.2}$$

Für $z = 0$ und $\alpha_k \neq 0$ gilt [Vav04]:

$$T(0,t) = T_0 + \frac{W}{b\sqrt{\pi t}} - \frac{W\alpha_k}{b^2} \cdot \left[b^{H^2 \alpha \pi} Erfc\left(H\sqrt{\alpha t}\right) \right] \tag{7.3}$$

mit $H = \alpha_k/\lambda$.
In Abbildung 7.2 sind die Gleichungen 7.1 und 7.2 für einen Dirac-Puls mit einer Energie von $3,75x10^5$ J (entspricht der Energie einer 5-minütigen Erwärmung von PK I_1), Beton und eine Tiefe von 0 bis 10 cm dargestellt.

7.1.2. Konstante Erwärmung

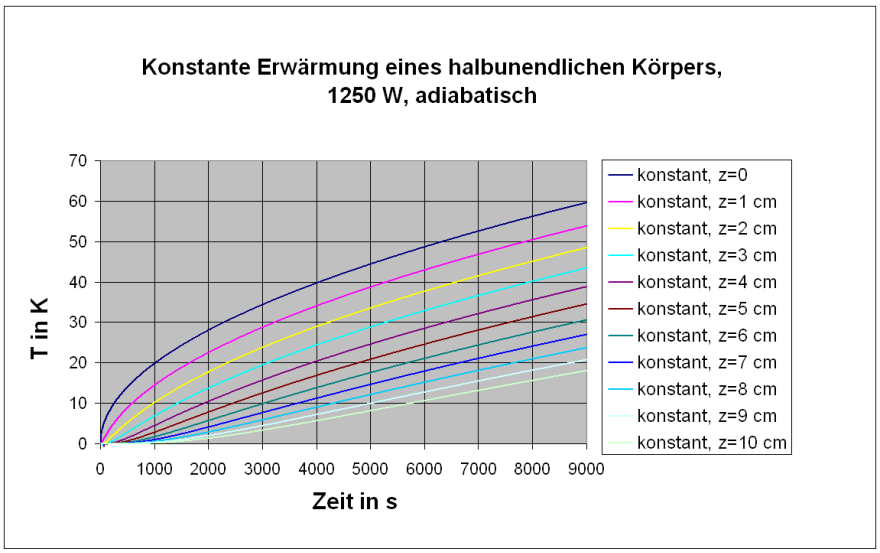


Abbildung 7.3.: Temperaturentwicklung für $\alpha_B = 8,75 \times 10^{-7} \frac{m^2}{s}$ [din02] in unterschiedlicher Tiefe z infolge konstanter Erwärmung der Oberfläche mit 1250 W/m^2 nach Gleichung 7.4 und 7.5

Für eine konstante Erwärmung j_q in W/m^2, $\alpha_k = 0$ und für $z = 0$ gilt [VB01]:

$$T(0,t) = T_0 + \frac{2 \cdot j_q}{b} \cdot \sqrt{\frac{t}{\pi}}. \tag{7.4}$$

Für den Zeitpunkt t und die Tiefe $z > 0$ während einer konstanten Erwärmung j_q gilt für adiabatische Randbedingungen ($\alpha_k = 0$) [VB01]:

$$T(z,t) = T_0 + \frac{j_q \cdot z}{\lambda} \cdot \left[2 \cdot \sqrt{\frac{Fo_z}{\pi}} \times \exp\left(-\frac{1}{4 \cdot Fo_z} \right) - Erfc \frac{1}{2\sqrt{Fo_z}} \right] \tag{7.5}$$

Und für $\alpha_k \neq 0$ und z=0 während einer konstanten Wärmezufuhr j_q gilt [Vav04]:

$$T(0,t) = T_0 + \frac{j_q}{\alpha_k} \left[1 - b^{H^2 \alpha \pi} Erfc\left(H\sqrt{\alpha t} \right) \right] \tag{7.6}$$

In Abbildung 7.3 sind die Gleichungen 7.4 und 7.5 für eine konstante Erwärmung $j_q = 1250$ W/m^2, Beton und eine Tiefe z von 0 bis 10 cm dargestellt.

7.1.3. Rechteckimpuls

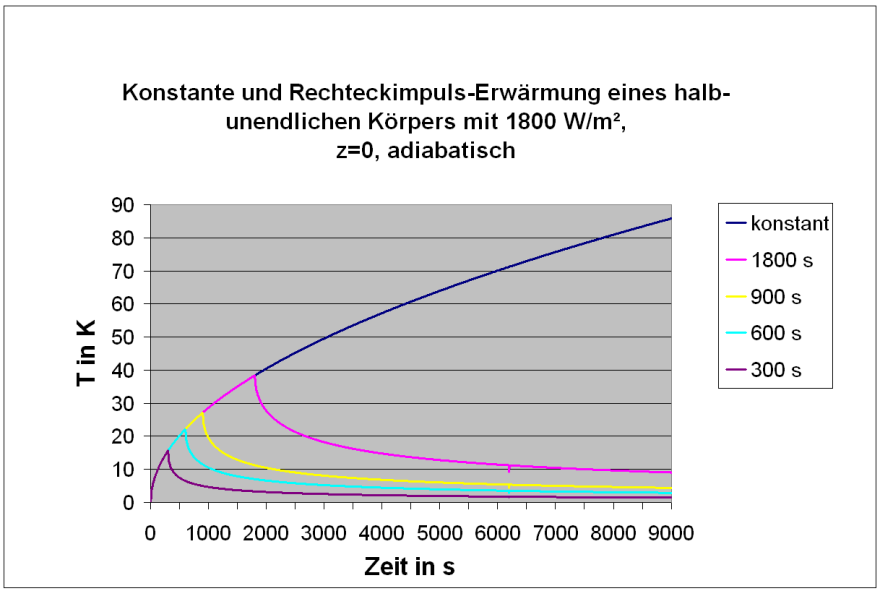


Abbildung 7.4.: Temperaturentwicklung für $\alpha_B = 8,75 \times 10^{-7} \frac{m^2}{s}$ für $z = 0$ infolge von konstanter Erwärmung (Gleichung 7.5) und Rechteckimpulsen unterschiedlicher Länge (1800, 900, 600 und 300 s) mit $Q = 1800$ W/m^2 (Gleichung 7.7)

Wie Abbildung 7.4 zu entnehmen ist, leitet sich die Lösung der Fourier-Gleichung für einen Rechteckimpuls von der Lösung für eine konstante Erwärmung ab.
Für den Zeitpunkt t in der Tiefe $z > 0$ nach Erwärmung mit einem Rechteckimpuls j_q der Länge t_E unter adiabatischen Bedingungen gilt (Herleitung des Verfassers nach [CJ01], Seite 76):

$$T(z,t) = T_0 + \frac{j_q \cdot z}{\lambda} \cdot \left[2 \cdot \sqrt{\frac{Fo_z}{\pi}} \times \exp\left(-\frac{1}{4 \cdot Fo_z} \right) \right] + \frac{j_q \cdot z}{\lambda} \cdot \left[-2 \cdot \sqrt{\frac{Fo_z - Fo_{zE}}{\pi}} \times \exp\left(-\frac{1}{4 \cdot (Fo_z - Fo_{zE})} \right) - Erfc \frac{1}{2\sqrt{Fo_z}} + Erfc \frac{1}{2\sqrt{Fo_z - Fo_{zE}}} \right] \tag{7.7}$$

Für $z = 0$ unter adiabatischen Randbedingungen gilt [VB01]:

$$T(0,t) = T_0 + \frac{2 \cdot j_q}{b \cdot \sqrt{\pi}} \cdot \left(\sqrt{t} - \sqrt{t - t_E} \right) \tag{7.8}$$

mit $Fo_{zE} = \alpha t_E / z^2$.
Für $\alpha_k \neq 0$ und $z = 0$ gilt [Vav04]:

$$T(z,t) = T_0 + \frac{j_q}{\alpha_k} \cdot \left[b^{H^2 \alpha (t - t_E)} Erfc\left(H\sqrt{\alpha (t - t_E)} \right) - b^{H^2 \alpha t} Erfc\left(H\sqrt{\alpha t} \right) \right] \tag{7.9}$$

In Abbildung 7.5 sind Gleichung 7.8 und 7.7 für eine Erwärmung der Oberfläche mit $j_q = 1250$ W/m^2 für 30 min, Beton und eine Tiefe z= $0 - 10$ cm dargestellt.

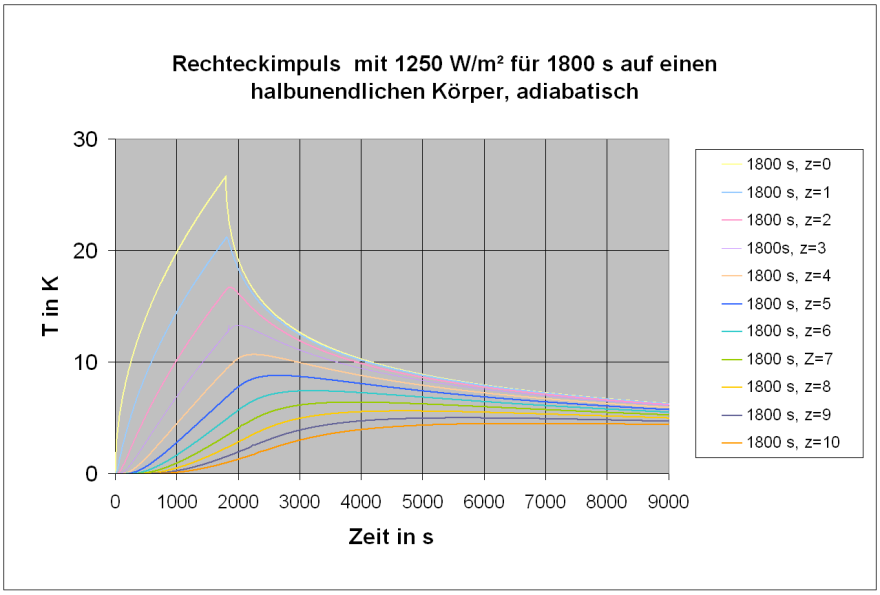


Abbildung 7.5.: Temperaturentwicklung für $\alpha_B = 8,75 \times 10^{-7} \frac{m^2}{s}$ für $z = 0 - 10$ cm nach Erwärmung mit einem Rechteckimpuls von 30 min mit 1250 W/m^2 nach Gleichung 7.8 und 7.7

7.1.4. Wärmewellen

Die bisher dargestellten Zusammenhänge beruhen auf der Annahme nichtperiodischer Randbedingungen. Viele Prozesse in der Natur laufen aber zyklisch ab, zum Beispiel die Jahreszeiten oder der Rhythmus von Tag und Nacht.
Wird einer Oberfläche ein zyklisches Temperatur-Wechselfeld aufgeprägt (wie in unserem Fall mit der automatisierten IR-Erwärmungseinheit), das heißt, geht man nun von einer zeitlich wiederkehrenden Erwärmung oder Abkühlung eines Festkörpers aus, kann man von der Temperaturfeldentwicklung in demselben als von einer *thermischen Welle* beziehungsweise einer *Wärmewelle* sprechen [Wu96]. Für die zeitliche Entwicklung der Temperatur in der Tiefe z in m innerhalb eines isotropen halbunendlichen Körpers für eine periodische Anregung gilt [Geb81], [AP96], [Wu96] oder [VB01]:

$$T(z,t) = T_0 + \frac{j_q}{2 \cdot b\sqrt{\omega}} \times \exp\left(-\frac{z}{\mu}\right) \times \exp\left[j\left(\omega t - \frac{z}{\mu} - \frac{\pi}{4}\right)\right] \tag{7.10}$$

mit der Kreisfrequenz des zyklischen Temperaturverlaufs ω in rad/s, der thermischen Eindringtiefe μ in m [Wu96] (siehe Kapitel 3.1.2) und $j_q = j_q^m \cdot [1 + \cos(\omega \cdot t)]$.
Für die zeitliche Entwicklung t der Oberflächentemperatur $T_O(t)$ eines zyklisch angeregten Körpers gilt:

$$T(0,t) = T_0 + \frac{j_q}{2 \cdot b\sqrt{\omega}} \times \exp\left[j\left(\omega t - \frac{\pi}{4}\right)\right] \tag{7.11}$$

7.2. Lösungen der Bilanzgleichung für den Wärmetransport in einer idealen Platte

Auch für den Fall einer idealen Platte mit $x, y \Rightarrow \infty$ und $z = d << \infty$ mit der Dicke d der Platte in cm gibt Vavilov ([VB01] und [Vav04] nach [CJ01]) Lösungen für die verschiedenen Anregungsarten und Randbedingungen an. Hier werden nur die Lösungen für adiabatische Randbedingungen und für einen idealen Dirac-Impuls und für einen Rechteckimpuls für die Oberflächen wiedergeben. Für die übrigen Lösungen siehe die zitierte Literatur.

7.2.1. Wärmepuls

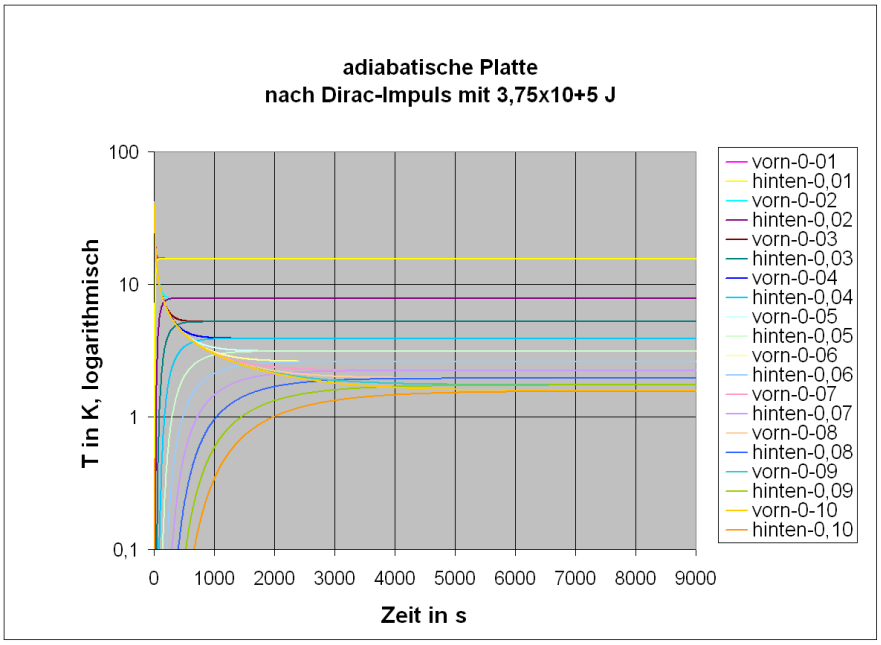


Abbildung 7.6.: Temperaturentwicklung für $\alpha_B = 8,75 \times 10^{-7} \frac{m^2}{s}$ für eine adiabatische Platte mit $d = 0 - 10$ cm nach Erwärmung mit einem Dirac-Impuls nach Gleichung 7.12

Für die Temperatur auf der Vorderseite einer Platte der Dicke d in m zum Zeitpunkt t unter adiabatischen Randbedingungen ($\alpha_k = 0$) nach Anregung mit einem Wärmeimpuls W ($\delta t \approx 0$) gilt [VB01]:

$$T(0,t) = T_0 + \frac{W \cdot \alpha}{\lambda \cdot d} \cdot \left[1 + 2\sum_{n=1}^{\infty} e^{-n^2 \cdot \pi^2 \cdot Fo_d}\right] \tag{7.12}$$

Und für die Rückseite der Platte gilt:

$$T(d,t) = T_0 + \frac{W \cdot \alpha}{\lambda \cdot d} \cdot \left[1 + 2\sum_{n=1}^{\infty} (-1)^n e^{-n^2 \cdot \pi^2 \cdot Fo_d}\right] \tag{7.13}$$

Abbildung 7.6 zeigt die Temperaturentwicklung nach einem Dirac-Impuls auf die vordere Oberfläche mit $3,75x10^5$ J/m^2 vorne und hinten für Beton und eine Plattendicke von 1 bis 10 cm unter

adiabatischen Randbedingungen.

7.2.2. Rechteckimpuls

Für die Temperatur auf der Vorderseite einer Platte zum Zeitpunkt t in s unter adiabatischen Randbedingungen ($\alpha_k = 0$) nach Anregung mit einem Rechteckimpuls der Länge t_E gilt [Vav04]:

$$T(0,t) = T_0 + \frac{j_q \cdot d}{\lambda} \cdot \left[Fo_{E,d} + \frac{2}{\pi^2} \cdot \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n^2} \cdot e^{-n^2 \cdot \pi^2 \cdot Fo_d} \cdot \left(e^{-n^2 \cdot \pi^2 \cdot Fo_d} - 1 \right) \right] \tag{7.14}$$

mit $Fo_d = \alpha \cdot t/d^2$ und $Fo_{E,d} = \alpha \cdot t_E/d^2$. Für die Rückseite gilt entsprechend [Vav04]:

$$T(0,t) = T_0 + \frac{j_q \cdot d}{\lambda} \cdot \left[Fo_{E,d} + \frac{2}{\pi^2} \cdot \sum_{n=1}^{\infty} \frac{-1}{n^2} \cdot e^{-n^2 \cdot \pi^2 \cdot Fo_d} \cdot \left(e^{-n^2 \cdot \pi^2 \cdot Fo_d} - 1 \right) \right] \tag{7.15}$$

7.3. Einfluss der Periodizität der Erwärmung auf den angeregeten Wärmefluss

An dieser Stelle wird der durch die automatisierte IR-Erwärmungseinheit angeregte Wärmefluss analysiert (vergleiche Kapitel 4.2, Tabelle 4.1 und Abbildung 4.1). Es stellt sich die Frage nach dem Einfluss der Perodizität auf den Wärmefluss in den Probekörpern.
Die Umkehrpunkte der Strahler liegen für Probekörper Typ I (1,50 x 1,50 m^2) ca. 1,60 m auseinander. Damit ergibt sich eine Periodendauer von 15 s in der Mitte des Probekörpers und von 30 s für seinen Rand. Für Probekörper Typ II mit den Maßen 1,0 x 1,0 m^2 liegen die Umkehrpunkte etwa bei 1,10 m.
Die Periodendauer beträgt hier bei gleicher Schrittgeschwindigkeit 9 beziehungsweise 18 s.
Die aufgebrachte durchschnittliche Wärmeenergie wurde für Typ I mit ca. 1250 W/m^2 und für Typ II mit ca. 1800 W/m^2 ermittelt [BMRW02], [Bri05], [MAR+05b].
Nach [Cha74] ist die Temperaturleitfähigkeit α eines Materials definiert als $\alpha = \lambda/(\rho \cdot c_p)$ in m^2/s (vergleiche auch Kapitel 3.1.1).
Für Normalbeton gilt [din02]:

$$\alpha_B = \frac{2,1 \cdot W \cdot m^3 \cdot kg \cdot K}{2400,0 \times 1000,0 \cdot m \cdot K \cdot kg \cdot J} = 8,75 \times 10^{-7} \frac{m^2}{s} \tag{7.16}$$

Für Probekörper aus Beton mit einer Oberfläche von $1,5 \times 1,5$ m^2 (Typ I) und einer Anregungsfrequenz $\omega = 2 \cdot \pi/15$ s ergibt sich somit die thermische Eindringtiefe in der Mitte des Probekörpers zu:

$$\mu_B(Mitte) = \sqrt{\frac{2 \cdot \alpha}{\omega}} = \sqrt{\frac{2 \times 8,75 \times 10^{-7} \times 15 \cdot m^2 \cdot s}{2 \cdot \pi \cdot s}} = 0,00204\, m \tag{7.17}$$

Und für den Probekörper-Rand mit $\omega = 2 \cdot \pi/30$ s ergibt sich:

$$\mu_B(Rand) = \sqrt{\frac{2 \cdot \alpha}{\omega}} = \sqrt{\frac{2 \times 8,75 \times 10^{-7} \times 30 \cdot m^2 \cdot s}{2 \cdot \pi \cdot s}} = 0,00289\ m \tag{7.18}$$

Für Probekörper aus Beton mit einer Oberfläche von $1,0 \times 1,0$ m^2 (Typ II) und einer Anregungsfrequenz $\omega(Mitte) = 2 \cdot \pi/9$ s beziehungsweise $\omega(Rand) = 2 \cdot \pi/18$ s ist $\mu_B(Mitte) = 0,00158$ m und $\mu_B(Rand) = 0,00224$ m.

Fazit

Vergleicht man diese Werte mit der Betondeckung unserer Fehlstellen zwischen 3 und 10 cm, so lässt sich der periodische Einfluss der Erwärmungseinheit auf die Messergebnisse vernachlässigen. Im folgenden Abschnitt wird der Wärmefluss nach den in Kapitel 7.1 angegebenen Lösungen untersucht.

7.4. Dirac- und Rechteckimpuls im Vergleich

In Kapitel 7.1 wurden die analytischen Lösungen für die eindimensionale Fourier-Gleichung 2.12 für den instationären Wärmefluss nach Anregung mit einem Dirac-Puls (DI) und einem Rechteckimpuls (RI) gegeben. In Abbildung 7.7 bis 7.10 sind jeweils die Erwärmung durch einen Rechteckimpuls von 1800, 900, 600 und 300 s mit 1250 W/m^2 (links) einem energiegleichen Dirac-Puls (rechts) und die abschließende Abkühlung gegenübergestellt. Der bei den Messungen in der BAM verwendete Aufnahmebereich von 7200 s nach Anregung (vorher ist ein Messen nicht möglich, wenn sich die Erwärmungseinheit vor dem Prüfobjekt befindet) ist jeweils rot markiert.

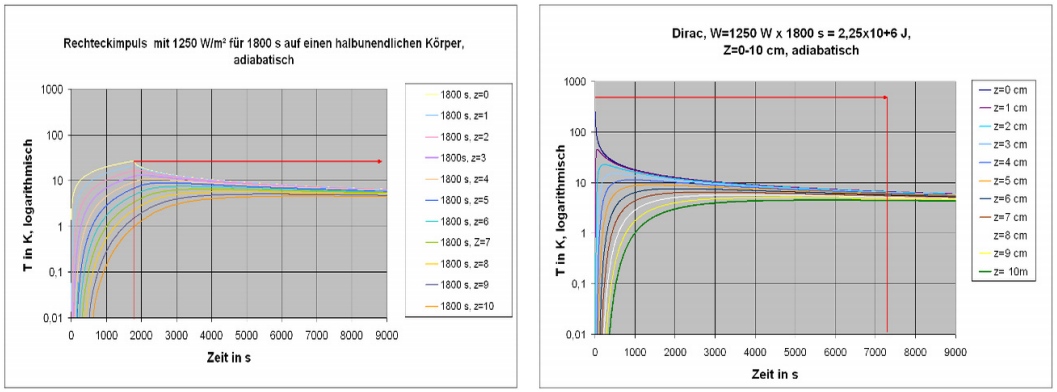


Abbildung 7.7.: Vergleich der Temperaturentwicklung infolge Rechteckimpuls für 1800 s mit 1250 W/m^2 (links) und Dirac-Puls gleicher Energie rechts

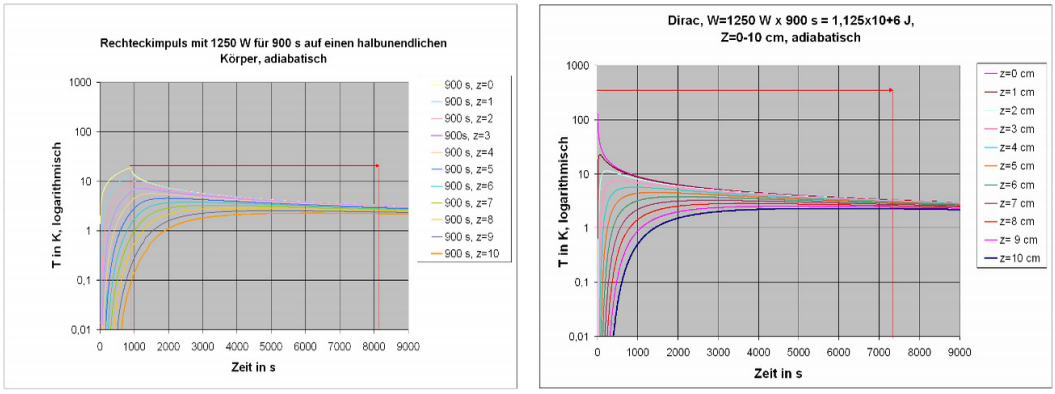


Abbildung 7.8.: Vergleich der Temperaturentwicklung infolge Rechteckimpuls für 900 s mit 1250 W/m^2 (links) und Dirac-Puls gleicher Energie (rechts)

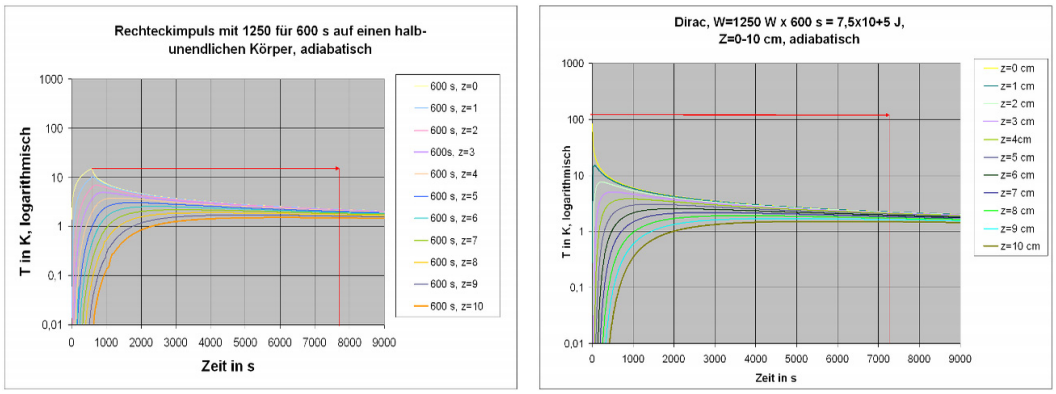


Abbildung 7.9.: Vergleich der Temperaturentwicklung infolge Rechteckimpuls mit 600 s mit 1250 W/m^2 (links) und Dirac-Puls gleicher Energie (rechts)

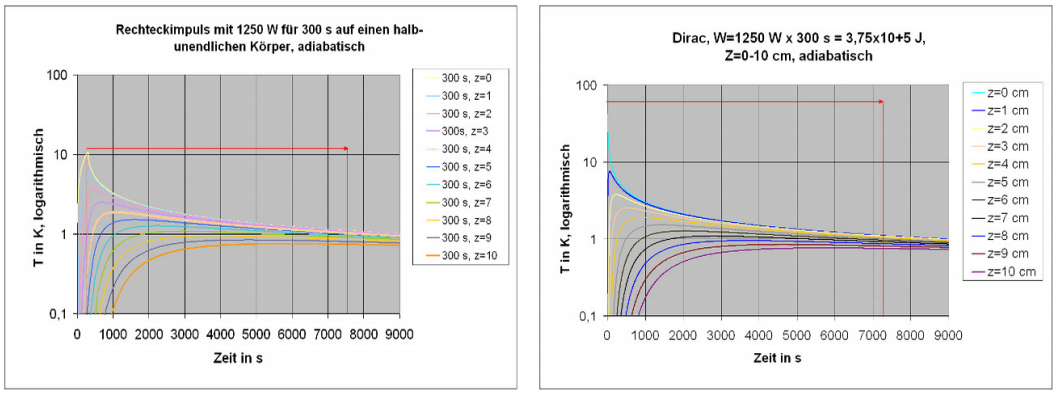


Abbildung 7.10.: Vergleich der Temperaturentwicklung infolge Rechteckimpuls mit 300 s mit 1250 W/m^2 (links) und Dirac-Puls gleicher Energie (rechts)

Fazit

Folgende Punkte werden deutlich:

1. Der Unterschied in der Temperaturverteilung zwischen Dirac- und Rechteckimpuls nimmt mit zunehmender Beobachtungszeit ab.

2. Der Unterschied in der Temperaturverteilung zwischen Dirac- und Rechteckimpuls nimmt mit zunehmender Erwärmungszeit zu. Er ist am größten beim 1800-s-Impuls und ist am geringsten beim 300-s-Impuls.

3. Je länger die Erwärmungszeit bei den Rechteckimpulsen ist, desto eher nach Beenden der Erwärmungphase stellt sich ein quasi-stationärer Zustand ein. Über ca. die Hälfte der Aufnahmezeit ist die Temperaturgradient in der uns interessierenden Tiefe zwischen 3 und 10 cm nahezu konstant (vergleiche hierzu auch Abbildung 7.5, die folgenden Abbildungen und Kapitel 7.4.2 - ohne die logarithmische Darstellung sowie die Untersuchungen von Brink unter Berücksichtigung nichtadiabatischer Randbedingungen im Zeitbereich [Bri05]).

4. Bei den Dirac-Pulsen weisen gerade die oberflächennahen Bereiche ($z = 0$ bis $z = 1$ cm) ein sehr starkes Gefälle auf, je nach Leistung des Pulses mehr oder weniger. Hier sind wir eindeutig im IT/PPT-Bereich, wo die Blindfrequenz und die thermischen Eindringtiefe μ, bei der ein Signal um das e^{-1}-Fache seines Wertes abfällt, für einen quantitativen Nachweis herangezogen werden kann. Im Gegenzug dazu wird klar, warum der Nachweis über die Blindfrequenz in der RPT und der thermischen Eindringtiefe bei der RAT häufig zu keinem Ergebnis führen kann. Bei der RIT ist gerade bei flachen Fehlstellen bereits zu Beginn der Aufnahme ein Temperaturkontrast vorhanden, außerdem tritt weder so ein starker Temperaturgradient auf, noch findet ein vollständiger Ausgleichsvorgang während der Aufnahmezeit statt, besonders bei langen Erwärmungszeiten nicht (vergleiche Punkt 3 des Fazit).

7.4.1. Blitzanregung

Im vorhergehenden Abschnitt wurde der Unterschied zwischen IT und RIT deutlich und auch, wie eine Methode durch lange beziehungsweise verzögerte Beobachtung in die andere überführt werden kann, also IT/PPT $\Rightarrow$ RIT/RST. Der Umkehrschluss gilt nicht zwangsläufig, wegen Punkt 4 (s.o.). Abbildung 7.11 veranschaulicht die aktuellen Grenzen der klassischen IT [1]. In Abbildung 7.11 ist die adiabatische Temperaturverteilung in Normalbeton nach einem Energiepuls einer herkömmlichen energiereichen Blitzlampe mit 12000 J dargestellt (Wert aus [NZ03]). Es wird deutlich, dass sich Beton bis zu wenigen Millimetern Dicke auf diese Weise zumindest qualitativ untersuchen lässt, natürlich in Abhängigkeit von den Randbedingungen, nicht zuletzt der Kameraauflösung. Das Gleiche gilt für den quantitativen Nachweis. Für Fehlstellen in einer

[1] Wenn man sich auf einen Einzelimpuls beschränken will. Neuere Ansätze gehen ja von einer mehrfach gepulsten IT [NZ03] aus. Dieser Ansatz wird zurzeit erfolgreich zur CFK-Prüfung in der BAM eingesetzt [HMR+06] oder [AHMR06]. Diese Methode wird im Rahmen dieser Forschungsarbeit nicht näher betrachtet.

Tiefe von 1 bis 2 mm würde sich eine Auswertung über die Blindfrequenz oder die thermische Eindringtiefe (Bereich der IT/PPT), für tiefer liegende Defekte eine Auswertung über die charakteristische Frequenz anbieten, vorausgesetzt man ermöglicht eine längere Beobachtungszeit von einer geschätzten halben Minute bei 10 bis 15 s Aufnahmeverzögerung[2].
Der Messaufbau, wie er in BAM und TUB vorhanden ist, sowie die Bedingungen im Bauwesen allgemein mit einer praktischen angewandten RIT vor Ort begünstigen auch einen entsprechenden quantitativen RST-Ansatz im Frequenzbereich.
Im folgenden Abschnitt wird der Einfluss der eingebrachten Energiedichte betrachtet, wie er in den oben dargestellten Untersuchungen beobachtet wurde.

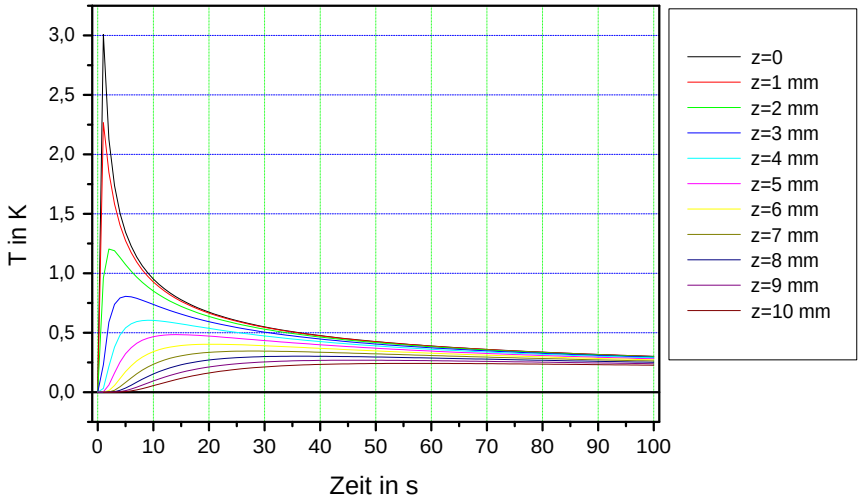


Abbildung 7.11.: Errechnete Abklingkurven für $z = 0 - 10$ mm nach Erwärmung einer adiabatischen halbunendlichen Normalbetonplatte mit einer im Handel üblichen Blitzlampe: Dirac-Puls, 12000 J [NZ03]

7.4.2. Einfluss der Energiedichte

In den in Kapitel 6.2 dargestellten Untersuchungen wurden die guten Ergebnisse bei den Fehlstellen in 6 und 10 cm Tiefe bei PK II_1 auf die hohe Leistungsdichte von 1800 W/m^2 gegenüber den 1250 W/m^2 bei PK I_1 zurückgeführt. In gewisser Hinsicht ist diese Aussage natürlich trivial, denn schon im Zeitbereich bei IT und RIT erhöht sich natürlich der Temperaturkontrast und damit auch die Nachweisempfindlichkeit und die Tiefenwirkung, wie man an den Differenzkurven in Abbildung 7.12 ablesen kann. Ein Geometrie-Effekt ist trotzdem nicht völlig auszuschließen. Dieser Punkt wird in gesonderten Simulationsrechnungen untersucht [Mau07].
Ein Vergleich zwischen Temperaturkontrastkurven von Rechteck- (Qi) und Dirac-Pulsen (Wi) für PK I und PK II für Betondeckungen von 0, 5 und 10 cm nach folgendem Schema:

[2]Diese Annahmen sind zunächst spekulativ, geben aber einen Einblick in die Möglichkeiten einer flexiblen quantitativen PPT/RST-Methodik, wenn sie im Zeitbereich durch IT/RIT gestützt wird.

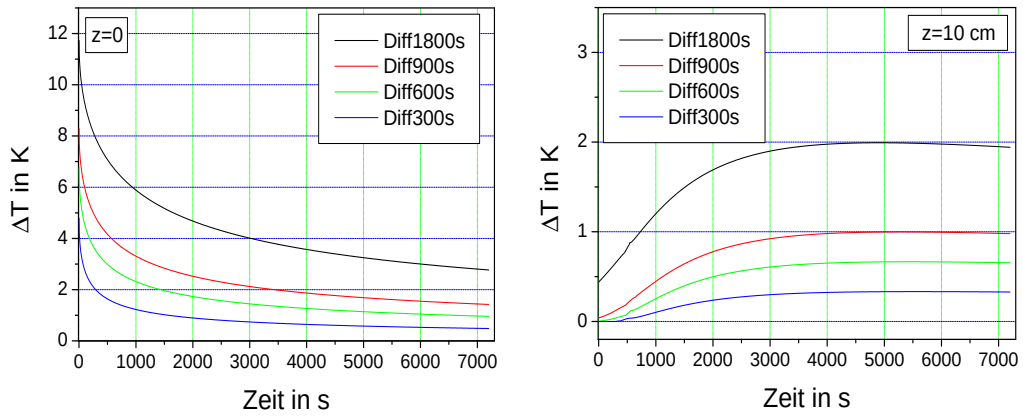


Abbildung 7.12.: Rechnerische Differenzkurven von Abklingkurven unterschiedlicher Leistung ($T_{1800W/m^2} - T_{1250W/m^2}$) nach Anregung mit Rechteckimpulsen von 1800, 900, 600 und 300 s für PK vom Typ I und II

Differenz $I = W1 - Q1$ mit $W1 = 1250W * 1800s = 2250000J$
Differenz $II = W2 - Q2$ mit $W2 = 1250W * 900s = 1125000J$
Differenz $III = W3 - Q3$ mit $W3 = 1250W * 600s = 750000J$
Differenz $IV = W4 - Q4$ mit $W4 = 1250W * 300s = 375000J$
Differenz $V = W5 - Q5$ mit $W5 = 1800W * 1800s = 3240000J$
Differenz $VI = W6 - Q6$ mit $W6 = 1800W * 900s = 1625000J$
Differenz $VII = W7 - Q7$ mit $W7 = 1800W * 600s = 1080000J$
Differenz $VIII = W8 - Q8$ mit $W9 = 1800W * 300s = 540000J$

führt zu ähnlichen Ergebnissen, wie man in den Abbildungen 7.13 und 7.14 ablesen kann.

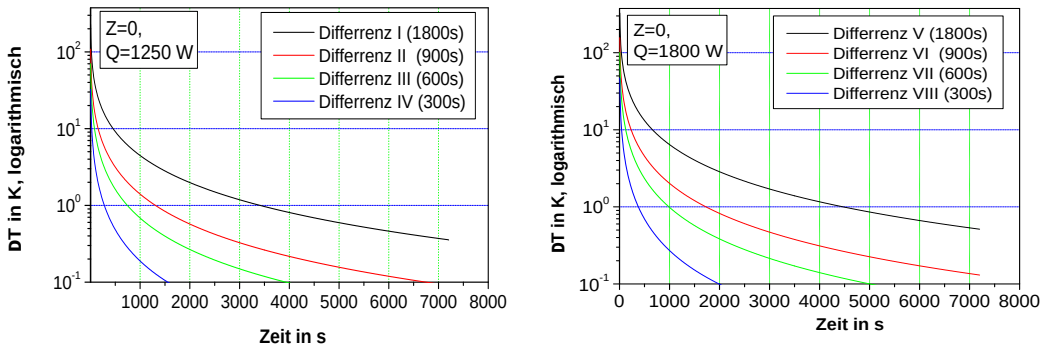


Abbildung 7.13.: Differenzen zwischen Rechteckimpulsen der Länge 1800, 900, 600 und 300 s und Dirac-Puls gleicher Energie für $z = 0$ cm mit 1250 W/m^2 (links) und 1800 W/m^2 (rechts)

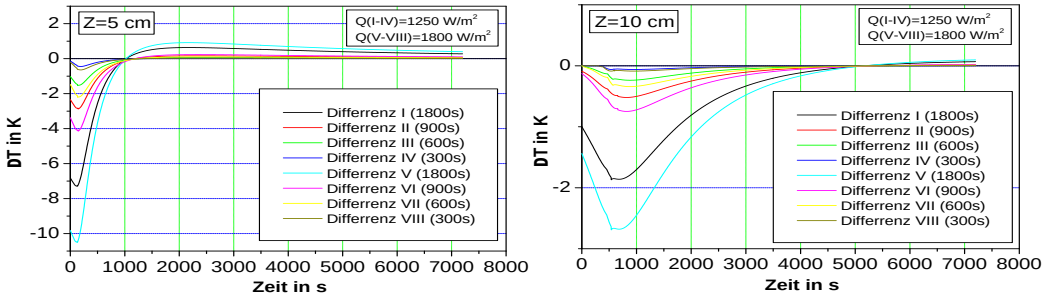


Abbildung 7.14.: Differenzen zwischen Rechteckimpulsen der Länge 1800, 900, 600 und 300 s und Dirac-Puls gleicher Energie mit 1250 W/m^2 und 1800 W/m^2 für $z = 5$ cm (links) und $z = 10$ cm (rechts)

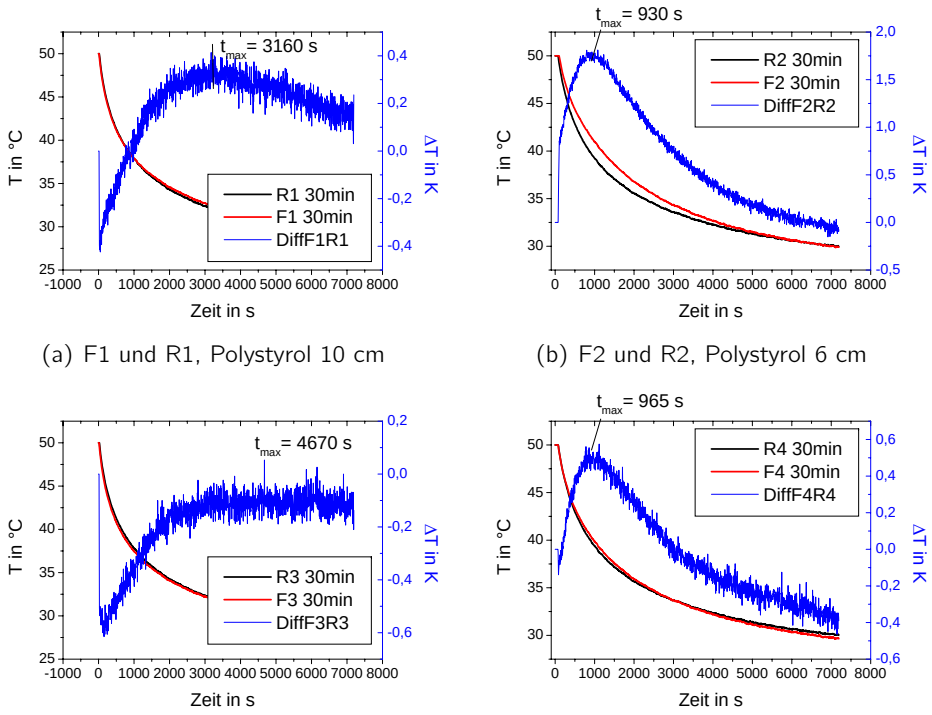
Fazit

Die maximale Differenz erhöht sich proportional zur aufgebrachten Leistungsdichte und damit auch das Signal-zu-Rausch-Verhältnis (SNR), aber am zeitlichen Verlauf, zum Beispiel des Nulldurchgangs, ändert sich nichts. dies ist eine Bestätigung für die Hypothese in Kapitel 6, wonach die Leistungsdichte nur einen indirekten Einfluss auf den quantitativen Nachweis hat, indem sie sich auf das SNR auswirkt.

7.5. Realer Temperaturverlauf der RIT

Der tatsächliche Temperaturverlauf von RIT-Untersuchungen an PK II_1 wird im Folgenden diskutiert. Der experimentelle Aufbau und die Messparameter sind wie gehabt. In Abbildung 7.15 sind die Ergebnisse nach 30 min Erwärmung am jungen Beton wiedergegeben (28 Tage). Die linke Ordinate zeigt die Temperatur der Referenz (schwarze Kurve) und der Fehlstelle (rote Kurve), die rechte Ordinate den Temperaturkontrast (blaue Kurve). Es fällt auf, dass das Material der Fehlstelle einen mit der Tiefe zunehmenden Einfluss auf den Zeitpunkt t_{max} zum Erreichen des maximalen Temperaturkontrastes T_{max} hat. Bei 6 cm Betondeckung beträgt der Unterschied mit 30 s nur 4%, bei den mit 10 cm bereits 48% ! Es ist nicht verwunderlich, dass sich das auch im Frequenzbereich auf den quantitativen Nachweis auswirkt, doch ist der Unterschied dort wesentlich geringer.
Betrachtet man nun den tatsächlich gemessenen Temperaturverlauf für verschiedene Erwärmungszeiten über den Fehl- und Referenzstellen von PK II_1 in Abbildung 7.16, ergibt sich eine gute Übereinstimmung mit den zugehörigen analytischen Lösungen in Abbildung 7.4 für $z = 0$ und $t_E = 1800$ s, wenn man berücksichtigt, dass bei den Vergleichsrechnungen adiabatische Randbedingungen angenommen wurden. Ein Beweis dafür, dass die analytische Lösung für

Rechteckimpulse hier die angemessene ist. Für eine genauere Annäherung sind Simulationsrechnungen erforderlich, die die Randbedingungen und Materialparameter detailliert berücksichtigen. Siehe hierzu vor allem [Bri05] und Abschnitt 4.6 dieser Arbeit mit simuliertem Nullbild und Differenzenkurve für eine Messung an PK II_I mit 1800 s Erwärmung.
In Abbildung 7.16 sind die Abklingkurven von 30 bis 5 min (links) und die zugehörigen Temperaturkontrastkurven (rechts) für F2 und F4 an vollständig abgebundenem Beton zusammengestellt, die die Grundlage der dargestellten Ergebnisse der RST bilden. Es ist anzumerken, dass die Umgebungstemperatur für alle Messungen bei 24 bis 25 °C lag, nur für die 30 min lagen erheblich kühlere 19 °C vor. Die Fehlstellen F1 und F3 konnten häufig nicht detektiert werden und sind deshalb nicht dargestellt. Der Unterschied zwischen den Porenbeton- und den Polystyrolfehlstellen ist in diesen Messungen, deutlich geringer als bei der 28-Tage-Messung, was in Abbildung 7.15 dafür spricht, dass der Porenbeton in 10 cm nach 28 Tagen noch nicht richtig ausgehärtet war.



(a) F1 und R1, Polystyrol 10 cm

(b) F2 und R2, Polystyrol 6 cm

(c) F3 und R3, Porenbeton 10 cm

(d) F4 und R4, Porenbeton 6 cm

Abbildung 7.15.: Abklingkurven und Differenzkurven für PK II_1 und 30 min Erwärmung mit der automatisierten IR-Erwärmungseinheit

Fazit

Folgende Erkenntnisse lassen sich ableiten:

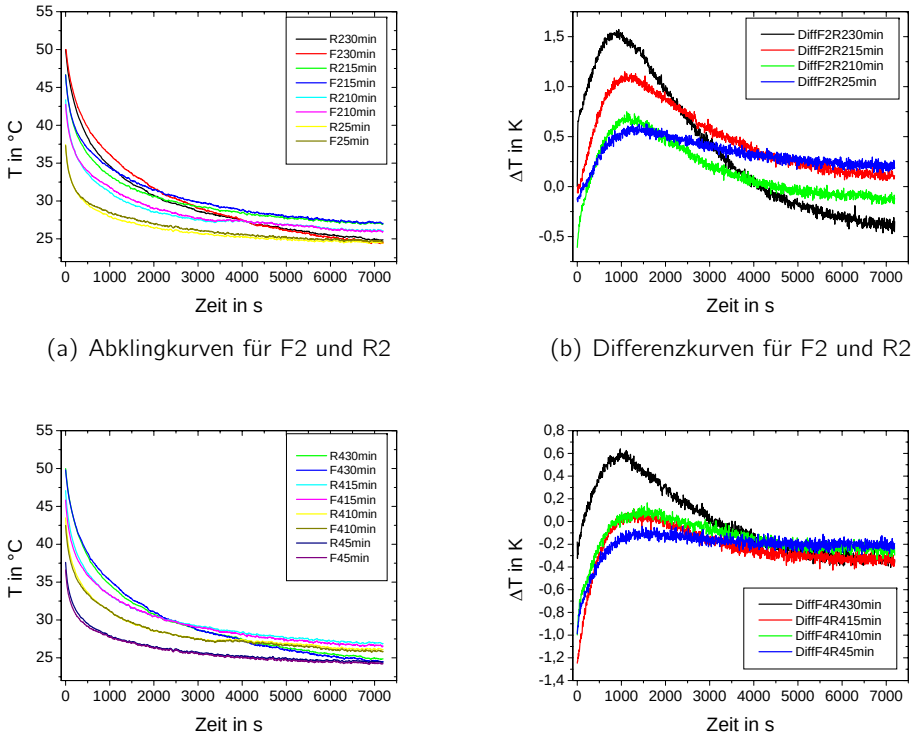
1. Das Material der Fehlstelle hat mit zunehmender Tiefe auch einen zunehmenden Einfluss auf den Verlauf der Abklingkurven sowie der Differenzkurven und den Zeitpunkt des maximalen

Temperaturkontrastes t_{max}. Allerdings nimmt dieser Einfluss mit dem Reifegrad des Betons ab. Dies spricht dafür, dass der Porenbeton im jungen Beton selber noch feucht ist und sich noch keine richtige Grenzschicht zum umgebenden Beton gebildet hat.

2. Je ähnlicher sich das Material der Fehlstelle und des umhüllenden Materials sind (hier: Porenbeton und Beton im Vergleich zu Polystyrol und Beton), desto geringer ist der Temperaturkontrast T_{max} und desto später wird er erreicht.

3. Die tiefen Fehlstellen und besonders die tiefe Porenbetonfehlstelle F3 sind gerade noch detektierbar.

4. Der Einfluss der Umgebungstemperatur und der Konvektion auf die Temperaturentwicklung auf der Oberfläche des Probekörpers wird deutlich.



(a) Abklingkurven für F2 und R2

(b) Differenzkurven für F2 und R2

(c) Abklingkurven für F4 und R4

(d) Differenzkurven für F4 und R4

Abbildung 7.16.: Abklingkurven und Temperaturkontrastkurven für PK II_1

7.6. Resümee

Die Ergebnisse der Untersuchungen des mit der automatisierten IR-Erwärmungseinheit angeregten Wärmeflusses lassen sich folgendermaßen zusammenfassen:

- Der Einfluss der Periodizität der automatisierten IR-Erwärmungseinheit kann vernachlässigt werden.

- Der Unterschied in der Temperaturverteilung zwischen Dirac- und Rechteckimpuls nimmt mit zunehmender Beobachtungszeit ab und mit zunehmender Erwärmungszeit zu. Er ist am größten beim 1800-s-Impuls und ist am geringsten beim 300-s-Impuls.
- Je länger die Erwärmungszeit bei den Rechteckimpulsen ist, desto eher nach Beenden der Erwärmungphase stellt sich ein quasi-stationärer Zustand ein. Über ca. die Hälfte der Aufnahmezeit ist die Temperatur in den bisher untersuchten Tiefen zwischen 3 und 10 cm nahezu konstant.
- Bei den Dirac-Pulsen weisen gerade die oberflächennahen Bereiche ($z = 0$ bis $z = 1$ cm) ein sehr starkes Gefälle auf, je nach Leistung des Pulses mehr oder weniger. Hier sind wir eindeutig im IT/PPT-Bereich, wo die Blindfrequenz und die thermischen Eindringtiefe μ, bei der ein Signal um das e^{-1}-Fache seines Wertes abfällt, für einen quantitativen Nachweis herangezogen werden kann. Im Gegenzug dazu wird klar, warum der Nachweis über die Blindfrequenz in der RPT und der thermischen Eindringtiefe bei der RAT zu keinem Erfolg führen *kann*. Bei der RIT ist gerade bei flachen Fehlstellen bereits zu Beginn der Aufnahme ein Temperaturkontrast vorhanden, außerdem tritt weder so ein starker Temperaturgradient auf, noch findet ein vollständiger Ausgleichsvorgang während der Aufnahmezeit statt, besonders bei langen Erwärmungszeiten nicht.
- Die maximale Differenz erhöht sich proportional zur aufgebrachten Leistungsdichte und damit auch das Signal-zu-Rausch-Verhältnis (SNR), aber am zeitlichen Verlauf, zum Beispiel des Nulldurchgangs, ändert sich nichts. Dies ist eine Bestätigung für die Hypothese in Kapitel 6, wonach die Leistungsdichte nur einen indirekten Einfluss auf den quantitativen Nachweis hat, indem sie sich auf das SNR auswirkt und keinen direkten.
- Je ähnlicher sich das Material der Fehlstelle und des umhüllenden Materials sind (hier insbesondere der junge Porenbeton und Beton im Vergleich zu Polystyrol und Beton), desto geringer ist der Temperaturkontrast T_{max} und desto später wird er erreicht.
- Die tiefen Fehlstellen und besonders die tiefe Porenbetonfehlstelle F3 sind gerade noch detektierbar, was auch die Schwierigkeiten bei der inversen Lösung im Frequenzbereich für diese Fehlstellen erklärt.
- Der Einfluss der Umgebungstemperatur und der Konvektion auf die Temperaturentwicklung auf der Oberfläche des Probekörpers wird deutlich.

Fazit: Bei einer Impulserwärmung mit kurzer Erwärmungszeit oder Blitz führt der große Anfangsgradient bei oberflächennahen Defekten in Bauteilen mit großer Temperaturleitfähigkeit zu Beginn des Abkühlvorganges zu der Möglichkeit eines quantitativen Nachweises über Blindfrequenz f_b und thermische Eindringtiefe μ im Frequenzbereich (PPT) durchzuführen. Die analytische Beschreibung des Wärmeflusses kann näherungsweise über das Dirac-Puls-Modell erfolgen. Bei einer Rechteckimpuls-Erwärmung ist dies nicht möglich. Dafür kann der Nachweis bei genügend langer Aufnahmezeit über die charakteristische Frequenz des maximalen f_{ch} Phasen- und Amplitudenkontrastes (RST) erfolgen. Für die analytische Lösung kann der Ansatz für Rechteckimpulse verwendet werden.

8. Parameterstudien einer quantitativen RST

Einführung

Die quantitative RST hat sich als sinnvoller Weg erwiesen, das inverse Problem der aktiven Thermogfarie mit Rechteckimpuls-Erwärmung (RIT) zu lösen. Um ihr Potential für die ZfPBau in vollem Umfang beurteilen zu können, sind weitere Randbedingungen und Parameter zu diskutieren. Auf die wichtigsten, die Erwärmungszeit und die Anregungsenergie, ist im vorhergehenden Kapitel eingegangen worden. Es folgen Betrachtungen über Einflussgrößen, die aus den Aufnahmebedingungen und der Datenverarbeitung (FT) resultieren. Dies sind Randbedingungen, die vom Untersuchenden selbst zu steuern oder doch wenigstens zu beeinflussen sind wie das Aufnahmeintervall, die Beobachtungszeit, sowie die Frequenzauflösung. Es schließen an Untersuchungen über Einflussgrößen, die vom untersuchten Bauteil selber ausgehen, die also vom Untersuchenden nicht zu beeinflussen sind, wie die Größe von Fehlstellen, das Fehlstellenmaterial und natürlich die Materialeigenschaften des untersuchten Bauteiles selber. Für Letzteres wurden Untersuchungen an verschiedenen Probekörpern durchgeführt.
Für eine Darstellung des experimentellen Aufbaues siehe Kapitel 4.

8.1. Einflussgrößen der Datenerfassung und -verarbeitung

Das Abtastintervall Δt, die Aufnahmezeit T sowie die Takt- oder Abtastrate Δf und die resultierende Anzahl der Bilder im Frequenzbereich N_f sind als Randbedingungen einer DFT beziehungsweise FFT aus der Literatur hinreichend bekannt [Azi87], [PFTV88], [Rea04] oder [Alg06]. [IC05] gibt an, wie man durch eine geeignete Wahl dieser Parameter gute Ergebnisse mit der Puls-Phasen-Thermografie (PPT) erzielen kann. Die Bedeutung der Beobachtungszeit gerade für den Nachweis der tiefen Fehlstellen wurde bereits mehrfach in dieser Arbeit erwähnt. Allgemein lässt sich sagen, dass eine gute Auflösung im Frequenzbereich indirekt in einer schlechten im Zeitbereich resultiert und umgekehrt. Der Vorteil einer Rechteckimpuls-Thermografie (RIT) im Bauwesen, wie es an BAM und TU angewendet wird, sind eben gerade lange Beobachtungszeiten, die in einer guten Frequenzauflösung resultieren[1]. Dazu kommen die großen Datenmengen, die bei einer zeitaufgelösten Thermografie parallel anfallen und bearbeitet und

[1] Dies mag der Grund sein, warum der Ansatz über die charakteristische Frequenz in erster Linie funktioniert und warum moderne Methoden, die in der Datenverarbeitung (zum Beispiel für das Impact-Echo-Verfahren, mit wesentlich höheren Frequenzen) großartige Dienste leisten - wie zum Beispiel die Wavelet-Transformation oder aktuelleren Datums die Hilbert-Huang-Transformation [Alg06]-, nach ersten Tests zu keiner Verbesserung der Datenverarbeitung führten. Weiterführende Untersuchungen wären hier für eine dezidierte Aussage erforderlich.

ausgewertet werden müssen, was den ausgefeilten und erprobten FFT-Algorithmus zu einem idealen Werkzeug macht, da er in der Lage ist, große Datenmengen in kürzester Zeit zu verarbeiten.
Auch kommt es anders als bei vielen anderen ZfP-Verfahren, einschließlich der LT und der IT, bei den im Rahmen dieser Arbeit betrachteten Tiefen von einigen Zentimetern und Messzeiten von 10 bis 120 min auf eine Sekunde mehr oder weniger bei Δt nicht an.
Naturgemäß sind der RIT und der RST auch hier Grenzen gesetzt. Ein einziges Abtastintervall Δt über die gesamte Aufnahmezeit T sagt auch im Frequenzbereich nichts aus. Was nicht im Zeitbereich aufgenommen wurde, kann auch nicht im Frequenzbereich analysiert werden.

8.1.1. Abtastintervall und Taktrate

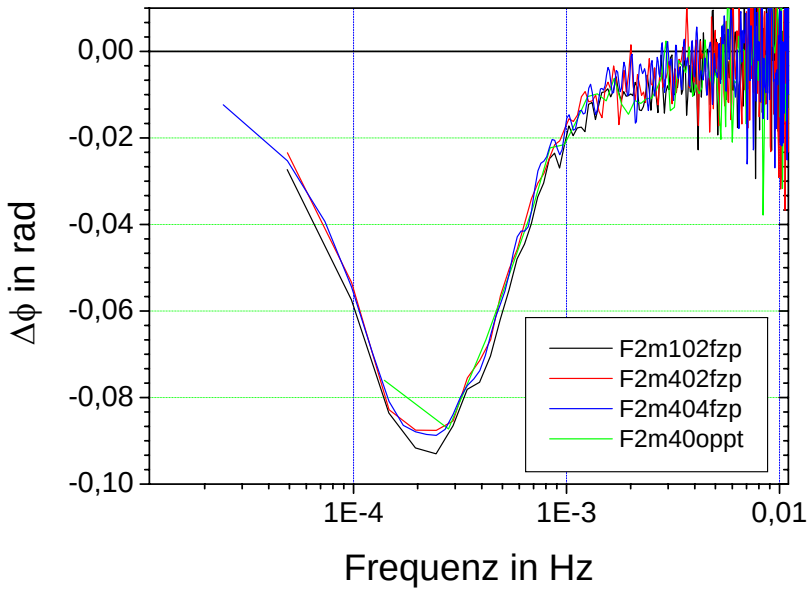


Abbildung 8.1.: Phasen-Kontrast-Kurve der FFT (einfaches Zero-Padding) gemittelt über 10 Werte (schwarz) und über 40 Werte (m40 - rot). Es sind auch noch die DFT für m40 (grün) und m40 mit nächsthöherem 2^n abgebildet (blau).

Um den Einfluss des Abtastintervalls Δt und der Taktrate Δf einschließlich des Zero-Padding (vergleiche Kapitel 2.3.4) zu demonstrieren, sind in Abbildung 8.1 Phasenkontrastkurven für PK II_1 und Fehlstelle F2 mit 15 min Erwärmung wiedergegeben, die auf unterschiedliche Weise weiterverarbeitet wurden. Die schwarze Kurve zeigt ein Ergebnis für die in der BAM übliche Vorgehensweise (über je 10 Messwerte gemittelt, so dass aus der Aufnahmefrequenz von 2 Hz 0,5 Hz Bearbeitungsfrequenz wird und Fast Fourier-Transformation (FFT) mit Zero-Padding mit nächst höheren $N_f = 2^n$ (hier: $N_t = 1438$ Eingangsbilder im Zeitbereich $\rightarrow N_f = 2048 = 2^{11}$ Bilder im Frequenzbereich), Faktor 2 genannt. Die rote Kurve mittelt über 40 Messwerte, weswegen 20 Bilder (entsprechen 10s Film) abgeschnitten werden mussten. In der grünen Kurve ist eine DFT für die m40 wiedergegeben und in der blauen wurde ein Zero-Padding von m40 mit

dem Faktor 4 ($n = 12$) durchgeführt.
Es wird deutlich, dass weder durch ein längeres Abtastintervall noch durch Zero-Padding, Informationen verloren gehen. Gerade wenn man die DFT mit den übrigen Kurven vergleicht, wird sogar der günstige Interpolationseffekt des Zero-Padding deutlich: Die grüne Kurve ohne Zero-Padding erscheint abgehackt und die Frequenz der minimalen Phasendifferenz lässt sich nicht genau bestimmen.
Allerdings ist auch erkennbar, dass Zero-Padding über den Faktor 2 hinaus an dieser Stelle keinen Sinn macht, da von Faktor 2 zu Faktor 4 keine Verbesserung mehr eintritt (für tiefere Fehlstellen gegebenenfalls schon).

8.1.2. Die Taktrate und das Verhältnis von Erwärmungs- zu Beobachtungszeit

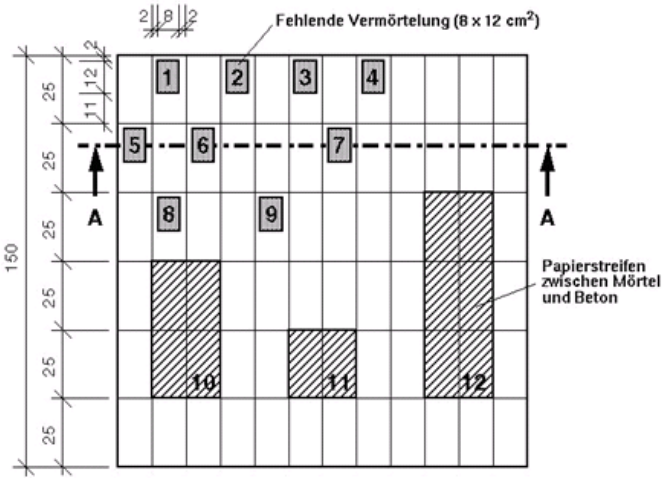


Abbildung 8.2.: Skizze von PK I_2 für Ablösungen zwischen Spaltklinker und Dickbettmörtel und Dickbettmörtel und Beton, Zeichnung: Borchard, BAM

Um den Einfluss vom Verhältnis Erwärmungs- zu Beobachtungszeit und der Taktrate auf die Ergebnisse im Frequenzbereich zu demonstrieren, werden Untersuchungsergebnisse von Messungen an PK I_2 (vergleiche Abbildung 8.2 und 5.3) mit variierender Taktrate und Beobachtungszeit herangezogen. Die Parameter für die FFT sind:

a) $t_{Erw=6}$ min, $T = 30$ min, $\Delta t = 2$ s
b) $t_{Erw=6}$ min, $T = 12$ min, $\Delta t = 1$ s
c) $t_{Erw=12}$ min, $T = 24$ min, $\Delta t = 1$ s

Die Temperaturleitfähigkeit wurde einheitlich zu $\alpha = 6.0x10^{-7}$ m^2/s angenommen, was eine gute Näherung für Spaltklinker ($\alpha = 5,83^{-7}$ m^2/s) und den Dickbettmörtel ($\alpha = 6,12^{-7}$ m^2/s) darstellt [din02].
Die Ergebnisse der RST an PK I_2 sind in Tabelle 8.1 zusammengefasst. In Abbildung 8.3 sind die Phasen-Kontrast-Kurven für Fall a und in Anlage C die Phasenkontrastkurven für die Fälle b und c dargestellt. Ausgewertet wurden die Fehlstellen F8 und F9 (Ablösungen zwischen Spaltklinker der Dicke $1,25 \pm 0,25$ cm und Dickbett) sowie F10 bis F12 (Ablösung unter dem

Dickbett in ca. 2,8±0,1 cm Tiefe (Papier+Verklebung zu 2 ± 1 mm angenommen).

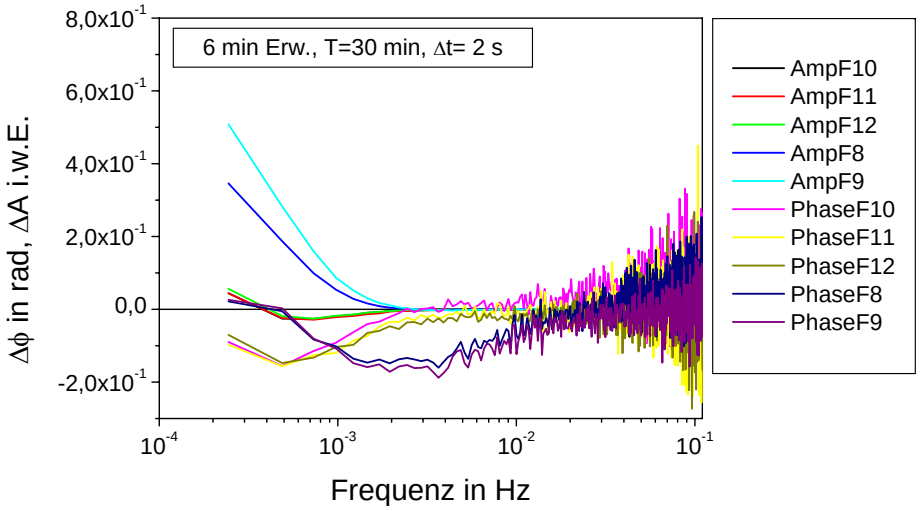


Abbildung 8.3.: Phasen- und Amplitudenkontrastkurven von PK I_2 für Ablösungen zwischen Spaltklinker und Dickbettmörtel und Dickbettmörtel und Beton für 6 min Erwärmung und 30 min Aufnahmezeit

Es ergeben sich folgende Schlussfolgerungen:

1. Die Dicke des Spaltklinkers konnte mit RAT und RPT mit einer Abweichung von ≤ 5 % bestimmt werden.

2. Die RAT erzeugte in allen Fällen keine Abweichung von $\geq 9\%$.

3. Die besten Ergebnisse mit einer Abweichung von 0% in allen Fällen wurden mit der RAT und den 6 min Erwärmungszeit und 30 min Beobachtungszeit erzielt (a), was die Vermutung bestätigt, dass für eine RST das Verhältnis Erwärmungszeit zu Beobachtungszeit entscheidend ist. Je länger die Aufnahmezeit, desto besser.

4. Die RPT erzielte mit den 6 min Erwärmungszeit und den 12 min Aufnahmezeit die besten Ergebnisse. Die lange Erwärmung von 24 min wirkte sich negativ auf das Resultat aus, mit Abweichungen von bis zu 33%.

Fazit

Das neue quantitative Nachweiskonzept funktioniert auch für Beschichtungen und für Materialdicken zwischen 1,5 und 3 cm. Es empfiehlt sich besonders eine Amplitudenauswertung.

Tabelle 8.1.: Zusammenstellung der Parameter für die quantitative RST an PK I_2 für $\alpha_{res} = 6,00x10^{-7}$ m^2/s und Parameter a ($t_E = 6$ und $T = 30$ min), b ($t_E = 6$ und $T = 12$ min) und c ($t_E = 12$ und $T = 24$ min), Abweichung gegenüber dem Sollwert in %.

Parameter	**a**	**b**	**c**	**a**	**b**	**c**	z
Fehlstelle	**f_{ch} in Hz x 10^{-4}**			**$\sqrt{\frac{\alpha}{f_{ch}}}$x 100 in cm**			**in cm**
PK I_2/F8 RPT	36,63	46,54	24,42	1,28 0%	1,14 0%	1,57 +5%	$1,25 \pm 0,25$
PK I_2/F8 RAT	36,63	39,05	43,97	1,28 0%	1,24 0%	1,17 0%	$1,25 \pm 0,25$
PK I_2/F9 RPT	36,63	29,31	29,31	1,28 0%	1,43 0%	1,43 0%	$1,25 \pm 0,25$
PK I_2/F9 RAT	43,05	53,74	43,97	1,18 0%	1,06 0%	1,17 0%	$1,25 \pm 0,25$
PK I_2/F10 RPT	4,85	9,77	9,77	3,52 +21%	2,48 -9%	2,48 -9%	$2,8 \pm 0,1$
PK I_2/F10 RAT	7,33	9,77	9,77	2,86 0%	2,48 -9%	2,48 -9%	$2,8 \pm 0,1$
PK I_2/F11 RPT	4,83	9,77	14,66	3,52 +21%	2,48 -9%	2,02 -33%	$2,8 \pm 0,1$
PK I_2/F11 RAT	7,33	–	9,77	2,86 0%	–	2,48 -9%	$2,8 \pm 0,1$
PK I_2/F12 RPT	4,83	9,77	14,66	3,52 +21%	2,48 -9%	2,02 -33%	$2,8 \pm 0,1$
PK I_2/F12 RAT	7,33	9,77	9,77	2,86 0%	2,48 -9%	2,48 -9%	$2,8 \pm 0,1$

8.2. Einfluss der Fehlstelle

Eine Fehlstelle kann unter verschiedenen Gesichtspunkten untersucht werden. Einige wurden im Rahmen dieser Arbeit bereits betrachtet, wie das Material der Fehlstelle, oder am Rande berührt, zum Beispiel deren Größe. Im folgenden Abschnitt werden alle diese Gesichtspunkte noch einmal zusammengestellt und durch weitere ergänzt.

8.2.1. Fehlstellenmaterial

Dieser Punkt wurde bereits in Kapitel 6.2.1 anhand von Porenbeton- und Polystyrolfehlstellen behandelt. Der Einfluss wirkt sich in der RST vor allem auf das SNR und den Phasen- oder Amplitudenkontrast aus. Im Zeitbereich erfolgt auch eine Beeinflussung von t_{max} (vergleiche Kapitel 7.5).

8.2.2. Größe der Fehlstelle

Wie den vorangehenden Betrachtungen zu entnehmen ist (Kapiel 6 ff.), spielt die Größe eines Defektes nur eine marginale Rolle, vergleichbar dem Material der Fehlstelle (s.o.). Zwar nimmt der Kontrast mit Kleinerwerden derselben auch ab, doch auf f_{ch} hat das nur einen geringen Einfluss, wie die zahlreichen Untersuchungsergebnisse zeigen (siehe zum Beispiel Kapitel 6.2 oder 6.3). Zur Bestimmung der Größe einer Fehlstelle siehe Kapitel 4.4.2.

8.2.3. Lage des untersuchten Punktes

Zur Untersuchung der Lage des untersuchten Punktes innerhalb einer Fehlstelle gilt im Wesentlichen das Gleiche, was über Material und Größe einer Fehlstelle gesagt wurde.

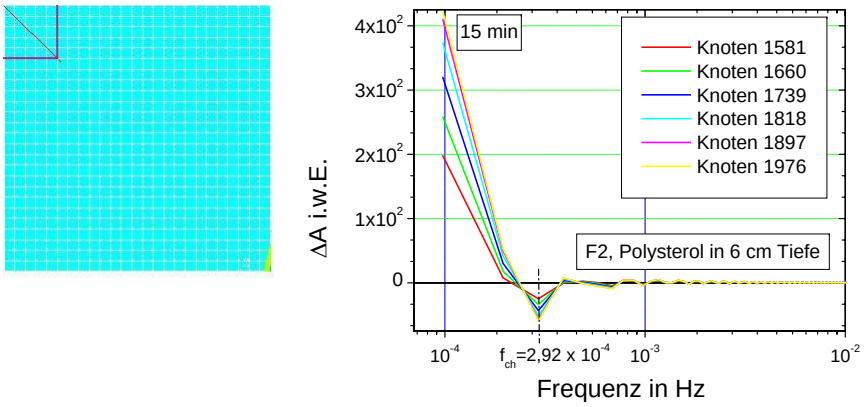


Abbildung 8.4.: Links: FE-Netz, Draufsicht, Ränder adiabatisch, $\alpha_k = 0,1$, Knoten auf Schnitt (rote Linie) von rechts unten (Knoten 1581) nach links oben (Knoten 1976), Rechts: Simulierte Amplitudenkontrastkurven für F2 von PK II_2 nach 15 min Erwärmung [Mau07]

Um dies zu demonstrieren, werden hier Ergebnisse von FE-Simulationen zu diesem Punkt gezeigt [Mau07]. In Abbildung 8.4, links, ist ein mit der FEM simuliertes Teilstück von PK II_1 wiedergegeben. Verwendet wurden isoparametrische Volumenelemente mit 8 Knoten und einem quadratischen Interpolationsansatz [GAP05] [GM01]. Aufgrund der Symmetrie musste nur ein 16tel von PK II_1 simuliert werden. Als Wärmeübergangskoeffizient auf der Oberfläche wurde vereinfacht ein konstanter Wert von $\alpha_k = 0,1$ W/(m^2·K) angenommen. Es wurden die Materialparameter für Normalbeton [din02] (Wärmeleitfähigkeit $\lambda = 2,1\ W/(m \cdot K)$, spezifische Wärmekapazität $c_P = 1000\ J/(kg \cdot K)$ und Dichte $\rho = 2400$ kg/m^3) angenommen. In einem ersten Simulationsschritt wurden die 15 min Erwärmung mit 1800 W/m^2 simuliert. In einem zweiten Schritt wurden schließlich die 120 min Abkühlung mit einer Taktrate von 5 s modelliert. In Abbildung 8.4, links, ist das modellierte Feld wiedergegeben. In Abbildung 8.4, rechts, sind die Amplitudenkontrastkurven wiedergegeben. Die untersuchten Punkte liegen auf einem diagonalen Schnitt durch die Fehlstelle von rechts unten (Knoten 1581 - rot) nach links oben (Knoten 1976 - gelb). Zwei Ergebnisse sind hervorzuheben:

1. Es ergab sich für alle Punkte die gleiche charakteristische Frequenz von $f_{ch} = 2,92x10^{-4}$ Hz, was einer Tiefe von $z = 5,47$ cm entspricht und in guter Übereinstimmung mit den simulierten 6 cm ist.

2. Je weiter die Fehlstelle am Rand liegt, desto kleiner (betragsmäßig) wird der Amplitudenkontrast für f_{ch}.

Diese durch Simulation ermittelten Zusammenhänge entsprechen auch den Erfahrungen des Verfassers bei den realen Daten in zahlreichen Auswertungen, bei denen zumeist nie genau das gleiche Pixel für den quantitativen Nachweis betrachtet wurde.

8.2.4. Schräglage der Fehlstellen

Nicht betrachtet wurde im Rahmen dieser Arbeit der Einfluss der Schräglage einer Fehlstelle, zumindest nicht direkt. Denn die Fehlstellen von PK I_1 liegen zumeist alle nicht parallel zur Oberfläche. Ein Teil der Schwierigkeiten, die Fehlstellen in PK I_1 immer akkurat zu bestimmen, mag auch diesem Umstand geschuldet sein.
Schräglagen von Fehlstellen sind deutlich auf den Phasenbildern, zum Beispiel in Abbildung 5.9, zu erkennen.

8.2.5. Weitere Einflussgrößen

Im folgenden Kapitel 8.3 werden weitere Randbedingungen und Parameter, die Einfluss auf einen quantitativen Nachweis im Frequenzbereich haben, systematisch anhand weiterer Probekörper untersucht.

8.3. Einfluss von Material der untersuchten Bauteile

Um die neue Methode zu überprüfen, werden an dieser Stelle Untersuchungen an weiteren Probekörpern der BAM mit den üblichen Messparametern durchgeführt (T= 7200 s, $\Delta t = 5$ s, Erwärmung mit der automatisierten IR-Erwärmungseinheit).

8.3.1. Ablösungen und Minderdicken

Die Möglichkeit der Anwendung des neuen quantitativen Ansatzes an Ablösungen von Beschichtungen und Minderdicken von 1,5 bis 3 cm wurde erfolgreich in Kapitel 8.1.2 am Beispiel von PK I_2 mit den Spaltklinkern im Dickbettmörtel nachgewiesen. Es wurden auch Untersuchungen mit positivem Ergebnis an PK I_4 und Gipsputz auf Beton mit ungelochten und gelochten Papierfehlstellen durchgeführt (für eine Skizze des untersuchten Probekörpers siehe Kapitel

4 Abbildung 5.5). Es zeigte sich, dass die Methodik auch für Dicken von $\leq$ 1 bis 2 cm aus Gipsputz erfolgreich angewendet werden kann. Die Temperaturleitfähigkeit wurde nach [din02] angenommen zu $\alpha = 2,917x10^{-7}$ m^2/s.

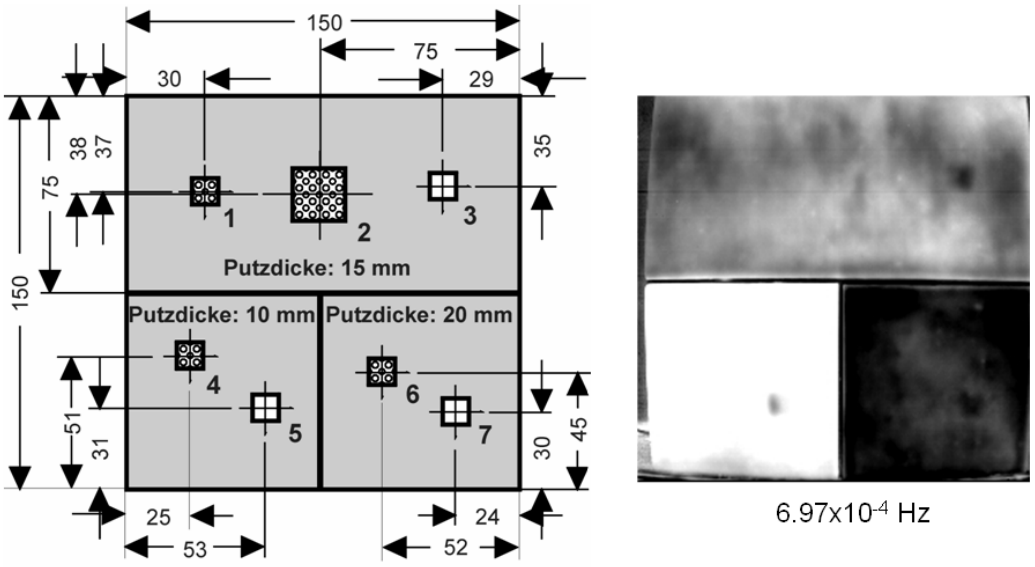


Abbildung 8.5.: Betonprobekörper PK I_4 ohne Bewehrung (150 x 150 x 50 cm^3); Gipsputz mit Ablösungen unterschiedlicher Ausdehnung simuliert durch gelochte und ungelochte Papierstreifen (alle Angaben in cm), Zeichnung: Borchard, BAM ´(links) und erstes Phasenbild (rechts).

In Tabelle 8.2 sind die Ergebnisse der quantitativen Untersuchung für verschiedene Beobachtungs- und Aufnahmezeiten zusammengestellt. Wie in der RIT konnten nur die ungelochten Defekte F3, F5 und F7 detektiert werden und F7 lediglich mit der RPT (siehe Abbildung 8.5 und Kapitel 5.2.3). Erneut erwies sich die RAT, als die genauere Methode und die RPT als besser geeignet für tiefliegende Defekte. Auch als günstig erwiesen sich lange Erwärmungszeiten (vergleiche Parameter a in Tabelle 8.2).

Auch die große ungewollte Ablösung im Feld mit 2 cm Putzdicke wurde untersucht (vergleiche Abbildung 5.6 in Kapitel 5.2.3). Hier ergaben sich Schwankungen zwischen 2 und 6 mm, was sich durch tatsächliche Schwankungen erklären ließe, da vermutlich nicht in allen Fällen exakt der gleiche Punkt für den Nachweis gepickt wurde. Auch eine Ungenauigkeit des Verfahrens ist hier nicht auszuschließen. Eine exakte Aussage über die Genauigkeit des quantitativen Nachweises für Dicken < 1 cm kann deshalb zum jetzigen Zeitpunkt nicht getroffen werden. Weiterführende Untersuchungen wären hier erforderlich. In Anlage B sind die entsprechenden Amplituden- und Phasenkontrastkurven für verschiedene Anregungen dargestellt (vergleiche auch die qualitativen Ergebnisse in Kapitel 5.2.3).

Der Probekörper mit CFK-Laminaten (PK I_3) wurde nicht ausgewertet, da hier anderweitig umfassende Studien erfolgen und ein Ansatz über die PPT und die Blindfrequenz bekanntermaßen zu guten Ergebnissen führt [IC05].

Tabelle 8.2.: Zusammenstellung der Parameter für die quantitative RST an PK I_4 für $\alpha_{Gipsputz} = 2,917x10^{-7}$ m$^2/s$ und Parameter a ($t_E = 12$ und $T = 24$ min), b ($t_E = 6$ und $T = 15$ min) und c ($t_E = 3$ und $T = 10$ min), Abweichung gegenüber dem Sollwert in %.

Parameter	**a**	**b**	**c**	**a**	**b**	**c**	z
Fehlstelle	**f_{ch} in Hz x 10^{-4}**			**$\sqrt{\frac{\alpha}{f_{ch}}}$x 100 in cm**			**in cm**
PK I_4/F3 RPT	7,32	9,76	–	2,00 +14%	1,73 0%	–	$1,5 \pm 0,25$
PK I_4/F3 RAT	7,32	–	–	2,00 14%	–	–	$1,5 \pm 0,25$
PK I_4/F5 RPT	9,76	9,76	–	1,87 38%	1,87 38%	–	$1,0 \pm 0,25$
PK I_4/F5 RAT	19,53	24,42	–	1,22 0%	1,09 0%	– –	$1,0 \pm 0,25$
PK I_4/F7 RPT	7,32	–	–	2,00 0%	–	–	$2,0 \pm 0,25$
PK I_4/F7 RAT	–	–	–	–	–	–	$2,0 \pm 0,25$
PK I_4/Ablösung RPT	78,11	620,3	–	0,61	0,21	–	unbekannt
PK I_4/Ablösung RAT	78,11	298,0	–	0,61	0,31	–	unbekannt

Fazit

Der neue quantitative Ansatz im Frequenzbereich liefert auch für Ablösungen in Beschichtungen gute Ergebnisse für Schichtdicken zwischen 1 und 3 cm. Für Schichdicken $\leq$1 cm sind für eine Aussage weiterführende Untersuchungen erforderlich, desgleichen für eine Schichtdickenbestimmung ohne das Vorhandensein von Defekten, da der im Rahmen dieser Arbeit entwickelte quantitative Nachweis auf einem Vergleich zwischen Fehlstelle und Referenz basiert. Ein solcher Nachweis auf Grundlage der RST erscheint aber vielversprechend, wenn man sich das obige Phasenbild betrachtet (Abbildung 8.5 rechts) auf dem die Schichtdicke in einem deutlichen Verhältnis mit dem Phasenkontrast zu stehen scheint.

8.3.2. Einfluss des Bewehrungsgrades

PK I_5 ist 1,50 x 1,50 x 0,50 m^3 groß und besitzt 6 Fehlstellen von 10 x 10 x 5 cm^3 in je 6 cm Tiefe. Er ist mit abgestufter Bewehrung ausgeführt. Über F1 befinden sich drei, über F2 zwei und über F3 eine Lage Q188-Matten. Die Referenzfehlstellen F01 bis F03 sind ohne Bewehrung ausgeführt (siehe Abbildungen 8.6 und 5.15). Die Versuche wurden mit dem üblichen Messaufbau und variierenden Erwärmungszeiten durchgeführt. Die Ergebnisse der quantitativen Untersuchungen an PK I_5 sind in Tabelle 8.3 zusammengestellt.

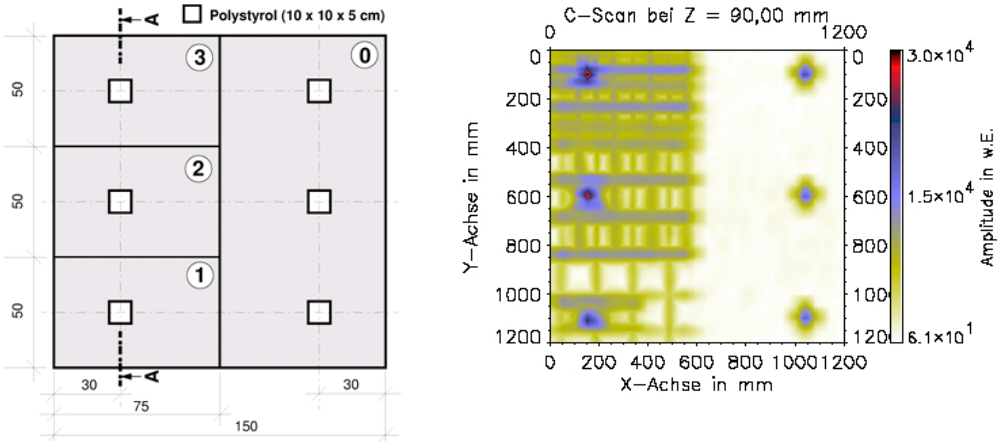


Abbildung 8.6.: Skizze von Probekörper PK I_5, zeichnung: Borchard, BAM (links), und Radar-C-Scan von PK I_5 in 9 cm Tiefe, Radargramm: Zacher, BAM (rechts), mit Bewehrung und 6 Fehlstellen in 6 cm Tiefe

Folgende Zusammenhänge werden deutlich:

- Die quantitativen Nachweise für die unbewehrten Referenzstellen besitzen eine Abweichung von $\leq 10\%$ für Amplituden und Phasen und für alle Erwärmungszeiten.
- Je größer der Bewehrungsgrad und je länger die Erwärmungszeit, desto größer ist der Einfluss der Bewehrung und desto flacher erscheint eine Fehlstelle. Hier wird der Einfluss der ca. 20-fachen Temperaturleitfähigkeit des Stahles $\alpha_{Stahl} = 1,91 \cdot 10^{-5}$ W/m^2 im Vergleich zu der des Betons $\alpha_{Beton} = 8,75x10^{-7}$ W/m^2 deutlich (vergleiche hierzu auch Abbildung 5.16 mit den Temperaturverläufen über PK I_5 und der nicht hohen, aber doch deutlichen Temperaturerhöhung über den Fehlstellen in den Bereichen mit hohem Bewehrungsgrad).
- Der Einfluss der Bewehrung ist aber lokal begrenzt und hängt vermutlich damit zusammen, ob man für den quantitativen Nachweis einen Punkt trifft, der genau über einem Bewehrungsstab liegt, oder nicht.
- Da der Bewehrungsgrad über F1 am größten ist, ist auch die Wahrscheinlichkeit am größten, einen einfach oder mehrfach bewehrten Punkt zu treffen (aus dem Radargramm wird auch deutlich, dass F1 genau unter einem Kreuzungspunkt der Matte liegt).

Fazit

Der neue quantitative Nachweis der RST funktioniert auch für bewehrte Bauteile. Allerdings ist die Abschätzung der maßgebenden Temperaturleitfähigkeit schwierig. Hier wäre unter Umständen ein probabilistischer Ansatz zum Bestimmen derselben sinnvoll, wenn der Bewehrungsgrad bekannt ist. Die Versuchsdurchführung erfolgte wie üblich.

Tabelle 8.3.: Zusammenstellung der Parameter für die quantitative RST an PK II_4 für Erwärmungszeiten t_E von 30, 15, 10 und 5 min und $\alpha_{Beton} = 8,75x10^{-7}$ m$^2/s$, Abweichung gegenüber dem Sollwert in %. Die * stehen für je eine Bewehrungslage über der Fehlstelle.

t_E	**30 min**	**15 min**	**10 min**	**5 min**	**30 min**	**15 min**	**10 min**	**5 min**	$_{nom}$**c**
Fehlstelle	**f_{ch} in Hz x 10^{-4}**				**$\sqrt{\frac{\alpha}{f_{ch}}}$x 100 in cm**				**in cm**
PK I_5/F1 RPT	4,39	2,44	3,91	2,93	4,46 -34%	5,99 0%	4,73 -27%	5,47 -10%	6,0 ***
PK I_5/F1 RAT	4,39	3,42	2,93	2,93	4,46 -34%	5,06 -19%	5,47 -10%	5,47 -10%	6,0 ***
PK I_5/F01 RPT	2,93	2,44	2,93	2,44	5,47 -10%	5,99 0%	5,47 -10%	5,99 0%	6,0
PK I_5/F01 RAT	2,93	2,44	2,44	2,44	5,47 -10%	5,99 0%	5,99 0%	5,99 0%	6,0
PK I_5/F2 RPT	3,42	3,42	2,93	2,93	5,06 -19%	5,06 -19%	5,47 -10%	5,47 -10%	6,0 **
PK I_5/F2 RAT	4,39	2,93	3,42	2,93	4,46 -34%	5,47 -10%	5,06 -19%	5,47 -10%	6,0 **
PK I_5/F02 RPT	2,44	2,93	2,44	2,93	5,99 0%	5,47 -10%	5,99 0%	5,47 -10%	6,0
PK I_5/F02 RAT	2,93	2,44	2,44	2,44	5,47 -10%	5,99 0%	5,99 0%	5,99 0%	6,0
PK I_5/F3 RPT	2,44	2,93	2,93	1,46	5,99 0%	5,47 -10%	5,47 -10%	7,74 +29%	6,0 *
PKI_5/F3 RAT	3,91	2,93	2,44	1,95	4,73 -27%	5,47 -10%	5,99 0%	6,70 +12%	6,0 *
PK I_5/F03 RPT	2,44	2,44	2,44	2,44	5,99 0%	5,99 0%	5,99 0%	5,99 0%	6,0
PK I_5/F03 RAT	2,93	2,44	2,44	2,44	5,47 -10%	5,99 0%	5,99 0%	5,99 0%	6,0

8.3.3. Einfluss durch Zugabe von Blähton

Bei PK II_2 (siehe Abbildung 5.12) wurde das Größtkorn durch Blähton ersetzt, wodurch sich eine Dichte von ca. 1900 kg/m^3 ergab. Die Wärmeleitfähigkeit wird abgeschätzt zu ca. 1,9 W/($m \cdot K$), die Temperaturleitfähigkeit zu $\alpha_{Beton} = 1,00x10^{-6}$ m^2/s. Die Ergebnisse der Auswertungen mit variierender Erwärmung und 120 min Aufnahmezeit sind in Tabelle 8.4 zusammengefasst.

Wie auch im Zeitbereich erweist sich dieser Probekörper als problematisch für eine quantitative Auswertung (vergleiche Abbildung 8.7 und [MAR$^+$05b]), besonders für die Porenbetonfehlstellen und für kurze Erwärmungszeiten wird dies deutlich. Eine quantitative Auswertung ist für diesen Probekörper für die RAT nicht möglich. Die Phasenauswertung erweist sich als stabiler. Je länger die Erwärmungszeit ist, desto besser sind die Ergebnisse. Bei 5 min Erwärmung lassen sich keine Regelmäßigkeiten erkennen, fast so, als würde die Wärmeenergie nicht ordentlich aufgenommen.

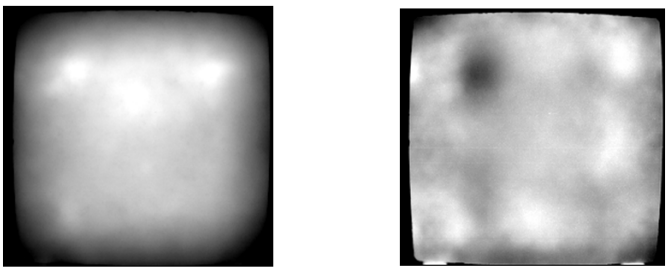


Abbildung 8.7.: Thermogramm nach 500 s (links) und Phasenbild von PK II_2 (rechts) mit der besonders Phasenbild deutlich erkennbaren inhomogenen Struktur des Probekörpers, die eine Detektion der Fehlstellen erschwert und einen quantitativen Nachweis, außer für sehr lange Erwärmungszeiten, fast unmöglich macht

Tabelle 8.4.: Zusammenstellung der Parameter für die quantitative RST an PK II_2 für Erwärmungszeiten t_E von 30, 15, 10 und 5 min und $\alpha_{Beton} = 1,00x10^{-6}$ m^2/s, Abweichung gegenüber dem Sollwert in %.

t_E	**30 min**	**15 min**	**10 min**	**5 min**	**30 min**	**15 min**	**10 min**	**5 min**	
Fehlstelle	**f_{ch} in Hz x 10^{-4}**				**$\sqrt{\frac{\alpha}{f_{ch}}}$x 100 in cm**				**$_{nom}c$ in cm**
PK II_2/F1 RPT	0,98	0,98	1,46	2,44	10,10 +1%	10,10 +1%	8,28 -21%	6,40 -56%	10,0
PK II_2/F1 RAT	–	1,46	0,98	1,46	–	10,10 +1%	8,28 -21%	8,28 -21%	10,0
PKII_2/F2 RPT	1,95	1,46	1,46	0,98	7,16 +19%	6,71 +12%	6,71 +12%	8,19 +37%	6,0
PK II_2/F2 RAT	2,44	1,95	1,46	1,95	6,40 +7%	7,16 +19%	8,28 +38%	7,16 +56%	6,0
PKII_2/F3 RPT	0,98	1,46	0,98	2,44	10,10 +1%	8,28 -21%	10,10 +1%	6,40 -56%	10,0 Porenbeton
PKII_2/F3 RAT	–	–	–	–	–	–	–	–	10,0 Porenbeton
PK II_2/F4 RPT	2,93	3,91	2,93	4,88	5,84 -3%	5,06 -19%	5,84 -3%	4,53 -32%	6,0 Porenbeton
PKII_2/F4 RAT	–	–	–	–	–	–	–	–	6,0 Porenbeton

8.3.4. Beton mit Luftporenbildner

Bei PK II_3 wurde Luftporenbildner mit zugegeben. dadurch verringerte sich die Dichte auf ≈ 2280 kg/m^3 und die Temperaturleitfähigkeit wird abgeschätzt zu $= 9,21x10^{-7}$ m$^{2]}$/s [din02]. Wie aus Tabelle 8.5 sichtbar wird, liefert der neue Ansatz für diesen Probekörper sehr gute Ergebnisse für Erwärmungszeiten von ≤ 10 min ($\leq 15\%$) und mit Außnahme der tiefen Porenbetonfehlstelle auch für die 15 min Erwämungszeit. Die größte auftretende Abweichung beträgt 26%. Tendentiell ist, soweit bestimmbar, die RAT etwas genauer als die RPT. Die tiefen Porenbetonfehlstellen lassen sich über die Amplituden nicht zuverlässig detektieren (vergleiche Tabelle 8.5).

Tabelle 8.5.: Zusammenstellung der Parameter für die quantitative RST an PK II_3 für Erwärmungszeiten t_E von 30, 15, 10 und 5 min und $\alpha_{Beton} = 9,21x10^{-7}$ m^2/s, Abweichung gegenüber dem Sollwert in %.

t_E	**30 min**	**15 min**	**10 min**	**5 min**	**30 min**	**15 min**	**10 min**	**5 min**	
Fehlstelle	**f_{ch} in Hz x 10^{-4}**				**$\sqrt{\frac{\alpha}{f_{ch}}}$x 100 in cm**				**$_{nom}c$ in cm**
PK II_3/F1 RPT	1,46	0,98	0,98	0,98	7,94 -26%	9,69 -3%	9,69 -3%	9,69 -3%	10,0
PK II_3/F1 RAT	1,46	0,98	0,98	–	7,94 -26%	9,69 -3%	9,69 -3%	– –	10,0
PK II_3/F2 RPT	3,42	2,93	2,93	1,95	5,19 -16%	5,61 -7%	5,61 -7%	6,87 +15%	6,0
PK II_3/F2 RAT	3,91	2,93	2,44	2,44	4,85 -24%	5,61 -7%	6,14 +2%	6,14 +2%	6,0
PK II_3/F3 RPT	0,98	1,46	0,98	0,98	9,69 -3%	7,94 -26%	9,69 -3%	9,69 -3%	10,0 Porenbeton
PK II_3/F3 RAT	0,98	–	–	–	9,69 -3%	–	–	–	10,0 Porenbeton
PK II_3/F4 RPT	2,93	1,95	2,93	2,44	5,61 -7%	6,87 +15%	5,61 -7%	6,14 +2%	6,0 Porenbeton
PK II_3/F4 RAT	2,93	2,44	2,44	2,44	5,61 -7%	6,14 +2%	6,14 +2%	6,14 +2%	6,0 Porenbeton

8.3.5. Beton mit Stahlfasern

Für PK II_4 wurden Stahlfasern (39 kg/m^3) und Flugasche (50 kg/m^3) dazu gegeben. Schon im Zeitbereich wirkte sich der Einfluss der Stahlfasern indirekt auf das thermische Verhalten aus. „*Durch die eingebrachten Stahlfasern wurde der Beton, trotz der Verwendung eines Fließmittels, schlechter verdichtet. Die dadurch zusätzlich eingebrachten Luftporen verringerten die Rohdichte und Wärmeleitfähigkeit des Betons und führten dazu, dass die Probekörper mit steigendem Stahlfasergehalt beim Erwärmen mit Infrarotstrahlern wärmer wurden.*“ ([MAR+05b], Seite 14). Zwar konnten keine „Stahlfaserigel“ detektiert werden, doch lässt sich von einer ungleichmäßigen

Verteilung der Fasern ausgehen, was sich gerade bei der kurzzeitigen Erwärmung von 5 min bemerkbar macht. Hier treten die größten Schwankungen bei f_{ch} auf. Gerade unter Berücksichtigung dieses Sachverhaltes, liefert der neue Ansatz gute Ergebnisse für die 6 cm tiefen Fehlstellen (siehe Tabelle 8.5). Der Nachweis für die Fehlstellen mit 10 cm Überdeckung ist dagegen unzuverlässig. Erneut ist die RPT für diese tiefen Fehlstellen erfolgreicher.

Tabelle 8.6.: Zusammenstellung der Parameter für die quantitative RST an PK II_4 für Erwärmungszeiten t_E von 30, 15, 10 und 5 min und $\alpha_{Beton} = 8,75x10^{-7}$ m^2/s, Abweichung gegenüber dem Sollwert in %.

t_E	**30 min**	**15 min**	**10 min**	**5 min**	**30 min**	**15 min**	**10 min**	**5 min**	
Fehlstelle	**f_{ch} in Hz x 10^{-4}**				**$\sqrt{\frac{\alpha}{f_{ch}}}$x 100 in cm**				**$_{nom}c$ in cm**
PK II_4/F1 RPT	1,46	1,46	1,46	0,98	7,74 -29%	7,74 -29%	7,74 -29%	9,45 -6%	10,0
PK II_4/F1 RAT	1,46	–	–	–	7,74 -29%	–	–	–	10,0
PK II_4/F2 RPT	2,44	2,93	2,93	1,95	5,99 0%	5,47 -10%	5,47 -10%	6,70 +12%	6,0
PK II_4/F2 RAT	2,93	2,44	2,44	2,93	5,47 -10%	5,99 0%	5,99 0%	5,47 -10%	6,0
PK II_2/F3 RPT	0,98	1,46	1,46	5,37	9,45 -6%	7,74 -29%	7,74 -29%	4,04 -148%	10,0 Porenbeton
PK II_2/F3 RAT	–	–	–	–	–	–	–	–	10,0 Porenbeton
PK II_2/F4 RPT	2,44	2,93	2,44	2,93	5,99 0%	5,47 -10%	5,99 0%	5,47 -10%	6,0 Porenbeton
PK II_2/F4 RAT	2,93	2,44	1,95	1,95	5,47 -10%	5,99 0%	6,70 +12%	6,70 +12%	6,0 Porenbeton

8.4. Resümee

Die Parameterstudie hat das Potential einer quantitativen RST aufgezeigt. Im einzelnen sind folgende Punkte hervoruzuheben:

- Der neue quantitative Ansatz der RST eignet sich für eine Tiefenbestimmug von Defekten und Schichtgrenzen zwischen ≤ 1 bis 10 cm für die untersuchten Materialien Beton (bewehrt und unbewehrt, mit und ohne Stahlfasern und hohem Luftporengehalt), Spaltklinker, Mörtel und Putz mit dem angegebenen Messaufbau.

- Das Verfahren an sich ist unempfindlich gegenüber dem Material des Bauteiles, der Fehlstellen oder deren Geometrie. Lediglich indirekt über ein schlechtes SNR und inhomogenes Material, resultierend in der Schwierigkeit die Temperaturleitfähigkeit zu bestimmen, wird der Nachweis beeinflusst.

- Unter günstigen Bedingungen (hohe eingebrachte Energie, lange Beobachtungszeit, homogenes Material, klare Schichtgrenzen zwischen umgebenden Material und Inhomogenität und wenn die Temperaturleitfähigkeit der untersuchten Materialien bekannt ist) liegt die Abweichung bei Tiefen zwischen 1 und 8 cm in den meisten Fällen unter 10% (selten bei 12% und häufig bei 0%) und bei einer Tiefe von 9 bis 10 cm von unter 30% (häufig auch bei 6 oder gar 0%).
- Eine Verbesserung des Nachweises der tiefen Fehlstellen ließe sich vermutlich über eine Verlängerung der Aufnahmezeit erzielen. Hier hat sich bei den tiefen Fehlstellen ein Verhältnis von Erwärmungszeit zu Aufnahmezeit von > 4 bewährt.
- Die Amplitudenauswertung erwies sich in vielen Fällen als die genauere.
- Dafür ist die Detektierbarkeit tiefer Fehlstellen bei den Phasen höher und auch die Unempfindlichkeit gegenüber Inhomogenitäten im untersuchten Bauteil beziehungsweise Material.
- Die Verwendung des ursprünglich eingeführten Korrekturfaktors k_c erscheint überflüssig.

Fazit: Inhomogenes Material erschwert zwar den quantitativen Nachweis im Frequenzbereich aufgrund der ungleichmäßig verteilten Temperaturleitfähigkeit, aber letztlich lässt sich der neue Ansatz für alle betrachteten Fälle mit dem angegebenen Messaufbau und unter den angegebenen Laborbedingungen einsetzten. Die Möglichkeiten eines erfolgreichen Einsatzes des neuen quantitativen Ansatzes in der Praxis erscheinen vielversprechend.

9. RIT und RST in der Praxis

Die bisher dargestellten qualitativen und quantitativen Untersuchungsergebnisse wurden unter Laborbedingungen mit einem einheitlichen Messaufbau gewonnen. Im folgenden Kapitel sind ausgewählte Praxisanwendungen der Rechteckimpuls-Thermografie (RIT) und der Rechteckimpuls-Spektral-Thermografie (RST), an denen der Verfasser beteiligt war, kurz wiedergegeben[1]. Es handelte sich dabei überwiegend um eigen-oder fremdfinanzierte Messeinsätze für Machbarkeitsstudien in der Qualitätssicherung im Bauwesen oder zum Erhalt von Kulturgütern.
Die angegebenen Beispiele geben einen breiten Einblick in die Vielfältigkeit der Anwendungsmöglichkeiten aktiver Thermografie im Bauwesen, erheben aber keinen Anspruch auf Vollständigkeit. Zudem werden die Vorteile der RST gegenüber der RIT gerade bei Messeinsätzen vor Ort noch einmal deutlich.

9.1. Messeinsätze und Machbarkeitsstudien

Im folgenden Abschnitt sind einige ausgewählte Beispiele von Fallstudien zu verschiedenen Fragestellungen der Qualitätssicherung im Bauwesen mittels RIT und RST dargestellt. Untersucht wurden Ablösungen und Hohllagen von horizontalen und vertikalen mehrschichtigen Bauteilen aus Naturstein, Asphalt und Epoxidharz auf Beton sowie von Putz auf Mauerwerk beziehungsweise Stahl.

9.1.1. Ablösungen unter Natursteinfußboden

Im Foyer eines Geschäftshauses mit starkem Publikumsverkehr hatten sich einige Platten eines Natursteinbodens (1,5 cm dicke Granitplatten) vom Mörtelbett gelöst. Der gesamte Bereich von ca. 40 m^2 sollte flächendeckend untersucht werden [HTA05]. Die einzelnen Bereiche wurden dazu ca. 3 min mit Infrarotstrahlern in horizontaler Anordnung erwärmt. Das anschließende Abkühlungsverhalten wurde 10 min mit einer IR-Kamera aufgenommen, digitalisiert und aufgezeichnet. Zur eindeutigen Bestimmung der betroffenen Flächen und Hohllagen wurden Thermogramme und digitale Bilddateien entzerrt und überlagert. Abbildung 9.2 zeigt auf der linken Seite ein fotogrammetrisch entzerrtes Foto des untersuchten Messbereiches 11. Das dazu entsprechend entzerrte Thermogramm mit maximalem Temperaturkontrast, überlagert mit dem Digitalfoto

[1] Eine Außnahme bildet Kapitel 9.1.2. Der Messeinsatz erfolgte zwar in der Arbeitsgruppe des Verfassers in der BAM, aber ohne Beteiligung desselben. Dieses Beispiel wird trotzdem aufgenommen, um zu zeigen, dass RST auch in der Lage ist, Stahlträger hinter Putz, zumindest indirekt über Lufteinschlüsse und Ausmauerung, zu orten. Auch die erfolgreiche Anwendung aktiver Thermografie an Decken kann an diesem Beispiel demonstriert werden.

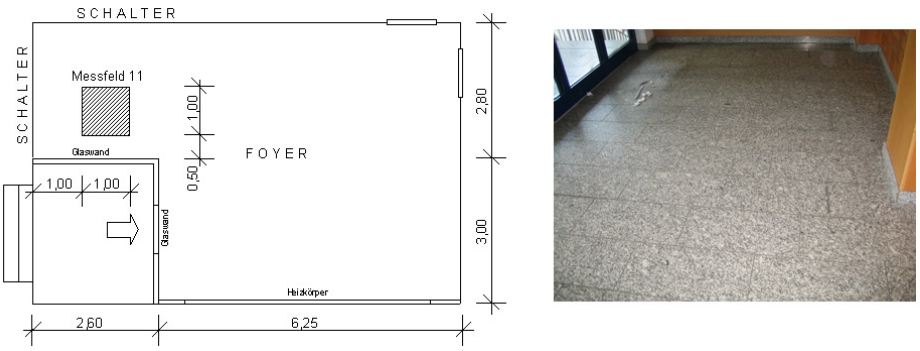


Abbildung 9.1.: Skizze des Messbereichs mit Messfeld 11, Zeichnung: Borchard, BAM (links), und Foto des Messbereichs zwischen Glaswand und Schalter (rechts)

zur Darstellung der Fugen, ist im rechten Bild zu erkennen. Hohlstellen im Bereich der Fugen und Ablösungen lassen sich durch einen deutlichen Temperaturkontrast von bis zu 8 K erkennen. Die Phasenbilder lieferten in diesem Fall keine nennenswerten Zusatzinformationen.

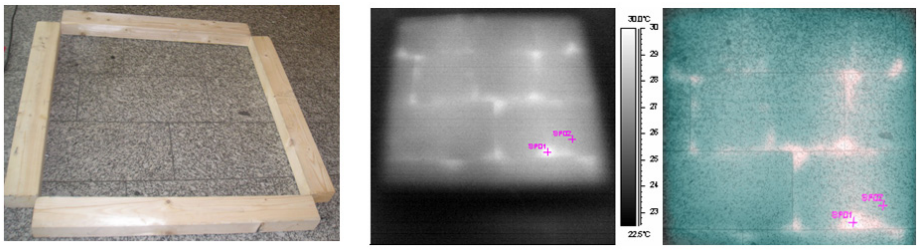


Abbildung 9.2.: Foto von Messbereich 11 (ca. 1 m^2, links), das zugehörige Thermogramm zum Zeitpunkt des maximalen Temperaturkontrastes (Mitte) und fotogrammetrisch entzerrte Überlagerung, Hemmleb, BAM (rechts) [MAR06a]

9.1.2. Stahl und Mauerwerk hinter Putz

Abbildung 9.3 zeigt das Beispiel einer Bauwerksuntersuchung mittels aktiver Thermografie. Es

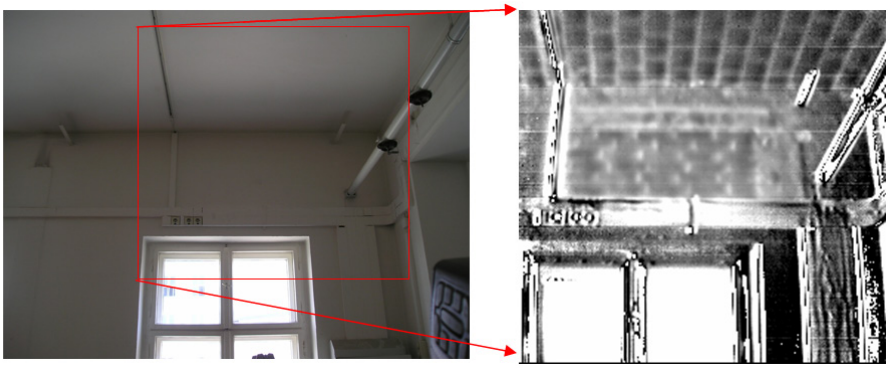


Abbildung 9.3.: Foto eines untersuchten Raumabschnittes (links) und zugehöriges Phasenbild der RPT (rechts)

sollte die konstruktive Durchbildung des Fenstersturzes hinter dem Putz detektiert werden. Die Erwärmung erfolgte mit einem konventionellen Heizlüfter. Das Phasenbild der RST-Auswertung zeigt die hinter dem Putz verborgene Konstruktion, die auf normalen Thermogrammen zum Teil verborgen blieb. Gut zu erkennen ist neben dem ausgemauerten Fenstersturz auch die Deckenkonstruktion.

9.1.3. Ablösungen von Epoxidharz auf Beton

In einem Faulschlammbehälter in einem Klärwerk bei Berlin löste sich die wenige Millimeter starke Epoxidharzbeschichtung an verschiedenen Stellen von der Betontragschale ab. Neben Messungen mit anderen ZfP-Verfahren wurde auch eine Machbarkeitsstudie mit aktiver Thermografie durchgeführt. Ziel der Machbarkeitsstudie war es, die delaminierten Bereiche zu detektieren und von den nicht delaminierten abzugrenzen. Eine besondere Herausforderung dieser Aufgabe war die starke Verschmutzung der Oberfläche durch Ablagerungen.

Experimenteller Aufbau

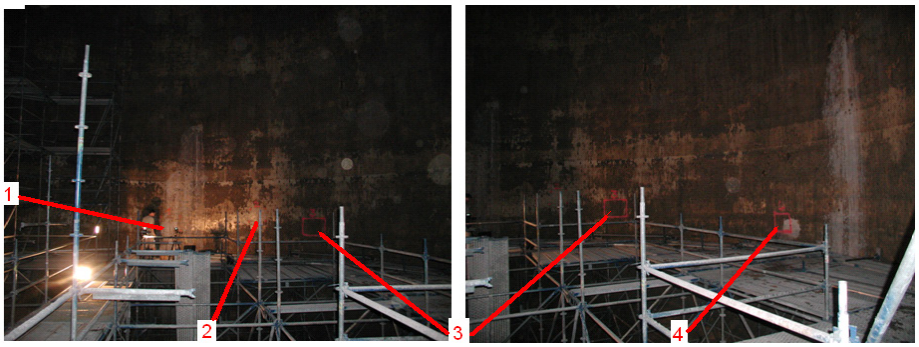


Abbildung 9.4.: Messfelder 1 bis 4 in Faulschlammbehälter bei Berlin

Die Messungen konnten von einem zu Sanierungszwecken errichteten Gerüst im Innern des Behälters aus durchgeführt werden (siehe Abbildung 9.4). Es wurden vier repräsentative Messbereiche (M) ausgewählt: M1 wurde ausgewählt wegen der dort bereits gezogenen Bohrkerne, M2 war ein relativ unverschmutzter Bereich und M3 stark verschmutzt. Der Bereich M4 wurde ausgewählt, da es dort bereits zu Abplatzungen gekommen war und ein testendes Abklopfen weitere Delaminierungen erwarten ließ.
Die vier untersuchten Messflächen waren ca. 1 m^2 groß und wurden mit einem Infrarotstrahler-Array von $0,25x1,00$ m^2 Fläche und 4800 W Anschlussleistung bestrahlt. Die gleichmäßige Erwärmung wurde durch ein manuelles vertikales Verfahren der Wärmeeinheit erreicht. Die Erwärmungsdauer wurde mit einer min veranschlagt, die Beobachtungsdauer betrug 10 min und die Aufnahmefrequenz 1 Hz. Nach der Datenerfassung mit RIT erfolgte eine Auswertung im Zeit- und im Frequenzberich mittels RST.

Untersuchungsergebnisse

Abbildung 9.5.: Foto (links), Thermogramm nach 0 s Abkühlung (Mitte) und erstes Amplitudenbild bei 0 Hz (rechts) von M1

Die Auswertung gestaltete sich für die verschmutzten Bereiche erwartungsgemäß schwierig. Es zeigte sich erneut ein deutlicher Informationsgewinn durch die Phasenauswertung der RPT, wie ein Vergleich des ersten Temperatur- und Amplitudenbildes in Abbildung 9.5 mit dem ersten Phasenbildes von M1 in Abbildung 9.6 zeigt.

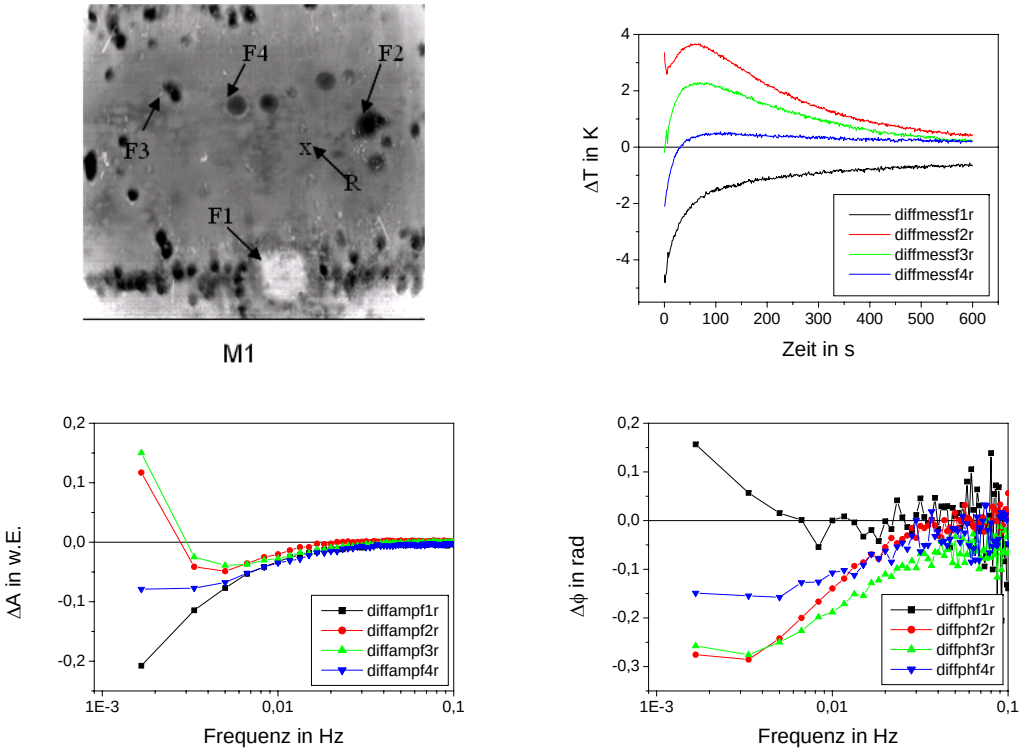


Abbildung 9.6.: Erstes Phasenbild bei $1,67x10^{-3}$ Hz (links oben), Temperaturkontrast(rechts oben), Amplituden- (links unten) und Phasenkontrastverläufe (rechts unten) für Auffälligkeit F1, F2, F3 und F4 (schwarz, rot, grün und blau), bezogen auf Referenzstelle R

Die Ablagerungen auf der Oberfläche heizten sich besonders stark auf und verzerrten die Messergebnisse teilweise erheblich. Wie sich am Beispiel von M1 veranschaulichen lässt (vergleiche Abbildung 9.5 mit Foto, 1. Thermogramm und 1. Amplitudenbild von M1 sowie Abbildung 9.6 mit 1. Phasenbild sowie den Amplituden- und Phasenkontrastkurven). Die mit F2 und F3 markierten

Bereiche stellten Verschmutzungen auf der Oberfläche dar. Sie verhielten sich bei der Zeit- und der Frequenzauswertung ähnlich (vergleiche Abbildung 9.6). Gut zu differenzieren sind naturgemäß auch die optisch herausstechenden Bohrkerne. Ein Bohrkern ist im Phasenbild 9.6 mit F4 markiert und ausgewertet worden.
Als Inhomogenität erscheint die Stelle F1. Sie verhält sich in Zeit- und Frequenzbereich auffällig und ist im Phasenbild als heller Spot erkennbar und in Thermogramm und Amplitudenbild als kühle Stelle. Vermutlich handelt es sich hier um eine Struktur mit höherer Temperaturleitfähigkeit als Beton, da die aufgebrachte Wärme schneller abzieht, und nicht um eine Ablösung, wie ein Vergleich mit M4 zeigt (siehe Abbildung 9.7 mit Foto, links und Phasenbild rechts).

Abbildung 9.7.: Foto (links) und Phasenbild bei $8,35x10^{-3}$ Hz mit mittels RST untersuchten Positionen (rechts)

Dort wurde ein delaminierter Bereich durch Abklopfen vorab detektiert und als Fehlstelle F2 untersucht. F1 ist ein Bohrkern, F3 ein stark verschmutzter Bereich und F4 kahler Beton (vergleiche Abbildung 9.8). Als Referenz R wurde ein gering verschmutzter Bereich gewählt, für den durch Abklopfen keine Auffälligkeit registriert wurde. Es zeigt sich, dass die Ablösung F2 sich gut detektieren lässt. Interessant ist, dass bei der RST von M4 der Bohrkern, der nackte Beton und der verschmutzte Bereich sich kaum voneinander unterscheiden.
Für Messfeld 2 konnten keine Auffälligkeiten detektiert werden, ebenso wenig für Messfeld 3. Bei letzterem lässt sich eine nicht detektierte Schädigung aufgrund der die Messungen stark beeinflussenden Ablagerungen jedoch nicht ausschließen.

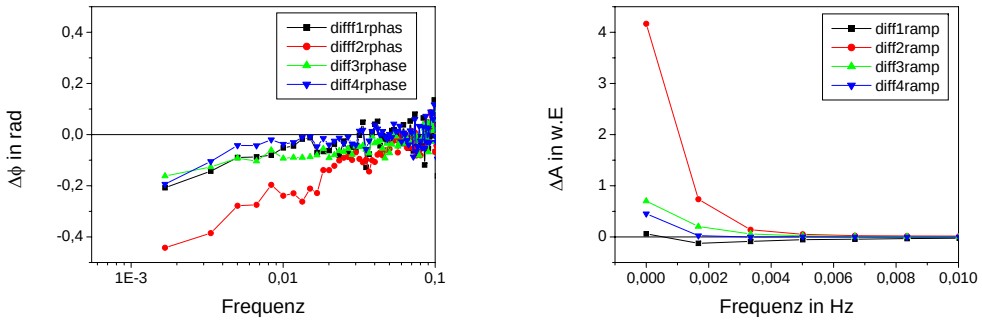


Abbildung 9.8.: Phasen- (links) und Amplitudenkontrastverläufe (rechts) für M4 für Auffälligkit F1, F2, F3 und F4 (schwarz, rot, grün und blau), bezogen auf Referenzstelle R

Fazit

Als Fazit lässt sich sagen, dass sich Epoxidharz-Ablösungen mit RST detektieren lassen. Eine starke Verschmutzung beeinträchtigt jedoch die Nachweisempfindlichkeit. Weiterführende Untersuchungen erscheinen erfolgversprechend, möglicherweise ergänzt durch ein akustisches Verfahren als Referenzverfahren.

9.1.4. Untersuchung von Asphaltbelägen unter Ausnutzung der Sonne als Energiequelle

Im Rahmen des DFG-Projektes wurden über Vermittlung der Materialprüfanstalt Berlin-Brandenburg (MPA) und mit Genehmigung des Forstamtes Berlin von BAM und TUB Untersuchungen an einer Betonfertigteilbrücke mit Spannstahlbewehrung nahe Berlin durchgeführt [MAR06a]. Dafür wurde zur Ortung von Asphaltablösungen mittels Thermografie die periodische Erwärmung durch die Sonne ausgenutzt. Es sollte die Anwendbarkeit des ASTM-Standards 4788 [AST97] über die Prüfung von Brückenbelägen für mitteleuropäische Randbedingungen überprüft werden. Den vorliegenden Konstruktionsplänen war zu entnehmen, dass sich der Aufbau des Brückenbelags aus einer 50 mm dicken Betonausgleichsschicht, einer 10 mm dicken Asphaltmastixschicht als Abdichtung sowie einer 50 mm dicken Asphaltdeckschicht zusammensetzt. Der Messaufbau mit IR-Kamera ist in Abbildung 9.9 dargestellt. Für jedes Messfeld wurden das Gerüst und der Messbereich während der Messung mit einer Plane abgedeckt.

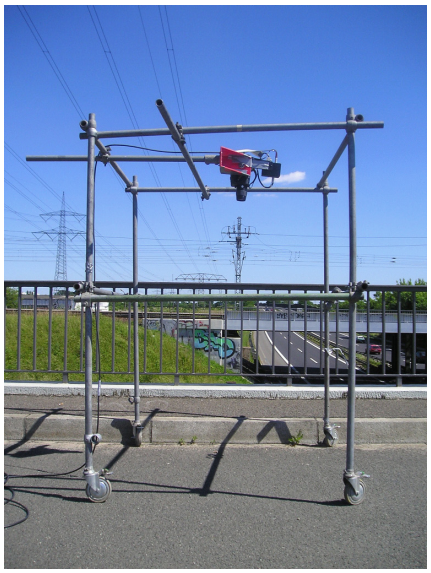


Abbildung 9.9.: Messaufbau mit Infrarotkamera und Gerüst zur Abschattung der Sonnenstrahlung zur Ortung von Asphaltablösungen

Vor Beginn des Messeinsatzes wurden im Fachgebiet „Baustoffe und Baustoffprüfung“ der TUB überschlägige FEM-Simulationsrechnungen für eine konservativ angenommene Asphaltdicke von 7 cm durchgeführt, die einen ausreichenden Temperaturkontrast für den untersuchten Messaufbau ergaben (siehe Abbildung 9.10, rechts) [MAR$^+$06b].

Untersuchungsergebnisse

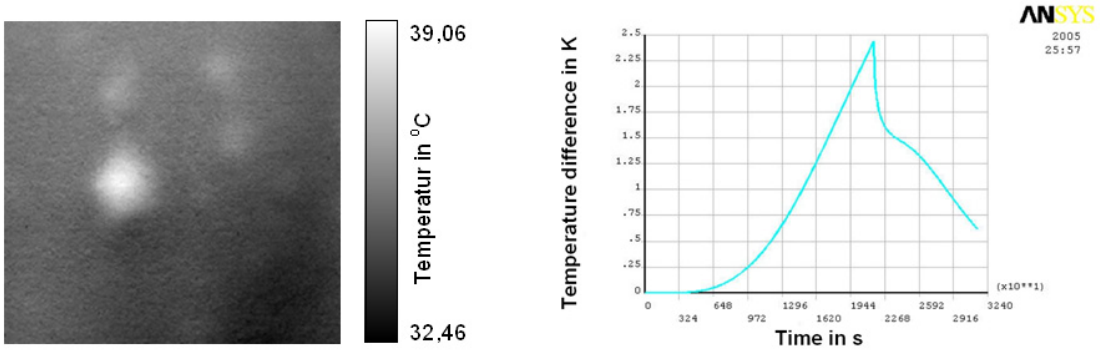


Abbildung 9.10.: Thermogramm (10:00 Uhr Sommerzeit am 23.6.2005) eines 1 m^2 großen Bereiches auf einer Autobahnbrücke mit Fehlstelle (links) und simulierte Differenzkurve zwischen angenommener Referenz- und Störstelle in 7 cm Tiefe (rechts, Walther, TUB) [MAR+06b]

Thermogramme wurden zu unterschiedlichen Tageszeiten nach Sonnenaufgang an einem sonnigen Tag im Juni aufgenommen (Abbildung 9.10, links, zeigt ein ausgewähltes Thermogramm, aufgenommen um 10:00 Uhr bei einer gemessenen Sonneneinstrahlung von 800 W/m^2. Deutlich sind mehrere wärmere Bereiche zu erkennen, die auf Fehlstellen und/oder Ablösungen hindeuten. Der größte und wärmste Bereich hat eine Temperaturdifferenz zur Umgebung von 3,5 K.
Eine Bearbeitung der Daten im Frequenzbereich erschien nicht notwendig.

9.2. Messeinsätze zur Erhaltung von historischen Kulturgütern

Abbildung 9.11.: Altes Museum in Berlin, Nordansicht, Foto: Köpp BAM

Aktive Thermografieverfahren und, wie in den folgenden Beispielen deutlich wird, insbesondere die RST in Verbindung mit schonender konvektiver Erwärmung, eignen sich besonders für die zerstörungsfreie Untersuchung von sensibler Bausubstanz, wie Fachwerk- und Mauerwerkskonstruktionen hinter Putz, aber auch von Intarsienarbeiten aus Holz oder Strukturen hinter Wandmalereien. Die folgenden Messeinsätze erfolgten im Rahmen der Tätigkeit des Verfassers in der BAM.

9.2.1. Altes Museum in Berlin - Ablösungen an Sandsteinsäulen

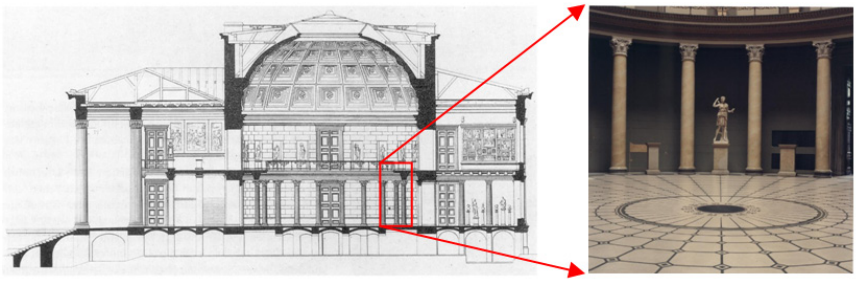


Abbildung 9.12.: Nord-Süd-Schnitt (links) und Rotunde des Alten Museums in Berlin, Foto: Köpp, BAM

Von der BAM wurden parallel zu einer Vielzahl anderer zerstörungsfreier (SPI, RADA, US und IE) und zerstörungsarmer Verfahren (wie *Flatjack* oder Mikrowelle [MHH+04]) RIT- und RST-Untersuchungen an Säulen in der Rotunde des von Schinkel entworfenen und zwischen 1822 und 1830 erbauten Alten Museums in Berlin durchgeführt (siehe Abbildung 9.11 und 9.12) [AMR+04b], [AHM+04], [MAR+06b]. Diese Untersuchungen erfolgten im Rahmen des Masterplans der Museumsinsel in Berlin-Mitte, der bis 2009 umgesetzt werden soll und der auch die denkmalgerechte Grundinstandsetzung des Alten Museums beinhaltet [MAR06a], und wurden finanziert durch das EU-Projekt „Onsiteformasonry".
Die Rotunde gehört zur ursprünglichen Bausubstanz des Gebäudes. An ihr wurden im 20. Jahrhundert eine Reihe von Restaurierungsmaßnahmen durchgeführt: 1906, 1966 und 1998 bis 1999. Die untersuchten zweilagig verputzten Sandsteinsäulen haben einen Außendurchmesser von 58 cm und eine lichte Raumhöhe von 534 cm. Sie sind mit einer Kalkputzschicht von 2 bis 3 cm Dicke versehen, auf der sich eine sichtbare Stuckmarmorschicht von 3 bis 6 mm Dicke befindet. Diese ist mit einem Netz feiner Haarrisse überzogen. Die maximale Rissweite beträgt 2 mm. Untersucht werden sollten:

- Ablösungen der Stuckmarmorschicht vom Kalkputz und
- Ablösungen der Kalkputzschicht vom Sandstein,

um Flächeneingrenzungen für möglicherweise erforderliche Instandsetzungsmaßnahmen vornehmen zu können.

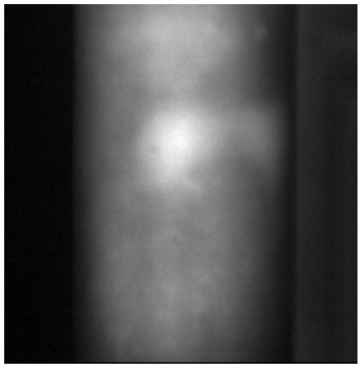
Experimenteller Aufbau

Der Versuchsaufbau umfasste neben IR-Kamera und mobilem Messrechner einen Heizlüfter mit einer Energieleistung von 2000 W. Eine konvektive Erwärmung bot sich vor allem wegen der abgerundeten Geometrie der Säulen an, die eine gleichmäßige Erwärmung mit einem parallelen IR-Strahler unmöglich machte. Die Erwärmung der Oberflächen erfolgte manuell von einem Hubwagen aus (vergleiche Abbildung 9.13, links). Es war nicht möglich, die gesamte Säule auf

Abbildung 9.13.: Versuchsaufbau für die Fallstudie Altes Museum (links) und Foto eines untersuchten Säulenabschnittes (rechts)

einmal zu erwärmen, deswegen wurde sie in gleichmäßige Segmente von ca. 1 m Höhe aufgeteilt. Zur Erfassung auch der oberen Bereiche der Säule mit der IR-Kamera wurde ein Zoomobjektiv mit einem Öffnungswinkel von 8° eingesetzt. Der Abstand der Kamera vom Messobjekt ergab sich so zu ca. 5 m. In Abbildung 9.13 sind der Messaufbau mit Hubwagen (links) und ein untersuchter Säulenabschnitt (rechts) zu sehen.
Es wurden zwei Messungen je Abschnitt durchgeführt. Im ersten Durchlauf betrug die Erwärmungszeit 1 min bei 5 min Aufnahmezeit. Im zweiten Durchlauf war die Erwärmungszeit 5 und die Aufnahmezeit 15 min bei einem Abtastintervall von $\Delta t = 5$ s.

Qualitative Ergebnisse



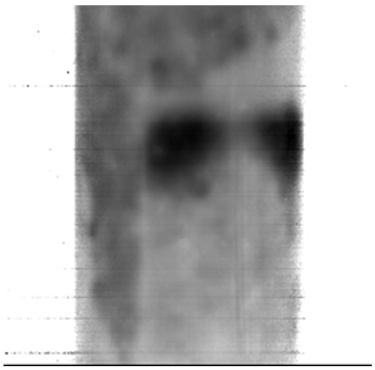


Abbildung 9.14.: Thermogramm mit Temperaturskala von 20 bis 30 °C (links) und Phasenbild bei $5.56x10^{-4}$ Hz (rechts) des in Abbildung 9.13 dargestellten Säulenabschnittes

In Abbildung 9.14 sind die Ergebnisse aus dem oben dargestellten Säulenabschnitt für 5 min Erwärmung wiedergegeben, da die Ergebnisse wesentlich deutlicher sind als die für 1 min Erwärmung (vergleiche die Abbildungen 9.15 und 9.16, hier ist die gesamte Säule für beide Erwärmungszeiten dargestellt). Während im Thermogramm (links) in der Mitte lediglich ein verschwommener heller (wärmerer) Bereich auf das Vorhandensein einer Fehlstelle hindeutet, kann man beim Phasenbild (rechts) klar die Abgrenzungen der Ablösung erkennen.

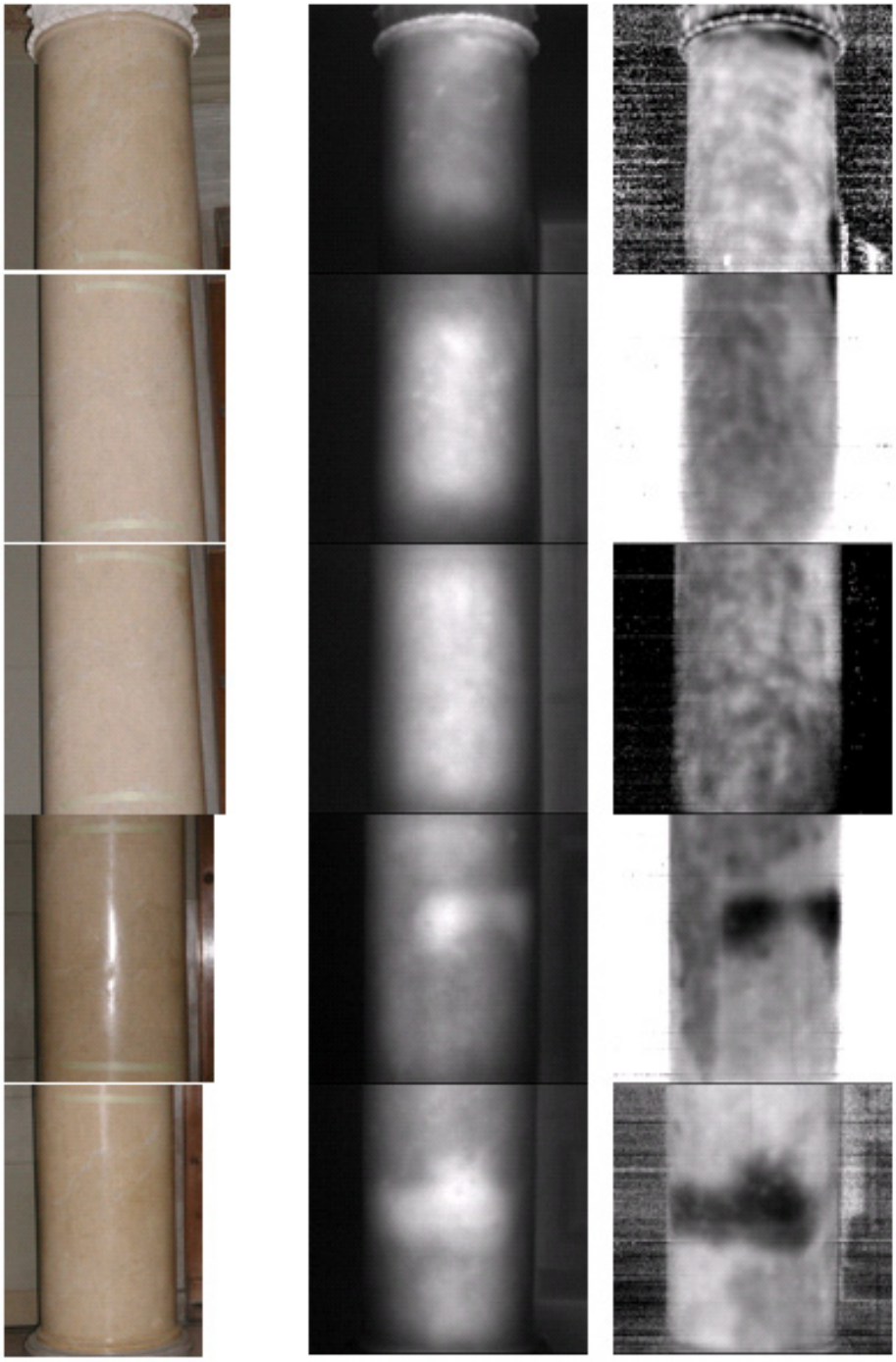


Abbildung 9.15.: Fotos (links), Thermogramme (Mitte) und Phasenbilder (rechts) einer Säule in der Rotunde des Alten Museums nach 5 min Erwärmung und 15 min Aufnahme

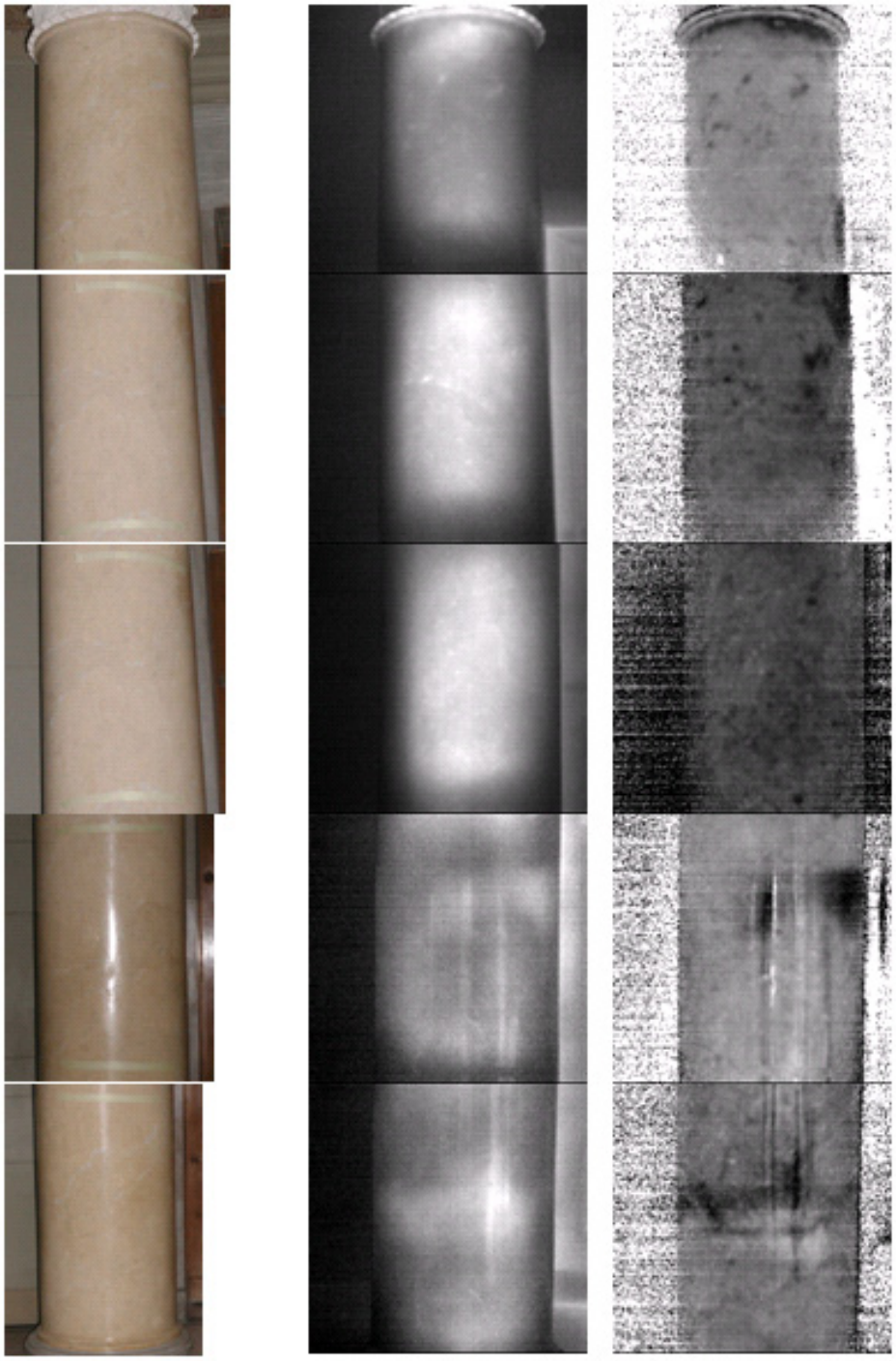


Abbildung 9.16.: Fotos (links), Thermogramme (Mitte) und Phasenbilder (rechts) einer Säule in der Rotunde des Alten Museums nach 1 min Erwärmung und 5 min Aufnahme

Quantitative Ergebnisse

Quantitative Untersuchungen an dem oben gezeigten Säulenabschitt lassen vermuten, dass die große Schädigung im Bereich der zweiten Schicht zu suchen ist, während die vielen kleinen Defekte eher im Bereich der ersten Lage vermutet werden können. Nimmt man den aus der RAT ermittelten Wert für $f_{ch} = 1,11x10^{-3}$ aus Abbildung 9.17 und eine abgeschätzte Temperaturleitfähigkeit von $\alpha = 5,27x10^{-7}$ W^2 [Bri05] für Stuckmarmor und Kalkgipsputz und setzt sie in die Gleichung $z = \sqrt{\alpha/f_{ch}}$ ein, so folgt daraus: $z \approx 2,2$ cm. Das liegt deutlich über der Dicke der schmalen Stuckmarmorschicht (3 bis 5 mm) und nahe der angenommenen Dicke der Kalkgipsputzschicht (2 bis 3 cm).

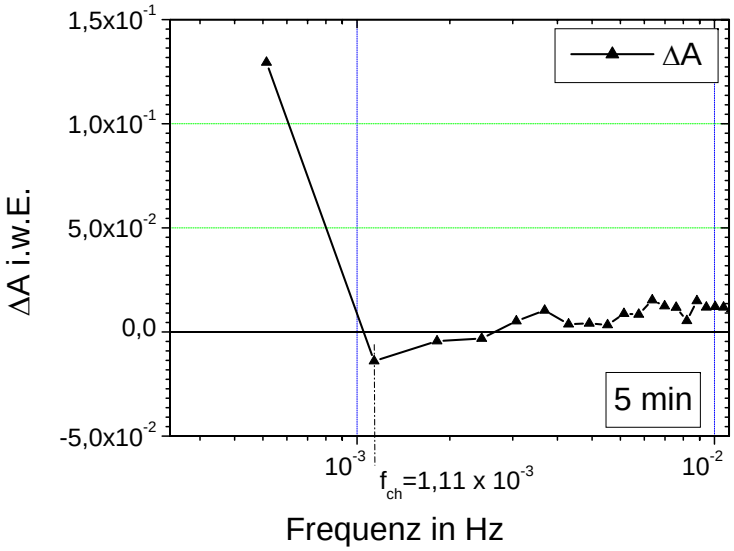


Abbildung 9.17.: Amplitudenkontrastkurve für eine Fehlstelle in der Säule der Rotunde des Alten Museums in Berlin

9.2.2. Wartburg - Ortung von Mauerwerk hinter Putz

Die Wartburg gehört zum Weltkulturerbe und weist eine bis in das 12. Jahrhundert zurückgehende Geschichte auf[2]. Im Landgrafenzimmer des Palas im Norden der Wartburg (siehe den Turm des Palas in Abbildung 9.18 und Abbildung 9.19), dem Sängersaal und in der Galerie befinden sich Fresken (1853-55) des Malers Moritz Schwind (1804-1871) [Sch01]. Der Palas im Osten der Wartburg ist der älteste seiner Art in Deutschland.
Im Rahmen des EU-Projektes „Onsiteformasonry“ und in enger Zusammenarbeit mit Historikern, Architekten,Restauratoren und vor allem der „Wartburg Stiftung Eisenach“ ergaben sich im Wesentlichen zwei Fragestellungen an die aktive Thermografie:

[2]Sie ist verbunden mit solch kulturhistorischen Schriften wie dem „Sängerkrieg auf der Wartburg“ (1269/70), an dem der Dichter Wolfram von Eschenbach (1170/80-1220), der Autor des „Parzival“ [Escht] (um 1210), teilgenommen haben soll, sowie dem Übersetzen der Bibel [Lut84] aus dem Griechischen und Hebräischen durch Dr. Martin Luther (1483-1546) ins Frühneuhochdeutsche während eines Aufenthaltes auf derselben im Winter 1521/22.

Abbildung 9.18.: Wartburg mit dem Palas, Ostansicht, Foto: Köpp, BAM

1. Ortung aufsteigender Feuchtigkeit in der Wand zwischen dem Landgrafenzimmer und der Galerie sowie Einschätzung der Gefährdung der sich darauf befindlichen Schwind-Fresken, die aus diesem Grund zusätzlich thermografisch untersucht werden sollten.

2. Untersuchung des Aufbaus der Wand zwischen Landgrafenzimmer und Treppenhaus im Norden des Landgrafenzimmers. Hier soll sich Schriften zufolge der ehemalige Haupteingang zum Palas befinden, der aber inzwischen im Zuge von Restaurierungen im 19. Jahrhundert zugemauert und später verputzt und im Innern des Landgrafenzimmers mit Ornamenten und Wandmalereien versehen wurde. Die Treppenhausseite der Wand wurde in den 50er Jahren des 20. Jahrhunderts weiß verputzt. Die genaue Position der ehemaligen Tür sollte geortet werden [MAR06a].

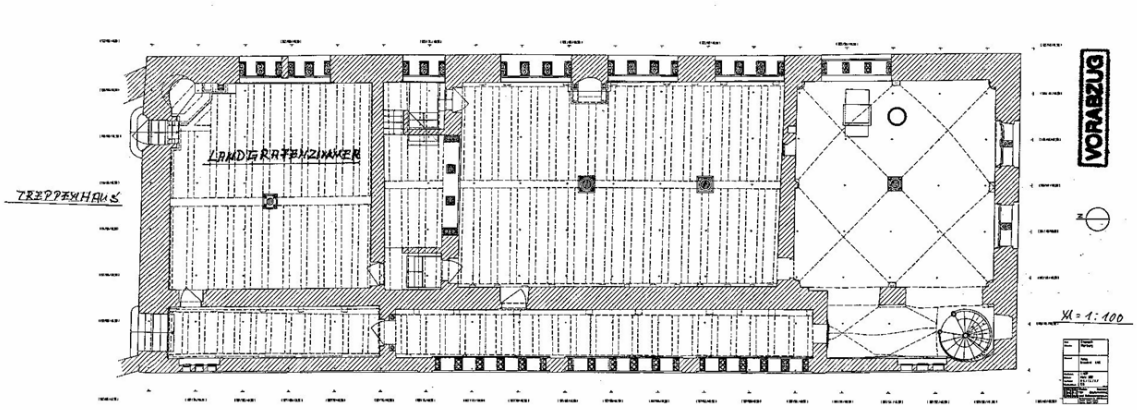


Abbildung 9.19.: Grundriss des Palas der Wartburg mit dem Landgrafenzimmer

Experimenteller Aufbau

Der Aufbau ergab sich aus der Aufgabenstellung und der Sensibilität der untersuchten Objekte. Er war für beide Fragestellungen der gleiche und entsprach im Wesentlichen den Messungen im

Alten Museum (siehe Kapitel 9.2.1) unter Verwendung einer konvektiven Erwärmungseinheit mit

Abbildung 9.20.: Treppenhausseitiges Foto der untersuchten Wand bei streifendem Lichteinfall

2000 W. Darüber hinaus durfte im Innern des Landgrafenzimmers aufgrund der empfindlichen Wandmalereien nur konvektive Erwärmung mit 1 min bei einer Aufnahmezeit von 5 min erfolgen. Die Erwärmungszeit von der Treppenhausseite betrug 5 und die Aufnahmezeit 15 min pro m^2. Die Taktrate war jeweils 2 Hz. Die untersuchte Fläche für Aufgabe 2 war 3,5 m breit und ca. 4 m hoch. Da im Treppenhaus ein nicht zu entfernender Schaukasten hing, konnte von der Treppenhausseite nur der ca. 1,2 m hohe Streifen über der Vitrine untersucht werden (siehe Abbildung 9.20). Nach den RIT-Messungen wurde eine RST-Auswertung der Daten durchgeführt.

Untersuchungsergebnisse

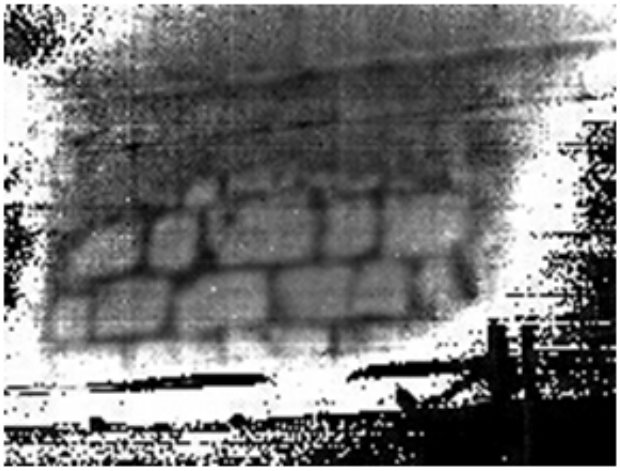


Abbildung 9.21.: Treppenhausseitiges Phasenbild bei $f = 2,46x10^{-4}$ Hz, Ausschnitt ca. 1 m^2

1. Es wurde keine akute Schädigung der Gemälde durch aufsteigende Feuchte mit der angewandten Methodik festgestellt.

2. Aufgrund der kurzen Erwärmungszeit im Innern des Landgrafenzimmers konnte das hinter dem Putz liegende Mauerwerk von innen nicht geortet werden. Auch von der Treppenhausseite wurde mit der RIT im Zeitbereich kein Resultat mit der verwendeten Kamera erzielt.

Lediglich mit der anschließenden RST-Auswertung konnten der alte Torbogen und die neu ausgemauerten Steine auf den ersten Phasenbildern erfolgreich sichtbar gemacht werden (siehe Abbildung 9.21).

Für weitere Ergebnisse der Messungen in der Wartburg auch mit anderen ZfP-Verfahren siehe zum Beispiel [MHH+04].

9.2.3. Neues Palais in Potsdam - Strukturanalyse an Marketerieboden

Abbildung 9.22.: Neues Palais in Potsdam, Foto: Köpp, BAM

Das spätbarocke Neue Palais in Potsdam wurde im Jahr 1769 als Sommerresidenz und Gästehaus der königlichen Familie Preußens fertiggestellt. Bauherr war Friedrich der Große (1712-1786). Es blieb jedoch während des größten Teiles seiner Existenz unbewohnt. Lediglich Kaiser Wilhelm II. (1858-1941) und seiner Familie diente es 1889 bis 1918 als Hauptwohnsitz.
Im Rahmen einer Masterarbeit [Mik06] im Fachgebiet Restauration an der Fachhochschule Potsdam (FHP) wurden in enger Abstimmung mit der „Stiftung Preußischer Kulturbesitz“ der Marketerieboden im Tassenkopfzimmer des Neuen Palais in Potsdam ergänzend zur optischen Prüfung durch Restauratoren und Gutachter sowie die Prüfung von Bauunterlagen mit verschieden zerstörungsfreien (Radar, US, IR) und zerstörungsarmen Untersuchuchungsmethoden (Endoskopie, Bohrwiderstand) untersucht.
Unterstützend wurden vorhandene Konstruktionszeichnungen des Vergleichbodens im Frühstückszimmer hinzugezogen und von Studenten der FHP ein Verbindungsmittelplan erstellt. Anhand dieser Informationen konnte im Vorfeld auf mögliche konstruktive Varianten geschlossen werden. Die Messungen sollten Informationen über den Fußbodenaufbau nebst Verbindungsmitteln, die Balkenlage, die Balkenquerschnitte sowie über vorhandene Schädigungen und akuten Schädlingsbefall der tragenden und nicht tragenden Holzkonstruktion liefern. Diese Informationen dienen als Grundlage für statische Berechnungen, mögliche Restaurierungsmaßnahmen und die Bauforschung. Eine Aufnahme des Bodens war nicht möglich, ohne die originale Substanz zu gefährden.
Die Wahl der Untersuchungsmethoden war an verschiedene Kriterien geknüpft [Mik06]:

- Keine Schädigung der Originalsubstanz
- Nur einseitige Zugänglichkeit

- Geringer Kosten- und Materialaufwand
- Anschaulichkeit und Wiederholbarkeit der Messungen
- Große Erfahrung bei der Interpretation der Ergebnisse

Die aktive Thermografie wurde in erster Linie hinzugezogen, um Schäden im Furnierbereich der oberen Parketttafeln aufzudecken.

Messobjekt und experimenteller Aufbau

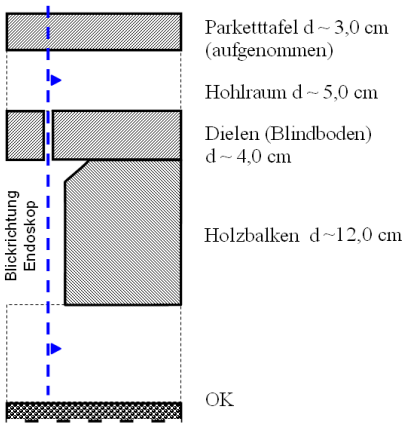


Abbildung 9.23.: Aufbau der Merkantierdecke nach Endoskopie bei Messfeld M2, Zeichnung: Borchard, BAM

Von den Konstruktionszeichnungen im Frühstückszimmer ging man zunächst von folgendem Aufbau des Marketeriebodens aus, der sich im Wesentlichen durch die Endoskopie-Untersuchungen bestätigte: Balkenlage, Blindboden und darauf liegende Dielentafeln mit aussteifenden Gratleisten. Der konstruktive Aufbau im Bereich M2 nach Endoskopie ist in Abbildung 9.23 wiedergegeben. In Abbildung 9.24 sind die mit Thermografie untersuchten Messfelder in eine Skizze des Tassenkopfzimmers eingetragen. Die Bereiche Tür und Fenster wurden gezielt ausgewählt, um einen Vergleich mit den dort durchgeführten Endoskopiemessungen durchführen zu können. Die einzelnen Messfelder M1 bis M4 sind ca. 1 m^2 groß und wurden mit Kreppband markiert. M1 und M2 liegen im westlichen Teil des Raumes genau vor der Eingangstür und die Bereiche M3 und M4 im Norden vor dem Doppelfenster.
Der experimentelle Aufbau entsprach dem im Alten Museum in Kapitel 9.2.1, einschließlich der Verwendung einer manuellen konvektiven Erwärmungseinheit mit 2000 W. Die Erwärmungszeit variierte zwischen 3 und 5 min, die Aufnahmezeit zwischen 10 und 15 min je Messfeld.
Im folgenden Abschnitt werden repräsentativ Ergebnisse der Messfelder M3 und M 4 (vergleiche Abbildung 9.25) dargestellt. Die 1 m^2 großen Messfelder liegen genau vor dem Doppelfenster im Osten des Tassenkopfzimmers und enthalten rosenartige Holzintarsien. Sie wurden für 3 min manuell mit einem Heizlüfter erwärmt und 10 min mit der IR-Kamera bei einer Aufnahmefrequenz von 0,5 Hz beobachtet. Im Anschluss an die RIT-Messungen wurde eine RST-Analyse der Messdaten durchgeführt.

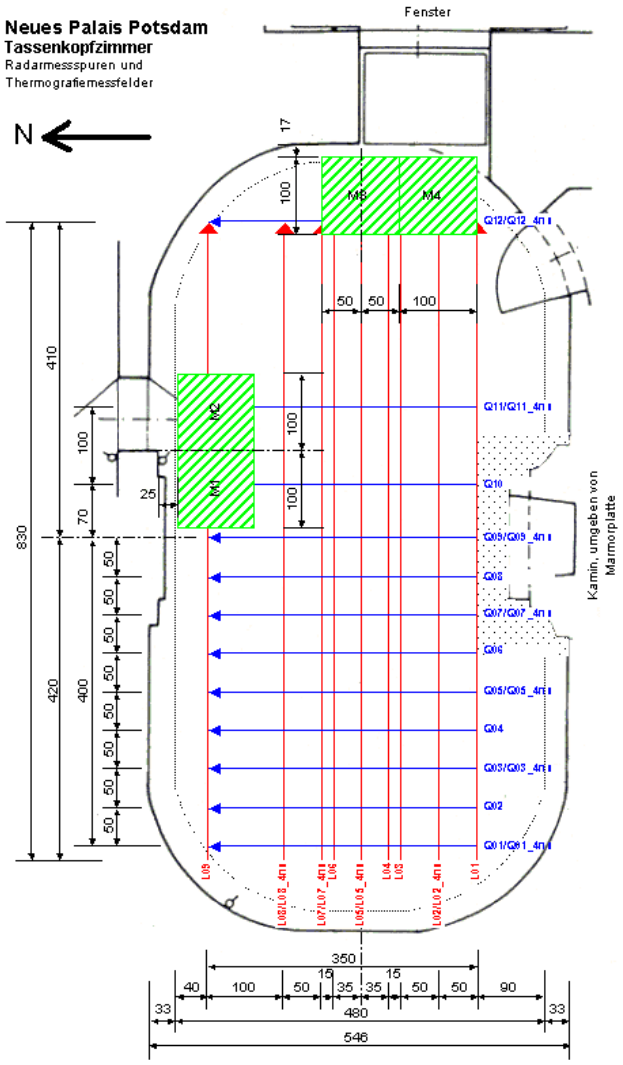


Abbildung 9.24.: Skizze des Tassenkopfzimmers, Thermografie-Messfelder (grün) und Radarmessspuren (rot und blau) [Borchard, BAM]

Untersuchungsergebnisse

Auf den Digitalbildern in Abbildung 9.25 ist gut der Aufbau der oberen Parketttafel mit den eingelegten Rosen und den dunkelbraunen Grenztäfelchen im Osten des Messfeldes M4 zu erkennen sowie die Fuge in Messfeld M3.

In Abbildung 9.26 sind jeweils das erste Thermogramm nach 0 s (oberste Reihe) sowie das erste Amplituden- (mittlere Reihe) und Phasenbild (untere Reihe) dargestellt. Es zeigt sich erneut die gute Auflösung gerade beim ersten Phasenbild.

Dort ist besonders gut die Faserrichtung der Parketttafeln und eine große Anzahl auffälliger Punkte zu erkennen. Zumindest fünf dieser Punkte sind auf die angegebenen Astlöcher und durchgehenden Verbindungsmittel zurückzuführen. Die übrigen decken sich mit guter Übereinstimmung mit den im Vorfeld von Studenten georteten Verbindungsmitteln (Stiftnägel und Schrauben).

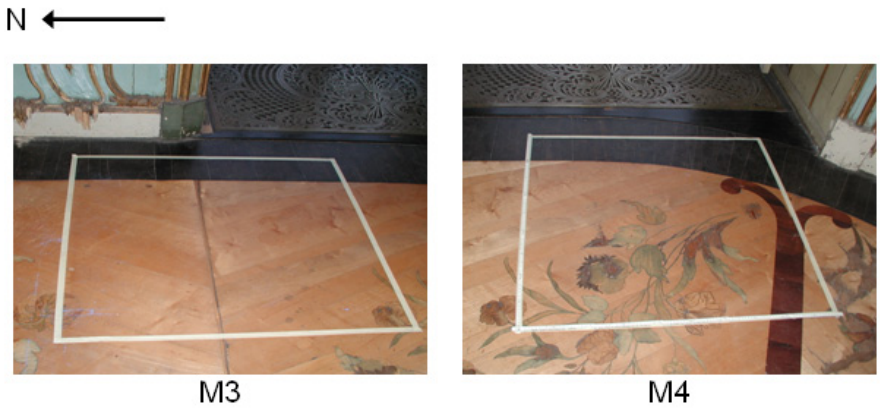


Abbildung 9.25.: Messfelder M3 und M4

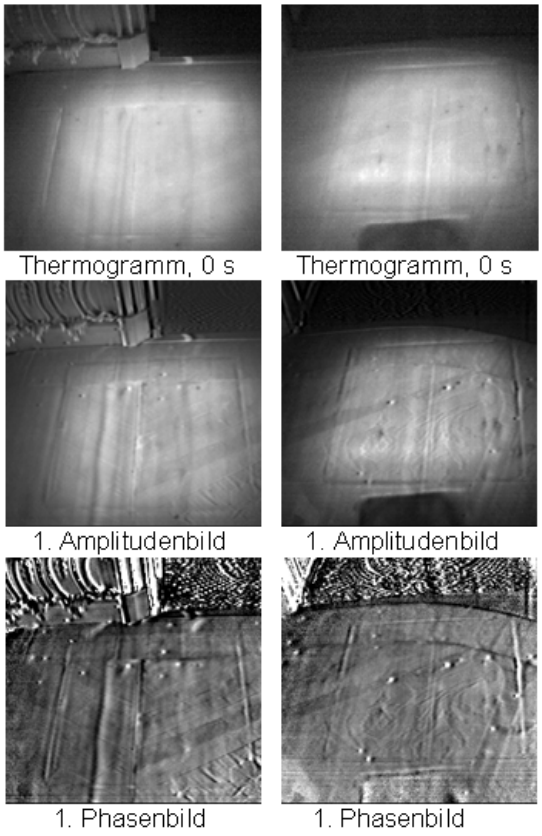


Abbildung 9.26.: Thermogramme (oben), Amplitudenbilder (Mitte) und Phasenbilder (unten) von M3 (links) und M4 (rechts)

Fazit

Die Phasenauswertung erweist sich erneut als die ergiebigste Methode einer qualitativen RST. Es lassen sich Verbindungsmittel, Faserrichtung und Fugen unter dem Parkett detektieren. Eine optische Überprüfung auf Astlöcher oder Schadstellen ist als Kontrolle allerdings unerlässlich. Weitere Ergebnisse auch von M1 und M2 befinden sich in Anlage D.

9.3. Resümee

Die wichtigsten Erkenntnisse der vorangehenden Untersuchungen lassen sich folgendermaßen zusammenfassen:

- Die Einsatzmöglichkeit der durch eine Frequenzauswertung ergänzten RIT in der Bauwerksdiagnose sind vielfältig und werkstoffübergreifend. RIT/RST-Untersuchungen konnten erfolgreich zur Ortung von Mauerwerk und Stahl hinter Putz, Ablösungen von Natursteinplatten, Asphalt, Epoxidharz auf Beton sowie Anschlüssen in Holz in der Qualitätssicherung und der Strukturuntersuchung insbesondere an historischen Kulturgütern durchgeführt werden.
- Speziell die Phasenauswertung der RPT beziehungsweise RST eignet sich für Messeinsätze vor Ort aufgrund der Unempfindlichkeit der Phasen gegenüber inhomogener Erwärmung und Oberflächen.
- Der neue quantitative Ansatz ließ sich erfolgreich im Messeinsatz vor Ort und unter Nutzung eines Heizlüfters zur Erwärmung durchführen.

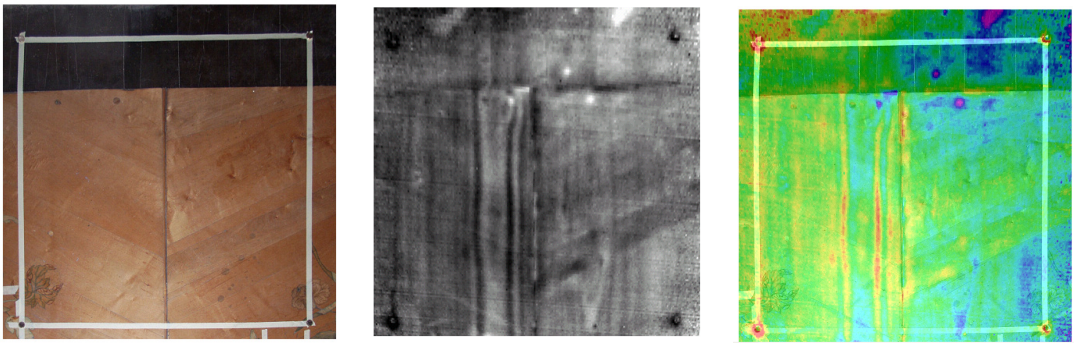
10. Perspektiven

Einführung

Die zahlreichen Praxisanwendungen und Machbarkeitsstudien haben gezeigt, welch großes Anwendungspotential für die qualitative und quantitative zerstörungsfreie Bauwerksdiagnose in einer durch die Auswertung im Frequenzbereich ergänzten Rechteckimpuls-Thermografie bereits besteht. Darüber hinaus sieht der Verfasser ein enormes Potential für die ZfPBau-Thermografie, das mit dem bisher Dargestellten bei weitem noch nicht ausgeschöpft ist. Insbesondere durch eine verstärkte Automatisierung und die Kombination mit anderen innovativen Methoden und technischen Neuerungen können ohne großen Entwicklungsaufwand neue Anwendungsgebiete erschlossen und alte ausgebaut werden. Um dieses große Potential zu veranschaulichen werden im folgenden Kapitel erste erfolgversprechende Ansätze beschrieben, die genug innovative Substanz in sich tragen, um eine Brücke in die Zukunft der im Rahmen dieser Arbeit untersuchten technischen und numerischen Methoden zu schlagen. Dabei werden nur neue Entwicklungen und Betätigungsfelder beschrieben, für die erste erfolgversprechende Anwendungen vorliegen und die gezeigt haben, dass sie den Keim für zukünftige Innovationen in sich tragen.

10.1. Verfahrenskombination, Datenfusion und Fotogrammetrie

Bereits in Kapitel 9.1.1 wurde ein Thermogramm mit einem Digitalbild überlagert, nachdem beide fotogrammetrisch entzerrt worden waren. Dies stellt bereits eine Verfahrenskombination (Thermografiedaten mit digitalen Daten) mit Datenfusion dar. Bedingung für diese Kombination ist die vorhergehende Bildbearbeitung, Entzerrung und passgenaue Einmessung in einem gemeinsamen Koordinatensystem. Gerade für eine wirtschaftliche und genaue Ortung von Defekten bei großflächiger Prüfung ist dieses Vorgehen unerlässlich.
In einem weiteren Schritt ist es auch möglich, mehr als zwei Datensätze zu überlagern, um die Informationen aus verschiedenen Quellen zu bündeln, wie dies zum Beispiel beim SAFT mit Radar,- Ultraschall- und Impact-Echo-Daten in der BAM durchgeführt wird [KS06]. In Abbildung 10.3 sind ein Digitalbild und mehrere Phasenbilder bei unterschiedlichen Frequenzen zu einem Bild zusammengesetzt worden. So können Bereiche nach unterschiedlichen Eigenschaften klassifiziert und der Fläche nach erfasst werden (vergleiche auch [HMWS06]).
Viele andere Verfahrenskombinationen, zum Beispiel die mit Radar und Thermografie, bieten sich an.



(a) Entzeertes Foto (b) Entzerrtes Phasenbild (c) Multispektrale Überlagerung

Abbildung 10.1.: Entzerrung und multispektrale Überlagerung von M3 mit Thermo-Passpunkt, Neues Palais Potsdam, Hemmleb, BAM

10.2. Automatisierung für aktive Thermografie-Untersuchungen vor Ort

Thermoscanner der BAM

Um ein Bauwerk gebrauchstauglich zu erhalten, muss es in regelmäßigen Abständen gewartet werden. Durch den normalen Alterungsprozess der verwendeten Baustoffe, durch eine Änderung der Anforderungen an das Bauteil oder durch Schädigungen können erhaltende oder verstärkende Maßnahmen erforderlich werden. Viele Stahlbetonbrücken leiden schon nach 25 bis 30 Jahren Nutzungszeit durch aggressive Umweltbedingungen beziehungsweise erhöhte Achslasten des Straßenverkehrs unter Schwächung der Tragfähigkeit. Fehler bei der Ausführung (zu geringe Betondeckung mangelhafte Verpressung der Spannglieder) führen häufig zu Rissbildung, Abplatzungen und zunehmender Korrosion der schlaffen und der vorgespannten Bewehrung.
Ein häufig zur Instandsetzung von Stahl- oder Spannbetonbauteilen verwendetes Konzept ist die Nachverstärkung mit Klebearmierungen aus Stahl oder aus kohlefaserverstärkten Kunststoffen. Die sogenannten CFK-Lamellen bestehen aus Kohlenstoff-Fasern, die in einer Kunststoff-Matrix eingebettet sind. Sie sind leichter als Stahl, rosten nicht und werden deshalb in zunehmendem Maße zur Sanierung verwendet [HMR+06]. Im Rahmen des EU-geförderten Projektes „Sustainable Bridges“ entwickelt die BAM in Zusammenarbeit mit internationalen Partnern ein leistungsfähiges Qualitätssicherungskonzept für die Wirksamkeit der Ertüchtigung von Bauteilen durch kohlefaserverstärkte Kunststoffe. Als ein Meilenstein auf diesem Weg wird momentan im Rahmen des EU-Projektes in BAM VIII.2 nach einer erfolgreichen Testphase der Prototyp eines Thermoscanners mit Blitzanregung entwickelt, der delaminierte Bereiche zwischen Beton und Laminat detektieren kann und vor Ort flexibel einsetzbar ist (vergleiche Abbildung 10.2 beziehungsweise [HMR+06] oder [AHMR06]).

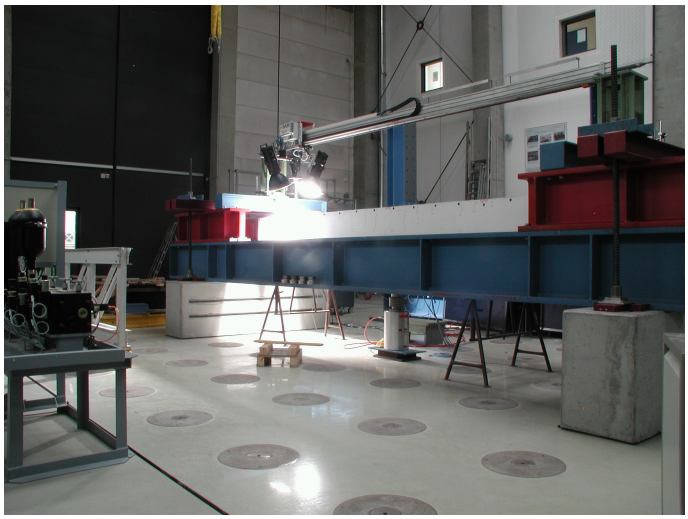


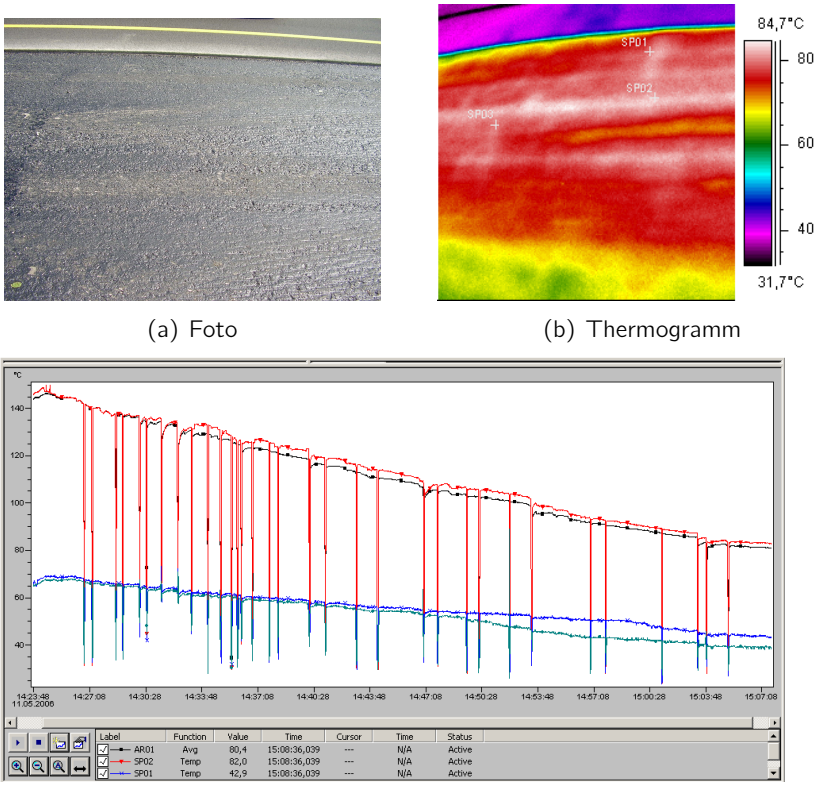
Abbildung 10.2.: Prototyp des BAM-Thermoscanners [HMR+06]

Weiteres Automatisierungspotential von Anregung und Aufnahme, ergänzt durch eine automatisierte Einmessung (vergleiche das vorhergehende Kapitel), existiert u. A. in der ZfP von großflächigen Bauteilen wie zum Beispiel Oberflächenschutzsystemen in Parkhäusern. Auch hier liegen erste erfolgversprechende Untersuchungen vor (vergleiche auch das folgende Kapitel).

10.3. Qualitätssicherung in der Fertigung

Junger Asphalt

Thermografie wird immer dort am effektivsten eingesetzt, wo nicht künstlich Energie aufgebracht werden muss, sondern wo die aus einem System frei werdende Wärme, zum Beispiel während eines Fertigungsprozesses, für IR-Messungen genutzt werden kann. Auch im Bauwesen gibt es solche Prozesse, die vom frühzeitigen Einsatz von Thermografie in bereits in der Fertigung profitieren können wie zum Beispiel die Asphalt-Straßenfertigung.
Unter Aufsicht des Autobahnbundesamtes wurde im Mai 2006 auf einer Teststrecke von 4,4 km auf der Autobahn zwischen Berlin und Hamburg auf 22 verschiedene Arten Asphalt aufgebracht. Anhand dieser Teststrecke sollte unter anderem der Einfluss der verwendeten Methodik der Asphaltierung auf die anschließende Dichtigkeit und Griffigkeit des Asphaltes untersucht werden. In Zusammenarbeit mit dem Fachgebiet „Straßenbau“ der TU Berlin sind neben herkömmlichen Prüfmethoden auch Radar und Thermografie von BAM VIII.2 zur Anwendung kommen. Neben den vom Verfasser vorgenommenen Thermografiemessungen wurden mit einer Wetterstation die Sonnenstrahlung sowie Windgeschwindigkeit und Windrichtung aufgenommen. Erste Auswertungen zeigen, dass sich die Thermografie hervorragend zu eignen scheint, den Verdichtungsprozess indirekt anhand der flächig aufgenommenen Thermogramme nachzuweisen (vergleiche Abbildung 10.3). Detaillierte Auswertungen und Veröffentlichungen zu diesem Thema sind geplant.



(a) Foto (b) Thermogramm

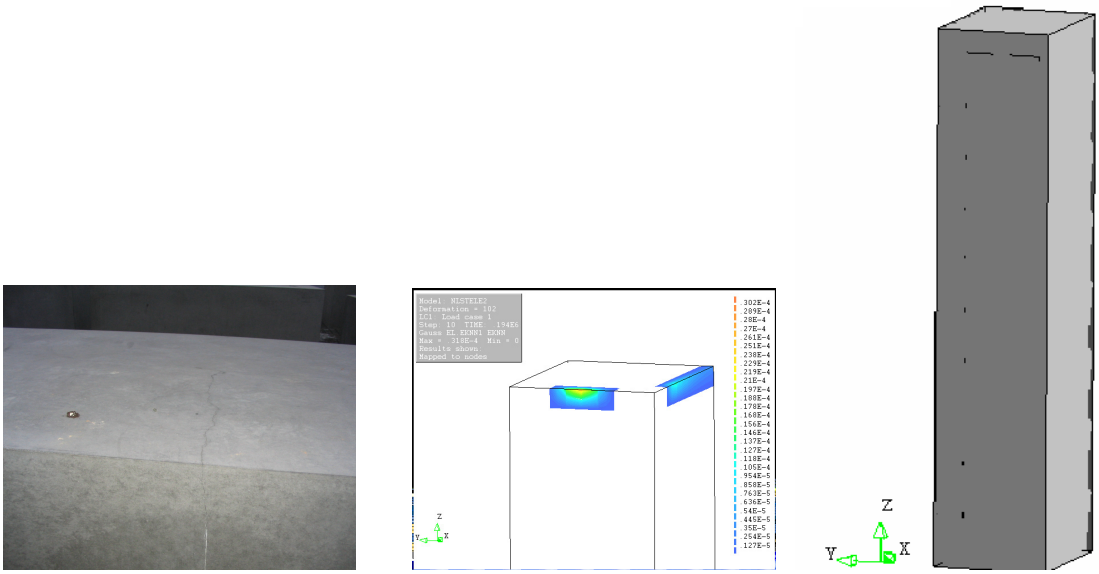
(c) Temperaturentwicklung

Abbildung 10.3.: Foto, Thermogramm und Temperaturentwicklung während der Verdichtung an drei ausgewählten Punkten in einem Messfeld

10.4. Strukturmechanik und Lebensdauerbemessung von Bauwerken

Der Trend in der ZfPBau geht zu bildgebendem Postprocessing, Verfahrenskombination sowie Automatisierung [Wig06]. Für einen Bauingenieur, der eine Aussage über die Tragfähigkeit des untersuchten Objektes treffen will, kann dies nur der erste Schritt in einer Kette von Maßnahmen sein und häufig treten nicht zerstörungsfreie Prüfmethoden zu den zerstörungsfreien hinzu. Auch numerische Simulationen werden benutzt, um zum Beispiel eine Prüfproblematik zu optimieren oder einfach nur einen physikalischen Zusammenhang besser zu verstehen und hinter dem Stichwort „Rekonstruktion“ verbirgt sich eine komplizierte Algorithmik, die aus Radar-, US oder IE-Messdaten auf die Bauteilstruktur zurückrechnen kann. Dabei beschränken sich die meisten Anwendungen dieser Art auf die Modellierung der verwendeten Prüfmedien im Prüfobjekt, wie elektromagnetische Wellen, Schallwellen oder wie in unserem Fall den angeregten Wärmefluss. Um nach den erfolgten Untersuchungen eines Objektes dieses auf seine statisch-mechanischen Eigenschaften hin zu untersuchen, sind allerdings Modelle und Ansätze erforderlich, die in der

Lage sind, die mechanischen Eigenschaften eines Bauwerkes unter Last und im Schädigungsfall und über seine gesamte Lebensdauer hin zu betrachten. In den sogenannten probabilistischen Bemessungskonzepten liegen solche Ansätze vor [Geh00]. Die sind allerdings auf den Input durch traditionelle und innovative Prüfmethoden wie die der ZfP angewiesen. Hier vermag auch die Numerik einer klassischen Strukturmechanik gute Dienste als „Informationslieferant“ zu leisten[1]. Am Beispiel des „Mahnmales der ermordeten Juden Europas“ in Berlin wird deutlich, was gemeint ist. Die dort auftretende Rissbildung konnte aufgrund von kombinierten Klima- und strukturmechanischen Simulationen nachvollzogen und teilweise vorhergesagt werden (siehe Abbildung 10.4 [AK05]).



(a) Foto: Walther, TUB (b) Rissdehnungen im gezoomten FE-Modell (c) FEM-Modell, halbe Stele

Abbildung 10.4.: Stele mit Riss

In einem nächsten Schritt können die aus der Bauwerksprüfung (schädigend, minimal invasiv und/oder zerstörungsfrei) und der Strukturmechanik gewonnenen Erkenntnisse, zusammen mit konstruktivem Fachwissen des Ingenieurs, Eingang finden in ein probabilistisches Modell zur Lebensdauermemessung des Bauwerkes [Pet04]. Nach Meinung des Verfassers liegt in dieser Partnerschaft mit modernen numerischen Methoden und den die Lebenswirklichkeit eines Bauwerkes berücksichtigenden probabilistischen Bemessungsansätzen ein großes Potential für die Zukunft der zerstörungsfreien Prüfung im Bauwesen.

[1] In der Automobil- und Flugzeugindustrie werden solche Verfahren standardmäßig in der Entwicklung neuer Konstruktionen und der Verwendung neuer Materialien ergänzend zu den wesentlich kostspieligeren experimentellen Versuchen eingesetzt. Erst wenn ein Modell erfolgreich die „numerische Hürde“ genommen hat, werden material- und kostenintensive Realversuche am Objekt durchgeführt (Beispiel: Crash-Test in der Automobilindustrie). Natürlich haben die oben genannten Industriezweige den Vorteil, dass ein Modell in geringen Variationen immer wieder validiert und angepasst werden kann, wohingegen im Bauwesen jedes Bauwerk eine einzigartige Neuschöpfung ist, mit veränderten Randbedingungen und Geometrien, gerade im Stahlbetonbau. Nichtsdestotrotz gibt es auch im Bauwesen einen reichhaltigen Erfahrungsschatz auf diesem Gebiet (siehe zum Beispiel [Elf89], [Meh95] oder [CA99]). Im Model Code 1990 zum Beispiel liegen die dafür erforderlichen Materialgesetze schon lange in genormter Form [Com90] vor und auch die deutsche DIN 1045-1 berücksichtigt erstmals die nichtlineare Stahlbetonbemessung [din00].

11. Zusammenfassung

Im Rahmen dieser Dissertation wurde die Rechteckimpuls-Spektral-Thermografie (RST) als eine qualitative und quantitative zerstörungsfreie Prüfmethodik oberflächennaher Strukturen im Bauwesen eingeführt.
Die RST ist eine Adaption der Puls-Phasen-Thermografie (PPT) für das Bauwesen mit den dafür notwendigen langen Erwärmungs- und Aufnahmezeiten, ergänzt durch eine Amplitudenauswertung, und kann als eine Rechteckimpuls-Thermografie (RIT) im Frequenzbereich verstanden werden.
Wie bei der PPT wird bei der RST auf die im Zeitbereich akquirierten Daten die Fourier-Transformation angewendet, die die zeitaufgelösten Temperaturdaten für jeden Datenpunkt der IR-Kamera in frequenzaufgelöste Phasen- und Amplitudenspektren umwandelt.
Im Laufe der Untersuchungen stellte sich heraus, dass sich die Phasen am besten für die qualitative Ortung von Defekten und Inhomogenitäten eignen. Die aus der Werkstoffprüfung bekannten guten Eigenschaften der Phasen, wie hohe Nachweisempfindlichkeit, ihre Unempfindlichkeit gegenüber Inhomogenitäten und ihre große Tiefenauflösung, konnten bestätigt werden. Auch für den neuen vom Verfasser entwickelten quantitativen Ansatz für die Tiefenbestimmung von Defekten $z = \sqrt{\alpha / f_{ch}}$ auf Grundlage der Temperaturleitfähigkeit α und der sogenannten charakteristischen Frequenz f_{ch} des minimalen Phasen- und Amplitudenkontrastes können die Phasen besonders bei tiefen Defekten und solchen mit einem geringen Kontrast erfolgreich eingesetzt werden. Es zeigte sich allerdings auch, dass die Amplituden, soweit sie bestimmbar sind, genauere und zuverlässigere quantitative Werte liefern als die Phasen.
Das neue quantitative Nachweiskonzept wurde erfolgreich für Defekttiefenbestimmungen zwischen 1 und 10 cm eingesetzt. Es ist weitestgehend unabhängig von Material oder Geometrie des untersuchten Bauteiles oder der Fehlstelle. Die Beobachtungszeiten sollten jedoch ausreichend lang und die Temperaturleitfähigkeit bekannt sein. Es basiert auf einer Gleichung für alle untersuchten Fälle und auf der überall erhältlichen und „schnellen“ FFT.
Auch deshalb ist die RST ein ideales Werkzeug der ZfP im Bauwesen. Sie eignet sich insbesondere für den Einsatz in der Qualitätssicherung und für Ortung von verdeckten Strukturen zum Beispiel in der Denkmalpflege, wie an zahlreichen Beispielen in dieser Arbeit demonstriert wurde.
Im folgenden sind die wichtigsten Ergebnisse dieser Arbeit nach Themengebiet zusammengefasst:

Qualitative Untersuchungen und Machbarkeitsstudien

Aus den qualitativen Untersuchungen und Machbarkeitsstudien ergaben sich die folgenden Ergebnisse und Schlussfolgerungen:

- Die Phasenauswertung im Frequenzbereich (RPT) führte häufig zu einer verbesserten Nachweisempfindlichkeit tiefer Fehlstellen, einer kontrastreicheren Darstellung und einer größeren Unabhängigkeit von Oberflächeneffekten sowie einer ungleichmäßigen Erwärmung.
- Bei den Phasen wurde ein Zusammenhang zwischen der Frequenz bei der eine Fehlstelle gut detektierbar ist und ihrer Tiefe erkennbar. Je tiefer die Fehlstelle desto niedriger ist die Frequenz bei der sie detektierbar ist und umgekehrt.
- Auf eine vergleichende Untersuchung mittels Amplituden (RAT) und im Zeitbereich sollte jedoch nicht verzichtet werden, da auch hier wichtige Informationen enthalten sein können.
- Durch die langen Erwärmungs- und Beobachtungszeiten einer RIT im Bauwesen können Defekte einer Tiefenlage von bis zu 10 cm nachweislich detektiert werden, was mit einer reinen Impulsanregung nicht möglich wäre.
- Die verwendeten Verfahren eignen sich zur zerstörungsfreien Prüfung einer Vielzahl baupraktischer Fragestellungen, die sowohl bei der Qualitätssicherung als auch im Rahmen von Bauwerksprüfungen bis hin zu Standsicherheitsbewertungen anfallen können. Sie wurden unter anderem erfolgreich eingesetzt bei der Ortung von
  - Hohlstellen und Ablösungen hinter Beschichtungen (zum Beispiel Spaltklinker und CFK-Laminate auf Beton, Putz auf Beton oder Mauerwerk)
  - Hohlstellen und Kiesnestern in Beton
  - unverfüllten Fugen in Mauerwerk
  - Spanngliedern und Verpressfehlern in Hüllrohren (von der TUB)

Fazit: Die RST ist eine ideale Ergänzung der RIT bei der qualitativen zerstörungsfreien Prüfung oberflächennaher Strukturen im Bauwesen. Weiterführende quantitative Untersuchungen erschienen gerade bei den Phasen vielversprechend und wurden im folgenden durchgeführt.

Ein neuer Ansatz für die quantitative Rechteckimpuls-Spektral-Thermografie

Neben den umfangreichen schon vorab veröffentlichten qualitativen Machbarkeitsstudien erfolgten quantitative zur Ortung von Ablösungen und Minderdicken an:

- Spaltklinker auf Beton
- Putz auf Beton

Weitere quantitative Machbarkeitsstudien erfolgten zur Ortung von Hohlstellen und Verdichtungsmängeln im Beton und zur Untersuchung des Einflusses von

- Reifegrad

- Dichte, Porosität und Stahlfaseranteil
- Bewehrungsgrad

auf den quantitativen Nachweis von Inhomogenitäten.
Im einzelnen sind die folgenden Ergebnisse der quantitativen Untersuchungen hervorzuheben:

- Die RST stellt einen Ansatz dar, das inverse Problem der aktiven Thermografie im Frequenzbereich zu lösen. Dafür können Phasen- (RPT) und Amplitudeninformationen (RAT) verwendet werden.
- Der neue quantitative Nachweis über die charakteristische Frequenz f_{ch} bei der RPT eignet sich für Fehlstellen einer Tiefenlage zwischen 3 und 10 cm für Erwärmungszeiten zwischen 5 und 30 min und eine Beobachtungszeit von 120 min und liegt dort überwiegend im Rahmen der Messgenauigkeit des Radars mit einer Abweichung zwischen 0 und 13% für Polystyrol- und zwischen 0 und 30 % für Porenbetonfehlstellen. Für Erwärmungszeiten von 45 und 60 min eignet sich eine quantitative RPT nicht.
- Der neue quantitative Nachweis über die charakteristische Frequenz bei der RAT eignet sich für Fehlstellen einer Tiefenlage zwischen 3 und 9,2 cm (Abweichungen gegenüber Radar und ${}_{nom}$c zwischen 0 und 12%) für Erwärmungszeiten zwischen 5 und 30 min und für Erwärmungszeiten von 45 und 60 min für eine Tiefenlage von 3 bis 8 cm (Abweichung 0%).
- Ein Nachweis kann und sollte sowohl über die RPT als auch die RAT erfolgen, da beide über sich ergänzende Eigenschaften verfügen. Bei tiefen Fehlstellen weisen die Phasenkontrastkurven einen klaren Vorteil auf. Die Amplitudenkontrastkurven sind rauscharm und liefern auch bei längeren Erwärmungszeiten genaue Ergebnisse, wo im Vergleich die Phasen wegen des hohen Rauschens keine quantitativen Informationen liefern.
- RAT und RPT gemeinsam ist, dass für Erwärmungszeiten $t_E \geq 30$ min die tiefen Fehlstellen $z \geq 9{,}2$ cm tendenziell zu flach erscheinen. Für kurze Erwärmungszeiten lassen sie sich zu meist akkurat bestimmen. Für die 5 min Erwärmung und die flachen Fehlstellen gilt das Umgekehrte.
- Die aufgebrachte Wärmeleistung schien einen nicht unerheblichen Einfluss auf das Ergebnis zu haben: je größer die Leistung, desto genauer das Ergebnis.
- Materialeigenschaften der Fehlstellen machen sich über den Kontrast und das Signal-zu-Rausch-Verhältnis bemerkbar, nicht jedoch bei der charakteristischen Frequenz.
- Gleiches gilt für die Größe der Fehlstelle.
- Ein Nachweis über die thermische Eindringtiefe μ und den Anfangsamplitudenkontrast ($f = 0$) kann aus den angegebenen Gründen nicht empfohlen werden.
- Die Verwendung des eingeführten Korrekturfaktors k_c war bisher nicht erforderlich und konnte für die untersuchten Parameter mit dem Wert $k_c = 1$ belegt werden.

Fazit: Weiterführende Untersuchungen über den Wärmefluss und Parameterstudien waren erforderlich.

Untersuchung des angeregten Wärmeflusses

Die Ergebnisse der Untersuchungen des mit der automatisierten IR-Erwärmungseinheit angeregten Wärmeflusses lassen sich folgendermaßen zusammenfassen:

- Der Einfluss der Periodizität der automatisierten IR-Erwärmungseinheit kann vernachlässigt werden.
- Der Unterschied in der Temperaturverteilung zwischen Dirac- und Rechteckimpuls nimmt mit zunehmender Beobachtungszeit ab und mit zunehmender Erwärmungszeit zu. Er ist am größten beim 1800-s-Impuls und ist am geringsten beim 300-s-Impuls.
- Je länger die Erwärmungszeit bei den Rechteckimpulsen ist, desto eher nach Beenden der Erwärmungphase stellt sich ein quasi-stationärer Zustand ein. Über ca. die Hälfte der Aufnahmezeit ist die Temperatur in den bisher untersuchten Tiefen zwischen 3 und 10 cm nahezu konstant.
- Bei den Dirac-Pulsen weisen gerade die oberflächennahen Bereiche ($z = 0$ bis $z = 1$ cm) ein sehr starkes Gefälle auf, je nach Leistung des Pulses mehr oder weniger. Hier sind wir eindeutig im IT/PPT-Bereich, wo die Blindfrequenz und die thermischen Eindringtiefe μ, bei der ein Signal um das e^{-1}-Fache seines Wertes abfällt, für einen quantitativen Nachweis herangezogen werden kann. Im Gegenzug dazu wird klar, warum der Nachweis über die Blindfrequenz in der RPT und der thermischen Eindringtiefe bei der RAT zu keinem Erfolg führen *kann*. Bei der RIT ist gerade bei flachen Fehlstellen bereits zu Beginn der Aufnahme ein Temperaturkontrast vorhanden, außerdem tritt weder so ein starker Temperaturgradient auf, noch findet ein vollständiger Ausgleichsvorgang während der Aufnahmezeit statt, besonders bei langen Erwärmungszeiten nicht.
- Die maximale Differenz erhöht sich proportional zur aufgebrachten Leistungsdichte und damit auch das Signal-zu-Rausch-Verhältnis (SNR), aber am zeitlichen Verlauf, zum Beispiel des Nulldurchgangs, ändert sich nichts. Dies ist eine Bestätigung für die Hypothese in Kapitel 6, wonach die Leistungsdichte nur einen indirekten Einfluss auf den quantitativen Nachweis hat, indem sie sich auf das SNR auswirkt und keinen direkten.
- Je ähnlicher sich das Material der Fehlstelle und des umhüllenden Materials sind (hier insbesondere der junge Porenbeton und Beton im Vergleich zu Polystyrol und Beton), desto geringer ist der Temperaturkontrast T_{max} und desto später wird er erreicht.
- Die tiefen Fehlstellen und besonders die tiefe Porenbetonfehlstelle F3 sind gerade noch detektierbar, was auch die Schwierigkeiten bei der inversen Lösung im Frequenzbereich für diese Fehlstellen erklärt.

- Der Einfluss der Umgebungstemperatur und der Konvektion auf die Temperaturentwicklung auf der Oberfläche des Probekörpers wurde deutlich.

Fazit: Bei einer Impulserwärmung mit kurzer Erwärmungszeit oder Blitz führt der große Anfangsgradient bei oberflächennahen Defekten in Bauteilen mit großer Temperaturleitfähigkeit zu Beginn des Abkühlvorganges zu der Möglichkeit eines quantitativen Nachweises über Blindfrequenz f_b und thermische Eindringtiefe μ im Frequenzbereich (PPT) durchzuführen. Die analytische Beschreibung des Wärmeflusses kann näherungsweise über das Dirac-Puls-Modell erfolgen. Bei einer Rechteckimpuls-Erwärmung ist dies nicht möglich. Dafür kann der Nachweis bei genügend langer Aufnahmezeit über die charakteristische Frequenz des maximalen f_{ch} Phasen- und Amplitudenkontrastes (RST) erfolgen. Für die analytische Lösung kann der Ansatz für Rechteckimpulse verwendet werden.

Parameterstudien einer quantitativen RST

Die anschließenden Parameterstudien ergänzten und vertieften die im Kapitel „*Ein neuer Ansatz für die quantitative RST*“ dargestellten Untersuchungen und hatten das Ziel, das Potential einer quantitativen RST aufzuzeigen. Im einzelnen sind folgende Punkte hervoruzuheben:

- Der neue quantitative Ansatz der RST eignet sich für eine Tiefenbestimmug von Defekten und Schichtgrenzen zwischen ≤ 1 bis 10 cm für die untersuchten Materialien Beton (bewehrt und unbewehrt, mit und ohne Stahlfasern und hohem Luftporengehalt), Spaltklinker, Mörtel und Putz mit dem angegebenen Messaufbau.

- Das Verfahren an sich ist unempfindlich gegenüber dem Material des Bauteiles, der Fehlstellen oder deren Geometrie. Lediglich indirekt über ein schlechtes SNR und inhomogenes Material, resultierend in der Schwierigkeit die Temperaturleitfähigkeit zu bestimmen, wird der Nachweis beeinflusst.

- Unter günstigen Bedingungen (hohe eingebrachte Energie, lange Beobachtungszeit, homogenes Material, klare Schichtgrenzen zwischen umgebenden Material und Inhomogenität und wenn die Temperaturleitfähigkeit der untersuchten Materialien bekannt ist) liegt die Abweichung bei Tiefen zwischen 1 und 8 cm in den meisten Fällen unter 10% (selten bei 12% und häufig bei 0%) und bei einer Tiefe von 9 bis 10 cm von unter 30% (häufig auch bei 6 oder gar 0%).

- Eine Verbesserung des Nachweises der tiefen Fehlstellen ließe sich vermutlich über eine Verlängerung der Aufnahmezeit erzielen. Bei tiefen Fehlstellen hat sich ein Verhältnis von Erwärmungszeit zu Aufnahmezeit von > 4 bewährt.

- Die Amplitudenauswertung erwies sich in vielen Fällen als die genauere.

- Dafür ist die Detektierbarkeit tiefer Fehlstellen bei den Phasen höher und auch die Unempfindlichkeit gegenüber Inhomogenitäten im untersuchten Bauteil beziehungsweise Material.

- Die Verwendung des ursprünglich eingeführten Korrekturfaktors k_c erwies sich als überflüssig.

Fazit: Inhomogenes Material erschwert zwar den quantitativen Nachweis im Frequenzbereich aufgrund der ungleichmäßig verteilten Temperaturleitfähigkeit, aber letztlich lässt sich der neue Ansatz für alle betrachteten Fälle mit dem angegebenen Messaufbau und unter den angegebenen Laborbedingungen einsetzten. Die Möglichkeiten eines erfolgreichen Einsatzes des neuen quantitativen Ansatzes in der Praxis erscheinen vielversprechend.

RIT und RST in der Praxis

Ergänzt wurden die Untersuchungen unter Laborbedingungen durch Messeinsätze vor Ort, zur Ortung von Mauerwerk und Stahl hinter Putz, Ablösungen von Natursteinplatten, Asphalt, Epoxidharz auf Beton sowie Anschlüssen in Holz. Die wichtigsten Erkenntnisse dieser Vor-Ort-Untersuchungen lassen sich folgendermaßen zusammenfassen:

- Die Einsatzmöglichkeit der durch eine Frequenzauswertung ergänzten RIT in der Bauwerksdiagnose sind vielfältig und werkstoffübergreifend. RIT/RST-Untersuchungen konnten erfolgreich zur Ortung von Mauerwerk und Stahl hinter Putz, Ablösungen von Natursteinplatten, Asphalt, Epoxidharz auf Beton sowie Anschlüssen in Holz in der Qualitätssicherung und der Strukturuntersuchung insbesondere an historischen Kulturgütern durchgeführt werden.

- Speziell die Phasenauswertung der RPT beziehungsweise RST eignet sich für Messeinsätze vor Ort aufgrund der Unempfindlichkeit der Phasen gegenüber inhomogener Erwärmung und Oberflächen.

- Der neue quantitative Ansatz ließ sich erfolgreich im Messeinsatz vor Ort und unter Nutzung eines Heizlüfters zur Erwärmung durchführen.

Perspektiven

Die zahlreichen Praxisanwendungen und Machbarkeitsstudien haben gezeigt, welch großes Anwendungspotential für die qualitative und quantitative zerstörungsfreie Bauwerksdiagnose in einer durch die Auswertung im Frequenzbereich ergänzten Rechteckimpuls-Thermografie bereits besteht. Darüber hinaus sieht der Verfasser ein enormes Potential für die ZfPBau-Thermografie, das mit dem bisher Dargestellten bei weitem noch nicht ausgeschöpft ist. Insbesondere durch eine Kombination mit anderen innovativen Methoden und technischen Neuerungen sowie eine verstärkte Automatisierung, in die das neue quantitative Konzept mühelos integriert werden kann, können ohne großen Entwicklungsaufwand neue Anwendungsgebiete erschlossen und alte ausgebaut werden, wie an ausgewählten Beispielen in den „Perspektiven“ erläutert wurde.

Das größte Potential für die ZfP insgesamt sieht der Verfasser in einer strategischen Partnerschaft mit modernen numerischen Methoden und den neuen probabilistischen Lebensdauer-Bemessungskonzepten, die auf den Input durch solch innovative ZfPBau-Verfahren wie die Rechteckimpuls-Spektral-Thermografie angewiesen sind.

Nomenklatur

Abkürzungsverzeichnis

BAM	Bundesanstalt für Materialforschung und-prüfung, Fachgruppe VIII.2 „Zerstörungsfreie Schadensdiagnose und Umweltmessverfahren“
CFK	Kohlefaserverstärkte Kunststoffe
DFG	Deutsche Forschungsgemeinschaft
DFT	Diskrete Fourier-Transformation
EFIT	Elastodynamische Finite Integrationstechnik
FDM	Methode der Finiten Differenzen
FEM	Methode der Finiten Elemente
FFT	Fast Fourier-Transformation
FG	Fachgruppe (BAM) bzw. Fachgebiet (TUB)
FT	Fourier-Transformation
FVM	Methode der finiten Volumen
IE	Impakt-Echo
IR	Infrarot
IT	Impuls-Thermografie
LIBS	Laser indused breakdown Spektroskopie
LIT	Lockin-Thermografie
PPT	Puls-Phasen-Thermografie
RAT	Rechteckimpuls-Amplituden-Thermografie
RIT	Rechteckimpuls-Thermografie
RPT	Rechteckimpuls-Phasen-Thermografie
RST	Rechteckimpuls-Spektral-Thermografie
SAFT	Synthetic Aperture Focusing Technique
SIP	Spektral induzierte Polarisation
SNR	Signal-zu-Rausch-Verhältnis
TUB	Technische Universität Berlin, Fachgebiet „Baustoffe und Baustoffprüfung“
US	Ultraschall
UV	Ultraviolett
ZfP	Zerstörungsfreie Prüfung
ZfPBau	Zerstörungsfreie Prüfung im Bauwesen

Kürzel	**Einheit**	**Parameter**
A	i.w.E	Amplitude
A	m^2	Fläche
b	$(W \cdot s^{0,5})/(m^2 \cdot K)$	Wärmeeindringzahl
c	$J/(kg \cdot K)$	spezifische Wärmekapazität
c_p	$J/(kg \cdot K)$	- bei konstantem Druck
c_1	$3{,}742 \times 10^4\ W \cdot cm^{-2} \cdot \mu m^4$	erste Strahlungskonstante
c_2	$1{,}439 \times 10^4\ \mu m \cdot K$	zweite Strahlungskonstante
d	m	Dicke
f	Hz	Frequenz
f_b	Hz	- Blindfrequenz
f_{ch}	Hz	- charakteristische Frequenz
Δf	Hz	- Abtastrate, Frequenzinkrement
f_{max} bzw. f_c	Hz	- Grenzfrequenz eines Signals
F_O	-	Fourier-Zahl
$\dot{f}$	W/m^3	Energiedichte
j_q	W/m^2	Wärmestromdichte bzw. -fluss
l	m	Länge
m	kg	Masse
M	W/cm^2	spezifische Ausstrahlung
Q	J	Wärmeenergie bzw. -menge
t	s	Zeit
t_E	s	- Erwärmungszeit
Δt	s	- Abtastintervall bzw. Zeitinkrement
T	s	- Periode bzw. Aufnahmezeit
T	K bzw. °C	Temperatur
T_O	K bzw. °C	- Oberflächentemperatur
T_0	K bzw. °C	- Ausgangstemperatur
v	m/s	Geschwindigkeit
V	m^3	Volumen
W	J	Energie
x, y, z	m	Koordinaten
z	m	Tiefe
α	-	Absorptionsgrad
α	m^2/s	Temperaturleitfähigkeit
α	$W/(m^2 \cdot K)$	Wärmeeindringkoeffizient
ϵ	-	Emissionsgrad / Emissivität
λ	$W/(m \cdot K)$	Wärmeleitfähigkeit
λ	μm	Wellenlänge
μ	m	thermische Eindringtiefe
ω	rad/s	Kreisfrequenz
ϕ	rad	Phase
ρ	kg/m^3	Rohdichte
σ	$5{,}6697 \times 10^{-8}\ W/(m^2 \cdot K^4)$	Stefan-Boltzman-Konstante
τ	-	Transmissionsgrad
θ	K bzw. °C	Temperatur

Literaturverzeichnis

[AHM+04] Arndt, R. ; Hillemeier, B. ; Maierhofer, Ch. ; Rieck, C. ; Röllig, M. ; Scheel, H. ; Walther, A.: Zerstörungsfreie Ortung von Fehlstellen und Inhomogenitäten in Bauteilen mit der Impuls-Thermografie. In: *Bautechnik* 10 (2004), Oktober, Nr. 81, S. 786–793

[AHMR06] Arndt, R. ; Helmerich, R. ; Maierhofer, Ch. ; Röllig, M.: Detection and Quantification of Voids and Delaminations in Masonry and Concrete Structures with active thermography. In: *Structural Faults and Repair 2006, Int. Conference, Proceedings*. Edinburgh, 2006

[ait05] *Active Infrared Technology Applications (AITA 2005), Int. Conference, Proceedings*. Padua, 2005

[AK05] Arndt, R. ; Konn, W.: Untersuchungen zum Spannungs- und Rissverhalten der Stelen des Holocaust-Mahnmals Berlin unter zyklischer Erwärmung / Hillemeier und Partner / TU-Berlin. 2003 bis 2005. – Untersuchungsbericht für den Berliner Senat

[Alg06] Algernon, D.: *Impact Echo: Analyse akustischer Wellen in Beton*, TU Berlin, Dissertation, 2006

[ALKB05] Avramenko, V. G. ; Lebedev, O. V. ; Kirzhanov, V. V. ; Budadin, O. N.: Solution of the Inverse Problem of Nonstationary Heat Conductivity in Multilayered Objects Using FFT. In: *IIIrd NDT in Progress, Proceedings*, 2005

[AMR+04a] Arndt, R. ; Maierhofer, Ch. ; Röllig, M. ; Weritz, F. ; Wiggenhauser, H.: Putzablösungen auf Beton und Mauerwerk mit der Puls-Phasen-Thermografie. In: *DACH-Jahrestagung, Berichtsband*. Salzburg, 2004

[AMR+04b] Arndt, R. ; Maierhofer, Ch. ; Röllig, M. ; Weritz, F. ; Wiggenhauser, H.: Structural Investigation of Concrete and Masonry Structures behind Plaster by Means of Pulse-Phase-Thermography. In: *Proceedings of the 7th Int. Conference on Quantitative Infrared Thermography (QIRT)*. Rhode-St-Genese, Belgium, 2004

[AMR06] Arndt, R. ; Maierhofer, Ch. ; Röllig, M.: Quantitative Pulse-Phase-Thermography for Masonry and Concrete Structures. In: *EC-NDT 2006, Int. Conference, Proceedings* DGZfP, 2006

[AP96] Almond, D.P. (Hrsg.) ; Patel, P.M. (Hrsg.): *Photothermal Science and Techniques*. London; New York : Chapman Hall, 1996 (Physics and its Applications 10)

[Arn03] Arndt, R.: *Dreidimensionale analytische Untersuchungen zum Biege- und Querkrafttragverhalten von Stahlbetonquerschnitten mit Hilfe nichtlinearer Finite-Elemente-Verfahren*, TU Berlin, Fachgebiet Stahlbetonbau, Diplomarbeit, 2003

[Arn04] Arndt, R.: Numerische Untersuchungen zum dreidimensionalen Verbundverhalten von Stahlbeton und dem dreiaxialen Tragverhalten eines Stahlbetonbalkens unter Lasteinleitung / TFH Berlin. 2004. – Forschungsbericht zum BMBF-Projekt KI-Smile

[AST97] ASTM Standard D4788-88 (Hrsg.): *Standard Test Method for Detecting Delaminations in Bridge Decks using Infrared Thermography*. ASTM Standard D4788-88, 1988 - reapproved 1997

[Avd03] Avdelidis, N. P.: Transient Thermography in the Assesment of Defects of Aircraft Composites. In: *NDTE International* 36 (2003), S. 433–439

[Azi87] Azizi, S. A.: *Entwurf und Realisierung digitaler Filter*. 3. Auflage. München Wien : R. Oldenbourg Verlag, 1987

[Bat82] Bathe, K. J.: *Finite Element Procedures In Engineering Analysis*. New Jersey : Prentice-Hall Inc., 1982

[BK95] Brady, R. P. ; Kulkarni, N. R.: A Novel Pulsed Video Thermography Apparatus for Quantitative Characterization of Material Flaws. In: *Transactions of the Illinois State Academy of Science* 88 (1995), Nr. 3 - 4, S. 131–136

[BMRW02] Brink, A. ; Maierhofer, Ch. ; Röllig, M. ; Wiggenhauser, H.: *Zwischenbericht zum DFG-Forschungsvorhaben: Struktur- und Feuchteuntersuchungen von Bauteil- und Bauwerksoberflächen mit der Impuls-Thermografie*. 2002. – BAM, Berlin

[BMS01] Bjegovic, D. ; Mikulic, D. ; Sekulic, D.: Non-Destructive Methods for Monitoring of Reinforcing Steel in Concrete. In: Forde, M.C. (Hrsg.): *Proceedings of 9th Int. Conf. On Structural Faults and Repair*. London : Engineering Technics Press, 2001

[BR80] Busse, G. ; Rosencwaig, A.: Subsurface Imaging with Photoacoustics. In: *Appl. Physics* 36 (1980), Nr. 10, S. 815–816

[Bri05] Brink, A.: *Einsatz der Impuls-Thermografie zur quantitativen zerstörungsfreiein Prüfung im Bauwesen*. Berlin, TU Berlin, Dissertation, 2005

[Büs99] Büscher, K.A.: *Einsatz der Modulationsthermographie zum Nachweis von Feuchtigkeit in Baustoffen*, Universität Rostock, Dissertation, 1999

[BSF04] Bögle, A. (Hrsg.) ; Schmid, P. C. (Hrsg.) ; Flagge, I. (Hrsg.): *leicht weit - Light Structures, Jörg Schlaich und Rudolf Bergermann*. Berlin London New York : Prestel, 2004

[Bus01] Busse, G.: Lockin Thermography. In: Maldague, X. (Hrsg.): *Nondestructive Testing Handbook - Infrared and Thermal Testing*. 3. Auflage. American Society for Nondestructive Testing, 2001, Kapitel 10, Teil 4:, S. 318–327

[BWK92] Busse, G. ; Wu, D. ; Karpen, W.: Thermal Wave Imaging with Phase Sensitive Modulated Thermography. In: *Journal of Applied Physics* 71 (1992), S. 3962–3965

[CA99] Carpinteri, A. (Hrsg.) ; Aliabadi, M. H. (Hrsg.): *Computational Fracture Mechanics in Concrete Technology*. Boston, Southampton : WIT Press/Computational Mechanics Publications, 1999

[CDMMR05] Carlomagno, G.M. ; Di Maio, R. ; Meola, C. ; Roberti, N.: Infrared Thermography and Geophysical Techniques in Cultural Heritage Conservation. In: *Quantitative Infrared Thermography Journal 2005* Bd. 2, 2005, S. 5–24

[Cha74] Chapman, A. J.: *Heat Transfer*. 3. Auflage. New York : Collier Macmillan International Editions, 1974

[CJ01] Carslaw, H. S. ; Jaeger, J. C.: *Conduction of Heat in Solids*. 2. Auflage. Oxford Science Publications, 1959 - reprinted 2001

[Com90] Comite Euro-International du Beton (Hrsg.): *CEB-FIP Model Code 1990*. Comite Euro-International du Beton, 1990

[Cue04] Cuellar, P.: Finite Element Simulations of Thermography Tests / BAM, Berlin. 2004. – Praktikumsbericht

[Det04] Detig, C.: *Der Latex-Wegweiser*. 2. Auflage. Bonn : mitp-Verlag, 2004

[DGZfP05] DGZfP (Veranst.): *Thermographie-Kolloquium 2005, Stuttgart, Berichtsband*. 2005

[Dil01] Dillenz, A.: Ultraschall Burst-Phasen-Thermografie. In: *Materialprüfung* 43 (2001), Nr. 1-2, S. 30–34

[din99] *DIN EN 13187: Wärmetechnisches Verhalten von Gebäuden - Nachweis von Wärmebrücken in Gebäudehüllen - Infrarot-Verfahren*. : *DIN EN 13187: Wärmetechnisches Verhalten von Gebäuden - Nachweis von Wärmebrücken in Gebäudehüllen - Infrarot-Verfahren*, 1999

[din00] *DIN 1045-1:Tragwerke aus Beton, Stahlbeton und Spannbeton, Teil 1: Bemessung und Konstruktion*. : *DIN 1045-1:Tragwerke aus Beton, Stahlbeton und Spannbeton, Teil 1: Bemessung und Konstruktion*, 2000

[din02] *DIN 4108, Wärmeschutz im Hochbau , Teil 4: Wärme- und feuchteschutztechnische Kennwerte*. : *DIN 4108, Wärmeschutz im Hochbau , Teil 4: Wärme- und feuchteschutztechnische Kennwerte*, 2002

[DIN05] *DIN 54162, Entwurf: Zerstörungsfreie Prüfung: Qualifizierung und Zertifizierung von Personal im Verfahren Infrarot-Thermografie*. : *DIN 54162, Entwurf: Zerstörungsfreie Prüfung: Qualifizierung und Zertifizierung von Personal im Verfahren Infrarot-Thermografie*, 2005

[DIN06] *DIN EN 473: Zerstörungsfreie Prüfung - Qualifizierung und Zertifizierung von Personal der zerstörungsfreiem Prüfung - Allgemeine Grundlagen*. : *DIN EN 473: Zerstörungsfreie Prüfung - Qualifizierung und Zertifizierung von Personal der zerstörungsfreiem Prüfung - Allgemeine Grundlagen*, 2006

[DIN 3] *DIN 54190: Zerstörungsfreie Prüfung -Thermografische Prüfung, Teil 1 bis 3*. : *DIN 54190: Zerstörungsfreie Prüfung -Thermografische Prüfung, Teil 1 bis 3*, 2004 (Teil 1), 2005 (Teil 2) und 2006 (Teil 3)

[DSWB98] Danesi, S. ; Salerno, A. ; Wu, D. ; Busse, G.: Cooling down Thermography: Principle and Results in NDE. In: Snell, J. R. (Hrsg.) ; Wurzbach, R. N. (Hrsg.) ; Thermosense (Veranst.): *Proceedings of the International Society for Optical Engineering* Bd. 20. Orlando, 1998, S. 266–274

[ecn06] *9th European Conference on NDT (ECNDT), September 25-29, 2006, Proceedings*. Bd. *103*. Berlin : DGZfP und EFNDT, 2006

[Elf89] Elfgren, L. (Hrsg.): *RILEM Report. Fracture Mechanics of Concrete Structures*. London, New York : Chapman & Hall, 1989

[Escht] Eschenbach, W. von: *Parzifal*. Bd. 100. Frankfurt/M : Eichborn: Die andere Bibliothek, 1220 - Neuauflage 1993, übertragen aus dem Mittelhochdeutschen von Peter Knecht

[EZB05] Ewert, U. ; Zscherpel, U. ; Bavendiek, K.: Digitale Radiologie in der ZfP. In: *ZfP-Zeitung* 97 (2005)

[FB94] Faires, J. D. ; Burden, R. L.: *Numerische Methoden - Näherungsverfahren und ihre praktischen Anwendungen*. Heidelberg : Spektrum Akademischer Verlag, 1994

[flu] *Online-Manual*. : *Online-Manual*. – Quelle: www.fluent.de

[Fou98] Fouad, N. A.: *Rechnerische Simulation der klimatisch bedingten Temperaturbeanspruchungen von Bauwerken - Anwendung auf Beton-Kastenbrücken und -Sandwichwände*, TU Berlin, Dissertation, 1998

[FR06] Fouhad, N. A. ; Richter, T.: *Leitfaden Thermografie im Bauwesen - Theorie, Anwendungen, praktische Umsetzungen*. Fraunhofer IRB-Verlag, 2006

[GA93] Geyer, E. ; Arndt, D.: *Merkblatt über thermografische Untersuchungen an Bauteilen und Bauwerken*. Berlin : DGZfP-Ausschuss für Zerstörungsfreie Prüfung im Bauwesen (AB) - Unterausschuss Optische und thermografische Verfahren, 1993 (B 5)

[GAP05] Gaulke, A. ; Arndt, R. ; Pöhner, S. ; FG Massivbau (Hrsg.): *Diskretisierung und Analyse von Stahlbetontragwerken mit DIANA - Einführung in die FEM im Stahlbetonbau*. 3. Auflage. TU Berlin: FG Massivbau, 2005. – Skript für Vorlesung und Übung

[Gau94] Gaussorgues, G.: *Microwave Technology*. Bd. 5: *Infrared Thermography*. London, New York : Chapman & Hall, 1994

[Geb81] Gebhardt, A.: *Thermografie - Anwendung bei der geophysikalischen Naherkundung*. Leipzig : VEB, Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie, 1981 (Freiburger Forschungshefte, Geowissenschaften Geophysik C367)

[Geh00] Gehlen, C.: *Probabilistische Lebensdauerbemessung von Stahlbetonbauwerken - Zuverlässigkeitsbetrachtungen zur wirksamen Vermeidung von Bewehrungskorrosion*. Deutscher Ausschuss für Stahlbeton Heft 510, 2000

[GM00] Galmiche, F. ; Maldague, X.: Depth Defect Retrieval Using the Wavelet Pulsed Phased Thermography, Reims, France, July 18-21, 2000. In: Balageas, D. (Hrsg.) ; Busse, G. (Hrsg.) ; Carlomagno, C. (Hrsg.): *Quantitative InfraRed Thermography (QIRT), Eurotherm Seminar 64*, 2000

[GM01] Groth, C. ; Müller, G.: *FEM für Praktiker* . Bd. 3. 4. Auflage. Renningen : Expert Verlag, 2001

[GM02] Giorleo, G. ; Meola, C.: Comparison between Pulsed and Modulated Thermography in Glass-Epoxy Laminates. In: *NDTE International* 35 (2002), S. 287–292

[Gol] Goldammer Gmbh (Hrsg.): *Zeitdiskrete, digitale Filter und schnelle Fourier-Transformation (FFT)*. Goldammer Gmbh. – www.goldammer.de, 03.03.2004

[GR01] Grinzato, E. ; Rosina, E.: Infrared and Thermal Testing for Conservation of Historic Buildings. In: Maldague, X. (Hrsg.): *Nondestructive Testing Handbook - Infrared and Thermal Testing*. American Society for Nondestructive Testing, 2001, Kapitel 18, Teil 5, S. 624–646

[Gru96] Grundmann, R. ; Technische Universität Dresden - Institut für Luft- und Raumfahrttechnik (Hrsg.): *Numerische Methoden (CFD) - Studienmaterial*. Dresden: Technische Universität Dresden - Institut für Luft- und Raumfahrttechnik, 1996. – Quelle: www.tu-dresden.de/mw/ilr/tfd/studium/cfd1/

[GV98] Grinzato, E. ; Vavilov, V.: Corrosion evaluation by thermal image processing and 3D modelling. In: *Rev. Gen. Therm.* 37 (1998), S. 669–679

[GVM00] Galmiche, F. ; Vallerand, S. ; Maldague, X.: Pulsed Phase Thermography with the Wavelet Transform. In: *NY: American Institute of Physics* 19A (2000), S. 609–615

[Has05] Hasenstab, A.: *Integritätsprüfung von Holz mit dem zerstörungsfreien Ultraschallechoverfahren*, TU Berlin, Dissertation, 2005

[HD04] Heinrich, H. ; Dahlem, K.-H.: Gebäudethermografie - klassische Anwendung der ZfP in der Bauphysik. In: Cziesielski, E. (Hrsg.): *Bauphysik-Kalender*. Berlin : Ernst Sohn, 2004, S. 310–320

[HDEV01] Heinrich, H. ; Dahlem, K.-H ; Edinger, M. ; Vogel, J.: Einsatz aktiver Thermographie zur Detektion von Einschlüssen in Baukonstruktionen und im Erdreich. In: *Thermografie-Kolloquium, Stuttgart, Berichtsband* DGZfP, 2001

[Hil80] Hillemeier, B.: Bewehrungssuche mit der Thermographie. In: *Beton- und Stahlbetonbau* (1980), Nr. 4, S. 83–85

[HMR+06] Helmerich, R. ; Maierhofer, Ch. ; Röllig, M. ; Arndt, R. ; Vielhaber, J.: Bond Quality Survey of Loaded RC-Beams with CFRP-Plate Repair Using Impulse-Thermography. In: *IABMAS'06 - Third International Conference on Bridge Maintenance, Safety and Management, Proceedings*, 2006

[HMS92] Hering, E. ; Martin, R. ; Stohrer, M.: *Physik für Ingenieure*. Düsseldorf : VDI, 1992

[HMWS06] Hemmleb, M. ; Maierhofer, Ch. ; Weritz, F. ; Schiemenz, A.: Schadensdiagnose an Bauwerksoberflächen mit multispektralen Methoden. In: *Bauwerksdiagnose 2006, Berichtsband* DGZfP, 2006

[Hol99] Holznagel, M.: *Erarbeitung eines Rechenprogramms für den instationären Wärmetransport durch mehrschichtige Bauteile*, FHTW Berlin, Diplomarbeit, 1999

[HRMS06] Helmerich, R. ; Röllig, M. ; Maierhofer, Ch. ; Schulz, A.: Bond Control in CFRP-Strengthened RC-Structures Using Active Thermography. In: *Operation, Maintenance and Rehabilitation of Large Infrastructure Projects, Bridges and Tunnels, 15.-17.05.2006, Proceedings*. Kopenhagen, 2006

[HRWS05] Hillemeier, B. ; Rieck, C. ; Walther, A. ; Scheel, H.: *Abschlussbericht zum DFG-Forschungsvorhaben: Struktur- und Feuchteuntersuchungen von Bauteil- und Bauwerksoberflächen mit der Impuls-Thermografie*. 2005. – TU Berlin

[HS03] Hillemeier, B. ; Scheel, H.: Location of Prestressing Steel Fractures in Bridge Decks and Parking lots. In: *NDTCE 2003, Proceedings*. Berlin, 2003

[HSRW01] Hillemeier, B. ; Scheel, H. ; Rieck, C. ; Westphal, B.: *Zwischenbericht zum DFG-Forschungsvorhaben: Struktur- und Feuchteuntersuchungen von Bauteil- und Bauwerksoberflächen mit der Impuls-Thermografie*. 2001. – TU Berlin

[HTA05] Hasenstab, A. ; Taffe, A. ; Arndt, R.: Verfahren und deren Anwendung zur zerstörungsfreien Prüfung von Beton. In: *Tragwerksplanung im Bestand*. Dresden, 2005

[HWNK03] Helmerich, R. ; Werner, K.-D. ; Niemann, J. ; Kohlhoff, H.: Langzeitmonitoring Lehrter Bahnhof. In: *Sonderkapitel des Ingenieurbaus - Veranstaltung der BAM mit dem Senat von Berlin, 21.-22.10.2003*, 2003, S. 92–99

[HZD03] Hasenberg, D. ; Zweschper, Th. ; Dilger, K.: Charakterisierung von Klebeverbindungen mittels ultraschallangeregter Thermografie. In: *Thermografie Kolloquium, Berichtsband* DGZfP, 2003

[IC05] Ibarra-Castanedo, C.: *Quantitative Subsurface Defect Evaluation by Pulsed Phase Thermography: Depth Retrieval with the Phase*, Université Laval, Canada,, Dissertation, 2005. – Quelle: http://www.theses.ulaval.ca/2005/23016/23016.html

[ICM04a] Ibarra-Castanedo, C. ; Maldague, X.: Defect Depth Retrieval from Pulsed Phase Thermographic Data on Plexiglas and Aluminium Samples. In: *Proc. SPIE* 5405 (2004), S. 348–355

[ICM04b] Ibarra-Castenado, C. ; Maldague, X.: Pulsed Phase Thermography Reviewed. In: *Quantitative Infrared Thermography Journal* 1 (2004), Nr. 1

[Inf] Infratec (Hrsg.): *Thermografie*. Infratec. – Quelle: www.infratec.de

[Kap01] Kaplan, H.: Equipment for Infrared and Thermal Testing. In: Maldague, X. (Hrsg.): *Nondestructive Testing Handbook - Infrared and Thermal Testing*. 3. American Society for Nondestructive Testing, 2001, Kapitel 10, Teil 1 bis 4, S. 271 – 300

[Kla02] Klan, H.: Wärmeübergang durch freie Konvektion an umströmten Körpern. In: VDI-Gesellschaft (Hrsg.): *VDI-Wärmeatlas*. 9. auflage. Berlin, Heidelberg : Springer Verlag, 2002, S. Fa1 – Fa6

[KM04] Kind, Th. ; Maierhofer, Ch.: Das Impulsradarverfahren - ein Verfahren zur zerstörungsfreien Strukturaufkärung von Bauwerken. In: Csiesielski, E. (Hrsg.): *Bauphysikkalender 2004*. Berlin : Ernst & Sohn, 2004, Kapitel C1.2, Abschn. 2.3, S. 333–341

[KN06] Kruschwitz, S. ; Niederleithinger, E.: Charakterisierung von Feuchte- und Salzbelastungen in Baumaterial durch Impedanzspektroskopie. In: *Bauwerksdiagnose 2006, Berichtsband* DGZfP, 2006

[KS06] Kohl, C. ; Streicher, D.: Results of Reconstructed and Fused NDT-Data Measured in the Laboratory and On-Site at Bridges. In: *Cement Concrete Composites* 28 (2006), Nr. 4, S. 402–413

[Lan00] Langenberg, K.J. ; Theoretische Elektrotechnik, Universität Gesamthochschule Kassel (Hrsg.): *Theorie elektromagnetischer Wellen*. Theoretische Elektrotechnik, Universität Gesamthochschule Kassel, 2000

[Lex92] Lexikonredaktion, Meyers (Hrsg.): *Meyers Großes Taschenbuchlexikon*. B.I. Taschenbuch Verlag, 1992

[LMPZ95] Lüthi, T. ; Meier, H. ; Primas, R. ; Zogmal, O.: Infrared Inspection of external boned CFRP-sheets. In: *Proceedings of the International Symposium Non-Destructive Testing in Civil Engineering (NDT-CE), Berlin, September 1995* Bd. 48 DGZfP, 1995, S. 689–696

[Lor97] Lorenzen, K. F. ; FH Hamburg, FB Bibliothek und Information (Hrsg.): *Das Literaturverzeichnis in wissenschaftlichen Arbeiten*. 2. Auflage. Hamburg: FH Hamburg, FB Bibliothek und Information, 1997

[Lud02] Ludwig, N.: Heat Losses and 3D Diffusion Phenomena for Defect Sizing Procedures in Video Pulse Thermography. In: *Infrared Physics Technology* 43 (2002), S. 297–301

[Lut84] Luther, M.: *Die Lutherbibel*. Evangelische Kirche in Deutschland, Revidierter Text von 1984

[Mai04] Maierhofer, Ch.: Zerstörungsfreie Ortung von Inhomogenitäten im oberflächennahen Bereich mit der Impuls-Thermografie. In: Cziesielski, E (Hrsg.): *Bauphysikkalender 2004*. Berlin : Ernst & Sohn, 2004, Kapitel C1, Abschn. 2.2:, S. 320–329

[Mal93] Maldague, X.: *Non-Destructive Evaluation of Materials by Infrared Thermography*. London : Springer-Verlag, 1993

[Mal01a] Maldague, X.: General Approaches and Techniques of Infrared and Thermal Testing. In: Maldague, X. (Hrsg.): *Nondestructive Testing Handbook - Infrared and Thermal Testing*. 3. Auflage. American Society for Nondestructive Testing, 2001, Kapitel 2, Teil 2, S. 40– 46

[Mal01b] Maldague, X.. (Hrsg.): *Nondestructive Testing Handbook - Infrared and Thermal Testing*. Bd. 3. 3. Auflage. American Society for Nondestructive Testing, 2001

[Mal01c] Maldague, X.: Pulse Thermography. In: Maldague, X. (Hrsg.): *Nondestructive Testing Handbook - Infrared and Thermal Testing*. 3. Auflage. American Society for Nondestructive Testing, 2001, S. 310–312

[Mal02] Maldague, X.: Introduction to NDT by Active Infrared Thermography. In: *Materials Evolution* (2002), September

[Mar97] Marklein, R.: *Numerische Verfahren zur Modellierung von akustischen, elektromagnetischen, elastischen und piezoelektrischen Wellenaus-breitungsproblemen im Zeitbereich basierend auf der Finiten Integrationstechnik*. Aachen : Shaker Verlag, 1997

[Mar02] Martin, H.: Einführung in die Lehre vonder Wärmeübertragung. In: VDI-Gesellschaft (Hrsg.): *VDI-Wärmeatlas*. 9. Auflage. Berlin, Heidelberg : Springer Verlag, 2002, S. A1 – A27

[MAR+03] Maierhofer, Ch. ; Arndt, R. ; Röllig, M ; Weritz, F. ; Wiggenhauser, H.: Untersuchung von Betonstrukturen mit der Puls-Phasen-Thermografie. In: *Thermografie-Kolloquium 2003, Berichtsband* DGZfP, 2003

[MAR05a] Maierhofer, Ch. ; Arndt, R. ; Röllig, M: Influence of concrete properties on the detection of voids with impulse-thermography. In: *Active Infrared Technology Applications (AITA) 2005, Proceedings*, 2005

[MAR+05b] Maierhofer, Ch. ; Arndt, R. ; Röllig, M. ; Brink, A. ; Wiggenhauser, H.: *Abschlussbericht zum DFG-Projekt Impuls-Thermografie: Struktur- und Feuchteuntersuchungen von Bauteil- und Bauwerksoberflächen mit der Impuls-Thermografie, Teil 1 und Teil 2*. 2005. – BAM, Berlin

[MAR06a] Maierhofer, Ch. ; Arndt, R. ; Röllig, M.: Aktive Thermografie zur zerstörungsfreien Ortung von Ablösungen und Fehlstellen in Beton und Mauerwerk. In: *Bauwerksdiagnose, 23.-24. Februar 2006, Berichtsband*. Berlin, 2006

[MAR+06b] Maierhofer, Ch. ; Arndt, R. ; Röllig, M. ; Helmerich, H. ; Walther, A. ; Hillemeier, B. ; Rieck, C.: Quantification of Voids and Delaminations in Real Concrete and Masonry Structures with Active Thermography: Case Studies. In: *QIRT 2006, Proceedings*, 2006

[MAR+06c] Maierhofer, Ch. ; Arndt, R. ; Röllig, M. ; Rieck, C. ; Walther, A. ; Scheel, H. ; Hillemeier, B.: Application of impulse-thermography for non-destructive assessment of concrete structures. In: *CCC Special Issue NDT* (2006)

[Mau07] Maul, M.: *Strukturuntersuchung von Baustoffen mit der Puls-Phasen-Thermografie*, TU Berlin, Diplomarbeit, 2007

[MBH+03] Maierhofer, Ch. ; Brink, A. ; Hillemeier, B. ; Rieck, C. ; Röllig, M. ; Wiggenhauser, H.: Struktur- und Feuchteuntersuchungen in Betonstrukturen mit der Impuls-Thermografie. In: *Bauphysik* 25 (2003), Nr. 1, S. 22–26

[MBR03] Maierhofer, Ch. ; Brink, A. ; Röllig, H. M.and W. M.and Wiggenhauser: Quantitative Impulse-Thermography as NDT Method in Civil Engineering - Experimental Results and Numerical Simulations. In: *10th International Conference Structural Faults + Repair, July 2003*. London, 2003

[Meh95] Mehlhorn, G. (Hrsg.): *Der Ingenieurbau. Rechnerorientierte Baumechanik*. Bd. 6. Berlin : Ernst & Sohn, 1995

[MEW+04] Mielentz, F. ; Ernst, H. ; Wüstenberg, H. ; Mayer, K. ; Marklein, R.: Gruppenstrahler für Ultraschallprüfungen von Betonbauteilen. In: *Materialprüfung* 46 (2004), Nr. 11-12, S. 582–586

[MG56] Meinke, H. (Hrsg.) ; Grundlach, F.W. (Hrsg.): *Taschenbuch der Hochfrequenztechnik*. Berlin / Göttingen / Heidelberg : Springer Verlag, 1956

[MG01] Maldague, X. ; Galmiche, F.: Pulsed Phase Thermography. In: Maldague, X. (Hrsg.): *Nondestructive Testing Handbook - Infrared and Thermal Testing*. American Society for Nondestructive Testing, 2001, Kapitel 11, Teil 3, S. 313 – 317

[MHH+04] Maierhofer, Ch. ; Hamann, M. ; Hennen, B. C. und K. C. und Knupfer ; Marchisio, M. ; Porto, F. da ; Binda, L. ; Zanzi, L.: Structural Evaluation of Historic Walls and Columns in the Altes Museum in Berlin Using Non-Destructive Testing Methods. In: Roca, Lourenco (Hrsg.): *4th International Seminar on Structural Analysis of Historical Constructions, November 10-13, 2004, Padova, Italy. Proceedings*. Modena : Taylor Francis Group, London, 2004

[Mic62] Michejew, M.: *Grundlagen der Wärmeübertragung*. Leipzig : VEB Verlag Technik, 1962

[Mik06] Mikszas, K.: *Untersuchung und Konzepterstellung eines Marketerirebodens von 1768/1768 der Gebrüder Spindler aus dem Neuen Palais in Potsdam*, FH Potsdam, Diplomarbeit, 2006. – Arbeit lag nur in Auszügen vor

[MLC98] Maldague, X. ; Largouet, Y. ; Couturier, J. P.: A Study of Defect Depth Using Neural Networks in Pulsed Phase Thermography: Modeling, Noise, Experiments. In: *Rev. Gén. Therm.* 37 (1998), S. 704–707

[MM96] Maldague, X. ; Marinetti, S.: Pulsed Phase Thermography. In: *Appl. Physics* 79 (1996), Nr. 5, S. 2694–2698

[MO01] Maldague, J. X.and V. X.and Varis ; Okamoto, Y.: Nondestructive Testing Handbook - Infrared and Thermal Testing. In: Maldague, X. (Hrsg.): *Noncontact Sensors for Infrared and Thermal Testing*. American Society for Nondestructive Testing, 2001, Kapitel 8, S. 185 – 225

[MPWB99] Marinetti, S. ; Plotnikov, Y.A. ; Winfree, W. P. ; Bragiotti, A.: Pulse Phase Thermography for Defect Detection and Visualization. In: *SPIE* 3586 (1999), S. 230–238

[MZK04] Maldague, X. ; Zialdi, A. ; Klein, M.: Double Pulse Infrared Thermography. In: *NDTE international* (2004)

[ndt03] *International Symposium Non-Destructive Testing in Civil Engineering (NDT-CE) in Berlin, September 16.-19.* 2003

[NZ03] Neuhäusler, St. ; Zenzinger, G.: Optimierung der Impuls-Prüftechnik durch Laserscans und Blitzsequenzen. In: *Thermografie-Kolloquium 2003, Berichtsband*. Stuttgart, 2003

[Ori] OriginLab Corporation (Hrsg.): 6.0. OriginLab Corporation

[OT04] Oswald-Tranta, B.: Thermoinductive Investigations of Magnetic Materials for Surface Cracks. In: *QIRT Journal* 1 (2004), Nr. 1

[Pah91] Pahl, P.J. ; Fachgebiet Theoretische Methoden, TU-Berlin (Hrsg.): *Theoretische Methoden IV: Finite Element Methoden für Physikalische Aufgaben, Skript zur Vorlesung*. Fachgebiet Theoretische Methoden, TU-Berlin, 1991

[Pet04] Petryna, Y.: *Schädigung, Versagen und Zuverlässigkeit von Tragwerken des konstruktiven Ingenieurbaus*. Aachen : Shaker Verlag, 2004

[PFTV88] Press, W. H. ; Flannery, B.P. ; Teukolsky, S. A. ; Vetterling, W. T.: *Numerical Recipes in C, The Art of Scientific Computing*. Cambridge University Press, 1988

[qir06] *Proceedings of the 8th International Conference on Quantitative Infrared Thermography (QIRT)*. Padua, 2006

[RAM05] Röllig, M. ; Arndt, R. ; Maierhofer, Ch: Quantitative Untersuchung von Fehlstellen in Beton mit der Impuls-Thermografie und der Puls-Phasen-Thermografie. In: *Thermographie-Kolloquium, Berichtsband* Bd. 98. Stuttgart, 2005

[Rau06] Raupach, M.: Vorgehensweise bei der Untersuchung von Parkhäusern. In: *Bauwerksdiagnose 2006, Berichtsband* DGZfP, 2006

[Rea04] Read, R.: *Nachrichten- und Informationstechnik*. München : Pearson Studium, 2004

[RH03] Rieck, C. ; Hillemeier, B.: Detecting Voids Inside Ducts of Bonded Steel Tendons Using Impulse Thermography. In: *International Symposium Non-Destructive Testing in Civil Engineering (NDT-CE) in Berlin, Germany, September 16-19, 2003, Proceedings* DGZfP, 2003

[RZB04] Riegert, G. ; Zweschper, Th. ; Busse, G.: Lockin Thermography with Eddy Current Excitation. In: *DGZfP-Berichtsband:* 1 (2004), Nr. 1

[Sch82] Schickert, G.: Infrarotthermographie als Hilfsmittel bei bautechnischen Untersuchungen. In: *BAM Amts- und Mitteilungsblatt* 12 (1982), Nr. 4, S. 336–350

[Sch01] Schuchardt, G. (Hrsg.): *Der romanische Palas der Wartburg - Bauforschung an einer Welterbestätte*. Bd. 1. Regensburg : Wartburg Stiftung Eisenach, Verlag Schnell+Steiner, 2001

[Sch04] Schindel, S. ; ebs Automatisierte Thermographie und Systemtechnik GmbH (Hrsg.): *Thermographie in der Theorie und Praxis*. ebs Automatisierte Thermographie und Systemtechnik GmbH , 2004. – Quelle: www.ebs-thermography.de

[sfr06] *Structural Faults and Repair 2006, Int. Conference*. Edinburgh, 2006

[SK00] Schuster, N. ; Kolobrodov, V. G.: *Infrarotthermographie*. Berlin : Wiley-VCH, 2000

[SS86] Schickert, G. (Hrsg.) ; Schnitger, D. (Hrsg.) ; DGZfP (Veranst.): *Zerstörungsfreie Prüfung im Bauwesen; Tagungsbericht ZfPBau-Symposium 2. und 3. Oktober 1985, Berlin*. Berlin, 1986

[Sti01] Stimolo, M.: Praktische Anwendung der Thermografie im Straßenbau und für Abdichtungssysteme. In: *Thermografie-Kolloquium, Berichtsband*. Stuttgart, 2001

[Str05] Streicher, D.: Automatisierte Brückenuntersuchung mit kombinierten Verfahren. In: DAfStb/BAM (Hrsg.): *DAFStb-Fachtagung, 10.-11.03.2005* Bd. A25-A30, 2005

[STWW06] Schaurich, D. ; Taffe, A. ; Weritz, F. ; Wilsch, G.: Quantitative Determination of Chlorine and Sulphur Content in Building Materials by Laser-Induced Breakdown Spectroskopy. In: Forde, M.C. (Hrsg.): *Structural Faults and Repair 2006, Proceedings*, 2006

[thech] *ThermoSense - The Annual Infared Thermography Applications Conference*. Orlando, Jährlich . – Quelle: www.thermosense.org

[Tul04] Tuli, S.: Frequency-Modulated Wave Thermography for Non-Destructive Characterization. In: *Proceedings of the 7th International Conference on Quantitative Infrared Thermography (QIRT)*, 2004

[TW06] Taffe, A. ; Wiggenhauser, H.: Validierung von ZfP-Verfahren im Bauwesen. In: *Bauwerksdiagnose 2006, Berichtsband* DGZfP, 2006

[Uni] Universität Stuttgart, Institut für Kunsststoffprüfung (IKP) (Hrsg.): *Homepage IKP: www.ikp.de*. Universität Stuttgart, Institut für Kunsststoffprüfung (IKP)

[Vav04] Vavilov, V. ; Klujev, V.V. (Hrsg.): *Zerstörungsfreie Prüfung*. Bd. 5 (1): *Wärmeprüfung*. Moskau : Maschinostroenie, 2004. – Russisches Original, Übersetzung ins Deutsche durch Milman, B., BAM

[VB01] Vavilov, V. ; Burleigh, D.: Heat Transfer. In: Maldague, X. (Hrsg.): *Nondestructive Testing Handbook - Infrared and Thermal Testing*. 3. Auflage. American Society of Nondestructive Testing, 2001, Kapitel 2, Teile 1 bis 3, S. 53–75

[VG02] VDI-Gesellschaft (Hrsg.): *VDI-Wärmeatlas*. 9. Auflage. Berlin, Heidelberg : Springer-Verlag, 2002

[VKG97] Vavilov, V. ; Kauppinen, T. ; Grinzato, E.: Thermal Characterisation of Defects in Building Envelopes Using Long Square Pulse and Slow Thermal Wave Techniques. In: *Research Non-Destructive Evaluation* 9 (1997), S. 181–200

[VM99] Vavilov, V. ; Marinetti, S.: Pulsed Phase Thermography and Fourier-Analysis Thermal Tomography. In: *Russian Journal of Nondestructive Testing* 35 (1999), Nr. 2, S. 134–145

[VM00] Vallerand, S. ; Maldague, X.: Defect Characterization in Pulsed Thermography: a Statistical Method Compared with Kohonen and Perceptron Neural Networks. In: *NDT&E International* 33 (2000), Nr. 5, S. 307–315

[Vor02] Vortmeyer, D.: Strahlung technischer Oberflächen. In: VDI-Gesellschaft (Hrsg.): *VDI-Wärmeatlas*. 9. Berlin, Heidelberg : Springer Verlag, 2002, Kapitel Ka

[WAB+95] Weise, F. ; Arndt, D. ; Borchardt, K. ; Geyer, E. ; Henschen, J. ; Krause, M. ; Niedack-Nad, M.: Non-Destructive Testing Methods for Determining the Built-in Position of Anchoring Elements at Curtain Facades. In: Schickert, G. (Hrsg.) ; Wiggenhauser, H. (Hrsg.) ; DGZfP (Veranst.): *Proceedings of the Int. Symp. on Non-Destructive Testing in Civil Engineering (NDT-CE)* Bd. 1. Berlin, 1995, S. 867–876

[WAM+05a] Walther, A. ; Arndt, R. ; Maierhofer, Ch. ; Röllig, M. ; Scheel, H. ; Rieck, C. ; Hillemeier, B.: Ergebnisse des DFG-Forschungsprojektes „Struktur- und Feuchteuntersuchungen von Bauteil- und Bauwerksoberflächen mit der Impuls-Thermografie“. In: *Thermographie-Kolloquium, Stuttgart, Berichtsband*. Stuttgart, 2005

[WAM+05b] Weritz, F. ; Arndt, R. ; Maierhofer, Ch. ; Röllig, M. ; Wiggenhauser, H.: Investigation of Concrete Structures with Pulse Phase Thermography. In: *Materials and Structures* 38 (2005), S. 843–849

[WBM+03] Wedler, G. ; Brink, A. ; Maierhofer, Ch. ; Röllig, M. ; Weritz, F. ; Wiggenhauser, H.: Active Infrared Thermography in Civil Engineering - Quantitative Analysis by Numerical Simulation. In: *Symposium Non-Destructive Testing in Civil Engineering (NDT-CE) in Berlin, Germany, September 16.-19.09. 2003*. Berlin, 2003

[Wie06] Wiesler, A.: Thermografie in Tunnelbauwerken. In: *Bauwerksdiagnose 2006, Berichtsband*, DGZfP, 2006

[Wig91] Wiggenhauser, H.: Verbesserte Aussagefähigkeit der Infrarot-Thermographie durch digitale Bildverarbeitung. In: *2. Internationales ZfPBau-Symposium Berlin, Proceedings* Bd. 21 DGZfP, 1991, S. 268–275

[Wig06] Wiggenhauser, H. (Hrsg.) ; DGZfP (Veranst.): *Bauwerksdiagnose 2006, Berlin, Berichtsband*. 2006

[WKM04] Wendrich, A. ; Köpp, C. ; Maierhofer, Ch.: Errichtung eines großen Mauerwerksprobekörpers. In: *Dachtagung, Berichtsband*. Salzburg, 2004

[WLPZ96] Wyss, P. ; Lüthi, T. ; Primas, R. ; Zogmal, O.: Factors Affecting the Detectability of Voids by Infrared Thermography. In: *Proceedings of QIRT, Stuttgart 1996*. Pisa : Edizioni ETS, 1996, S. 227–232

[WM04] Weritz, F. ; Maierhofer, Ch.: Anwendung der Puls-Phasen-Thermografie zur Untersuchung von Betonbauteilen. In: Cziesielski, E (Hrsg.): *Bauphysikkalender 2004*. Berlin : Ernst & Sohn, 2004, Kapitel C1, Abschn. 2.2:, S. 329–333

[Wu96] Wu, M. Sc. D.: *Lockin-Thermographie für die zerstörungsfreie Werkstoffprüfung und Werkstoffcharakterisierung*, Universität Stuttgart, Dissertation, 1996

[WWB+03] Weritz, F. ; Wedler, G. ; Brink, A. ; Röllig, M. ; Maierhofer, Ch. ; Wiggenhauser, H.: Investigation of Concrete Structures with Pulse Phase Thermography. In:

International Symposium Non-Destructive Testing in Civil Engineering (NDT-CE), Berlin, 16.-19.09.2003, Proceedings. Berlin, 2003

[ZDB00] Zweschper, Th. ; Dillenz, A. ; Busse, G.: Inspection of Aerospace Structures with Ultrasound Lockin-Thermography. In: *WCNDT* (2000). – Quelle: http://www.ndt.net/article/wcndt00/papers/idn312/idn312.htm

[Zie84] Zienkiewicz, O. C.: *Methode der Finiten Elemente*. Wien, München : Carl Hanser Verlag, 1984

[ZWB98] Zweschper, Th. ; Wu, D. ; Busse, G.: Detection of Loose Rivets in Aeroplane Components Using Lockin-Thermography. In: Balageas, G. (Hrsg.) ; Busse, G. (Hrsg.) ; Carlomagno, G. M. (Hrsg.): *Quantitative infrared thermography (QIRT) 1998, Proceedings* Bd. 60, 1998 (Eurotherm), S. 161–166

Anhang A.

Machbarkeitsstudien und systematische Laboruntersuchungen

Erwärmungseinheiten

In Abbildung A.1 ist beispielhaft der Einfluss des Abstandes der periodischen Erwärmungseinheit bei 10 min Erwärmungszeit auf die Gleichmäßigkeit der Erwärmung an einem Probekörper von Typ I dargestellt [BMRW02]. Der dargestellte Abstand wurde zwischen 2(oben), 10 (Mitte) und 20 cm (unten) variiert. Dargestellt ist jeweils das Thermogramm sofort nach der Erwärmung (linke Spalte) sowie ein vertikaler Linienscan aus der Mitte des jeweiligen Thermogramms (rechte Spalte). Dabei wurden die Temperaturwerte der Nullbilder vor der Erwärmung abgezogen.

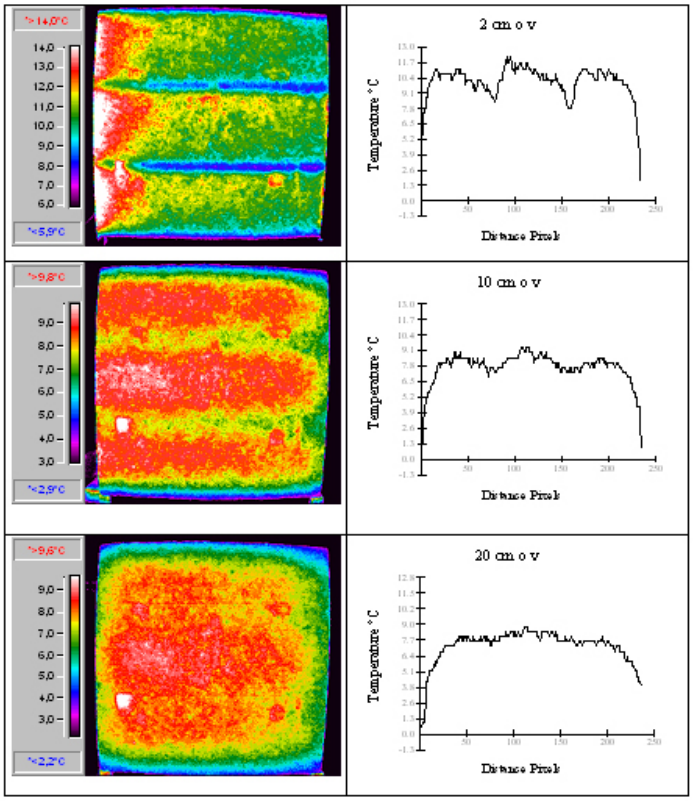


Abbildung A.1.: Einfluss des Abstandes des Heizstrahlers auf die Gleichmäßigkeit der Erwärmung [BMRW02], links: Thermogramme, rechts: Linienscans

Anhang B.

Quantitativer Ansatz der RAT

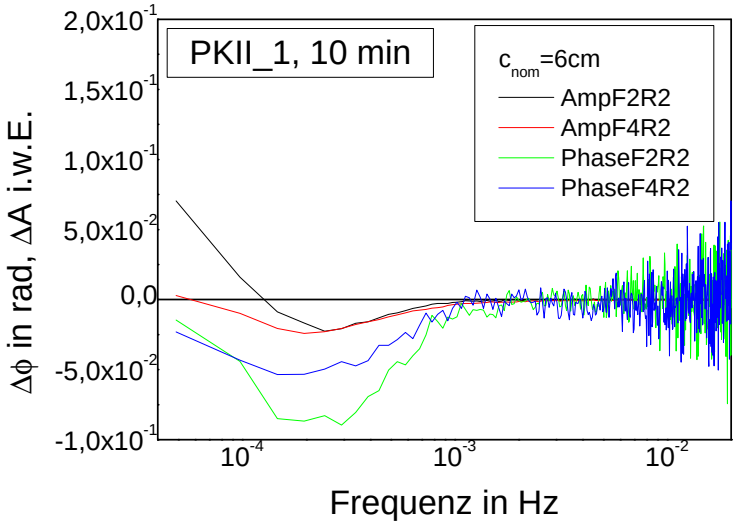


Abbildung B.1.: Amplituden- und Phasenkontrastkurven für 10 min Erwärmung von PK II_1 für 6 cm Betondeckung der Fehlstellen. Die Fehlstellen mit ${}_{nom}c = 10$ cm konnten nicht detektiert werden.

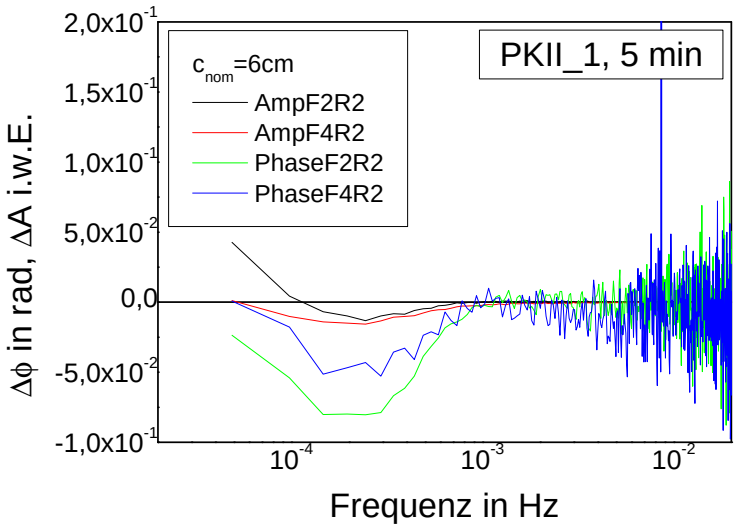


Abbildung B.2.: Amplituden- und Phasenkontrastkurven für 5 min Erwärmung von PK II_1 für 6 cm Betondeckung der Fehlstellen. Die Fehlstellen mit ${}_{nom}c = 10$ cm konnten nicht detektiert werden.

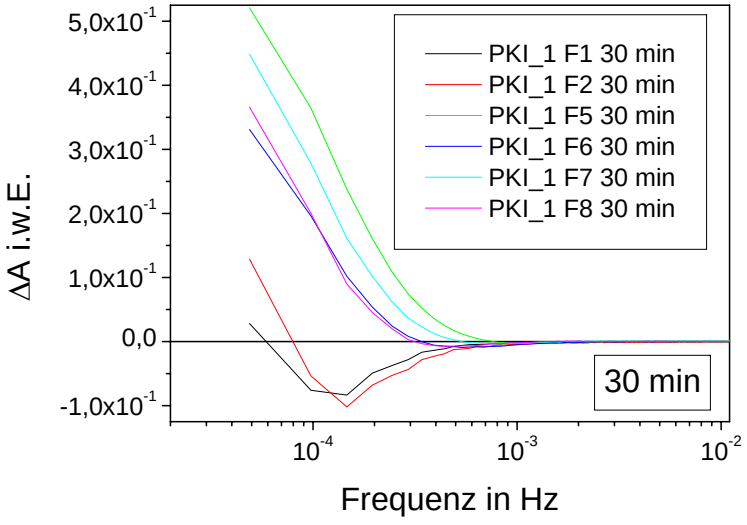


Abbildung B.3.: Amplitudenkontrastkurven für die Polystyrolfehlstellen F1, F2, F5 bis F8 von PK I_1 für 30 min Erwärmung mit der automatisierten Erwärmungseinheit aus Tabelle 4.1. Die Werte für F5 bis F8 sind in dem Maßstab nicht erkennbar, aber da quasi kein Rauschen vorliegt, eindeutig numerisch bestimmbar.

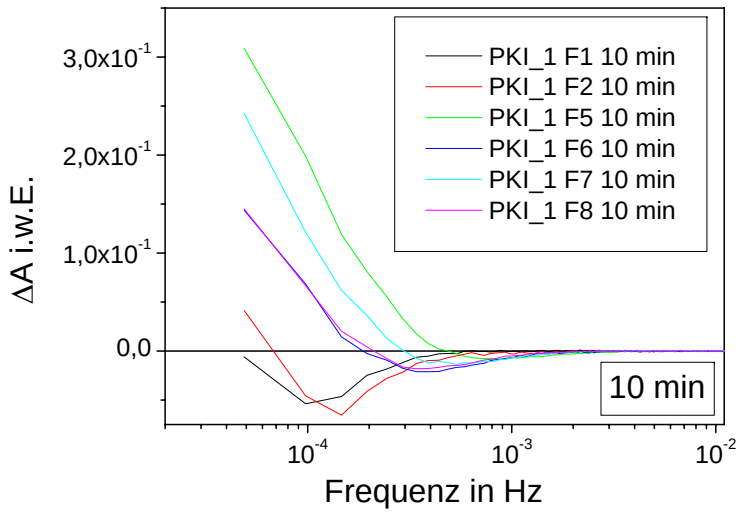


Abbildung B.4.: Amplitudenkontrastkurven für die Polystyrolfehlstellen F1, F2, F5 bis F8 von PK I_1 für 10 min Erwärmung mit der automatisierten Erwärmungseinheit aus Tabelle 4.1

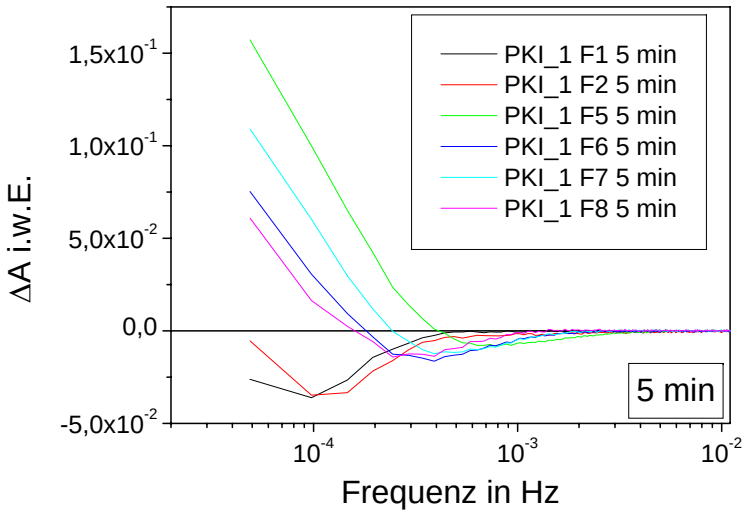


Abbildung B.5.: Amplituden-Kontrast-Kurven für die Polysterol-Fehlstellen F1, F2, F5 bis F8 von PK I_1 für 5 min Erwärmung mit der automatisierten Erwärmungseinheit aus Tab. 4.1

Anhang C.

Parameterstudien

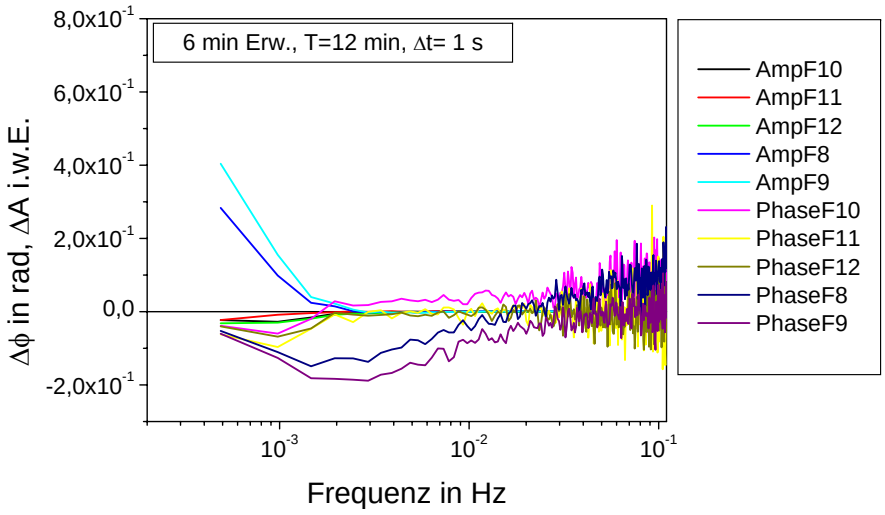


Abbildung C.1.: Phasen- und Amplitudenkontrastkurven von PK I_2 für Ablösungen zwischen Spaltklinker und Dickbettmörtel und Dickbettmörtel und Beton mit 6 min Erwärmung und 12 min Aufnahmezeit

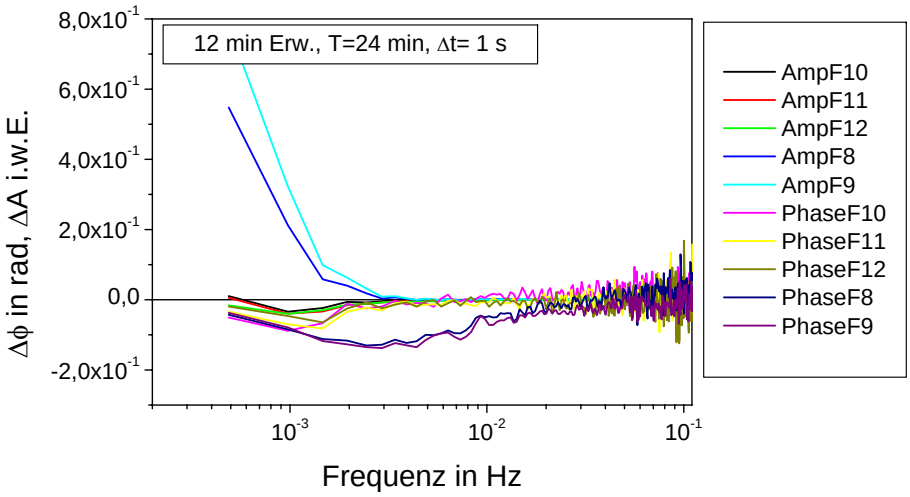


Abbildung C.2.: Phasen- und Amplitudenkontrastkurven von PK I_2 für Ablösungen zwischen Spaltklinker und Dickbettmörtel und Dickbettmörtel und Beton mit 12 min Erwärmung und 24 min Aufnahmezeit

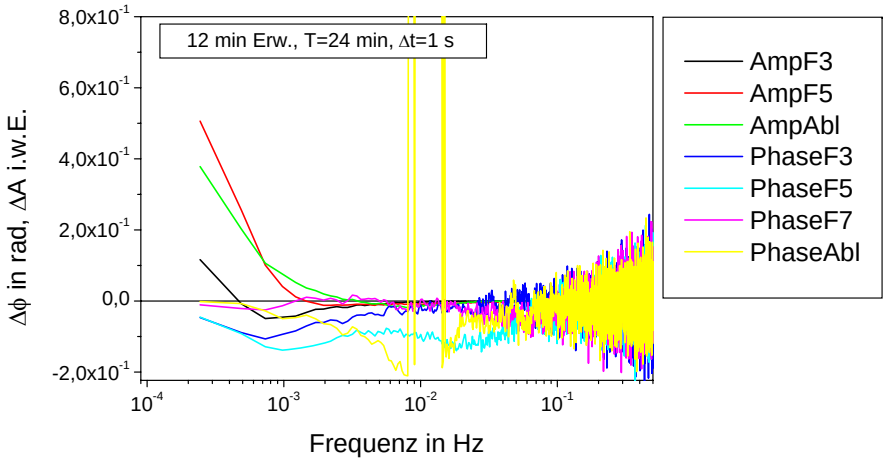


Abbildung C.3.: Amplituden- und Phasenkontrastkurven der Auswertung von PK I_4 mit 12 min Erwärmung und 24 min Aufnahme, $\Delta t = 1$ s

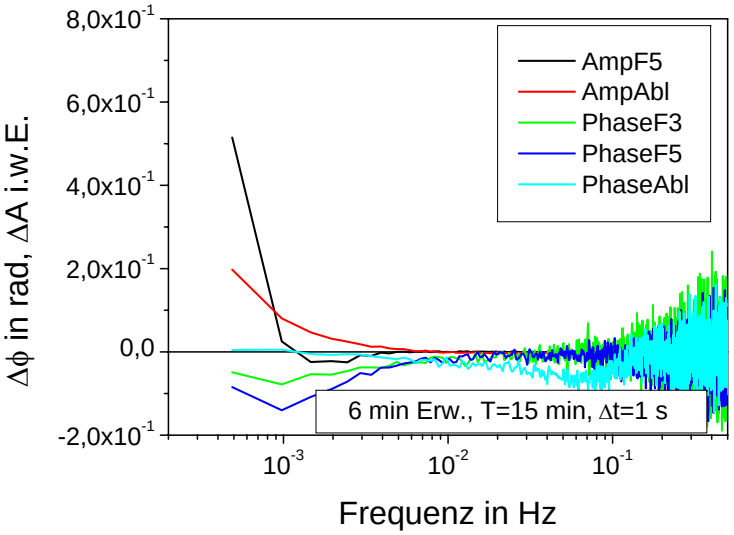


Abbildung C.4.: Amplituden- und Phasenkontrastkurven der Auswertung von PK I_4 mit 6 min Erwärmung und 15 min Aufnahme, $\Delta t = 1$ s

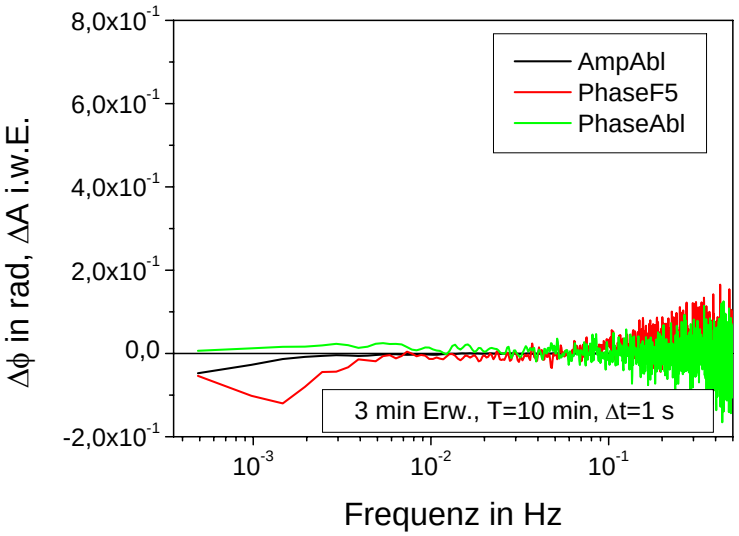


Abbildung C.5.: Amplituden- und Phasenkontrastkurven der Auswertung von PK I_4 mit 3 min Erwärmung und 10 min Aufnahme, $\Delta t = 1$ s

Anhang D.

Neues Palais

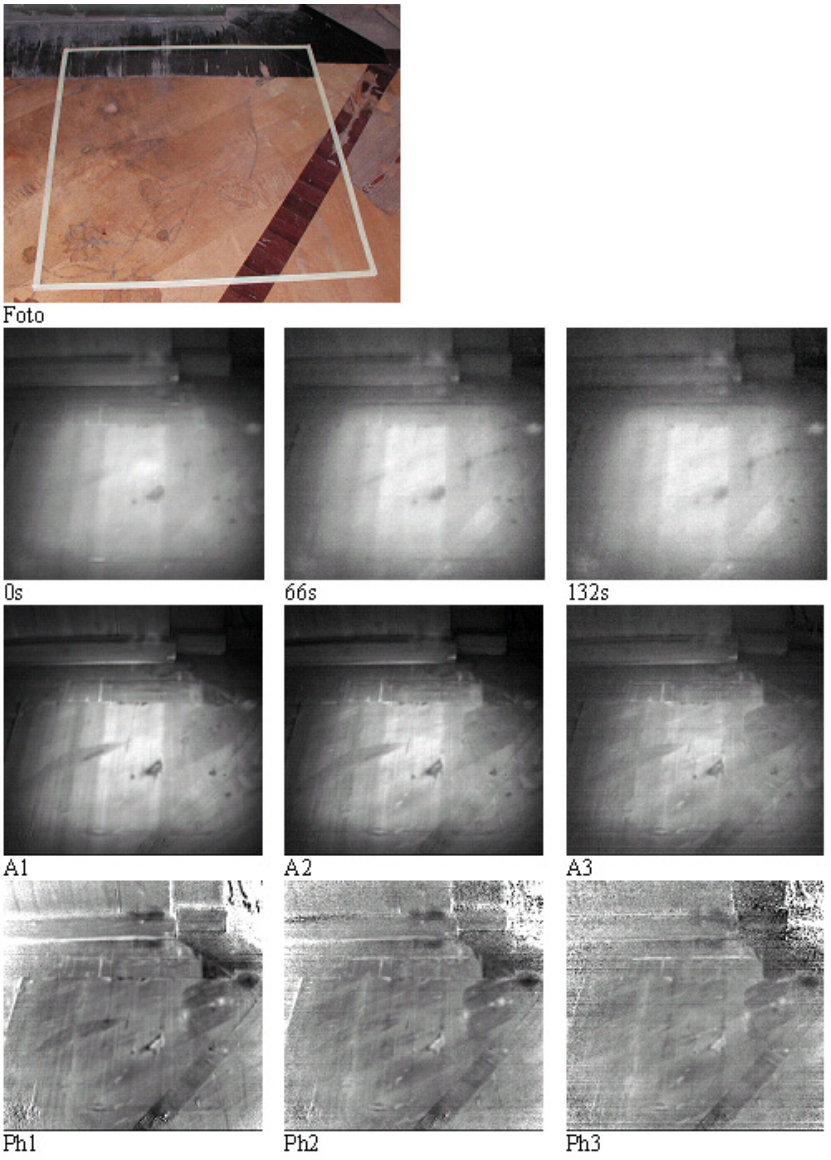


Abbildung D.1.: Ergebnisse Messfeld 1, links oben: Digitalbild von M1, obere Reihe: Thermogramme nach 0, 66 und 132 s, mittlere Reihe: 1., 2. und 3. Amplitudenbild, untere Reihe: 1., 2. und 3. Phasenbild

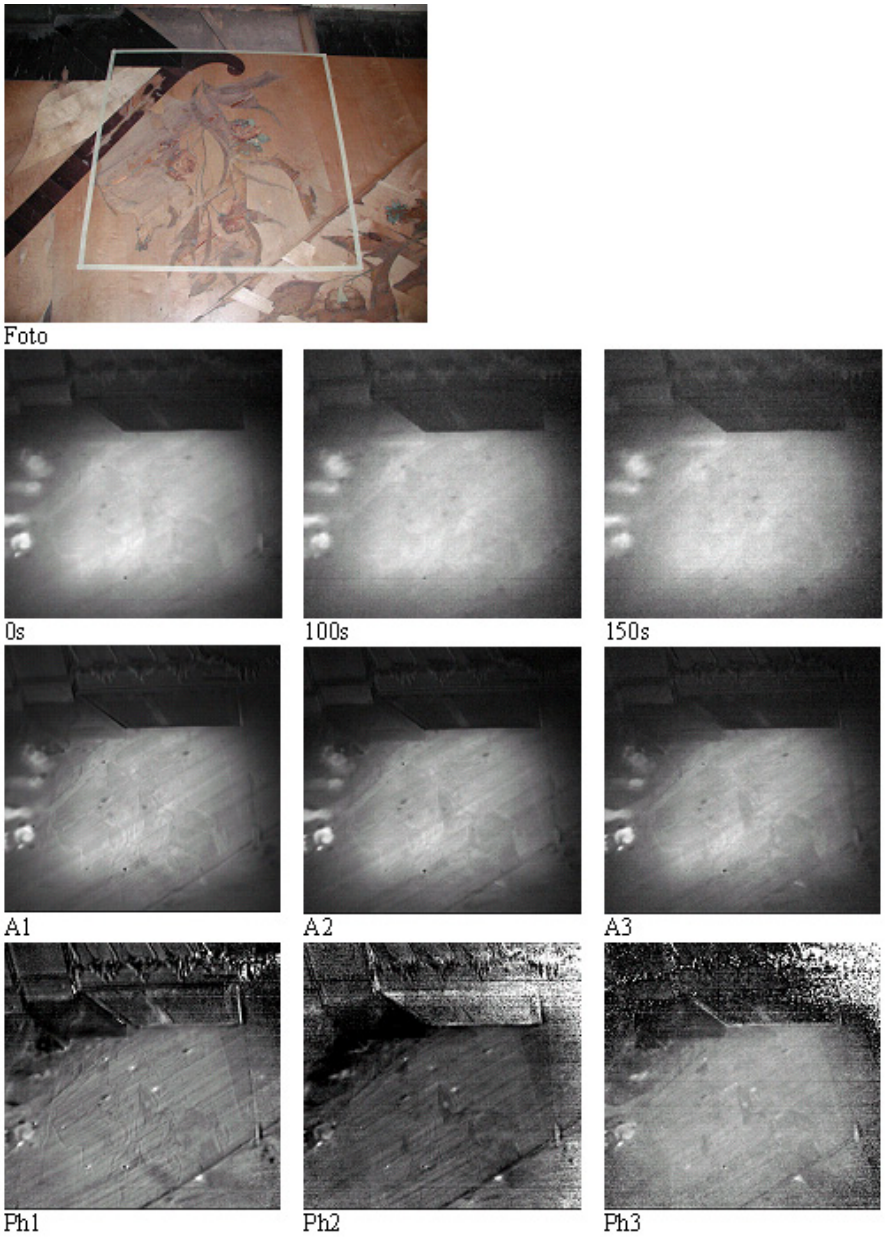


Abbildung D.2.: Ergebnisse Messfeld 2, links oben: Digitalbild von M2, obere Reihe: Thermogramme nach 0, 100 und 150 s, mittlere Reihe: 1., 2. und 3. Amplitudenbild, untere Reihe: 1., 2. und 3. Phasenbild

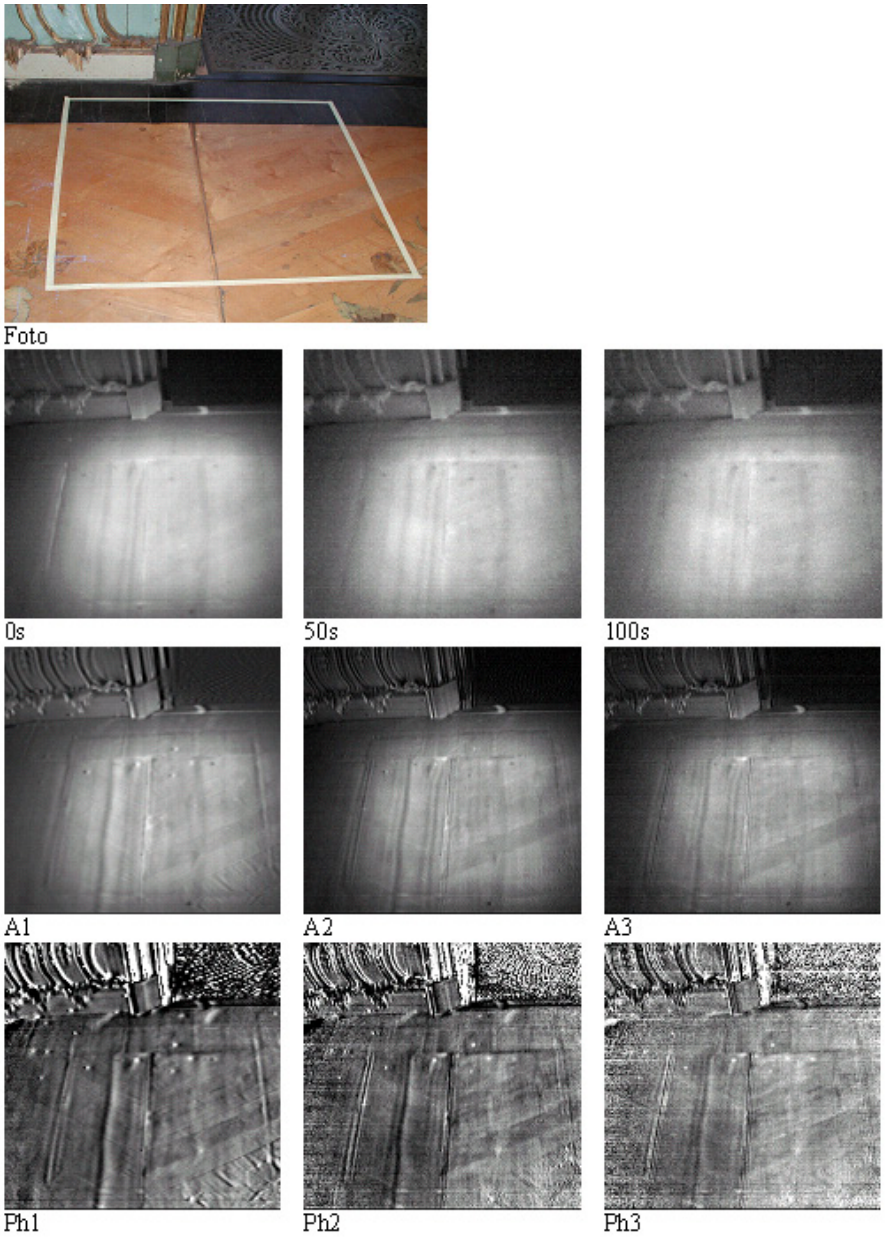


Abbildung D.3.: Ergebnisse Messfeld 3, links oben: Digitalbild von M3, obere Reihe: Thermogramme nach 0, 50 und 100 s, mittlere Reihe: 1., 2. und 3. Amplitudenbild, untere Reihe: 1., 2. und 3. Phasenbild

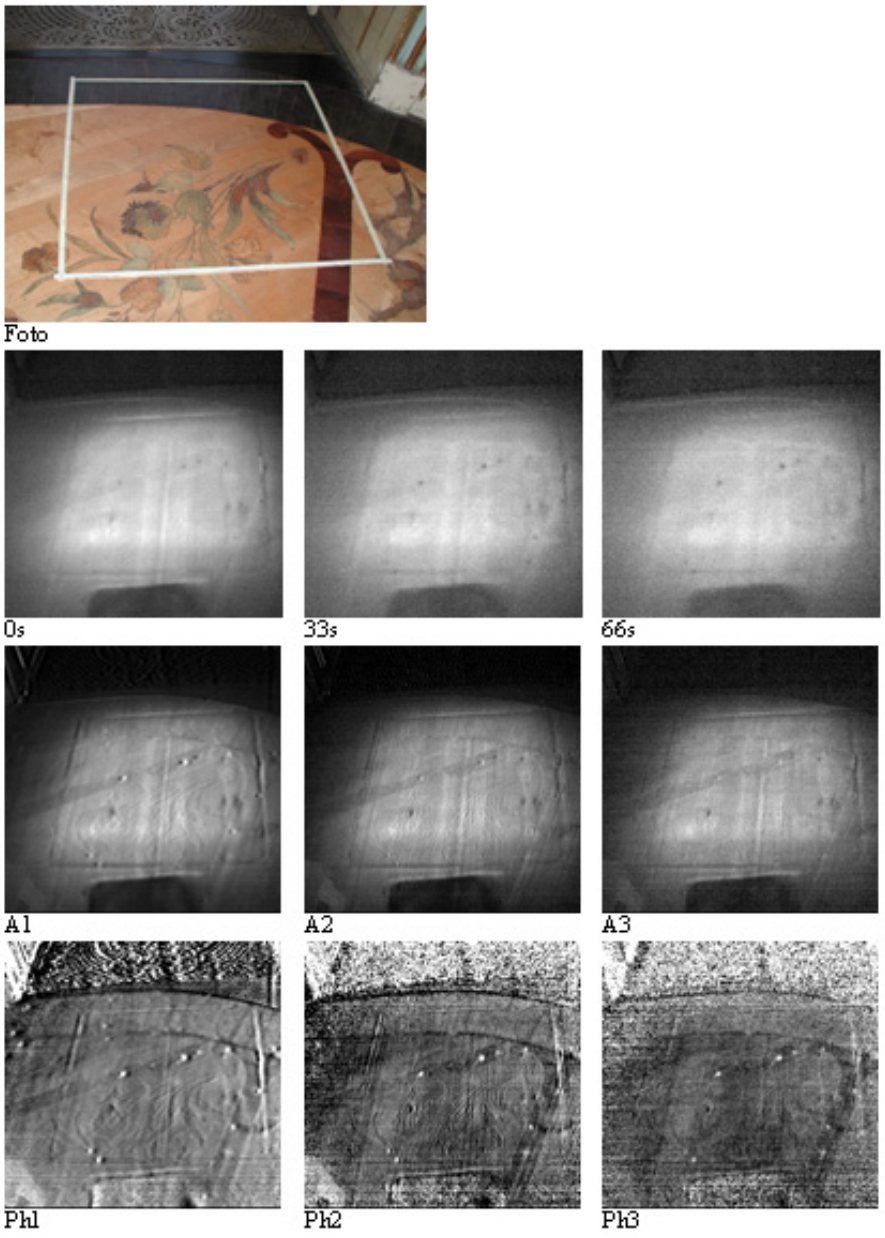


Abbildung D.4.: Ergebnisse Messfeld 4, links oben: Digitalbild von M4, obere Reihe: Thermogramme nach 0, 50 und 100 s, mittlere Reihe: 1., 2. und 3. Amplitudenbild, untere Reihe: 1., 2. und 3. Phasenbild