

Untersuchung solar angeregter Thermografie-
verfahren zur Materialeigenschaftsbestimmung
und zerstörungsfreien Prüfung an Bauwerken

Dissertation

zur Erlangung des Grades

des Doktors der Ingenieurwissenschaften

der Naturwissenschaftlich-Technischen Fakultät

der Universität des Saarlandes

von

Samuel Joseph Nathanael Klein

Saarbrücken

2022

Tag des Kolloquiums:	21.11.2022
Dekan:	Prof. Dr. Ludger Santen
Berichterstatter:	Prof. Dr. Hans-Georg Herrmann Prof. Dr. Christian Motz
Vorsitz:	Prof. Dr. Michael Vielhaber
Akad. Mitarbeiter:	Dr. Michael Roland

Abstract

Solar-loading thermography is a non-destructive testing technique that has attracted increased scientific attention in recent years. On the one hand, economic influences, such as the advent of increasingly inexpensive thermographic cameras, as well as technical innovations in the field of embedded systems and data processing are partly responsible for the increased attention paid to the subject.

Advantages of the method are the simple setup and the large testable surface area compared to laboratory-scale thermography, since in contrast to conventional active thermography the excitation energy is introduced into the test object by solar radiation and other environmental influences. This allows unique testing scenarios, but also creates unique challenges, which are investigated in this work. Analogies to active thermography are introduced for the evaluation of this thermographic technique, which can provide both qualitative and quantitative results.

This work describes the theoretical background, methods for measurement and evaluation, derives limitations and points out obstacles for practical implementation. Two methods are introduced and tested on different structures. These methods are used to determine surface heat capacity and thermal effusivity.

Kurzzusammenfassung

Die solar angeregte Thermografie für die zerstörungsfreie Prüfung ist ein Verfahren, welches in den vergangenen Jahren vermehrte wissenschaftliche Aufmerksamkeit erregte. Einerseits sind wirtschaftliche Einflüsse, wie das Aufkommen immer günstiger werdenden Thermografiekameras, als auch technische Innovationen im Bereich eingebetteter Systeme und Datenverarbeitung mitverantwortlich für die gestiegene Beachtung des Themenfeldes.

Vorteile des Verfahrens sind der einfache Aufbau und die, verglichen zur labormassstäblichen Thermografie, große prüfbare Oberfläche, da im Gegensatz zur konventionellen aktiven Thermografie die Anregungsenergie von der Sonneneinstrahlung und anderen Wettereinflüssen in den Prüfobjekt eingebracht wird. Dies ermöglicht einzigartige Prüfzenarien, aber auch Herausforderungen, die in dieser Arbeit untersucht werden. Für die Auswertung dieses Thermografieverfahrens werden Analogien zur aktiven Thermografie eingeführt, die sowohl qualitative, als auch quantitative Ergebnisse liefern können.

Die vorliegende Arbeit beschreibt den theoretischen Hintergrund, Methoden zur Messung und Auswertung, leitet Grenzen ab und zeigt Hemmnisse bei der praktischen Umsetzung auf. Es werden zwei Verfahren eingeführt und an verschiedenen Strukturen getestet. Diese Verfahren werden zur Bestimmung der Oberflächenwärmekapazität und des Wärmeeindringkoeffizienten eingesetzt und diskutiert.

Danksagung

Diese Arbeit wäre ohne die Unterstützung zahlreicher Begleiter nicht möglich gewesen. An erster Stelle steht Herr Professor Hans-Georg Herrmann, der mir einerseits durch das Anbieten eines interessanten Forschungsthemas, Arbeitsumgebung, sowie kollegialem Umgang hervorragende Voraussetzungen zum erfolgreichen Forschen gegeben hat und andererseits bei Fragen und Problemen mir stets zur Seite stand. Weiterhin möchte ich Dr. Motz und Dr. Bähre für die Begleitung und Begutachtung meiner Arbeit danken.

Niemand arbeitet im luftleeren Raum. So möchte ich mich an dieser Stelle für das äußerst freundschaftliche und hilfsbereite Kollegenumfeld bedanken. Sowohl Doktorandenmitstreiter, als auch Hilfswissenschaftler boten ein stets angenehmes Arbeitsklima. Sowohl fachlich als auch sozial standen meine Kollegen mir stets mit Rat und Tat zur Seite. Mein besonderer Dank an dieser Stelle gebührt Stephan Bechtel, Tobias Heib und Hendrik Jost, die mich durch Hilfe, Anregungen und einem stets offenen Ohr unterstützten.

Ebenso bedanke ich mich bei Josef Suchan und Professor Günther Hendorfer für exzellente wissenschaftliche Kommunikation.

Abschließend danke ich meiner Lebensgefährtin und meiner Mutter, die mich in Zeiten, in denen mir die Decke auf den Kopf zu fallen schien, stets aufbauten und mich mein Ziel nicht aus den Augen verlieren ließen.

Inhaltsverzeichnis

I	Abkürzungen und Bezeichnungen	4
II	Formelzeichen	5
1	Einleitung	6
1.1	Motivation und Darstellung der Problematik.....	6
1.2	Aufbau und Stand der Wissenschaft.....	8
1.3	Forschungsfragen dieser Arbeit	12
2	Theorie	13
2.1	Wärmetransportmechanismen	13
2.1.1	Wärmeleitung.....	13
2.1.2	Konvektion.....	14
2.1.3	Wärmestrahlung und Radiometer.....	15
2.2	Thermische Materialeigenschaften	20
2.2.1	Intensive thermische Materialeigenschaften.....	20
2.2.2	Extensive thermische Materialeigenschaften.....	22
2.3	Lock-in-Verfahren	22
2.4	Fourier-Transformation	23
2.5	Thermografie in der zerstörungsfreien Prüfung	25
2.5.1	Definition und atmosphärische Bedingungen.....	25
2.5.2	Thermografiekameras.....	28
2.5.3	Aktive und passive Thermografieverfahren	30
2.5.4	Lock-in-Thermografie.....	32
2.5.5	Impuls- und Stufenheizungsthermografie.....	33
2.5.6	Puls-Phasen-Thermografie (PPT – Pulsed-Phase Thermography)	35
2.5.7	Solar angeregte Thermografie (SLT – Solar-Loading Thermography)	36
3	Methoden und Materialien	38
3.1	Methoden zur Bestimmung von thermischen Materialeigenschaften .38	
3.1.1	Hintergrund und Wärmeleitungsgleichung	38
3.1.2	Wärmesimulationen	39
3.1.3	Analogien zur Lock-In-Thermografie	39
3.1.4	Analogien zum Stufenheizungsversuch	43
3.1.5	Linear Effusivity Fit.....	46
3.2	Ausrüstung und Versuchsaufbauten	50
3.2.1	Thermografiekameras.....	50
3.2.2	Pyranometer	52

3.2.3	Laborexperimente.....	53
3.2.4	Feldexperimente.....	57
3.3	Hard- und Software-Entwicklung	60
3.3.1	Systemkonzept	60
3.3.2	Softwarekonzept	63
3.3.3	Hardwarebeschreibung und Kernel-Treiber	66
3.3.4	Auswertungsstrategie	70
3.4	Zusammenfassung	71
4	Ergebnisse.....	72
4.1	Simulation und Laborexperimente.....	72
4.1.1	Wärmepunktsimulation.....	72
4.1.2	Laborexperiment	73
4.2	Fehlerbehaftetes Prüfobjekt	79
4.2.1	Laborexperimente.....	79
4.2.2	Vergleichsmessung Ultraschall	82
4.3	Feldexperimente	85
4.3.1	Ohne Referenz.....	85
4.3.2	Mit Referenzplatten	88
4.3.3	Mit Pyranometer.....	94
5	Diskussion der Ergebnisse	108
5.1	Einordnung in den Kontext der zerstörungsfreien Prüfung.....	108
5.2	Verbleibende Fehlerquellen und Lösungsansätze.....	111
5.2.1	Bolometerkamera	111
5.2.2	Atmosphäre	111
5.2.3	Konvektion, Strahlungswärmeabgabe und Verdunstungswärme.....	112
5.2.4	Emissivität und Albedo.....	113
5.3	Beantwortung der Forschungsfragen	114
6	Zusammenfassung und Ausblick.....	116
6.1	Zusammenfassung.....	116
6.2	Ausblick auf zukünftige Forschungsthemen.....	117
6.3	Verwertung und Einsatzgebiete.....	119
7	Literaturverzeichnis.....	121
8	Abbildungsverzeichnis	126
9	Tabellenverzeichnis.....	129

10 Anhang	130
10.1 Thermische Eigenschaften ausgewählter Materialien.....	130
10.2 Hardware	131
10.3 Quellcode	132
10.3.1 MATLAB	132
10.3.2 Bash.....	134
10.3.3 C.....	135
10.3.4 FPGA	138

I Abkürzungen und Bezeichnungen

ADC	Analog-Digital-Umsetzer	Analog to Digital Converter
DHI	Direktstrahlung horizontal	Direct Horizontal Irradiance
DNI	Direktnormalstrahlung	Direct Normal Irradiance
DVI	Direktstrahlung vertikal	Direct Vertical Irradiance
ENOB	Effektive Bittiefe	Effective Number Of Bits
FFT	Schnelle Fourier-Transformation	Fast Fourier Transform
FPGA		Field Programmable Gate Array
GHI	Globalstrahlung	Global Horizontal Irradiance
GNI		Global Normal Irradiance
GVI		Global Vertical Irradiance
IRT	Infrarotthermografie	Infrared Thermography
LEF		Linear Effusivity Fit
LIT	Lock-In-Thermografie	Lock-In-Thermography
LSB	Niederwertiges Bit	Least Significant Bit
LWIR	Langwelliges Infrarot	Long-wave Infrared
MWIR	Mittelwelliges Infrarot	Medium-wave Infrared
NETD	Thermische Empfindlichkeit	Noise Equivalent Temperature Difference
PGA	Einstellbarer Messverstärker	Programmable Gain Amplifier
PPT	Puls-Phasen-Thermografie	Pulsed-Phase-Thermography
RAM	Direktzugriffsspeicher	Random Access Memory
SCP	Dateiübertragungsmethode via SSH	Secure Copy
SFTP	Sichere Dateiübertragungsmethode	Secure File Transfer Protocol
SHT	Stufenheizungsthermografie	Step Heating Thermography
SLT	(saT) Solar angeregte Thermografie	Solar-loading Thermography
SPS	Messwerte pro Sekunde	Samples Per Second
SSD	Festkörperspeicher	Solid State Drive
SSH	Sicheres Terminal zur Fernwartung	Secure Shell
SWIR	Kurzwelliges Infrarot	Short-wave Infrared
ZfP	Zerstörungsfreie Prüfung	(NDT) Non-Destructive Testing

II Formelzeichen

	Bezeichnung	Englische Bezeichnung	Einheit
ρ	Dichte	Density	[kg/m ³]
c_P	Spezifische Wärmekapazität	Specific heat capacity	[J/kg]
λ	Wärmeleitfähigkeit	Thermal conductivity	[W/(m ² · K)]
T	Temperatur	Temperature	[K]
t	Zeit	Time	[s]
ω	Winkelfrequenz	Angular frequency	[s ⁻¹]
\vec{r}	Ortsvektor	Location vector	
Δ	Laplace-Operator	Laplace operator	
a	Temperaturleitfähigkeit	Thermal diffusivity	[m ² /s]
e	Wärmeeindringkoeffizient	Thermal effusivity	[J/(K · m ² · √s)]
c_S	Oberflächenwärmekapazität	Surface heat capacity	[J/(K · m ²)]
s	Wärmespeicherzahl	Volumetric heat capacity	[J/(K · m ³)]
μ	Thermische Diffusionslänge	Thermal diffusion length	[m]
λ_T	Wärmewellenlänge	Thermal wavelength	[m]
ε	Emissionsgrad	Emissivity	[1]
α	Albedo	Albedo	[1]
Q	Wärme(menge)	Heat	[J]
\dot{Q}	Wärmestrom	Heat flux	[W]
\dot{q}	Wärmestromdichte	Heat flux density	[W/m ²]

1 Einleitung

Dieses Kapitel gibt einen Überblick über die Motivation der Arbeit, inklusive Darstellung der Problematik, dem Ziel und dem Aufbau der Arbeit, sowie eine tabellarische Zusammenfassung der relevanten Literatur und des aktuellen Stands der Technik.

1.1 Motivation und Darstellung der Problematik

Mit der größeren Verfügbarkeit und den effektiv sinkenden Preisen von Thermografiekameras¹ hat sich die Thermografie in den letzten Jahren von einer selten genutzten Technik zu einer weit verbreiteten Untersuchungsmethode bei den zerstörungsfreien Prüfverfahren (ZfP) entfaltet. Die technische Entwicklung der Thermografiekameras wurde zu einem großen Teil durch die militärische Forschung ausgelöst. Mit dem Ende des Kalten Krieges wurde die hochempfindliche Infrarot (IR)-Technologie durch den Wegfall militärischer Geheimhaltungsinteressen weniger eingeschränkt und hält nun auch Einzug in den zivilen Markt. Neben Nachsichtanwendungen sind die dominierenden Anwendungen der Thermografie die Abbildung von Temperaturunterschieden im täglichen Leben (z.B. Wärmeverluste in Gebäuden), in der Industrie (z.B. Überwachung von Kraftwerken) und in der Biologie/Medizin (z.B. Hauttemperatur-Mapping in der Brustkrebsforschung) [1^{S. 1}].

Die Thermografie wird seit Anfang des zwanzigsten Jahrhunderts eingesetzt. Die erste Materialeigenschaftsbestimmung des Wärmeeindringkoeffizienten mittels Thermografie fand 1937 statt [2]. Seit 1959 wird die impulsangeregte Thermografie zur zerstörungsfreien Prüfung eingesetzt [3]. Mit dem Aufkommen von radiometrischen Kameras in den Sechzigern wurde der Grundstein für das Verfahren, wie es heute bekannt ist, gelegt. Fortschritte in der Datenverarbeitung sowie in der Lösung verschiedener, speziell auf den Prüfprozess ausgelegten Wärmeleitungsgleichungen machen die Thermografie zu einem eigenständigen, ausgereiften Unterbereich der zerstörungsfreien Prüfung [3].

Die vorliegende Arbeit stützt sich dabei vor allem auf den Teilbereich der „aktiven Thermografie“, wo eine künstliche, vom Prüfer gesteuerte Wärmequelle zur thermischen Anregung des Prüfobjekts dient. Variation der Anregungsquelle, Aufnahme- und Auswertungsmethoden führen zu verschiedenen Test-Szenarien und bilden die Vielfalt der Verfahren in der aktiven Thermografie.

¹ Einstiegsmodelle, wie die FLIR Lepton, kosten etwa 100€ (2021)

Bei der aktiven Thermografie muss mindestens so viel Wärmeenergie in das Prüfobjekt einbracht werden, dass ein gewünschter bzw. messbarer thermischer Kontrast entsteht. Ab einer gewissen geometrischen Ausdehnung des Prüfobjektes stellt die Logistik des Energieeintrags eine beträchtliche Herausforderung dar. Einen geometrisch nahezu unbegrenzten Wärmeeintrag kann die Sonnenstrahlung liefern. Der Kern dieser Arbeit umfasst die Untersuchung der „solar angeregten Thermografie“ (engl. *Solar-Loading Thermography*), bei der natürliche Wärmeeintragsphänomene als pseudo-aktive Wärmequelle genutzt werden.

Für die Anwendung der solar angeregten Thermographie ist es erforderlich, dass das Prüfobjekt hinreichende Wärmeeintragsvariation erfährt. Dies ist zum Beispiel der Fall für eine unter freiem Himmel stehende Mauer. Zur Erzeugung von für die Prüfung notwendigen Kontraste ist nicht immer direkte Sonneneinstrahlung nötig. Diese erhöht zwar die entstehenden Temperaturdifferenzen und damit einhergehenden Bildkontrast, jedoch sind andere Umwelteinflüsse unter bestimmten Bedingungen hinreichend [4].

Durch das Nutzen der Sonneneinstrahlung und anderen natürlichen Wärmequellen unterscheidet sich die solar angeregte Thermografie fundamental von der labormaßstäblichen aktiven Thermografie in ihrer Periodendauer und den Störeinflussfaktoren. Die Hauptkomponente der solaren Anregung liegt im 24h-Tageszyklus. Diese hohe Periodendauer führt zu einer vergleichsweise hohen thermischen Diffusionslänge, was wiederum eine hohe Prüftiefe ermöglicht.

Bei der solar angeregten Thermografie liegen die Herausforderungen vor allem in den nicht vernachlässigbaren Konvektions- und Wärmestrahlungsverlusten. Außerdem sind die natürlichen Wärmequellen und -senken schwer zu berechnen. Für eine quantitative Auswertung können sie durch weitere Messmittel abgeschätzt werden (Kapitel 3.1). Weiterhin bietet sich eine Korrektur basierend auf einem Kalibrierobjekt in der Szene an.

Die vorliegende Arbeit greift die Fragen der solar angeregten Thermografie nach Realisierbarkeit und Auflösungsvermögen auf (Kapitel 1.3), führt verschiedene, zur aktiven Thermographie analoge Methoden zu der aktiven Thermografie ein (Kapitel 3.1) und setzt diese experimentell um (Kapitel 4).

Verwandte Arbeit und zugrundeliegende Buchquellen finden sich in Kapitel 1.3.

1.2 Aufbau und Stand der Wissenschaft

Diese Arbeit gliedert sich in vier Teilbereiche. In der *Theorie* werden theoretische Grundlagen zum Verständnis der aufgeführten Algorithmen und Rechnungen vermittelt. Basierend darauf wird auf einzelne praxisübliche Auswertungs-Algorithmen der Thermografie eingegangen. Anschließend werden *Materialien und Methoden* beschrieben. Die notwendige Ausrüstung und die dazugehörigen Versuchsaufbauten werden im Detail vorgestellt. Außerdem werden methodische Ansätze zur Bestimmung von Materialeigenschaften erläutert. Im Anschluss werden die *Ergebnisse* visuell dargestellt und beschrieben, um abschließend in einer *Diskussion* betrachtet zu werden.

Die relevante Arbeit auf dem Teilgebiet lässt sich einteilen in direkt und indirekt verwandte Literatur. Dabei nutzt die direkt verwandte Literatur auch das Verfahren der solar angeregten Thermografie, wohingegen die indirekte Literatur lediglich durch Algorithmen und Zusammenhänge zur Auswertung beiträgt.

	Direkt verwandt	Indirekt verwandt
Lock-In-Ansatz	[5–7]	[1, 8]
Stufenheizungs-Ansatz	[4, 9, 10]	[11–14]
Grundlagen zur solar angeregten Thermografie	[1, 15–20]	

Garrido et al. [19] geben einen Überblick über die in der Infrastruktur relevanten Thermografiemethoden, sowie Grundlagen zur Thermografie selbst. Zusammenfassend sehen die Autoren großes Potential der Thermografie für die zerstörungsfreie Prüfung von Infrastruktur und „es wurde festgestellt, dass [die Thermografie] neben der Erkennung und Charakterisierung möglicher thermischer Ungängen einer Infrastruktur, kann [die Thermografie] auch die Eigenschaften der Materialien, aus denen die Struktur besteht, thermisch charakterisieren wie den Gesamtwärmeübergangskoeffizienten, um den tatsächlichen Energiebedarf eines Wohngebäudes abzuschätzen.“

Rosina und Robison [21] zeigen, dass die aktive und passive Infrarotthermografie für die Infrastrukturüberwachung von Wohngebäuden erfolgreich angewandt werden kann. Die Autoren zeigen vor allem wie Gebäude auf thermische Wettereinflüsse (wie einbrechende Kälte) passiv von innen reagieren. Sie erkennen so Wärmebrücken, die auf Materialeigenschaften

und Feuchtigkeit zurückzuführen sind. Die Autoren fokussierten ihre Arbeit auf nordamerikanische Holzständerbauwerke. Sie schlussfolgern, dass die passive Thermografie ein adäquates Mittel zur zerstörungsfreien Prüfung darstellt und dass „der aktive Ansatz am nützlichsten als eine zweite Ebene der Analyse“ ist.

Lerma et al. [9] stellen bereits 2011 Ergebnisse einer solar angeregten Thermografie-Untersuchung dar. Die Bezeichnung solar angeregte Thermografie wurde noch nicht eingeführt. Die Autoren zeigen eine Feuchtigkeitsanalyse einer Fassade, mittels vier Thermogrammen, die im zeitlichen Abstand einiger Stunden aufgenommen wurden. Die Daten wurden hierbei sowohl als Differenzbilder dargestellt, als auch einer Hauptkomponentenanalyse unterzogen. Die Ergebnisse der Arbeit zeigen eine Schätzung der Feuchtigkeit über einen bestimmten Teil einer Hausfassade. Die Autoren sehen das Verfahren als „sehr wertvolles Mittel, nicht nur zur Detektion von Feuchtigkeit, sondern ebenso Tiefenfehlern, wie Ablösungen und Leckagen“.

Fox et al. [10] zeigen 2015, dass die Auswertung von langen Zeitverläufen Defekte in Hauswänden aufzeigen kann, die unter Umständen bei der Betrachtung von Einzelbildern nicht auffallen. Die Autoren vermuten großes Potential bei der Ausbeutung dieser Methode, jedoch weisen sie ebenso darauf hin, dass die Methode große Abhängigkeit von den Umweltbedingungen zum Prüfzeitpunkt hat.

2015 führen Sfarra et al. [7] den Begriff „Solar Loading Thermography“ (solar angeregte Thermografie) ein und zeigen als erste Gruppe ein über mehrere Tage aufgezeichnete Reihe an Thermogrammen, die zu einem einzigen Thermogramm verrechnet worden sind. Dies wird von den Autoren begründet durch die Analogie der Sonne als periodische Anregungsquelle der Frequenz $1/24$ h. Wie Lerma et al. [9] stellen die Autoren Hauptkomponentenanalysen der gewonnenen Thermogramme als Ergebnis dar und sprechen nicht, wie in dieser Arbeit, von *Lock-In-Thermografie*. Die Autoren schließen mit dem Hinweis auf die Abhängigkeit von Wetterbedingungen ab und postulieren, dass „die Methode bei Messdauern von einem bis zu mehreren Tagen funktioniert“, ohne einen Nachweis zu erbringen

Ibarra-Castanedo et al. [6] beschreiben 2017 den theoretischen Hintergrund der thermischen Wellen, die auf thermisch dicke Objekte wirken und stellen die Zusammenhänge der Materialeigenschaften auf das Temperaturverhalten dar. Damit wird das Verfahren von den Autoren als quantitatives Verfahren eingeführt. Weiter beschreiben die Autoren das Verfahren (genauer, die Sonneneinstrahlungsleistung) zum ersten Mal als „Lock-In“-Verfahren, was daraufhin als Motivation zur quantitativen Betrachtung genutzt wird. Ebenso werden Paral-

len zur Puls-Phasen-Thermografie genannt und abschließend die Hauptkomponentenanalyse (wie bei vorangegangenen Veröffentlichungen genutzt) erläutert. Die Autoren stellen sowohl Temperaturverläufe über mehrere Tage als auch, als erstes, das Amplituden- und Phasenbild als Auswertungsmethode dar. Die Autoren schließen ab mit der Aussage, dass die Puls-Phasen-Thermografie und Hauptkomponentenanalyse geeignete Mittel zur „starken Erhöhung des thermischen Kontrasts“ darstellen, geben jedoch keine konkreten Anwendungsbeispiele zur Materialcharakterisierung. Die Autoren geben Aussicht auf große Prüftiefen, die durch die langen Anregungsperioden erreicht werden.

Tu et al. [5] zeigen 2021 weitere Auswertungsalgorithmen, die auf solar angeregt gewonnene Thermogramme angewandt werden. Konkret werden eine spezielle Form der Komponentenanalyse (MEEMD) und die Hauptkomponentenanalyse untersucht. Die Autoren zeigen eine „Erweiterung der konventionellen Hauptkomponentenanalyse“, mit derer die solar angeregte Thermografie „mehr Details erkennen kann“, ohne eine quantitative Bewertung vorzunehmen

Pozzer et al. [4] stellen 2021 die Ergebnisse einer sehr langen Thermografieüberwachung vor. Die Messdauer lag dabei bei einem Jahr. Die Autoren untersuchten einen speziell dafür hergestellten Betonblock, der mit Ungängen behaftet war und im Freien lag. Sie zeigen anhand von Tageszeitverläufen, dass sich an gewissen Tagen die Fehlstellen deutlich von den unversehrten Teilen des Betonblocks unterscheiden. Die Experimente wurden verglichen mit Finite Elemente Computersimulationen und zeigen gute Übereinstimmung. Abschließend geben die Autoren eine Übersicht über den gemessenen Temperaturkontrast, in Form einer heatmap, über das gesamte gemessene Jahr. Dieses zeigt deutlich, dass die Sommermonate einen höheren Kontrast bieten als die Wintertage. Ebenso werden stark beeinflussende Wetterphänomene, wie Regen oder Schnee herausgestellt. Außerdem wird eine Defektanalyse von stahlbewährtem Beton in Aussicht gestellt, jedoch nicht ausgeführt. Die Arbeit der Autoren liefert einen guten Überblick über den Unterschied der Jahreszeiten auf die zu erwartenden Kontraste gibt jedoch keine Auskunft über zu nutzende Algorithmen oder Vorgehensweisen für bestimmte Prüfaufgaben.

Diese Dissertationsschrift basiert auf den eigenen, vorangegangenen Veröffentlichungen:

Titel	Datum	Fokus	Nachweis
Estimating Thermal Material Properties Using Solar Loading Lock-in Thermography	03/2021	Lock-In-Analogie (Frequenzbereich)	[22]
Estimating Thermal Material Properties Using Step-Heating Thermography Methods in a Solar Loading Thermography Setup	08/2021	Stufenheizungs- Analogie (Zeitbereich)	[23]

Diese Arbeit greift diese Veröffentlichungen auf, vertieft den wissenschaftlichen Hintergrund, ergänzt und ordnet das Verfahren „solar angeregte Thermografie“ in den Kontext der zerstörungsfreien Prüfung ein. Hierbei wird das Verfahren in die zwei Auswertungsdomänen, Zeitbereichsauswertung und Frequenzbereichsauswertung unterteilt.

Bei der Frequenzbereichsauswertung werden gezielt Analogien zur Lock-In-Thermografie genutzt und deren Anwendbarkeit auf solar angeregt gewonnene Thermogramme untersucht. Die erste Veröffentlichung zeigt den Anwendungsfall: „Bestimmung des Wärmeeindringkoeffizienten“ mittels Lock-In-Thermografie.

Die zweite Veröffentlichung untersucht die Parallelen zur Stufenheizungsthermografie im Zeitbereich. Hierzu werden zufällige, stufenartige Wärme-Events in der solar angeregten Thermografie betrachtet. Auch hier wird der Anwendungsfall: „Bestimmung des Wärmeeindringkoeffizienten“ als Ziel der Arbeit gewählt. Beide Male werden bewusst quantitative Auswertungsziele gewählt, da diese nicht nur das Darstellen eines besonders hohen Kontrastes benötigen, sondern auch das Bewahren von physikalischen Zusammenhängen in den Berechnungsalgorithmen erfordern. Zudem ist die Nutzung der solar angeregten Thermografie zur Materialeigenschaftsbestimmung noch nicht in der Literatur beschrieben und zeigt damit einen Neuheitsgrad. Zwar wurden physikalische Beziehungen schon von anderen Autoren beschrieben, werden jedoch nicht durchgeführt.

Basierend auf den Recherchen werden folgende Forschungsfragen abgeleitet und formuliert.

1.3 Forschungsfragen dieser Arbeit

Forschungsfrage 1: Welche Untersuchungsformen können bei solar angeregter Thermografie angewandt werden, welche eignen sich in besonderem Maße?

Diese Frage befasst sich mit dem Auswertungsspektrum der solar angeregten Thermografie. Die Auswertung solar angeregt gewonnener Thermogramme mit ausgereiften Verfahren aus der aktiven Thermografie wird betrachtet. Zwei Analogien (Lock-In und Stufenheizung) werden in vorangegangenen Veröffentlichungen des Autors ausführlich dargestellt. Dazu mehr in Kapitel 1.4.

Forschungsfrage 2: Wie können Analogien zu Lock-In-Thermografie und Stufenheizungsthermografie auf solar angeregt gewonnene Thermogramme angewandt werden?

In dieser Forschungsfrage wird der Hypothese nachgegangen, dass Lock-In-Algorithmen, angewendet auf solar angeregt gewonnene Thermogramme, eine quantitative Auswertung ermöglichen. Dazu wird eine Reihe an Simulationen und Experimenten im Labor und Feld durchgeführt. Dabei wird die solar angeregte Thermografie weitergehend, als bisher in der Literatur, untersucht. Defizite des Verfahrens sollen erkannt und im theoretischen Framework aufgenommen werden.

Forschungsfrage 3: Wie ordnet sich die solar angeregte Thermografie in den Kontext der zerstörungsfreien Prüfung, insbesondere der verwandten, labormaßstäblichen Verfahren ein? Welche Grenzen der Anwendbarkeit ergeben sich bei realistischen Einsatzbedingungen?

Hier wird das Verfahren quantitativ mit den verwandten Verfahren (Stufenheizungsthermografie und Lock-In-Thermografie) verglichen und in den Kontext der ZfP eingeordnet. Das beinhaltet das Aufzeigen der Vor- und Nachteile des Verfahrens, sowie das Aufstellen von den Randbedingungen zum Einschätzen des Erfolges einer gewissen Prüfaufgabe.

2 Theorie

Dieses Kapitel stellt die theoretischen Grundkenntnisse vor, die als Voraussetzung für das weitere Vorgehen und Methoden gelten. Hierbei wird auf Wärmetransportmechanismen, besondere Verfahren, wie Lock-In und Fouriertransformation im Speziellen und die Thermografie in der ZfP eingegangen.

2.1 Wärmetransportmechanismen

Dieses Kapitel beschreibt die drei Wärmetransportmechanismen: Wärmeleitung, Konvektion und Wärmestrahlung. Die Phasenübergangs-Enthalpie (z.B. Verdampfungs-Enthalpie bzw. Verdunstungskühlung) wird als vierter Wärmetransportmechanismus genannt [16], jedoch von dieser Arbeit als eigenständiger Faktor ausgeschlossen. Die Verdampfungsenthalpie tritt im Kontext der solar angeregten Thermografie vor Allem in Form von Tau und Reif auf. Die quantitative Tau- und Reifbestimmung ist vornehmlich bei feuchtkaltem Klima relevant und stellt in bestimmten Räumen eine nicht zu unterschätzende Wärmequelle und – Senke dar. In dieser Arbeit wurden die Prüfobjekte und die Prüfbedingungen so gewählt, dass Tau und Reif mit hoher Sicherheit die Messergebnisse nicht beeinflussen, um so die Verdampfungsenthalpie als eigenständigen Faktor weitestgehend ausschließen zu können.

2.1.1 Wärmeleitung

Die Wärmeleitung, auch Konduktion, beschreibt das fundamentale Phänomen, bei dem Wärmeenergie ohne Stofftransport in Materialien diffundiert. Dieser Effekt wurde von Fourier im Anfang des 19ten Jahrhunderts beschrieben und ist die Basis der Wärmeleitungsgleichung (Diffusionsgleichung). Die übertragene Wärmemenge ist proportional zur Temperaturdifferenz und hängt von den Materialeigenschaften ab. Die inhomogene Wärmeleitungsgleichung bei konstanter Temperaturleitfähigkeit a lautet:

$$\frac{\partial}{\partial t} T(\vec{r}, t) - a \cdot \Delta T(\vec{r}, t) = f(\vec{r}, t) \quad (1)$$

Dabei gibt T die lokale Temperatur an, \vec{r} bezeichnet den Ortsvektor und a beschreibt die Temperaturleitfähigkeit (mehr dazu in Kapitel 2.2.1). Δ gibt den Laplaceoperator an. $f(\vec{r}, t)$

beschreibt lokale, Joule'sche Wärmequellen. Sind keine Joule'schen Wärmequellen vorhanden, so reduziert sich die inhomogene Wärmeleitungsgleichung zur homogenen Wärmeleitungsgleichung:

$$\frac{\partial}{\partial t}T(\vec{r}, t) - a \cdot \Delta T(\vec{r}, t) = 0 \quad (2)$$

$$\Delta T(\vec{r}, t) = \frac{1}{a} \frac{\partial}{\partial t}T(\vec{r}, t) \quad (3)$$

2.1.2 Konvektion

Die Konvektion beschreibt, im Gegensatz zur Konduktion, den Wärmefluss mit Stofftransport. Der Wärmeübergangskoeffizient h findet vor allem Anwendung, wo Festkörper an Fluide angrenzen (wie z.B. Wasser oder Luft). Dieser Faktor verbindet die Wärmeübertragungsmechanismen und gibt einen integralen Wert an, der die gesamte Wärmestromdichte pro Kelvin Temperaturunterschied repräsentiert.

Generell beschreibt Konvektion auch den Stoffaustausch, der nicht nur auf Wärmeübertragung beschränkt ist. In dieser Arbeit wird jedoch die Konvektion immer im Kontext der Wärmeübertragung genutzt. Ursache für die Konvektion ist die sogenannte Konvektionsströmung. Diese entsteht durch Wärmeunterschiede, die im Fluid Dichteunterschiede erzeugen, welche wiederum zur physikalischen Beschleunigung dessen führen.

Allgemein kann bei Konvektion zwischen freier Konvektion und erzwungener Konvektion unterschieden werden. Hierbei ist ausschlaggebend, ob die Fluidbewegung ausschließlich durch den Temperaturunterschied erzeugt wird (freie Konvektion) oder durch mechanische Hilfsmittel, wie Lüfter. Üblicherweise lassen sich durch Nutzen von erzwungener Konvektion höhere Wärmeübergangskoeffizienten als durch freie Konvektion erreichen. Dies wird z.B. bei der Kühlung von Computern genutzt. Der Wärmeübergangskoeffizient h ist ein experimentell bestimmter Wert, der die übertragene Wärmeleistung pro Fläche und Temperaturdifferenz angibt [$\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$]. Es existieren zudem theoretische Berechnungsformeln, die den Wärmeübergangskoeffizienten abschätzen können. Übliche Wärmeübergangskoeffizienten für die freie Konvektion in Luft sind $5 - 35 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ [16], je nach Geometrie und Oberflächenbeschaffenheit.

2.1.3 Wärmestrahlung und Radiometer

Die Wärmestrahlung beschreibt den Wärmeaustausch über Photonen, die von einer Materialoberfläche abgelöst werden. Die Wärmestrahlung ist ein makroskopisches Phänomen, bei dem die Strahlung an der Oberfläche eines Objekts im thermischen Gleichgewicht mit der Oberfläche selbst steht. Jeder reale Körper mit einer Temperatur über 0 K strahlt Wärmestrahlung aus [16 S. 539ff]. Die Strahlung, die ein Körper abgibt ist abhängig von seiner Temperatur und seiner Emissivität (Oberflächeneigenschaft). Die theoretische, maximale Menge thermischer Strahlung wird vom idealisierten „schwarzen Körper“ abgestrahlt. Die vom schwarzen Körper ausgesandte Strahlung wird auch als *Schwarzkörperstrahlung* bezeichnet. Das Plancksche Strahlungsgesetz für Wellenlängen gibt die spezifische spektrale Aussendung eines ideal schwarzen Körpers für eine bestimmte Wellenlänge λ an:

$$B(\lambda, T) = \frac{2hc^2}{\lambda^5} \frac{1}{e^{\frac{hc}{\lambda k_B T}} - 1} \quad (4)$$

$B(\lambda, T)$ gibt hierbei die spektrale Leistungsdichte pro Raumwinkel sr in Abhängigkeit der Temperatur T in $[W/(sr \cdot m^3)]$ an. Weiterhin gibt h das Plancksche Wirkungsquantum, k_B die Boltzmann-Konstante und c die Lichtgeschwindigkeit an.

Die gesamte abgestrahlte Leistung P eines Körpers, über eine Oberfläche der Größe A mit der Oberflächentemperatur T , kann über das Stefan-Boltzmann-Gesetz vereinfacht dargestellt werden zu:

$$P = \varepsilon(\lambda) \cdot \sigma AT^4 \quad (5)$$

Die Stefan-Boltzmann-Konstante σ ist eine Naturkonstante mit dem Wert:

$$\sigma \approx 5,67 \cdot 10^{-8} \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K}^4) \quad (6)$$

Die mit dem Gesetz beschriebene Leistung ist als Wärmeabgabeleistung nur dann zu sehen, wenn der Körper diese auch abgeben kann (z.B. ein Raumschiff im tiefen All). Genauer bedeutet das, dass unter üblichen Umständen sich Gegenstände immer in der Nähe zu anderen Gegenständen (mit Temperaturen über 0 K) befinden und sich die Gegenstände somit über Wärmestrahlung wechselseitig erwärmen. Außerdem verfügt jeder Körper über die Emissivität ε , die die Wärmestrahlung um einen bestimmten Faktor reduziert. Dieser Punkt wird nachfolgend in Absatz 2.2.1 erläutert.

In der Praxis ist oft nicht die absolute abgegebene Leistung interessant, sondern die tatsächliche Nettoleistung, also die Differenz aus ausgestrahlter und aufgenommener Strahlungsleistung, die bei homogener Umgebungstemperatur und idealer Emissivität der Umgebung ($\varepsilon_{amb} = 1$) wie folgt bestimmt werden kann:

$$P = \varepsilon(\lambda) \cdot \sigma A (T^4 - T_{amb}^4) \quad (7)$$

Diese Formel berücksichtigt die Umgebungstemperatur T_{amb} , die für die Berechnung für den gesamten Halbraum angenommen wird.

Zum Sichtfaktor:

Zur Bestimmung des Wärmeflusses zwischen zwei Oberflächen, kann der sogenannte Sichtfaktor genutzt werden. Dieser einheitenlose Faktor beschreibt den Anteil eines Strahlers 1, der von ihm ausgehend auf eine bestimmte Zielfläche 2 fällt, der so resultierende Sichtfaktor wird mit F_{12} bezeichnet.

Dabei wird der Sichtfaktor durch Raumwinkelintegration des photometrischen Grundgesetzes² gebildet und kann durch Integration der Flächen A_n bestimmt werden, oder über Integration der Raumwinkel Ω , was besonders bei der Betrachtung des Himmels die Berechnung vereinfacht:

$$F_{12} = \frac{1}{\pi \cdot A_1} \int_{A_1} \int_{A_2} \frac{1}{r^2} \cdot \cos(\beta_1) \cdot \cos(\beta_2) dA_1 dA_2 \quad (8)$$

$$= \frac{1}{\pi \cdot A_1} \int_{A_1} \int_{\Omega_2} \cos(\beta_1) d\Omega_2 dA_1 \quad (9)$$

Hierbei gibt r den Abstand der Flächen an und β_n die jeweiligen Einfallswinkel auf die Teilflächen. Zur Bestimmung des Wärmeflusses von A_1 nach A_2 wird, bei Annahme eines schwarzen Strahlers, die gesamte abgegebene Wärmeleistung P mit F_{12} multipliziert. Durch die Bestimmung der Sichtfaktoren kann der Strahlungshaushalt diffus strahlender Oberflächen bestimmt werden und so eine Abschätzung des Wärmeaustausches via Strahlung getätigt werden.

So ergeben sich die Sichtfaktoren einer senkrecht stehenden Wand, deren Halbraum genau zur Hälfte von Himmel und zur anderen Hälfte von Erdboden ausgefüllt wird zu jeweils $1/2$.

² Das photometrische Grundgesetz beschreibt den Austausch von Licht zwischen zwei Flächen

Der Wärmeaustausch findet also zur einen Hälfte mit einer Oberfläche der Temperatur des Erdbodens statt und zur anderen Hälfte mit einer „Fläche“ der Temperatur des Himmels.

Zur scheinbaren Temperatur des Himmels:

Terrestrische Oberflächen tauschen langwellige Infrarotstrahlung in alle Richtungen innerhalb einer Hemisphäre um ihren Azimut aus. Die Hemisphäre umfasst eine Vielzahl von thermischen Körpern vom Himmel bis zum Boden, außerdem feste Körper, wie z. B. Gebäude, die alle selbst unterschiedliche Intensitäten und Wellenlängen der Wärmestrahlung emittieren. Um diese komplexe Situation zu vereinfachen, wird die terrestrische Strahlung im Allgemeinen als ein durchschnittlicher Wärmeaustausch behandelt, der auf halbkugelförmigen Emissionsgraden und durchschnittlichen halbkugelförmigen Oberflächentemperaturen basiert. So wird eine scheinbare Temperatur des Himmels eingeführt, die der Temperatur, einer endlichen Oberfläche entspricht, die den gleichen Wärmeaustausch ausübt.

Der Austausch von langwelliger Infrarotstrahlung zwischen einer Oberfläche und dem Himmel hängt von der Exposition des Körpers ab, die durch den Neigungswinkel, das Ausmaß der Verdeckung, z. B. durch andere Gebäude, und die Himmelstemperatur beeinflusst werden kann (siehe vorheriger Abschnitt: Sichtfaktor). Siehe dazu Abbildung 1.

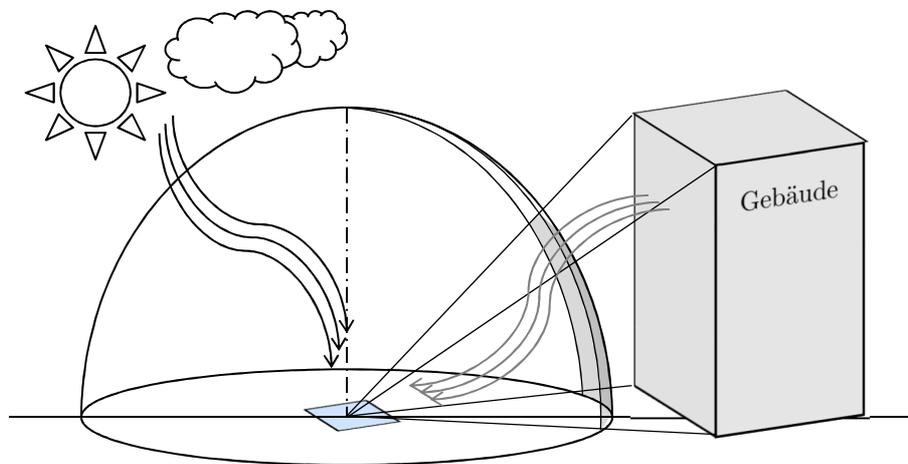


Abbildung 1: Schaubild zur Verdeutlichung des Sichtfaktors. Eine bestimmte Oberfläche (blau) befindet sich im Austausch von Wärmestrahlung in Form einer Halbkugel. Objekte im Sichtbereich (z.B. Gebäude) nehmen einen gewissen Teil dieser Halbkugel ein (hier in Grau hinterlegt).

Die scheinbare Temperatur des Weltraums nähert sich zwar dem absoluten Nullpunkt bei etwa 3 Kelvin (-270 °C) [24], jedoch enthält die Erdatmosphäre Gase, wie Stickstoff, Sauerstoff, Kohlendioxid, Wasserdampf in Wolken und andere Partikel, die ihrerseits langwellige Infrarotstrahlung aussenden und damit die scheinbare Temperatur etwas erhöhen. Goforth et al. [25] geben einen Überblick über die Komplexität der scheinbaren Himmelstemperaturbestimmung bezogen auf die Bewölkung.

Das bedeutet, dass die Himmelstemperatur an jedem beliebigen Ort von Faktoren wie der Höhe, der Luftfeuchtigkeit, der Wolkenbedeckung und dem Vorhandensein anderer Partikel in der Luft wie Staub oder Verschmutzung abhängt.

Unter wolkenlosen Bedingungen in der Wüste werden häufig Himmelstemperaturen von bis zu -50 °C gemessen, während in feuchten, bewölkten Bedingungen Himmelstemperaturen von fast 20 °C erreicht werden können. Generell liegt die durchschnittliche Himmelstemperatur bei ca. $0 - 15\text{ °C}$ [26].

Eine Methode messtechnisch die atmosphärische Gegenstrahlungsdichte³ zu bestimmen bietet das Pyrgeometer. Dieses misst die eintreffende Strahlungsleistung (Irradiation), ist jedoch mit einem Filter ausgestattet, welcher explizit die Sonneneinstrahlung (Insolation) ausschließen soll.

Das Gegenstück zum Pyrgeometer ist das Pyranometer, welches die Insolation des gesamten Himmels misst. Wird nur die Strahlungsdichte der Sonne selbst und nicht des gesamten Himmels gemessen, so bezeichnet man die Messapparatur als Pyrheliometer. Zusammengefasst sind die vorgestellten Arten der Radiometer in Tabelle 1.

³ Die von der Atmosphäre ausgesandte *Wärmestrahlung* (IR), die wieder auf die Erde fällt

Tabelle 1: Übersicht gängiger Radiometerarten

Radiometer	Messbereich	Anwendung
Pyr-geo-meter	Mittel- bis Langwelliges Infrarot (4 μm +))	Messung der atmosphärischen Gegenstrahlung, durch gezieltes Filtern des Insolationswellenlängen-Bereiches. Auch DHI – Diffuse Horizontal Irradiance bezeichnet. Stellt nur den Strahlungsanteil der Atmosphäre dar.
Pyr-ano-meter	Kurzwelliges Infrarot (SWIR) und sichtbares Licht	Messung der Globalstrahlung, gesamte Bestrahlungsdichte der Sonne, die auf die Erde trifft (GHI – Global Horizontal Irradiance, bei horizontaler Position, GNI – Global Normal Irradiance, bei Sonnenpositionstracking). Diese Messgröße wird z.B. zur Effizienzbestimmung von Photovoltaikanlagen genutzt.
Pyr-helio-meter	Kurzwelliges Infrarot (SWIR) und sichtbares Licht	Messung der Bestrahlungsstärke, die ausschließlich von der Sonne kommt (DNI – Direct Normal Insolation). Der Aufbau des Pyrheilometers verhindert, dass der Himmel das Sensorelement bestrahlen kann.

2.2 Thermische Materialeigenschaften

Dieses Kapitel beschreibt die physikalischen Materialeigenschaften, die im Zusammenhang mit der Temperatur stehen und relevant für die vorliegende Arbeit sind.

Zu unterscheiden sind generell materialspezifische Kennwerte, die Eigenschaften des Bulk-Materials darstellen und effektive oder scheinbare Kennwerte, die zum Beispiel von der Geometrie oder dem Messaufbau abhängen.

Als Beispiel hierzu dient der Unterschied der Wärmeleitfähigkeit (spezifische Materialeigenschaft) zu dem Wärmeleitwert (tatsächlich, experimentell bestimmter Wert). Hierbei ist die Wärmeleitfähigkeit nicht abhängig von extrinsischen Bedingungen, sondern eine Konstante (oder Funktion verschiedener Faktoren) des Materials selbst. Der Wärmeleitwert hingegen $[\text{W}/\text{K}]$ ist ein experimentelles Maß, welches Aussage über den vorliegenden experimentellen Aufbau und dessen Eigenschaften gibt. Oft sind Experimente so ausgelegt, dass mit minimalem systematischem Fehler von Messwert auf Materialeigenschaft geschlossen werden kann.

2.2.1 Intensive thermische Materialeigenschaften

Zu den intensiven thermodynamischen Materialeigenschaften gehören:

- Die spezifische Wärmekapazität c_P $[\text{J}/(\text{K} \cdot \text{kg})]$
- Die Wärmeleitfähigkeit λ $[\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})]$
- Die Dichte ρ $[\text{kg}/\text{m}^3]$
- Die Temperatur T $[\text{K}]$

Aus den drei oberen Eigenschaften lassen sich abgeleitete Materialeigenschaften bilden, die je nach experimentellem Aufbau vorteilhaft bestimmbar sind und beispielsweise bei der Lösung der Wärmeleitungsgleichung erscheinen.

Zu den, in dieser Arbeit relevanten, abgeleiteten Eigenschaften gehören:

- Der Wärmeeindringkoeffizient $e = \sqrt{\lambda c_P \rho}$ $[\text{J}/(\text{K} \cdot \text{m}^2 \cdot \sqrt{\text{s}})]$
- Die Temperaturleitfähigkeit $a = \lambda/(\rho \cdot c_P)$ $[\text{m}^2/\text{s}]$
- Die thermische Diffusionslänge $\mu = \sqrt{2a/\omega}$ $[\text{m}]$
- Die Wärmewellenlänge $\lambda_T = 2\pi \cdot \mu$ $[\text{m}]$
- Die Wärmespeicherszahl $s = \rho \cdot c_P$ $[\text{J}/(\text{K} \cdot \text{m}^3)]$

Die Emissivität ε ist, im Gegensatz zu den oben genannten Eigenschaften, eine Oberflächeneigenschaft, hauptsächlich abhängig von der betrachteten Wellenlänge λ ist:

- Die Emissivität $\varepsilon(\lambda)$ [1]

Zum Wärmeeindringkoeffizienten

Der Wärmeeindringkoeffizient (auch Effusivität) steht unter anderem im Zusammenhang mit der Kontakttemperatur zweier Materialien unterschiedlicher Temperatur⁴. Außerdem bestimmt dieser bei thermisch dicken Materialien die Temperaturamplitude bei periodischer Wärmeanregung, sowie beim Stufenheizungsversuch. Dazu mehr in Kapitel 2.5.5 und 3.1.

Der Wärmeeindringkoeffizient (engl. Thermal effusivity oder thermal inertia) ist zudem die Wurzel aus der seltener genutzten Wärmeträgheit, welche in Verbindung mit der „Reaktionsgeschwindigkeit“ der Oberfläche auf einen bestimmten Wärmefluss steht.

$$\begin{aligned} F &= e^2 \\ &= \lambda \rho c_P \end{aligned} \quad (10)$$

Zur thermischen Diffusionslänge μ und der Wärmewellenlänge λ_T

Die Diffusionslänge gibt die Tiefe an, bis zu welcher eine thermische Welle der Frequenz ω in ihrer Amplitude um den Faktor $e^{-1} = 0.37$ gesunken ist. Die Wärmewellenlänge ist eng verwandt mit der Diffusionslänge und gibt die Distanz an, bis zu welcher eine Phasenverschiebung von 2π in Tiefenrichtung durchschritten wird. Die Wärmewellenlänge kann, ebenso wie die Diffusionslänge als Entscheidungsmaß gelten für die scheinbare thermische Dicke [27]⁵.

Zur Emissivität ε

Die Emissivität (auch Emissionsgrad) ist eine Oberflächeneigenschaft, die angibt, wie viel Wärmestrahlung ein Objekt, im Vergleich zum idealen schwarzen Strahler⁶ abgibt und aufnimmt (Grauer Strahler). Die Emissivität ist ein einheitenloser Faktor im Bereich 0 bis 1. Ist die Emissivität exakt 1, dann verhält sich das Objekt wie der ideale schwarze Strahler, bei

⁴ Die instantane Kontakttemperatur T_K zweier Materialien der Temperatur $T_{1,2}$ bestimmt sich durch ihre Wärmeeindringkoeffizienten e_1 und e_2 : $T_K = (e_1 T_1 + e_2 T_2) / (e_1 + e_2)$

⁵ Thermisch dick mit Dicke $d \gg \mu$ und thermisch dünn mit $d \ll \mu$

⁶ Ein theoretischer, idealisierter Körper der die gesamte Schwarzkörperstrahlung aussendet

der Emissivität 0 gibt das Objekt keine Wärmestrahlung ab und nimmt keine auf (idealer Reflektor).

Die Emissivität von realen Objekten ist, unter anderem, abhängig von der betrachteten Wellenlänge λ und der aktuellen Oberflächentemperatur T .

Typische Werte der Emissivität sind 0,95 für sehr hohe Abstrahleigenschaften („schwarze“ Farbe) und 0,05 für sehr schlechte Abstrahleigenschaften (poliertes Metall, sehr weiße Farbe) [16^{S. 594}]. Die Emissivität ist eine kritische Oberflächeneigenschaft, die für die Thermografie von hoher Bedeutung ist. Crisóstomo und Pitarma [28] zeigen die Wichtigkeit von Emissivitätskorrektur bei der thermografischen Überwachung von Holzstrukturen.

Zur Wärmespeicherzahl s

Die Wärmespeicherzahl ist das Produkt aus spezifischer Wärmekapazität und der Dichte eines Materials. Sie gibt das Vermögen eines bestimmten Volumens an, Wärme zu speichern. Im Englischen wird sie deshalb als „volumetrische Wärmekapazität“ (*Volumetric heat capacity*) bezeichnet. In dieser Arbeit findet sich an vielen Stellen das Produkt aus spezifischer Wärmekapazität und der Dichte, es wird jedoch absichtlich auf die großzügige Nutzung der Wärmespeicherzahl verzichtet, um den Zusammenhang zu den in der Literatur genutzten Größen darzustellen (Wertetabellen geben häufig die spezifische Wärmekapazität und Dichte separat an).

2.2.2 Extensive thermische Materialeigenschaften

Die extensiven Eigenschaften, wie zum Beispiel die Wärmekapazität C [J/K], oder der Wärmewiderstand R_{th} [K/W] sind abhängig von der Geometrie des Objektes. Sie setzen sich aus einer intensiven und einer oder mehreren geometrischen Größen zusammen und dienen unter anderem zum Berechnen von absoluten Energiemengen oder Temperaturänderungen.

2.3 Lock-in-Verfahren

Das Lock-In-Verfahren ist ein aus der elektrischen Messtechnik entstandenes Verfahren, das einen *phasenempfindlichen Gleichrichter* darstellt. Es wurde entwickelt, um kleine, stark durch Rauschen verzerrte Signale in Amplitude und Phasenwinkel zu einem vorher generierten periodischen Referenzsignals zu bestimmen.

Dazu wird das Messsignal mit einer künstlich erzeugten, phasenverschiebbaren Schwingung multipliziert (*Phasendetektion*). Das resultierende Signal enthält sowohl Summen- als

auch Differenzfrequenzen, wobei die Summenfrequenzen im Anschluss durch ein dafür ausgelegtes Tiefpassfilter vom Signal entfernt werden. Das Resultat dieses Verfahrens ist eine Gleichspannung, die proportional zur Amplitude der im Messsignal enthaltenen entsprechenden Schwingung ist. Damit stellt der Lock-In-Verstärker ein sehr schmales, mischendes Bandpassfilter dar. Ein tieferen Einblick in Funktionsweise, Historie und State-of-the-Art der Lock-In-Verstärker gibt Zurich Instruments AG [29].

Das Lock-In-Verfahren kann analog und digital implementiert werden. Diese Verstärkertopologie ist ein fester Bestandteil der Elektronik und Funktechnik und ist in vielen technischen Anwendungen integriert⁷. Die Berechnung des Lock-In-Verfahrens eines Eingangssignals $u_{in}(t)$ mit einem Referenzsignal der Frequenz ω_{ref} und Phase φ lautet:

$$u_{LI} = \frac{1}{t_{int}} \int_{t_{int}} u_{in}(t) \cdot \sin(\omega_{ref} \cdot t + \varphi) dt \quad (11)$$

Wird über ein ganzzahliges Vielfaches der Referenzzeit $1/f_{ref}$ oder sehr lange integriert, dann ergibt sich die Ausgangsspannung zu:

$$u_{LI} \propto u_{in} \cdot \cos(\Delta\varphi) \quad (12)$$

Dabei gibt $\Delta\varphi$ die Phasenverschiebung des Referenzsignals zur Phase der entsprechenden Frequenz im Eingangssignal an. Da die Referenzphase einen großen Einfluss auf das Messergebnis hat, werden bei der analogen Lock-In-Verstärkung „Dual-Phase“-Lock-In-Verstärker genutzt, die zwei um 90° zueinander verschobene Referenzspannungen erzeugen, um unabhängig von der Eingangssignal-Phase die Amplitude korrekt zu ermitteln.

Das „Dual-Phase“-Verfahren multipliziert dadurch, de facto, mit einem komplexen Träger $\exp(-j\omega_{ref} \cdot t)$ und führt damit dazu, dass das Dual-Phase-Lock-In-Verfahren effektiv mit einer Fourier-Transformation abgebildet werden kann.

2.4 Fourier-Transformation

Die Fourier-Transformation ist eine mathematische Transformationsvorschrift, die dazu genutzt wird Signale $f(t)$ vom Zeitbereich (seltener auch Ortsbereich) in den (zeitlichen oder räumlichen) Frequenzbereich $F(\omega)$ zu überführen.

⁷ Z.B. Chopper-Verstärker, Homodyn-/Direktempfänger

Die Fourier-Transformation wird beschrieben durch:

$$\mathcal{F}\{f(t)\} = F(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} f(t) \cdot e^{-j\omega t} dt \quad (13)$$

Die Fourier-Transformation lässt sich ebenfalls auf diskrete Zeitreihendaten x_n anwenden, was in der digitalen Signalverarbeitung große Anwendung und Bedeutung findet. Der bekannteste Algorithmus und de facto Standard, zur Berechnung der diskreten Fourier-Transformation (DFT) ist die *Schnelle Fourier-Transformation* (FFT – engl. Fast Fourier Transform). Die diskrete Fourier-Transformation einer Reihe von N Punkten ist definiert als:

$$\mathcal{F}\{x(n)\} = X_k = \sum_{n=0}^{N-1} x_n \cdot e^{-j2\pi k \frac{n}{N}} \quad (14)$$

Hier kann man ebenfalls die Parallelen zum Lock-In-Verfahren erkennen, da $e^{-j\omega t} = \cos(\omega t) + j \cdot \sin(\omega t)$. Die Fourier-Transformation stellt dabei ein Quasi-Lock-In-Verfahren dar, unter der Einschränkung, dass keine Integration stattfindet, sondern von der Fourier-Transformation von einem periodischen Signalverlauf ausgegangen wird [30]. Falls Daten nicht stetig in das Transformationsfenster „passen“, so entstehen „Nebenkeulen“⁸, diese können durch die Nutzung sogenannter *Fensterfunktionen* die unterdrückt werden. Dies geschieht unter Inkaufnahme breiterer Einzelfrequenzträger [30]. Wenn nicht anders beschrieben, so werden sämtliche Fourier-Transformationen in dieser Arbeit als nicht-gefensterte FFT durchgeführt.

Die Analogie, dass die Fouriertransformation als Quasi-Lock-In-Verfahren genutzt werden kann, nimmt zudem an, dass das analoge Lock-In-Verfahren zwei, um 90° zueinander Verschobene, Sinus-Referenz-Funktionen nutzt, die in ihrer Amplitude gleich sind. Dadurch ergibt sich, rein rechnerisch, auf der entsprechenden Frequenz der Fouriertransformation, das gleiche Ergebnis, wie bei einem Lock-In-Verstärker⁹.

⁸ Spektrale Inhalte auf Frequenzen, die neben der eigentlichen Frequenz liegen.

⁹ Bis auf den Faktor t_{int} , welcher als „FFT-Gain“ bezeichnet wird.

2.5 Thermografie in der zerstörungsfreien Prüfung

Dieses Unterkapitel gibt eine Übersicht über die in dieser Arbeit verwandten, gängigen thermografischen Mess- und Auswertungsverfahren. Es werden die einzelnen Einsatzgebiete, Vor- und Nachteile, sowie der Stand der Technik zu den einzelnen Anwendungsverfahren präsentiert.

Diese Arbeit beschränkt sich auf die zur Materialprüfung eingesetzten thermografischen Verfahren. Im Verlauf der Arbeit wird der Begriff „Thermografie“ synonym zum Begriff „thermografische, zerstörungsfreie Prüfung“ oder „Thermografie in der ZfP“ (engl. Thermal NDT, TNDT) genutzt. Die Thermografie als Ganzes wird noch in vielen weiteren Bereichen, darunter medizinische Diagnostik, Luft- und Raumfahrt, sowie Militär, seit vielen Jahren erfolgreich eingesetzt. InfraTec GmbH [31] nennt die militärische Nutzung zur Aufklärung im Zweiten Weltkrieg als maßgebliche Entwicklungstriebkraft der gesamten Thermografie-Technologie.

2.5.1 Definition und atmosphärische Bedingungen

Die Thermografie bezeichnet ein bildgebendes Verfahren zur Anzeige der Oberflächentemperaturen oder Strahlungsdichten von Objekten. Sie ist eine spezielle Form der Pyrometrie, also der berührungslosen Temperaturmessung. Das physikalische Messprinzip beruht dabei immer auf dem Empfang, der vom Objekt ausgesendeten Wärmestrahlung.

Dazu werden Kameras genutzt, deren Sensoren in dem Wellenlängenspektrum empfindlich sind, in dem Wärmestrahlung des zu messenden Objektes ausgesendet wird. Zur Messung der Umwelt werden Kameras genutzt, die empfindlich im langwelligen Infrarotbereich (praxisübliche Werte sind $7\ \mu\text{m} - 14\ \mu\text{m}$) sind, da einerseits Gegenstände um Raumtemperatur ihr Abstrahlmaximum in diesem Bereich besitzen ($0\ \text{°C} \triangleq 10,6\ \mu\text{m}$; $20\ \text{°C} \triangleq 9,9\ \mu\text{m}$; $40\ \text{°C} \triangleq 9,3\ \mu\text{m}$) und andererseits die Atmosphärendurchlässigkeit für den LWIR-Bereich gut ist und somit Messungen über weite Distanzen ermöglicht.

Nicht bildgebende Sensoren (mit nur einem einzigen „Pixel“), die dadurch geringere Optikansprüche als FPA-Kameras (Focal Plane Arrays) besitzen, finden ebenso breite, technische Anwendung¹⁰ zur Temperaturmessung und werden als Pyrometer bezeichnet.

¹⁰ Z.B. Hand-Pyrometer, industrielle Pyrometer zur Temperaturmessung von Metallschmelzen

In Abbildung 2 ist das reale und ideale Spektrum der ausgesandten Strahlung der Erdoberfläche gezeigt. Diese Darstellung zeigt das „atmosphärische Fenster“, als der Wellenlängenbereich, bei dem die Erdatmosphäre besonders gute Durchlässigkeitseigenschaften besitzt. Abbildung 3 zeigt die theoretische Durchlässigkeit der Erdatmosphäre für alle Wellenlängen bis 22 μm . Hier sind ebenfalls die drei technisch relevanten IR-Bereiche eingezeichnet.

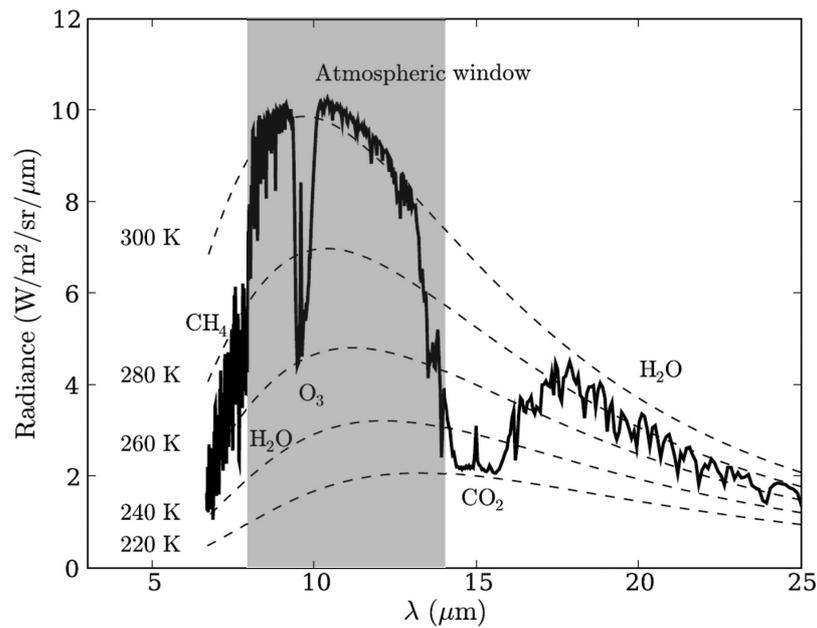


Abbildung 2: Spektrum der terrestrischen Strahlung bei einer Oberflächentemperatur von 305 K. Die einzelnen Einbrüche der Strahlungsdichte sind Absorptionsbanden, mit den jeweiligen verursachenden Substanzen beschriftet. Der grau hinterlegte Bereich wird als „Atmosphärisches Fenster“ bezeichnet [32].

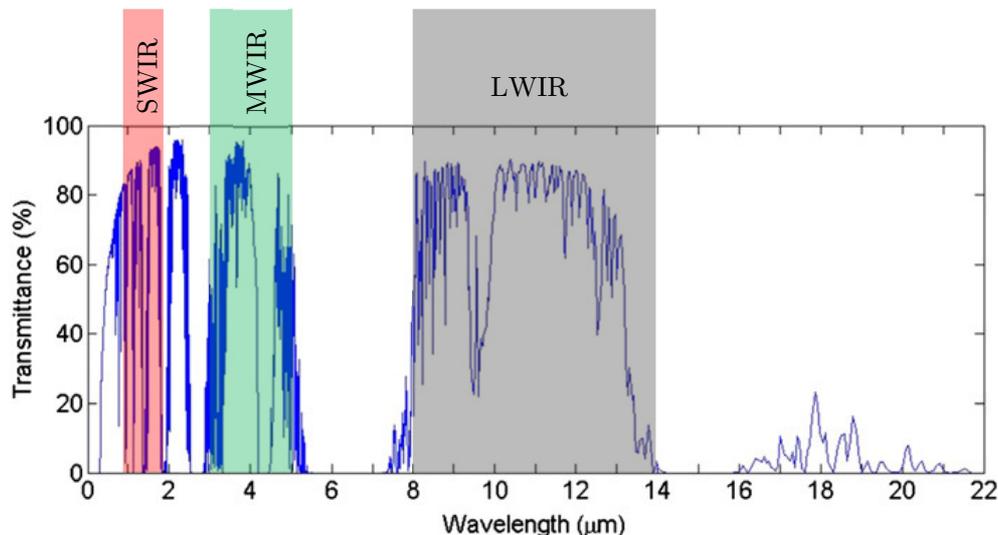


Abbildung 3: Atmosphärische Durchlässigkeit in Prozent nach Wellenlänge und Einteilung der Infrarotbereiche in SWIR (rot), MWIR (grün), LWIR (grau) über eine Distanz senkrecht vom Weltraum auf die Meeresoberfläche gesehen.

Entnommen aus [32].

Der kurzwellige Infrarot-Bereich (SWIR) beginnt nach Ende des sichtbaren Spektrums (ca. $1 \mu\text{m}$) und endet bei ca. $1,7 \mu\text{m}$. Der Übergangsbereich zwischen sichtbarem Licht und SWIR wird auch als „nahes Infrarot“ (NIR – engl. near infrared) bezeichnet. Der SWIR-Bereich wird analog zum sichtbaren Spektrum genutzt, z.B. für Spektroskopie, ist jedoch thermografisch uninteressant für diese Arbeit, da nur sehr heiße Objekte ($> 500 \text{ }^\circ\text{C}$) Schwarzkörperstrahlung in diesem Band aussenden. Etwas mehr als ein Drittel der Sonneneinstrahlung erreicht die Erdoberfläche im (NIR/)/SWIR-Band¹¹.

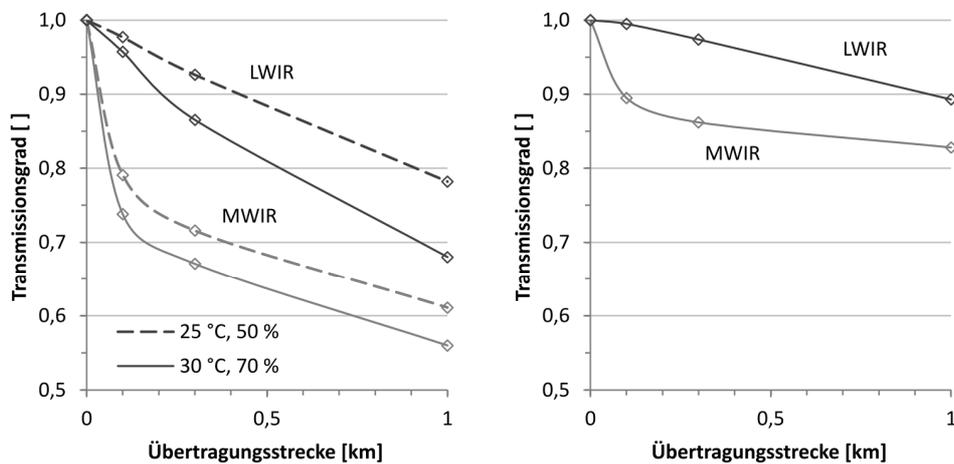
Der Mittelwellen-Infrarot-Bereich (MWIR) bezeichnet das Infrarotfenster $3 \mu\text{m} - 5 \mu\text{m}$ und wird thermografisch für heiße bis sehr heiße Objekte genutzt, z.B. Flammenmessung, und kann durch Einsatz von speziellen MWIR-Filtern auch zur spektralen Thermografie genutzt werden [34^{S. 9-11}]. Objekte ab ca. $100 \text{ }^\circ\text{C}$ können messtechnisch im MWIR-Bereich erfasst werden [35].

Das langwellige Infrarotband (LWIR) eignet sich besonders, um Messungen von Objekten im Bereich der Raumtemperatur (und höher) durchzuführen. Wie oben genannt liegen die

¹¹ Energieverteilung der Insolation auf die einzelnen Bänder nach [33]: 7% UV, 44% sichtb. Licht, 37% NIR/SWIR, 11% MWIR/LWIR, 1% Rest

Strahlungsmaxima von Objekten zwischen ca. $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$ und $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ im LWIR-Bereich und können durch die gute atmosphärische Durchlässigkeit in diesem Bereich auch über weitere Entfernungen gemessen werden.

Erst ab einer gewissen Messdistanz führt die atmosphärische Dämpfung zu nennenswerten Fehlern, die bei einer entsprechend genauen Temperaturbestimmung berücksichtigt werden müssen. In Abbildung 4 (a) ist die atmosphärische Dämpfung aufgezeichnet. Sie beträgt, je nach Umweltbedingungen, nach 100 m ca. 5 - 10 %. Die in dieser Arbeit vorgenommenen Experimente werden innerhalb einer Messdistanz von ca. 50 m im LWIR-Bereich durchgeführt, was einen Messfehler von $< 5\%$ verursacht, der unter dem intrinsischen Fehler der Kamera liegt. Mehr zu den atmosphärischen Fehlerquellen in Kapitel 5.2.2.



(a) Transmission infolge des in der Luft gelösten Wasserdampfes, abhängig von der Temperatur und der relativen Luftfeuchte

(b) Transmission infolge des in der Luft vorhandenen Kohlendioxids bei $0,03\text{ Vol.}\% \text{CO}_2$ -Konzentration

Abbildung 4: Transmissionsgrade für das LWIR- und MWIR-Band unter Berücksichtigung von (a) zwei verschiedenen Umweltbedingungen und alleinige Absorption von CO_2 (b).

Entnommen aus [34^{S. 14}].

2.5.2 Thermografiekameras

Thermografiekameras dienen zur Aufnahme von Oberflächentemperatur- oder Strahlungsdichtebildern. Dazu nutzen sie sogenannte IR-Detektoren, die in einem Feld angeordnet sind, analog zu visuellen Kameras.

Die IR-Detektoren erzeugen elektrische Signale, die in einem bestimmten Verhältnis zur Strahlungsleistung/Temperatur stehen, die von ihren Empfangselementen absorbiert wird. IR-Detektoren umfassen nach Vavilov und Burleigh [15^{S. 343}]:

- Empfängerelemente (dazu weiter unten mehr),
- Eintrittsfenster, welches die Umgebung vom Sensorelement trennt,
- Eine optionale Blende, die den Sichtwinkel begrenzt

Detektoren für Infrarotstrahlung basieren immer auf dem Prinzip des Einfangens, der vom Messobjekt ausgesendeten Infrarotstrahlung. Dabei werden die Anordnungen typischerweise in zwei Gruppen eingeteilt: *thermische* und *photonische* Detektoren. Eine Übersicht der Wirkprinzipien findet sich in Abbildung 5.

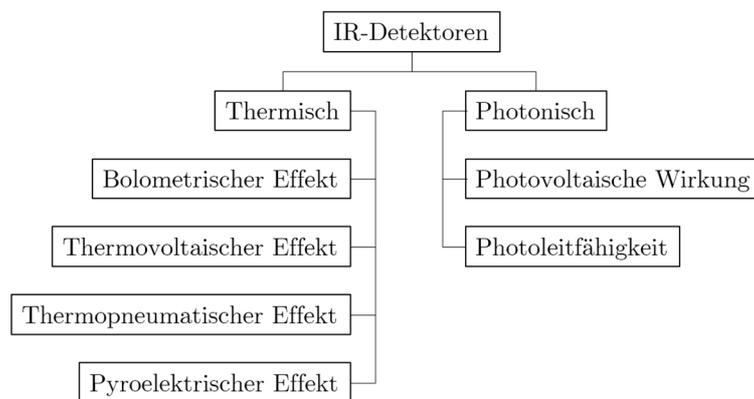


Abbildung 5: Einteilung der Wirkprinzipien von IR-Detektoren

Das Funktionsprinzip von thermischen Detektoren basiert auf dem Aufheizen oder Abkühlen eines Sensorelements, welches mittels einem der folgenden vier Effekten erfasst werden kann:

1. Bolometrischer Effekt
Änderung des elektrischen Widerstands eines Sensorelements
2. Thermovoltaischer Effekt
Änderung der Spannung beim Kontakt zweier unterschiedlicher Metalle
3. Thermopneumatischer Effekt
Änderung der Detektortemperatur verändert ein Gasvolumen
4. Pyroelektrischer Effekt
Änderung des Dipolmomentes eines kristallinen Sensorelements

Die in dieser Arbeit genutzten Thermografiekameras nutzen den bolometrischen Effekt und nutzen dazu ein ungekühltes, bolometrisches Sensorfeld (FPA). Man nennt diese auch „Mikrobolometer-“ oder „Bolometerkameras“. Bolometerkameras können unter anderem auch

zur Verbesserung des thermischen Kontrasts gekühlt werden [36], jedoch sind ungekühlte Bolometerkameras deutlich kompakter und leichter, da der Kühlapparat wegfällt.

In *photonischen Detektoren* erhöhen die Quanten (Photonen) der absorbierten Strahlung die Anzahl der freien, elektrischen Ladungsträger, wodurch sich die elektrische Spannung eines Sensorelements ändert. Praxisüblich werden diese Detektoren gekühlt [34].

Wird das Phänomen der *Photoleitfähigkeit* genutzt, ändert die absorbierte IR-Strahlung die elektrische Leitfähigkeit eines Sensorelementes.

Im Fall der *photovoltaischen Wirkung* erzeugt die absorbierte Strahlung Elektron-Loch-Paare in der Nähe des p-n-Übergangs, wodurch elektrischer Strom erzeugt wird, welcher wiederum digitalisiert werden kann.

2.5.3 Aktive und passive Thermografieverfahren

Generell ist zu unterscheiden zwischen aktiven und passiven Thermografieverfahren. Hiermit wird die Art der Anregung bezeichnet. Die Abgrenzung von aktiver zu passiver Thermografie ist nicht ganz klar geregelt [18^{S. 343}], da selbst lediglich bei Beobachtung von Temperaturverläufen, ohne Eingriff in den Temperaturverlauf selbst, vorherige Temperatureinflüsse gewirkt haben müssen. Daher wird die passive Thermografie oft definiert als Thermografie, die durch „nicht aktiv vom Benutzer erzeugte“ Wärme angeregt wird. Ein Beispiel für ein typisches passives Thermografieverfahren ist die Bauwerksthermografie, als Hilfsmittel zur Bestimmung von Wärmebrücken oder anderen Undichtigkeiten an Gebäuden. Weiterhin werden auch elektrische Anlagen passiv thermografisch geprüft, da besonders hohe Übergangswiderstände in der Regel punktuell hohe Temperaturen erzeugen, die mit einer Thermografiekamera schnell lokalisiert werden können [31^{S. 46}, 37]. Außerdem wird die passive Thermografie bei Verfahren genutzt, die intrinsisch Wärme nutzen, wie zur Bewertung des Abkühlverhaltens von Spritzgussteilen [31^{S. 50-51}], oder Stahlhalbzeugen im Walzwerk [38].

Bei der passiven Thermografie wird die Thermografiekamera auf das Prüfobjekt gerichtet und ein oder mehrere Thermogramme werden aufgezeichnet. Die Anregung der Struktur geschieht hierbei unabhängig von der thermographischen Messung (z.B. Hauszentralheizung, Restwärme vom Tag, Körperwärme, etc.). Lediglich die Antwort der zu messenden Struktur auf vorangegangene Wärmeereignisse wird kontextlos aufgezeichnet [39].

Hierbei können sich Ungenzen oder Inhomogenitäten durch eine unterschiedliche Abkühlrate abzeichnen. Die im Bauteil stattfindenden Wärmeströme werden von den Ungenzen

beeinflusst, sodass sich eine andere Oberflächentemperatur ergibt. Im weiteren Verlauf können die Temperatur- und Abkühlinformationen vom Messsystem zurück an die Anlage gegeben werden, die wiederum Einfluss auf die zugehörigen Prozessparameter (wie Heiztemperatur oder Ähnliches) hat, um somit aus dem System ein Regelkreis zu bilden [40].

Bei der aktiven Thermografie wird Wärme gezielt in ein Prüfobjekt geleitet, um einen Wärmestrom anzuregen. Bei der Erwärmung oder Abkühlung eines Prüfobjekts entstehen durch lokale Variationen der Wärmeleitfähigkeiten und Wärmekapazitäten des Prüfobjekts Temperaturunterschiede an der Oberfläche. Diese werden mit einem Thermografiesystem erfasst und ausgewertet. Die wichtigsten Verfahren, die dabei zum Einsatz kommen, sind die Impulsthermografie, die Impuls-Phasen-Thermografie (Kapitel 2.5.5) und die Lock-In-Thermografie (Kapitel 2.5.4).

Bei diesem Verfahren ist der Prüfer, beziehungsweise der Prüfaufbau, in der Lage, aktiv Wärme in das Prüfobjekt in einer bestimmten Form, Dauer und Art einzubringen, um damit eine Wärmeantwort des Prüfobjekts zu generieren. Die örtlichen Wärmeimpulse im Prüfobjekt erzeugen eine spezifische Wärmeantwort, welche über spezielle Auswertungsalgorithmen Aussagen über die gemessene Oberfläche gibt. Dazu gehören: Messung von Ungängen, wie Oberflächenrissen und verdeckten Delaminationen [11], Legefehler von Gelegen [41] und weiteren Defekten [12]. Außerdem können mittels aktiver Thermografie auch thermische Materialeigenschaften bestimmt werden [14, 42, 43].

Die aktive Thermografie funktioniert mittels des Einbringens von thermischen Wellen in das Prüfobjekt. An Ungängen oder Inhomogenitäten wird die Wärmewelle reflektiert und transmittiert und anschließend zurück an der Oberfläche vom Thermografiesystem aufgenommen. Bei äußerer Anregung wird die thermische Welle praxisüblich entweder punktuell, linienförmig oder flächig auf das Material aufgebracht, dringt dort in das Material ein und breitet sich aus. Andere Verfahren erzeugen Wärme direkt innerhalb des Prüfobjekts und diese wandert dann von innen nach außen.

Übliche Wärmequellen in der aktiven Thermografie sind nach Vavilov und Burleigh [44] *optischer Wärmefluss* (wie Laser), *induktive Anregung*, *Mikrowelle*, *mechanische Anregung*, *Kontakt-basierte Wärmeübertragung*, *Verlustwärme* durch *elektrischen Strom* und *Heiß-*

/Kaltgas oder -Flüssigkeit. Die so erzeugten Wärmeunterschiede werden durch das Thermografiesystem aufgenommen und können währenddessen oder im Anschluss verarbeitet werden. Drei übliche, für diese Arbeit relevante, aktive Thermografieverfahren sind:

- Die Impuls- oder Blitzlichtthermografie, bei der eine impulsförmige Anregung das Prüfobjekt erhitzt, und das Abkühlverhalten aufgezeichnet wird.
- Die Stufenheizungthermografie (SHT), verwandt mit der Impulsthermografie, wird das Prüfobjekt jedoch konstant (üblicherweise mit einer Wärmelampe) kontinuierlich erhitzt und dessen Aufwärmvorgang wird thermografisch aufgezeichnet [44 S. 115–125]. Hierbei wird das Prüfobjekt meist in Transmission beleuchtet (also ‚von der Rückseite‘), um Reflexionen der Heizvorrichtung zur Thermografiekamera zu vermeiden (mehr zu SHT in Kapitel 2.5.5).
- Die Lock-In-Thermografie (LIT). Hierbei wird das Prüfobjekt einer periodischen Anregung unterzogen, die ein periodisch wechselnde Temperaturantwort erzeugt. Diese wird aufgezeichnet und im Nachhinein in ihrer Höhe (Amplitude) und zeitlichem Zusammenhang mit der Anregung (Phase) bewertet. Ebenso können weitere Auswertungsstrategien angewandt werden, die im folgenden Kapitel näher erläutert werden.

2.5.4 Lock-in-Thermografie

Die Lock-in-Thermografie (LIT) nutzt die Rauschverminderungseigenschaften des Lock-in-Verfahrens. Die Anregung des Prüfobjekts geschieht mit Hilfe einer periodisch gesteuerten Wärmequelle. Dies geschieht praxisüblich mittels den in Kapitel 2.5.3 aufgelisteten Wärmeintragsmethoden, wie zum Beispiel optisch mit einem gesteuerten Laser.

Hierbei wird die Wärmequelle periodisch gesteuert und eine gewisse Anregungsfrequenz f_0 gewählt. Die durch die Lock-In-Thermografie gewonnenen Thermogramme werden im Computer nun pixelweise vom Zeitbereich in den Frequenzbereich überführt und können als Realteil- und Imaginärteil-Bild oder als Amplituden- und Phasenbild dargestellt werden. Beide Darstellungsformen finden in bestimmten Bereichen Anwendung und eignen sich für unterschiedliche Auswertungsstrategien [1 S. 149–156].

Die Wahl der Anregungsfrequenz kann dabei entweder frei oder nach bestimmten Kriterien erfolgen, wobei die gewählte Frequenz Einfluss auf die Eindringtiefe und Ungängenbestimmung hat. Typische Frequenzen für die Lock-In-Thermografie im Labor sind 0,01 – 100 Hz, je nach Größe und gewünschter Eindringtiefe [1, 18].

Anwendungsbereiche für die Lock-In-Thermografie umfassen beispielweise die Prüfung von integrierten Schaltkreisen auf Mikroebene und Solarzellen [1, 45]. Außerdem wird die Lock-In-Thermografie zur In-Situ-Prüfung von Hybridbauteilen genutzt. Sowohl Amplituden- als auch Phaseninformation sind aussagekräftig für die Risscharakterisierung [41, 46].

2.5.5 Impuls- und Stufenheizungsthermografie

Die Impuls- und Stufenheizungsthermografie bezeichnen aktive Thermografieverfahren, die sich durch ihre Anregungsform auszeichnen. Dabei stellt die Impulsthermografie eine (nahezu) impulsförmige Wärmequelle bereit, die das Prüfobjekt bei Experimentbeginn mit einer hohen Wärmeleistung für eine, im Vergleich zur Bildwiederholrate, kurze Zeit erwärmt [18^{S. 347–352}]. Diese Wärme wird praxisüblich mittels Blitzlichtlampen erzeugt. Diese eignen sich durch ihre hohen Energien pro Entladung und kurzer Entladungszeit und geben dem Verfahren „Blitzlichtthermografie“ den Namen.

Die Anregung kann analog zu anderen Thermografieverfahren auch induktiv, per Ultraschall oder über andere physikalische Wechselwirkungen geschehen. Hier ist der limitierende Faktor hinreichend hohe Leistungsdichten zu erzeugen, um den Anregungsimpuls bei ausreichender Anregungsenergie möglichst kurz zu halten. Vor allem großflächige Anregungen um einen gewissen Temperaturunterschied (typischerweise mindestens einige Grad) sind logistisch durch ihre hohen Anregungsenergien herausfordernd.

Zur Auswertung des Experiments werden Thermogramme genutzt, die die Abkühlung des Prüfobjekts nach der impulsförmigen Anregung beobachten. Die Impulsthermografie kann „in Reflexion“ und „in Transmission“ durchgeführt werden. Beide Versuchsmethoden bieten eigene Vor- und Nachteile, in dieser Arbeit wird sich jedoch mit den Parallelen zum Aufbau „in Reflexion“ beschäftigt, da solar-angeregte Thermografie meist „in Reflexion“ geschieht.

Um die Anforderung der hohen momentanen Leistungsaufnahme zu reduzieren, kann die sogenannte Stufenheizungsthermografie (engl. SHT – Step Heating Thermography) verwendet werden [18^{S. 352–355}]. Diese nutzt praxisüblich Heizstrahler, wie Arraystrahler, Halogenlampen oder, wie in dieser Arbeit später gezeigt, die Sonnenstrahlung.

Ein Nachteil der Stufenheizungsthermografie ist, dass, im Gegensatz zur Blitzlichtthermografie, bei Experimenten mit der Anregungsquelle *in Reflexion* die Reflexion der Wärmequelle, je nach Einfallswinkel, im Prüfobjekt zu erkennen sein kann. Dies wiederum kann die Temperaturbestimmung systematisch verfälschen. Daher eignet sich die Stufenheizungsthermografie besonders beim experimentellen Aufbau *in Transmission*, da dort die Wärmequelle

vom Prüfobjekt selbst verdeckt wird oder in Aufbauten, bei denen die Anregungsquelle im hinreichenden Abstand zur optischen Achse der Kamera steht.

Typische Auswertungsmethoden für die Impuls- und Stufenheizungsthermografie nach Vavilov und Burleigh [44] sind:

Temperaturdifferenzsignal (Difference Temperature Signal):

Hierbei wird ein Thermogramm ausgewählt und als Referenzthermogramm T_{ref} von allen folgenden subtrahiert. Es gilt damit als „Null“-Referenz und folgende Temperaturentwicklungen lassen sich mit diesem Verfahren hervorragend darstellen, da die statische Temperaturverteilung (der „Hintergrund“) aus den Thermogrammen effektiv entfernt wird. Hierbei ist die Wahl des Referenzthermogramms jedoch entscheidend [44].

$$(\Delta T)_n = T_n - T_{ref} \quad (15)$$

Dieses Verfahren reagiert außerdem empfindlich auf die Emissivität, unebene Anregungsbedingungen und ist limitiert durch die effektive Temperaturempfindlichkeit des Kamerasystems *NETD* (engl. Noise Equivalent Temperature Difference) und das inhärente Rauschen des Systems.

Fourier-Transformation (Puls-Phasen-Thermografie, siehe Kapitel 2.5.6):

Laplace-Transformation (Linear Effusivity Fit, siehe Kapitel 0):

Hauptkomponentenanalyse (PCT – Principal Component Thermography):

Dieses Verfahren wird verwendet, um sowohl räumliche als auch zeitliche Merkmale aus IR-Thermografie-Sequenzen von Quelldaten zu extrahieren. Durch Ausschluss von Komponenten niedriger Ordnung ist es möglich, die Metrik zu reduzieren (Verringerung der Anzahl der Bilder in der Sequenz), um zum Beispiel den Einfluss ungleichmäßiger Erwärmung auszuschließen oder bestimmte Defekte hervorzuheben.

Direktes (polynomielles) Fitting oder Thermografische Signalrekonstruktion (TSR – Thermographic Signal Reconstruction):

Das Fitting von Temperaturentwicklungsfunktionen wird zunehmend aufgrund der folgenden Faktoren genutzt:

- hochfrequentes Rauschen kann effektiv unterdrückt werden
- einige mathematische Operationen, wie z. B. Division, Differenzieren, Fourier-Transformation usw., können effizienter sein, wenn sie auf angepasste Daten angewendet werden

- IR-Rohbildsequenzen von beliebiger Länge können reduziert werden auf wenige Bilder der Koeffizienten (typischerweise weniger als sechs)
- Defekttiefen können einigen Anpassungskoeffizienten auf die gleiche Weise zugeordnet werden wie Fourier-Spektrum-Komponenten in der Puls-Phasen-Thermografie
- Bestimmbarkeit der Temperaturleitfähigkeit über lineares Fitting möglich [47]

Typische Anpassungsverfahren verwenden Polynomfunktionen mit einem Grad kleiner als sechs, sowie die Kombinationen einiger Exponentialfunktionen [48].

Die TSR unterscheidet sich insofern von anderen Verfahren, dass nicht der Temperaturverlauf selbst direkt polynomiell gefittet wird, sondern die Funktion:

$$\ln(T) = a_0 + a_1 \cdot \ln(t) + a_2 \cdot (\ln(t))^2 + a_3 \cdot (\ln(t))^3 + \dots \quad (16)$$

Diese steht im direkten Zusammenhang mit dem Lösen der 1D-Wärmeleitungsgleichung¹². Außerdem zeigen die Bilder der Ableitungen der logarithmierten Temperatur nach der logarithmierten Zeit $\frac{\partial^n \ln(T)}{\partial^n \ln(t)}$ besseren Signal-Rausch-Abstand und damit einhergehend bessere Detektierbarkeit von Defekten [49]. Praxisüblich werden dazu die erste und zweite Ableitung betrachtet.

2.5.6 Puls-Phasen-Thermografie (PPT – Pulsed-Phase Thermography)

Die Vorgehensweise zur Durchführung einer PPT ist grundsätzlich die gleiche, wie bei der Impulsthermografie und lässt sich nach Ibarra-Castanedo et al. [45] in vier Schritte unterteilen:

1. Die Oberfläche der Probe wird mit einem Wärmeimpuls angeregt
2. Sobald der Impuls die Probe erreicht, wandert die Wärmefront durch das Material, während der Abkühlungsprozess an der Oberfläche beginnt
3. In regelmäßigen Zeitabständen wird ein Thermogramm aufgezeichnet

¹² Über die 1D-Lösung der Temperaturverteilung eines Halbraums, der einem Wärmeimpuls der Energiemenge Q ausgesetzt ist: $T(z, t) = T_0 + \frac{Q}{e\sqrt{\pi t}} \exp\left(-\frac{z^2}{4at}\right)$, ergibt sich die Oberflächentemperatur zu: $T(z = 0, t) = T_0 + \frac{Q}{e\sqrt{\pi t}}$. Insbesondere die Wurzel kann mit Hilfe des Logarithmus umgeschrieben werden zu: $\ln(T) = \ln\left(\frac{Q}{e}\right) - \frac{1}{2} \ln(\pi t)$, was das polynomielle Fitting vereinfacht.

4. Die Thermogrammsequenz wird dann mit einem Transformationsalgorithmus verarbeitet (z. B. Fourier-Transformation) und so aufbereitet, dass neben Amplituden- zusätzlich auch Phasenbilder erzeugt werden.

Das Prinzip der Fehlererkennung basiert auf der Tatsache, dass defekte Zonen an der Oberfläche unterschiedliche Temperaturen, in Bezug auf die sonstige Temperaturentwicklung, an der Oberfläche aufweisen.

Der Vorteil der Puls-Phasen-Thermografie liegt in der Transformation der Thermogramme. Hierbei können verschiedene Einflüsse, wie ungleichmäßige Erwärmung oder unterschiedliche Emissivität, unterdrückt werden. Dadurch erhält man besser bewertbare Ergebnisbilder, die es vereinfachen, Ungängen von intakten Bereichen zu unterscheiden.

Außerdem wird die Tiefenempfindlichkeit z deutlich erhöht. So liegt sie ohne Transformation etwa bei der thermischen Diffusionslänge μ . Durch Nutzen der PPT kann diese auf $1,8 \mu$ [50] oder sogar auf über 2μ erhöht werden [51]. Eine Übersicht über die Tiefenempfindlichkeit einiger Thermografieverfahren findet sich in Tabelle 2.

Tabelle 2: Vergleich der Tiefenempfindlichkeit ausgewählter Thermografieverfahren

Thermografieverfahren	Tiefen- Empfindlichkeit	Nachweis
Impulsthermografie	$z \sim 1 \mu$	[45]
Pulsphasenthermografie	$z \sim 1,5 \mu$ $z \sim 2 \mu$	[50, 51]
TSR	$z > 2 \mu$	[8]
Lock-in-Thermografie	$z > 2 \mu$	

2.5.7 Solar angeregte Thermografie (SLT – Solar-Loading Thermography)

Die solar angeregte Thermografie, bezeichnet ein Thermografieverfahren, dass die Sonne als pseudo-aktive Hauptanregungsquelle nutzt. Es erlangte in vergangenen Jahren gehäuft Aufmerksamkeit in der wissenschaftlichen Welt [5–7, 9, 10, 22, 52, 53], was, unter anderem dem Aufkommen von immer kleiner und günstiger werdenden Thermografiekamera-Systemen geschuldet ist. Außerdem sinken die Anforderung an das Aufnahmesystem durch das Bereitstellen von standardisierten USB-Video-Class-Geräten, die vom Rechner als „Webcam“ erkannt werden und somit das Auslesen mit betriebssystemeigener Software realisiert werden

kann. Für einen detaillierten Überblick über verwandte, wissenschaftliche Arbeit, siehe Kapitel 1.2.

Die Schwerpunkte dieser Arbeit sind die Untersuchung der solar angeregten Thermografie und das Aufzeigen der Anwendungs- und Auswertungsmöglichkeiten. Ein Vorteil der solar angeregten Thermografie ist die große Vielseitigkeit. Die solar angeregte Thermografie kann mittels ihrer hohen Amplitudenwerte bei den Frequenzen $1/24\text{h}$ und deren Harmonische ($1/12\text{h}$, $1/6\text{h}$ usw.) als Lock-In-Verfahren genutzt werden. Außerdem können einzelne natürliche (oder auch künstlich vom Prüfer eingebrachte), zeitlich begrenzte Events analog zur Impulsthermografie genutzt werden (z.B. Stufenheizungsversuch). Diese Vielfalt und der Fakt, dass die Anregung nahezu homogen und, im Vergleich zur Laborthermografie, über ein sehr großen Bereich ausgedehnt ist, macht die solar angeregte Thermografie zu einem vielversprechenden Prüfansatz für verschiedene Anwendungsszenarien (siehe auch Kapitel 6.3).

3 Methoden und Materialien

Dieses Kapitel beschreibt die in dieser Arbeit genutzten Methoden und Materialien und geht dabei im Detail auf die bestehenden und neuen Methoden ein, die im Bereich der solar angeregten Thermografie Anwendung finden. Im zweiten Teil wird auf die genutzte Ausrüstung und Versuchsaufbauten eingegangen und dabei die Funktion und der versprochene Mehrwert der genutzten Messinstrumente erläutert.

3.1 Methoden zur Bestimmung von thermischen Materialeigenschaften

Dieses Unterkapitel beschreibt verschiedene Methoden thermische Eigenschaften im Kontext der solar angeregten Thermografie zu bestimmen. Hierbei werden hauptsächlich drei Verfahren herausgestellt. Diese Verfahren werden in der solar angeregten Thermografie analog zu den labormaßstäblichen Thermografieverfahren durchgeführt.

3.1.1 Hintergrund und Wärmeleitungsgleichung

Die homogene 1D-Wärmeleitungsgleichung (Diffusionsgleichung) mit der Temperaturleitfähigkeit a lautet:

$$\frac{\partial^2}{\partial x^2} T(x, t) = \frac{1}{a} \frac{\partial}{\partial t} T(x, t) \quad (17)$$

Bei periodischer Anregung eines Mediums, das einen Halbraum bildet, mit der Frequenz $f = 2\pi\omega$ und der Leistungsamplitude P_0 ergibt die eindimensionale Lösung der Gleichung eine Temperaturdifferenz von $\Delta T(x, t)$. Hier kann zudem die Wärmewellenlänge λ_T (Formel (19)) bestimmt werden.

$$\Delta T(x, t) = \overbrace{\frac{P_0}{e \cdot \sqrt{\omega}} \exp\left(-\frac{x}{\mu}\right)}^{\Delta T(x)} \cdot \sin(\omega t + \Phi(x)) \quad (18)$$

$$\lambda_T = 2\pi\mu = \sqrt{\frac{4\pi a}{f}} \quad (19)$$

Hierbei ergibt sich die Temperaturamplitude $|S|$ an der Oberfläche ($x = 0$) zu $|S| = P_0/(e \cdot \sqrt{\omega})$, was in Kapitel 3.1.3 genutzt wird, um die Effusivität e zu bestimmen. Der Hauptfehler, der bei diesem Ansatz im Vergleich zu experimentellen Aufbauten gemacht wird, ist die Annahme, dass der Wärmefluss ins Objekt sinusförmig ist. Das bedeutet, dass in der

einen Hälfte der Schwingung Wärmeeintrag stattfindet und in der anderen Hälfte Wärmeentzug. In realen Bedingungen sind besonders die Wärmeentzugsphänomene nicht sinusförmig, sondern, in erster Näherung, proportional zum Temperaturunterschied zur Umgebungstemperatur ΔT , und ähneln damit eher Kurven der exponentiellen Annäherung, als einer Sinusform. Hier ähneln die gemessenen Temperaturverläufe sehr dem Lade- und Entladeverhalten von elektrischen Kondensatoren, daher kann dieser Ansatz der Sinus-Anregung nur unter Berücksichtigung bestimmter Korrekturen angewendet werden.

3.1.2 Wärmesimulationen

Zur Validierung der Linearitätsannahme der verschiedenen Wärmeeinflüsse wird eine Reihe an Wärmesimulationen durchgeführt. Dabei wird ausschließlich eine 1D-Betrachtung durchgeführt. Der laterale Wärmetransport in den betrachteten Medien ist zwar nicht vernachlässigbar, jedoch ist die Untersuchung dessen Einflusses nicht Teil der vorliegenden Arbeit. Aus dem lateralen Wärmefluss folgt eine Weichzeichnung der eventuellen (Fehler-)Kontraste auf der Oberfläche. Moderne Schärfungsverfahren, wie die Entfaltung (engl. Deconvolution) können mittels spezieller Punktspreizfunktionen (engl. Point Spread Function – PSF) die Fehlergeometrie präzise zurückrechnen [54].

3.1.3 Analogien zur Lock-In-Thermografie

In der aktiven Lock-In-Thermografie können durch Vereinfachung und das Annehmen bestimmter Verhältnismäßigkeiten Formeln aufgestellt werden, nach denen die resultierende Temperaturamplitude des Lock-In-Versuchs anhand der Beleuchtungsintensität und der Materialeigenschaften des Prüfobjekts bestimmt werden kann. Die wichtigsten Vereinfachungen, die dabei getroffen werden sind: Wegfall von Konvektion und Strahlungswärme bei sinusförmiger periodischer Anregung (Neumann-Randbedingung) des Prüfobjekts (das bedeutet sowohl Wärmeeintrag, als auch „Wärmeentzug“ beim Prüfobjekt).

Dadurch kann die Wärmeleitungsgleichung analytisch für verschiedene Anregungsfälle gelöst werden. Die Ergebnisse dieser geschlossenen Lösung stellen Breitensteil et al. [1] in Tabelle 3 auf. Diese gibt die komplexe Temperaturamplitude S an und unterscheidet drei Anregungsarten: punktförmig, linienförmig und flächenförmig. Dazu werden benötigt: die Punktquellenleistungsamplitude P , die Linienquellenleistungsamplitude pro Meter p_l und die Flächenquellen-Wärmedichteamplitude p . Außerdem die thermischen Materialeigenschaften (wie oben) und, wo anwendbar, die Materialdicke d und der Abstand des Messpunkts von

der Wärmequelle D . Zur besseren Unterscheidbarkeit wird im Folgenden für die Temperaturamplitude thermisch dünner Materialien S' und für thermisch dicke Materialien S'' genutzt.

	Punktquelle	Linienquelle	Flächenquelle	
Thermisch dünn	$\Re\{S'\}$	$\frac{P}{\pi^2 d \lambda} \ln \left(\frac{2}{D} \sqrt{\frac{\pi \lambda}{\rho c_P \omega}} \right)$	$\frac{p_l}{\pi d \sqrt{2 \lambda \omega c_P \rho}}$	0
	$\Im\{S'\}$	$\frac{P}{4 \pi d \lambda}$	$\frac{p_l}{\pi d \sqrt{2 \lambda \omega c_P \rho}}$	$\frac{p}{\rho d c_P \omega}$
	$ S' $			$\frac{p}{\rho d c_P \omega}$ (20)
	$\arg(S')$			-90°
Thermisch dick	$\Re\{S''\}$	$\frac{2P}{\pi^{\frac{3}{2}} D \lambda}$	$\frac{2p_l}{\pi^2 \lambda} \ln \left(\frac{4}{D} \sqrt{\frac{\lambda}{\rho c_P \omega}} \right)$	$\frac{p}{\sqrt{2 \lambda \omega c_P \rho}}$
	$\Im\{S''\}$	$\frac{P \sqrt{\rho c_P \omega}}{\sqrt{2} \pi^{\frac{3}{2}} \lambda^{\frac{3}{2}}}$	$\frac{p_l}{2 \pi \lambda}$	$\frac{p}{\sqrt{2 \lambda \omega c_P \rho}}$
	$ S'' $			$\frac{p}{\sqrt{\lambda \omega c_P \rho}}$ (21)
	$\arg(S'')$			-45°

Tabelle 3: Realteil und Imaginärteil der komplexen Temperaturamplituden verschiedener Anregungsgeometrien bei thermisch dicken und dünnen Materialien. Entnommen aus [1^{S. 126}], verändert und ergänzt.

Dabei weisen die Formeln für die flächenförmige Anregung die größten Parallelen zur solar angeregten Thermografie auf (farblich hinterlegt), da die Sonnenstrahlung in gewisser Näherung auch als homogener Flächenstrahler betrachtet werden kann (unter Berücksichtigung des „Sinus-Fehlers“ von oben).

Dabei sind die Formeln für die absolute Temperaturamplitude $|S|$ von besonderem Interesse und dienen als Berechnungsbasis zur Bestimmung des Wärmeeindringkoeffizienten (Effusivität) [22]. Diese lauten für thermisch dünne und thermisch dicke Objekte:

$$|S'| = \frac{p}{\rho d c_P \omega} \quad \left| \quad d \ll \lambda_T \right. \quad (22)$$

$$|S''| = \frac{p}{\sqrt{\lambda \omega c_P \rho}} \quad \left| \quad d \gg \lambda_T \right. \quad (23)$$

Für thermisch dicke Objekte kann die Effusivität e durch Einsetzen von $e = \sqrt{\lambda \rho c_P}$ in Formel (21) bestimmt werden. Damit ergibt sich:

$$e = \frac{p}{|S''| \cdot \sqrt{\omega}} \quad (24)$$

In der solar angeregten Thermografie ist es jedoch herausfordernd, die mit großen Fehlern behaftete Wärmedichteamplitude p zu bestimmen, da die oben genannte Formel Wärmetransportphänomene, wie den Wärmetzug in Form von Konvektion oder Wärmestrahlung vernachlässigt und den absoluten Wärmestrom an der Oberfläche $\dot{q} = p$ annimmt. Zur Abhilfe muss entweder eine Methode eingeführt werden, den systematischen Fehler zu korrigieren oder empirisch zu kalibrieren. In der vorangegangenen Veröffentlichung [22] wird eine Methode vorgestellt, welche mit Hilfe von separaten Aluminiumreferenzplatten eine neu eingeführte „äquivalente Wärmestromdichteamplitude p_{eq} “ bestimmt wird. Dazu wird wieder auf Tabelle 3 zurückgegriffen, bei der die absolute Temperaturamplitude $|S'|$ für thermisch dünne Objekte, Formel (20), nach p umgestellt wird und als p_{eq} bezeichnet wird. *Al-Ref.* steht hierbei für die Materialeigenschaften der genutzten Aluminiumreferenzplatten:

$$p_{eq} = |S'| \cdot \omega \cdot \underbrace{\rho c_P d}_{Al-Ref.} \quad (25)$$

Feldexperimente zeigen, dass eine weitere Korrektur der Wärmestromdichteamplitude notwendig ist, damit diese Methode Materialwerte bestimmen kann, die mit den angenommenen Literaturwerten übereinstimmen. Dies liegt, wie oben beschrieben, unter anderem an der nicht berücksichtigten Konvektion und Wärmestrahlung, die jeweils einen nicht vernachlässigbaren Anteil Wärmefluss beitragen. Der eingeführte Korrekturfaktor $c(\omega)$ wird empirisch durch die durchgeführten Feldexperimente und einen dafür konzipierten Laborversuch bestimmt, welcher in Kapitel 3.2.2 beschrieben wird. Dadurch ergibt sich die finale Formel zur Bestimmung der Effusivität [22] zu:

$$e = \frac{p_{eq} \cdot c(\omega)}{|S''| \cdot \sqrt{\omega}} \quad (26)$$

Der Korrekturterm $c(\omega)$ wird mittels linearer Regression ermittelt. Er steht in einem ungefähren linearen Zusammenhang zu der Anregungsperiode $t_{irr} = 2\pi/\omega$. In Kapitel 4.1.2 wird die Regression dargestellt. Nach dem Einsetzen von p_{eq} ergibt sich:

$$e = \frac{|S'|}{|S''|} \cdot c(\omega) \sqrt{\omega} \cdot \underbrace{\rho c_P d}_{Al-Ref.} \quad (27)$$

Die so bestimmte Effusivität kann im Nachhinein mit den erwarteten Literaturwerten verglichen werden, um so eine Aussage über das Material zu treffen. Weicht der Wert stark vom erwarteten ab, kann das auf eine Veränderung des Materials hindeuten (z.B. Eindringen von Wasser in die Struktur verändert die bestimmte Effusivität in Richtung der Effusivität von Wasser). Ebenfalls kann eine Änderung auf eine nicht hinreichende thermische Verbindung in der Tiefe deuten, wonach die Effusivität hier meist niedrigere Werte aufweist, da die Wärmeleitung in die Tiefe bis zu einem gewissen Grad unterbrochen wird.

Einer der größten Fehlerterme bleibt weiterhin, dass die tatsächliche 24h-Wärmestromdichteamplitude in den Feldversuchen unbekannt ist. Insbesondere der Wärmeverlust über Konvektion und Strahlung ist schwer direkt zu bestimmen, da er von mehreren signifikanten Faktoren abhängig ist, die oben aufgeführt wurden. Deswegen wird eine Regressionsmethode verwendet, um die gemessenen Ergebnisse mit dem Literaturwert eines bestimmten Materials (in diesem Fall Ziegel und Beton) abzugleichen [22].

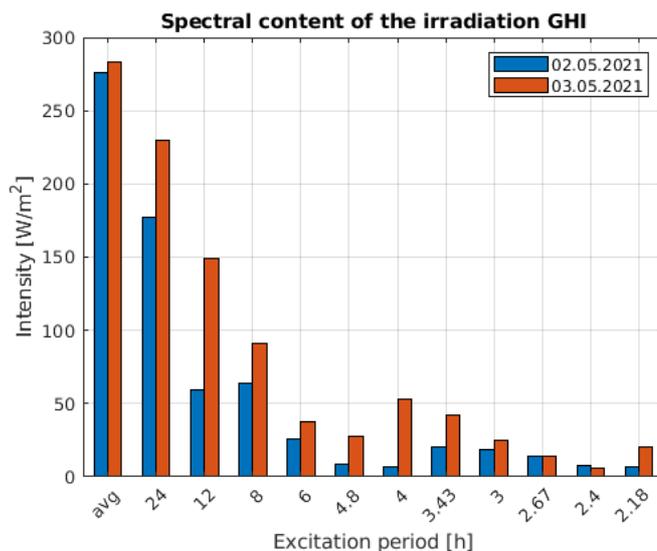


Abbildung 6: Frequenzinhalt der globalen horizontalen Anregungsintensität (GHI) vom 02.05. und 03.05.2021. Gut zu erkennen sind die nicht zu vernachlässigen Oberwellenanteile für die Perioden ≤ 12 h

Eine weitere Methode zur Bestimmung der Anregungsamplitude ist der Einsatz eines Pyranometers, dessen Strahlungsdichtedaten im Anschluss in den Frequenzraum transformiert werden und so ein Maß für die Leistungsamplitude bei der jeweiligen Frequenz bestimmt werden kann. Diese Methode wird in Kapitel 4.3.3 genutzt, um unterstützend zu der oben genannten Methode eine Abschätzung von p_{eq} zu erhalten [22]. Beispielhafte Daten dieser Berechnung sind in Abbildung 6 und der Ablauf der Bestimmung von p_{eq} ist schematisch in Abbildung 7 dargestellt.

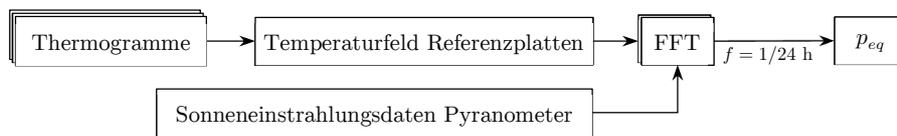


Abbildung 7: Ablaufdiagramm zur Berechnung der äquivalenten Leistungsamplitude

3.1.4 Analogien zum Stufenheizungsversuch

Je nach Wettersituation sind in der solar angeregten Thermografie einige zeitliche Verläufe ähnlich zu einem Stufenheizungsversuch. Insbesondere, wenn bei teilweise wolkenbedecktem Himmel eine Wolkenfront plötzlich aufreißt oder wegzieht, können stufenartige Beleuchtungsszenarien entstehen. Ein solcher Versuch kann, im Gegensatz zur Lock-In-Analogie, jedoch nicht gut geplant werden, da einzelne Wolkenschichten und deren Aufzug nicht präzise über Tage hinweg vorhergesagt werden können. Diese Versuchsanalogie eignet sich daher als zusätzlicher Messvorgang bei Messungen, die durch hohe Bewölkung ohnehin gestört werden.

Beim Stufenheizungsversuch bestehen idealisierte analytische Zusammenhänge der Materialeigenschaften und des Anregungsimpulses. Dabei wird auch hier zwischen thermisch dicken und thermisch dünnen Objekten unterschieden. Thermisch dick bedeutet hierbei, ebenso wie bei der Lock-In-Thermografie, dass die Wärmewelle nur unwesentlich internen Reflexionen (keine Wechselwirkung mit der Rückwand) ausgesetzt ist und sich das Material damit als Quasi-Halbraum verhält. Ideale thermische dicke wird bei unendlicher Dicke erreicht. Thermisch dünn bedeutet, dass sich keine Wärmewelle ausbreitet und das Objekt sich *im Ganzen* erwärmt. Die thermische Dicke kann über die Diffusionslänge μ oder die Wärmewel-

lenlänge λ_T abgeschätzt werden. Die Diffusionslänge μ ist das Ergebnis der Lösung der Diffusionsgleichung für einen Körper der harmonisch-periodischer und großflächiger Bestrahlung ausgesetzt ist (siehe Kapitel 3.1.3), und damit nur bedingt übertragbar auf die Stufenheizungsthermografie.

Die Grundfrequenz f des Anregungsimpulses der Dauer t kann über $f = 1/2t$ bestimmt werden. Dabei bestimmt sich die Diffusionslänge μ beim Stufenheizungsversuch über die Temperaturleitfähigkeit a und die Stufendauer t zu:

$$\mu = \sqrt{\frac{a \cdot 2t}{\pi}} \quad (28)$$

Bei thermisch dicken Objekten ($d \gg \mu$) kann die Effusivität e über die resultierende Temperaturdifferenz ΔT , die Messdauer t , die Dichte ρ , die spezifische Wärmekapazität c_P und die Wärmeleitfähigkeit λ nach Boué und Fournier [55] bestimmt werden zu:

$$\Delta T = 2\dot{q} \cdot \sqrt{\frac{t}{\pi \cdot \lambda c_P \rho}} \quad (29)$$

$$e = \frac{2\dot{q}}{\Delta T} \cdot \sqrt{\frac{t}{\pi}} \quad (30)$$

Bei thermisch dünnen Objekten ($d \ll \mu$) können Materialeigenschaften über die Oberflächenwärmekapazität bestimmt werden. Bei thermisch dünnen Objekten findet der Wärmeaustausch in die Tiefe so schnell statt, dass das thermische Gleichgewicht näherungsweise instantan erreicht und das Prüfobjekt isotherm (in Tiefenrichtung) ist, weswegen nicht die Effusivität, sondern die Oberflächenwärmekapazität c_S bestimmend wirkt (da die Wärmeleitfähigkeit näherungsweise keine Rolle spielt). Über die Oberflächenwärmekapazität können weitere Eigenschaften, wie die Dicke d oder die Wärmespeicherzahl $s = \rho c_P$, je nach a-priori-Wissen, bestimmt werden.

$$\Delta T = \frac{t \cdot \dot{q}}{c_S} \quad (31)$$

$$c_S = \frac{t \cdot \dot{q}}{\Delta T} \quad (32)$$

$$c_S = \rho c_P \cdot d \quad (33)$$

Bei bekannten Materialeigenschaften wie der Dichte ρ und der spezifischen Wärmekapazität c_P kann die lokale Dicke d bestimmt werden und umgekehrt. Dadurch ergeben sich die beiden Formeln:

$$d = \frac{t \cdot \dot{q}}{\Delta T \cdot \rho c_P} \quad (34)$$

$$\rho c_P = \frac{t \cdot \dot{q}}{\Delta T \cdot d} \quad (35)$$

Berücksichtigung inhomogener Anregung:

Gerade bei Feldversuchen ist die Anregungsdichte hohen, natürlich auftretenden Schwankungen ausgesetzt, was eine Korrektur der Anregungsdichte motiviert. Dabei kann die durchschnittliche Wärmedichte \bar{q} über folgendes Integral bestimmt werden zu:

$$\bar{q} = \frac{1}{t} \int_0^t \dot{q}(t) dt \quad (36)$$

Die Integration kann immer dann berechnet werden, wenn die zeitlichen Einstrahlungsdichten $\dot{q}(t)$ bekannt sind. Dies ist der Fall wenn beispielsweise ein Pyranometer verwendet wird. Die oben genannte Methode nach Boué und Fournier [55] nutzt lediglich den Anregungsimpuls (Heizvorgang) zur Materialeigenschaftsbestimmung, genauer, nur die resultierende Änderung der Oberflächentemperatur, bei bekanntem Wärmeeintrag.

Suchan und Hendorfer [13, 14] stellen eine Methode vor, die Effusivität zu bestimmen, durch Nutzen eines Stufenimpulses nicht vernachlässigbarer Breite, der Aufwärmzeit und des Abkühlverhaltens. Die Methode wird als *Linear Effusivity Fit* bezeichnet und in folgendem Kapitel beschrieben.

3.1.5 Linear Effusivity Fit

Diese neuartige Auswertungsmethode für stufenangeregte Proben wurde von Suchan und Hendorfer [13, 14] vorgestellt und zur Porositätsbestimmung von kohlenstofffaserverstärkten Kunststoffproben genutzt. Dabei wird im Zwischenschritt die thermische Effusivität bestimmt. Das Verfahren wurde als Ergänzung zum *Linear Diffusivity Fit* [47] entwickelt und nutzt sowohl den Aufheiz- als auch *Abkühl*-Zeitraum der Probe nach einem Stufenheizungsversuch. Die Konvektion wird hierbei vernachlässigt und es wird davon ausgegangen, dass das Abkühlen der Oberflächentemperatur wird allein durch Konduktion verursacht wird. Daher eignet sich der LEF nur bei thermisch dicken Proben im Prüfmodus *in Reflexion*. Der LEF stützt sich auf das Einsetzen der Laplace-Transformation. s gibt hierbei den Laplace-Operator an und ist nicht zu verwechseln mit der komplexen Temperaturamplitude S .

Die Methode zur Bestimmung der Effusivität besteht aus den folgenden Schritten:

1. Transformation von Anregungsimpuls $q(t)$ und Temperaturantwort $T(t)$ in den Frequenzbereich mittels Laplace-Transformation
2. Bestimmen der Übertragungsfunktion $Z(s)$ des Systems
3. Auftragen der Übertragungsfunktion über $1/\sqrt{s}$
4. Kehrwert der Steigung des linearen Fit der resultierenden Funktion entspricht e

Tabelle 4: Transformation der Wärmeleitungsgleichung und zugehörigen Bedingungen in den Laplace-Raum nach Hendorfer [56]

	Zeitbereich	Frequenzraum (Laplace)
	$T(x, t)$	$\mathcal{L}\{T(x, t)\} = \bar{T}(x, s)$
Wärmeleitungs- gleichung	$\frac{\partial^2}{\partial x^2} T(x, t) = \frac{1}{a} \frac{\partial}{\partial t} T(x, t)$	$\frac{\partial^2}{\partial x^2} \bar{T}(x, s) = \frac{s}{a} \bar{T}(x, s)$
Randbedingung 1	$-k \cdot \frac{\partial}{\partial x} T(x, t) \Big _{x=0} = q(t)$	$-k \cdot \frac{\partial}{\partial x} \bar{T}(x, s) \Big _{x=0} = \bar{q}(s)$
Randbedingung 2	$T(\infty, t) = 0$	$\bar{T}(\infty, s) = 0$
Anfangsbedingung	$T(x, 0) = 0$	$\bar{T}(x, 0) = 0$

Durch die allgemeine Lösung der oben gewonnenen Wärmeleitungsgleichung im Laplace-Raum und einsetzen der Rand- und Anfangsbedingungen gelangt Hendorfer schließlich zu:

$$\bar{T}(0, s) = \frac{\bar{q}(s)}{e \cdot \sqrt{s}} \quad (37)$$

Anschließend wird die komplexe Übertragungsfunktion $Z(s)$ definiert, die das Übertragungsverhalten der Probe im Laplace-Raum angibt:

$$Z(s) = \frac{\bar{T}(0, s)}{\bar{q}(s)} \quad (38)$$

$$= \frac{1}{e \cdot \sqrt{s}} \quad (39)$$

Ändert man nun die Darstellung der x-Achse von s zu $1/\sqrt{s}$, so entsteht eine lineare Funktion der Steigung $1/e$. Daraufhin wird die Steigung mittels linearer Regression ermittelt und invertiert. Das Resultat ist die thermische Effusivität e in $[\text{J}/(\text{m}^2\text{K}\sqrt{\text{s}})]$.

Abbildung 8 und Abbildung 9 veranschaulichen den oben vorgestellten Vorgang mit künstlich generierten Daten. Dabei zeigt Abbildung 8 die Transformation der Signale in den Laplace-Raum. Abbildung 9 zeigt die Übertragungsfunktion und wie diese beim Ändern der Abszisse eine lineare Funktion darstellt, deren Steigung proportional zu e ist.

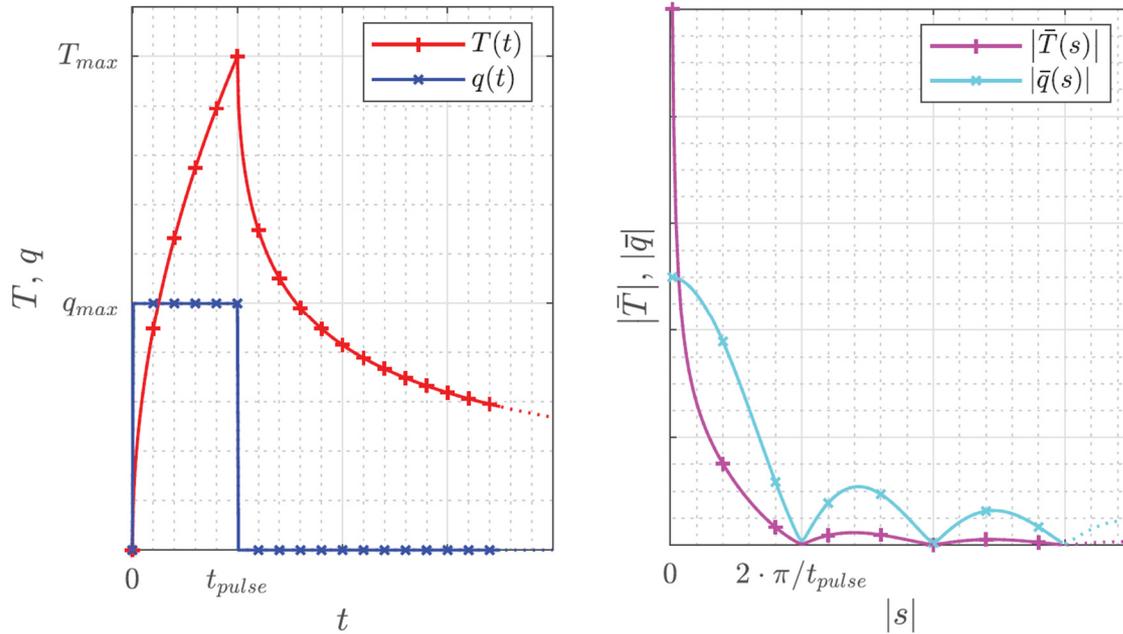


Abbildung 8: Vergleich von einem Anregungsimpuls $q(t)$ und Temperaturantwort $T(t)$ (links) zu deren diskreter Laplace-Transformation $\bar{q}(s), \bar{T}(s)$ (rechts).

Entnommen aus [14].

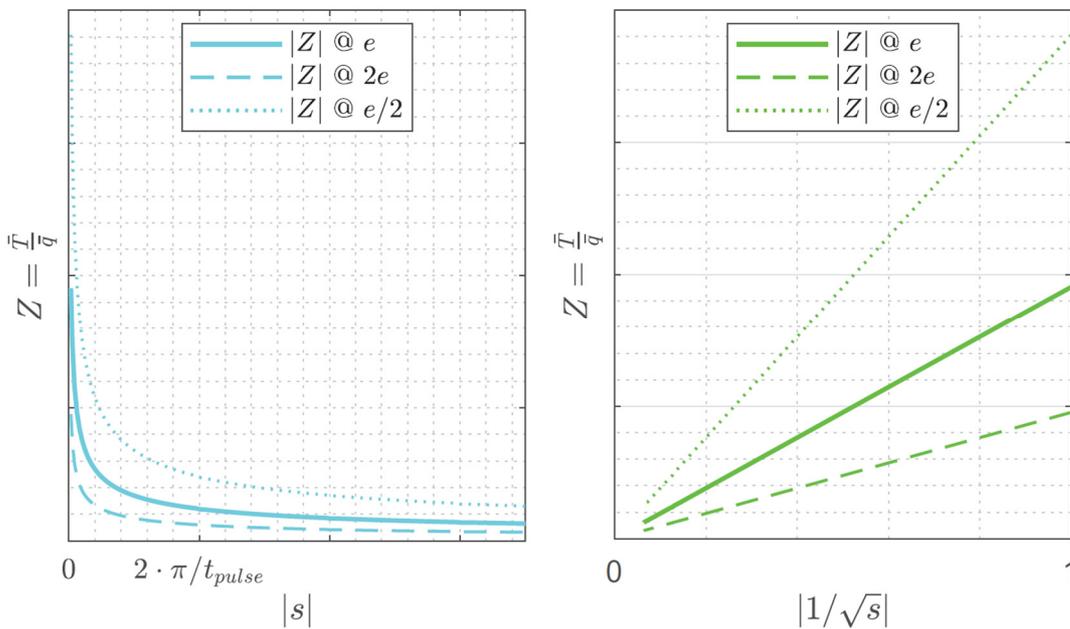


Abbildung 9: Übertragungsfunktion $Z(s)$ für drei theoretische Werte von e (links) und selbige aufgetragen nach $|1/\sqrt{s}|$. Gut erkennbar ist der Zusammenhang zwischen der Steigung der Funktion rechts und $1/e$, welcher zur Eigenschaftsbestimmung genutzt wird.

Entnommen aus [14].

Eine der Herausforderungen dieser Methoden ist die Transformation in den Laplace-Raum. Die hierbei verwendete diskrete Laplace-Transformation ist nicht in Softwarepaketen, wie MATLAB oder GNU Octave verfügbar. Außerdem kann das Verfahren nur an thermisch dicken Objekten durchgeführt werden. Bei thermisch dünnen gilt die Anfangsannahme, dass die Oberflächentemperatur durch die Effusivität bestimmt wird, nicht mehr aufgrund des isothermen Verhaltens. Suchan und Hendorfer [14] ermitteln einen Fehler von ca. 10% bei $d = \mu$ (weder thermisch dick, noch dünn), der bei steigender Dicke d schnell absinkt.

Suchan und Hendorfer [14] nennen folgende Berechnungsgrundlage für die diskrete Laplace-Transformation:

$$\bar{F}(s) = \mathcal{L}\{f(n\eta)\} = \eta \sum_{n=0}^{\infty} e^{-sn\eta} \cdot f(n\eta) \quad (40)$$

Nach Wilcox und Gibson [57] wird $s = 2\pi/T_{mess}$ gewählt. In dieser Arbeit wird folgende Berechnung zur Bestimmung der diskreten Laplace-Transformierten genutzt, dabei gibt s den komplexen Laplace-Operator, σ den Realteil und ω den Imaginärteil dessen an.

$$\begin{aligned} s &= \sigma + j\omega \\ \bar{F}(s) &= \eta \sum_n e^{-(\sigma+j\omega)n\eta} \cdot f(n\eta) \\ &= \eta \sum_n e^{-j\omega n\eta} \cdot (f(n\eta) \cdot e^{-\sigma n\eta}) \\ \hat{f}(n\eta) &= f(n\eta) \cdot e^{-\sigma n\eta} \\ \bar{F}(s) &= \eta \sum_n e^{-j\omega n\eta} \cdot \hat{f}(n\eta) \\ &= \eta \cdot \mathcal{F}\{\hat{f}(n\eta)\} \\ \mathcal{L}\{f(n\eta)\} &= \eta \cdot \mathcal{F}\{f(n\eta) \cdot e^{-\sigma n\eta}\} \end{aligned} \quad (41)$$

Dabei wird die diskrete Fouriertransformation (hier die FFT) genutzt, und die zu transformierende Funktion vorher mit den Faktor $e^{-\sigma n\eta}$ multipliziert. Das Ergebnis dieser Berechnung kann nun über die komplexe Abszisse $|s| = |\sigma + j\omega|$ aufgetragen werden. Der Vorteil dieser Berechnungsmethode liegt in der Nutzung der weit verbreiteten und hochoptimierten FFT. Für Code-Details der Implementierung in MATLAB siehe Anhang (Kapitel 10.1).

3.2 Ausrüstung und Versuchsaufbauten

Dieses Kapitel beschreibt die eingesetzte Ausrüstung und die einzelnen Versuchsaufbauten im Detail und gibt Erfahrungswerte beim Aufbau und der Generierung von Messdaten wider. Ebenso werden die spezifischen Eigenschaften der einzelnen Kameras erläutert, die ihre jeweilige Hard- und Softwareentwicklung notwendig machen und im anschließenden Kapitel erläutert werden.

3.2.1 Thermografiekameras

Zur Aufnahme der Thermogramme werden in dieser Arbeit zwei Thermografiekameras genutzt:

- FLIR¹³ Boson 640
- Leonardo¹⁴ Tamarisk 320

Beide Kameras besitzen eine thermische Empfindlichkeit (NETD) von <50 mK und Bildpunktraster von 640×512 (Boson) und 320×240 (Tamarisk). Die Bildwiederholrate beträgt bei beiden Kameras bis zu 30 Hz, wobei in dieser Arbeit genutzte Bildwiederholraten nie 1 Hz überschritten.

Zum Ansteuern und Auslesen der Kameras wurde anwendungsspezifische Software genutzt die in Kapitel 3.3 erläutert wird. Zur Kalibrierung der Thermografiekameras wurde eine Mehrpunktmessung mittels einer Niedertemperatur-Schwarzkörper-Kalibrierquelle Mikron M345X4 der Firma Advanced Energy¹⁵ durchgeführt. Die Kamera wurde mit derselben Fokuseinstellung, wie auch im Feld, ca. 13 cm vor der Strahlungsquelle aufgestellt und dieser wurde im relevanten Messfenster, von $0 - 35$ °C, in 5 °C Schritten variiert. Zu jedem Temperaturschritt wurden mehrere Rohbilder der Kamera aufgezeichnet und abgespeichert. Die anschließende Kalibrierung der im Feld gewonnenen Daten geschieht mittels der von Quirin entwickelten Zweipunkt-Kalibrierung [34], bei welcher mittels zwei bekannter Temperaturstützstellen von einem linearen Verhalten zwischen Rohdatenwert „Digital Level“ (DL) und der Temperatur ausgegangen wird. Außerdem wurde die Kalibrierkurve gegen die äquivalente Strahlungsdichte L aufgetragen (rechts). Diese wurde über den Wellenlängenbereich von $8 \mu\text{m}$ bis $14 \mu\text{m}$ integriert. Der genaue Algorithmus hierzu ist im Anhang zu finden.

¹³ FLIR Systems, Inc., Wilsonville, Oregon, Vereinigte Staaten

¹⁴ Leonardo S.p.A., Rom, Italien, früher *Leonardo DRS*

¹⁵ Advanced Energy Industries, Inc., Denver, Colorado, Vereinigte Staaten

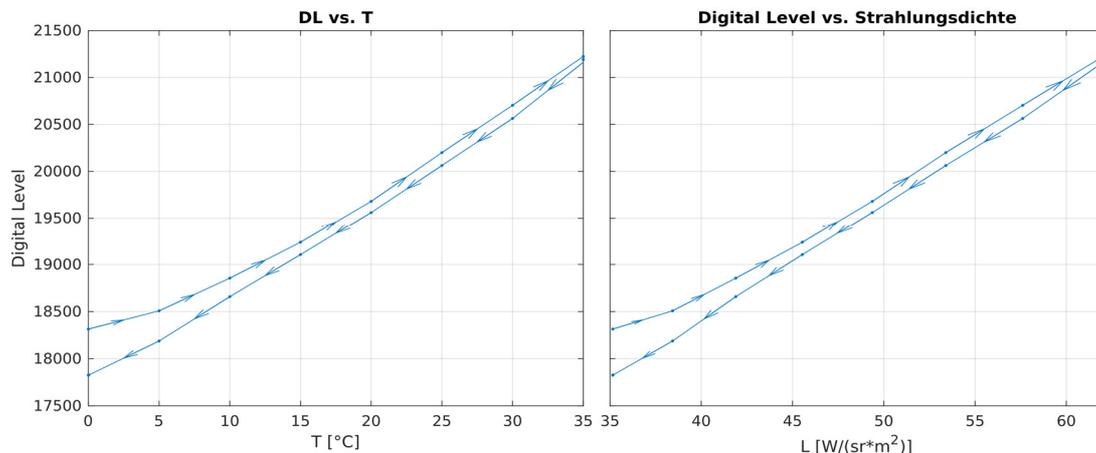


Abbildung 10: Kalibrierkurve Digital Level gegenüber Temperatur (links).

Kalibrierkurve Digital Level gegenüber äquivalenter Strahlungsintensität (rechts).

Hinweis: die Temperatur wurde für 15 Minuten auf 35 Grad gehalten.

Die rechte Abbildung zeigt einen etwas lineareren Zusammenhang als die linke. Dieses Verhalten wird oft bei Mikrobolometer-Kameras beobachtet. Ein Grund dafür ist das Erwärmen (oder Abkühlen) der Kamera selbst und deren Ausgangswerte bei hohen und lang andauernden Temperaturdifferenzen driften [34]. Zur Kalibrierung von Thermogrammen kann nun dieser lineare Zusammenhang genutzt werden. Dazu wird ein linearer Fit von Abbildung 10 (links) angefertigt und abgelegt. Diese Korrekturdaten werden anschließend zur Umrechnung sämtlicher Kamerabilder von Digital Level zur Temperatur genutzt. Die dafür genutzten Skripte befinden sich ebenso im Anhang.

Als weitere Möglichkeit zur laufenden Kalibrierung der Kamera wird ein Kalibrierstrahler zur Verfügung gestellt, welcher sich durch eine besonders hohe Emissivität im LWIR-Bereich ($> 0,97$) auszeichnet. Dieser kann mit einem handelsüblichen Digitalthermometer¹⁶ ausgestattet werden, welches die Temperatur im laufenden Betrieb aufnimmt und zur späteren Kalibrierung bereitstellt. Die tatsächliche Temperatur des Kalibrierstrahlers kann dazu genutzt werden den Drift der Bolometerkamera zu kompensieren und damit die in Abbildung 10 dargestellte Hysterese und den damit einhergehenden Messfehler zu vermeiden.

¹⁶ Typische integrierte Digitalthermometer, die für diesen Einsatzzweck geeignet sind, sind DS18B20 ($\pm 0,5$ °C) oder MAX30208 ($\pm 0,1$ °C) der Fa. Maxim Integrated.

3.2.2 Pyranometer

Ein Pyranometer dient zur messtechnischen Erfassung der Globalstrahlung. Dies wird durch eine Anordnung aus Messfenster, Thermosäule und elektrischer Kontaktierung erzielt. Die Thermosäule gibt eine Spannung aus, die proportional zur ihrer Erwärmung ist. Durch die geschwärzte Oberfläche wird eine Emissivität $\varepsilon \sim 1$ erreicht. Die Erwärmung wird in diesem Bereich etwa proportional zur Bestrahlungsstärke angenommen.

Das in dieser Arbeit genutzte Pyranometer ist ein LP PYRA 03 der Firma Delta Ohm. Delta Ohm stellt Radiometer her, die dem ISO 9060 Standard und den Ansprüchen der *World Meteorological Organization* (WMO) entsprechen. Das genutzte PYRA 03 ist ein sogenanntes Second Class Pyranometer, das entsprechende Genauigkeitsklassen erfüllt und für diesen Anwendungszweck geeignete Ergebnisse liefert (Gesamtfehler in der Größenordnung $\pm 10 \text{ W/m}^2$). Der Sensor verfügt über einen differenziellen Spannungsausgang, der von der ADS1256-Karte digitalisiert wird.

Zum Einfallswinkel / Kosinusfehler:

Die Sonne ändert im Laufe des Tages den Einfallswinkel. Sowohl Azimut (von Ost nach West), als auch Elevation (von Horizont bis Zenit) verändern sich im Tagesverlauf. Fällt die eintreffende Sonnenleistung in einem bestimmten Winkel δ (Zenitwinkel) auf die Erdoberfläche, so wird die Insolation auf die Erdoberfläche projiziert (Unterschied horizontale Strahlungsdichte, GHI und normale Strahlungsdichte, GNI). Bei einem flachen Einfallswinkel wird von horizontalen Flächen die Strahlungsdichte reduziert, da das Sonnenlicht nicht rechtwinklig auftrifft. Die Veränderung der eintreffenden Leistung auf der Oberfläche geschieht um den Faktor $\cos(\delta)$. Diese Art systematischer Messfehler wird in der Messtechnik auch als Kosinusfehler (engl. Cosine error) bezeichnet und tritt bei allen Messaufbauten auf, deren Vektor, welcher gemessen wird, nicht mit dem Vektor übereinstimmt, den der Benutzer messen möchte [58^{S. 182}]. In dieser Arbeit wird daher der horizontale Messwert (GHI) auf den entsprechenden Winkel umgerechnet, sodass der systematische Projektionsfehler berücksichtigt wird.

3.2.3 Laborexperimente

Zur Validierung der Linearitätsvermutung der solar angeregten Thermografie wurde ein Laborexperiment aufgestellt, welches den Einfluss von unterschiedlichen Anregungsperioden auf die Temperaturantwort von thermisch dicken und thermisch dünnen Materialien untersuchen soll. Ziel soll es sein zu validieren, bis zu welcher Anregungsfrequenz die unter vereinfacht gewonnenen Formeln (siehe Kapitel 3.1.3) noch anwendbar sind und ab wann eine systematische Korrektur notwendig ist.

Für den Messaufbau werden drei Prüfobjekte genutzt, die von einer Wärmelampe beleuchtet werden:

- Zwei Aluminium-Referenzplatten als thermisch dünne Referenz
- Ein fehlerfreier Betonblock als thermisch dicke Referenz
- Ein fehlerbehafteter Betonblock zur Charakterisierung der Detektionsempfindlichkeit

Die für diese Arbeit genutzten Referenzplatten sind zwei gefräste Aluminiumplatten aus EN AW 5083 mit den Maßen 300 x 300 x 10 mm und 300 x 300 x 20 mm. Diese wurden einseitig mit „Tetenal Kameralack“ besprüht, um eine hohe Emissivität zu erreichen, damit diese eintreffende Strahlungsenergie bestmöglich aufnehmen können. Die Emissivität der Aluminiumplatten wird dadurch zu der von Beton ($\varepsilon_{\text{Beton}} \approx 0,95$) vergleichbar. Dieses Vorgehen wird auch als „Schwarz-Bemalung“ (engl. black-painting) bezeichnet und ist eine gängige Methode zur Emissivitätskorrektur von Prüfobjekten [15^{S. 322}]. Hier bezeichnet „Schwarz“ die Farbe des Objekts im Infrarotband. Das bedeutet, dass spezielle hochemissive Lacke auch weiß (im sichtbaren Bereich) sein können¹⁷. Nachteile dieses Vorgehens sind hoher Aufwand in der Vorbereitung und die geringe Praxistauglichkeit im Produktionsumfeld (Trocknungszeit, Lackkosten).

¹⁷ Wie zum Beispiel bestimmte Heizkörperlacke

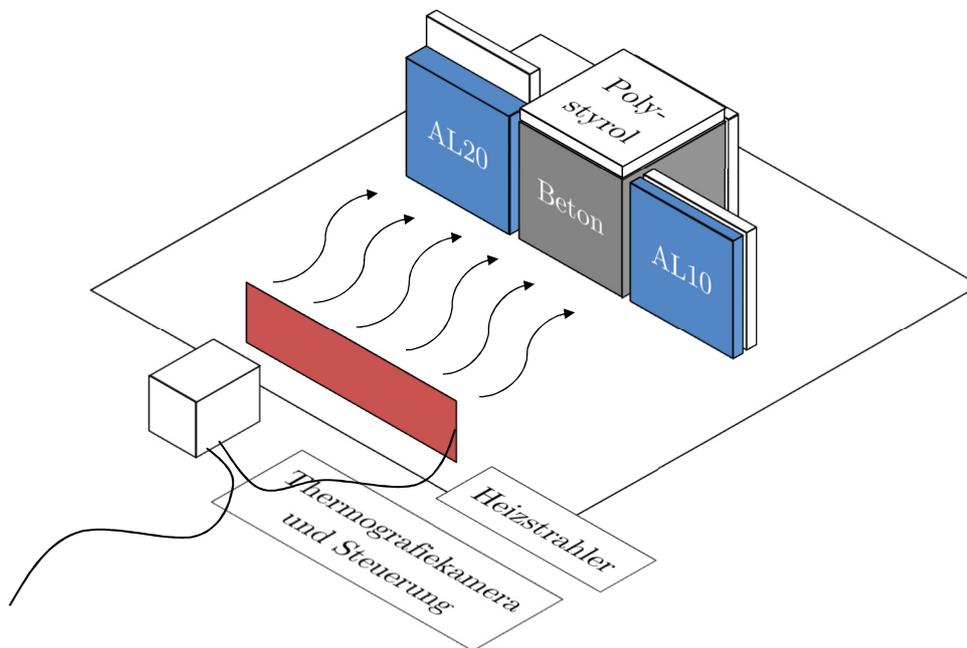


Abbildung 11: Schematischer Laboraufbau mit Betonblock (grau) und Aluminiumplatten (blau). Auch dargestellt ist der Polystyrol-Wärmedämmstoff, der an Rück- und Seitenwände angebracht wurde.

In Abbildung 11 ist der Aufbau des Laborexperiments schematisch dargestellt. Der Heizstrahler ist ein handelsüblicher Infrartheizstrahler der Firma Sempotec¹⁸ (Modell NX-9010-919) und hat eine Nennleistung von 3 kW. Durch den gewählten Abstand und die experimentelle Auswertung ergibt sich eine Beleuchtungsstärke von ca. 800 W/m^2 auf den Prüfobjekten.

Der Steuercomputer steuert mit einstellbarem Intervall die Heizlampe periodisch an. Die Thermografiekamera zeichnet sämtliche Versuche mit 1 Bild pro Sekunde auf. Die Messdaten werden im Anschluss in MATLAB eingelesen und weiterverarbeitet.

¹⁸ PEARL GmbH, Buggingen, Deutschland

Zur Einordnung des Verfahrens in den Kontext verwandter ZfP-Verfahren wird ein fehlerbehafteter Betonblock hergestellt, der verschiedene Ungängen in unterschiedlichen Tiefen beinhaltet. Die hier eingebrachten Ungängen sind aus aufgeschäumtem Polystyrol und weisen ähnliche thermische Eigenschaften wie Luft auf¹⁹. Der Reflexionsfaktor an der Grenzfläche Beton zu Ungänge beläuft sich damit auf beinahe 1. Eine genaue Anordnung mit Größentabelle befindet sich in Tabelle 5.



Abbildung 12: Blick von oben in die gefertigte Schalungsform für den Betonblock mit den eingebrachten Ungängen. Zu erkennen sind die einzelnen EPS²⁰-Quader, die als Pseudo-Luftein-schlüsse in verschiedenen Größen und Tiefen an Holzspießen befestigt sind.

Insgesamt wurden neun einzelne Ungängen in den Betonblock eingebracht, die das Auflösungsvermögen von Ungängen des solar angeregten Systems darstellen sollen. Abbildung 12 zeigt die Schalungsform des Betonblock vor dem Gießen. In der untenstehenden Tabelle 5

¹⁹ Effusivität Polystyrol (aufgeschäumt): $30 \text{ J}/(\text{m}^2\text{K}\sqrt{\text{s}})$, Luft: $6 \text{ J}/(\text{m}^2\text{K}\sqrt{\text{s}})$, im Vergleich zur Effusivität von Beton: ca. $2000 \text{ J}/(\text{m}^2\text{K}\sqrt{\text{s}})$

²⁰ Expandiertes Polystyrol

sind alle Ungängen einzeln aufgelistet. Dabei wurde außerdem das Aspektverhältnis $AV = \frac{\text{Seitenlänge}}{\text{Tiefe}}$ als Detektionsmaß angegeben, wobei generell höhere Aspektverhältnisse mit höherem Signal-Rausch-Verhältnis abbildbar sind. Das Verhältnis der Tiefe zur thermischen Diffusionslänge muss bei jedem Experiment separat berechnet werden, da die Diffusionslänge von der Anregungsfrequenz abhängt.

Tabelle 5: Übersicht über die eingebrachten Ungängen und deren jeweiliges Aspektverhältnis

Ungänge	Größe [cm]	Tiefe [cm]	AV
#1	10 x 10 x 1	10	1
#2	10 x 10 x 1	5	2
#3	9 x 9 x 3	3	3
#4	6 x 6 x 2	2	3
#5	3 x 3 x 1	1	3
#6	3 x 3 x 1	2	1,5
#7	3 x 3 x 1	3	1
#8	3 x 3 x 1	4	0,75
#9	3 x 3 x 1	5	0,6

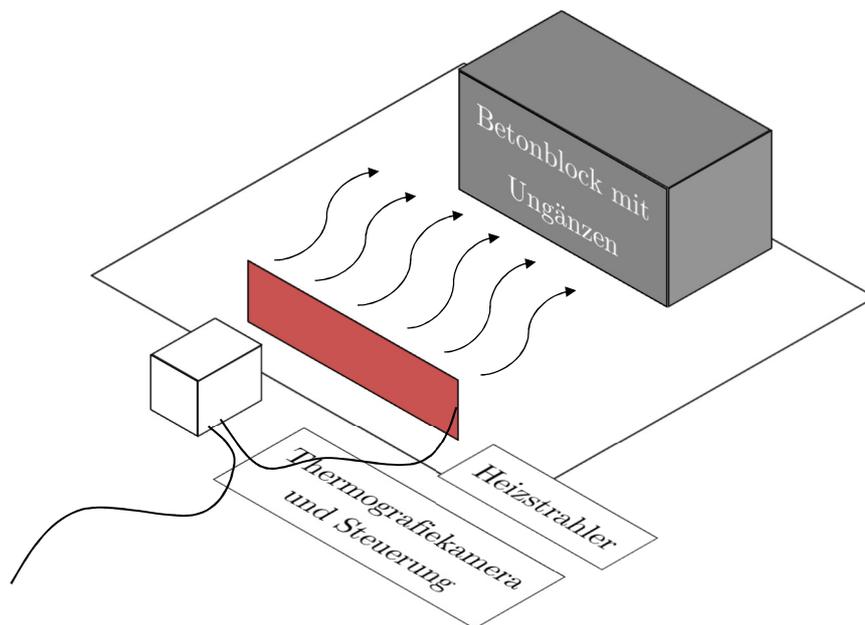


Abbildung 13: Schematischer Laboraufbau des Versuchs mit dem Betonblock mit eingebrachten Ungängen.

3.2.4 Feldexperimente

Die Feldexperimente zeichnen sich im Vergleich zu den Laborexperimenten vor allem dadurch aus, dass die Materialeigenschaften der Prüfobjekte nicht vollständig bekannt sind, jedoch die echten Anregungsbedingungen der solar angeregten Thermografie wirken. Dies bedeutet, dass auch die Auswertung der 24h-Perioden möglich wird.

Die ersten Feldexperimente fanden ohne jegliche Referenz statt und werden in Kapitel 4.3.1 vorgestellt. Dieses und später auch andere Experimente fanden auf dem Betriebsgelände der „RAG Montan Immobilien“ in Fischbach, Camphausen statt, einem stillgelegten Untertagebau-Gelände. Im weiteren Verlauf der Arbeit wird dieses Versuchsfeld als *Camphausen* bezeichnet.

Die untersuchte Standmauer in Camphausen ist von besonderem Interesse, da es sich hierbei um eine historische Mauer aus der Zeit der Errichtung der Grube handelt. Die Mauer selbst besteht selbst besteht aus einer Reihe von Baumaterialien, vorwiegend mit Mörtel verbundene Sandsteine unterschiedlicher Größe und Tiefe. Durch die Erklärung des Gruben-

geländes als „Prioritärer Bergbau-Denkmalstandort“²¹ besteht für die RAG Montan Immobilien besteht ein Interesse am Erhalt der Grubenanlage. Die solar angeregte Thermografie wird mit anderen Methoden als Prüfmittel für die Charakterisierung der Mauer eingesetzt [59]. Ziel der Untersuchungen in Camphausen ist die Untersuchung der solar angeregten Thermografie auf Tauglichkeit verdeckte Ungängen wie Wassereinschlüsse, Ablösungen oder Risse zu erkennen.

Abbildung 14 und Abbildung 15 zeigen das Versuchsgelände. Dort ist gut die Standmauer zu erkennen, die das höhergelegene Betriebsgelände zur tiefer liegenden Bahnstrecke abstützt. An dieser, ca. 390 m langen Stützmauer wird ein Abschnitt am südlichen Teil der Struktur thermografisch untersucht. Dieses Teilstück zeichnet sich von dem Rest der Mauer ab, da es lediglich an einem Streifen mit Putz bedeckt ist und sonst direkt der vermauerte Sandstein freiliegt. Dies ist besonders für die thermografische Prüfung interessant, da keine Putzschichten zwischen Oberfläche und Grundmaterial der Mauer liegen.

Außerdem sind die thermischen Materialeigenschaften von Sandstein bekannt, sodass in erster Näherung ein Wert für diese angenommen werden kann. Im tieferen Verlauf der Mauer sind weitere Sandsteine verbaut, jedoch ist der exakte rückwärtige Aufbau unbekannt [59].

Ein weiteres Experiment wird wegen Zugänglichkeitsproblemen zu der Zeit auf dem Balkon des Autors durchgeführt (Kapitel 4.3.3). Es zeigt zwei isolierte, verputzte Hauswände, eine verputzte Garage und eine Pflastersteinstraße, die auf ihre Effusivität untersucht werden.

²¹Quelle online (abgerufen am 16.01.2022): https://www.saarland.de/mbk/DE/portale/industriekulturportal/industriekultur/OrteIndustriekulturSaarland/denkmaelersteinkohle/bergbaudenkmalcamphausen/bergbaudenkmalcamphausen_node.html

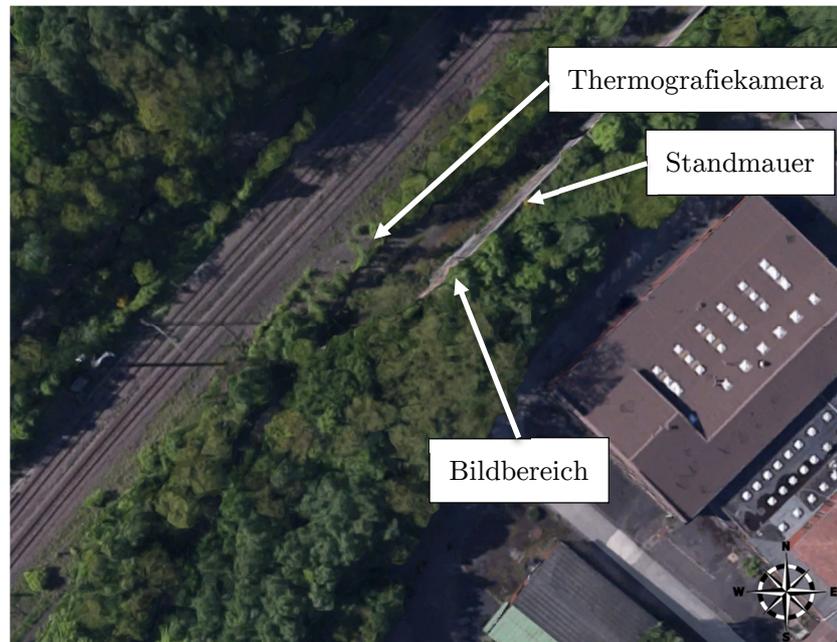


Abbildung 14: Kartenbild des Versuchsgeländes Camphausen.

Bilder © 2021 Google, Kartendaten © 2021 GeoBasis-DE/BKG (© 2009)

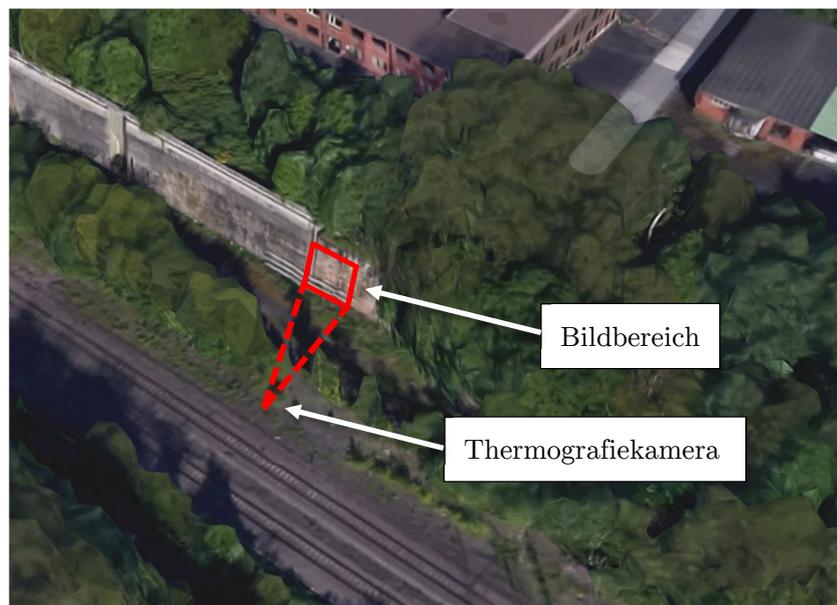


Abbildung 15: Schrägansicht des Versuchsgeländes mit Sicht auf die Messfläche.

In Rot dargestellt ist der Bildbereich und der Blickwinkel der Kamera.

Bilder © 2021 Google, Kartendaten © 2021 GeoBasis-DE/BKG (© 2009)

3.3 Hard- und Software-Entwicklung

Für die Aufzeichnung der Messdaten wird eigens Hard- und Software entwickelt, die die verschiedenen genutzten Sensoren auslesen kann und die Messungen verwaltet. Zu den beiden Kameras gibt es zwei wesentliche Entwicklungsstufen der Hardwareplattform, die im Detail vorgestellt werden. Im Anhang befinden sich zudem relevante Auszüge aus dem genutzten Quellcode.

3.3.1 Systemkonzept

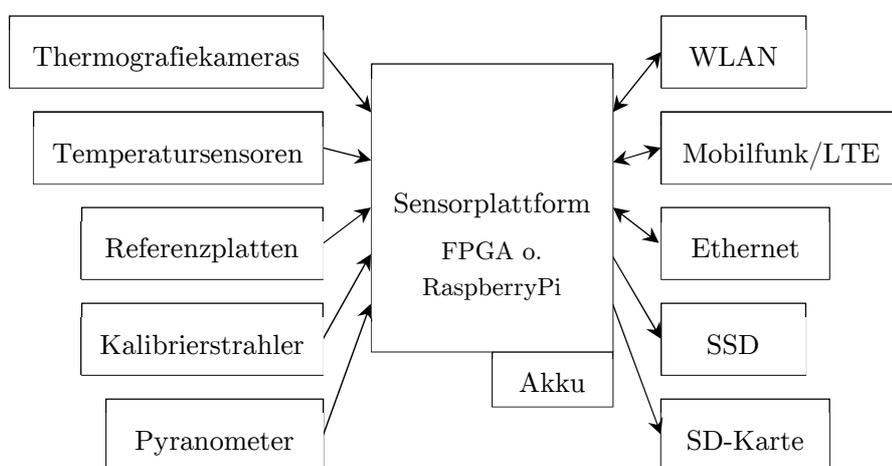


Abbildung 16: Übersicht über das Systemkonzept der verwendeten Plattform. Ein- und Ausgänge sind jeweils links und rechts angeordnet.

In Abbildung 16 ist das Systemkonzept als Blockdiagramm dargestellt. Als zentrale Einheit dient die sogenannte Sensorplattform, die wiederum, je nach Thermografiekamera, aus dem FPGA-basierten System oder dem RaspberryPi-System besteht.

Zur Thermografie-Messdatenerfassung werden für beide Kameras auf den entsprechenden Systemen Intervalometer-Anwendungen geschrieben, die eine regelmäßige Bilddatenaufnahme mit großen Abständen zwischen einzelnen Bildern ermöglichen (z.B. ein Bild je 60s).

Das System soll außerdem in der Lage sein, energieautark Messungen über mehrere Tage zu ermöglichen, die sowohl das Aufzeichnen von Thermografiebildern, als auch Einstrahlungsdaten via Pyranometer umfassen. Währenddessen oder im Anschluss soll es möglich sein, auf die aufgezeichneten Daten über ein beliebiges Netzwerkprotokoll (WLAN, Ethernet, LTE)

zuzugreifen und diese zur Auswertung herunterzuladen. Dabei können die Daten wahlweise auf die systemeigene SD-Karte oder eine via USB abgeschlossene SSD abgelegt werden.

Durch diese Konfiguration soll eine flexible Auswertungsstrategie ermöglicht werden. Ein Beispiel einer solchen Strategie wäre das kontinuierliche Auswerten der Thermografiedaten, bis ein bestimmter Grenzwert von Datenqualität erreicht ist, und ein Signal auslöst, dass die Messung bereit ist beendet zu werden.

Zur Tamarisk 320 LWIR Kamera:

Diese Kamera verfügt über eine CameraLink-Schnittstelle, als Datenübertragung der Thermogramme. Zur Steuerung bietet diese Kamera eine serielle Schnittstelle. Die serielle Schnittstelle wird mit einem handelsüblichen USB-Seriell-Wandler²² realisiert, dessen Treiber unter allen üblichen Betriebssystemen funktionieren.

Wegen der elektrischen Eigenschaften der CameraLink-Schnittstelle wird auf einem FPGA-basierten System aufgebaut. Hierzu wird das Entwicklungsboard „PicoZed“ der Firma Avnet²³ genutzt, welches auf der „Xilinx PicoZed FMC Carrier Card“ aufgesteckt ist. Das PicoZed-Board besteht im Kern aus dem FPGA „Xilinx ZYNQ 7010“. Hierauf wird eine eigenentwickelte CameraLink-Schnittstelle programmiert.

Diese CameraLink-Schnittstelle speichert die von der Kamera gesendeten Bilddaten in einem vorher definierten RAM-Abschnitt ab, welcher wiederum von der Anwendungssoftware unter Linux ausgelesen werden kann. Außerdem hat die Linuxanwendung den Empfang der Bilddaten via DMA-Steuerung zu koordinieren (dazu mehr in Kapitel 3.3.3).

Generell lässt sich der Datenfluss über ein Blockschaltbild (Abbildung 20) gliedern. Die Dateneingabe der CameraLink-Daten (spez. die Datensynchronisation) in den FPGA ist in Kapitel 3.3.3 beschrieben.

Zur Boson 640 LWIR Kamera:

Die FLIR Boson 640 verfügt, im Gegensatz zur vorherig genannten Kamera, über Video-Datenübertragung per USB. Die Kamera spezifiziert sich dabei als UVC-Gerät (USB Video Class) und stellt damit die gleiche Schnittstelle für das Betriebssystem zur Verfügung, wie beispielsweise handelsübliche Webcams. Das bietet den Vorteil, das betriebssystemeigene

²² Viele USB-Seriell-Schnittstellen basieren auf dem günstigen CH340-Chipset der Firma *Nanjing Qinheng Microelectronics Co., Ltd., China*. Dieser wird von allen üblichen Betriebssystemen unterstützt.

²³ Avnet Inc., Phoenix, Arizona, Vereinigte Staaten

Softwarekomponenten den Bildempfang ermöglichen. Unter Linux sind diese Komponenten die Gerätetreiber `/dev/video*`, basierend auf dem zugrundeliegenden Softwaretreiber *Video4Linux*. Dadurch ist es möglich über vorhandene Video-Werkzeuge einzelne Bilder abzuspeichern, ohne den Entwicklungsaufwand eines eigenen Framegrabbers²⁴.

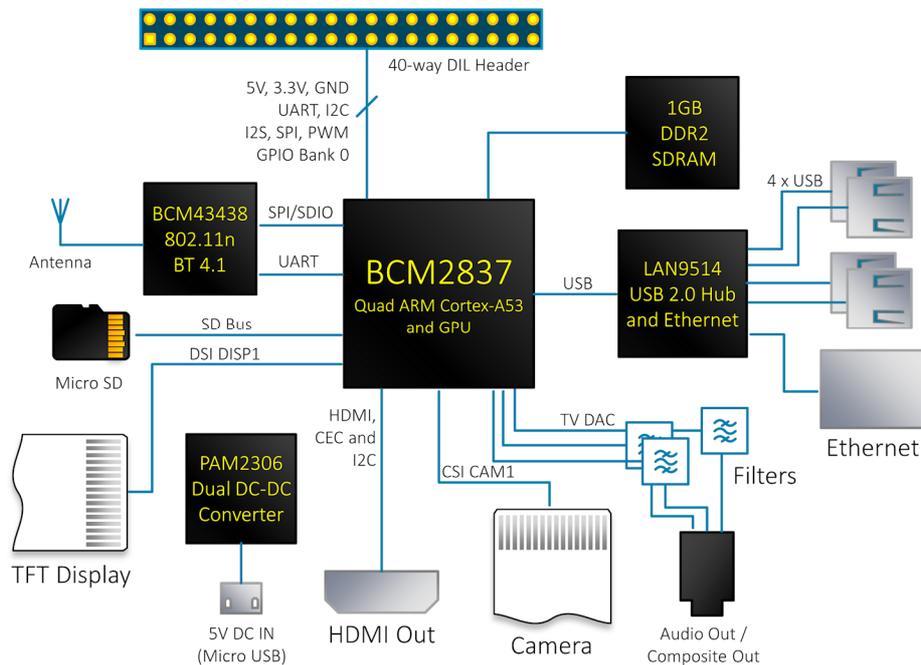
Aus diesem Grund wird für einige Experimente der FLIR Boson Kamera die Entwicklungsplattform Raspberry Pi gewählt, die durch ihre leistungsfähige Hardware und gute Kompatibilität für diesen Zweck ebenso geeignet ist. Außerdem ist die Raspberry-Plattform eine der meistverkauften Computerplattformen der Welt²⁵, was wiederum dazu führte, dass sich eine sehr große Community rund um diese Hardware gebildet hat, die es vereinfacht, auftretende Probleme schnell zu lösen²⁶. Außerdem besticht die Raspberry-Community durch eine Vielzahl an vorgestellten Projekten, die nicht selten sämtliche genutzte Software veröffentlichen und es somit weiter vereinfachen, für den Nutzer einige Lösungen innerhalb kurzer Zeit zu entwickeln.

Abbildung 17 zeigt den schematischen Aufbau des RaspberryPi 3. Zu erkennen sind die verschiedenen vorhandenen Schnittstellen die in dieser Arbeit genutzt werden: Ethernet, USB, SD-Karte und SPI.

²⁴ <https://www.kernel.org/doc/html/v4.14/media/v4l-drivers/index.html> dokumentiert das V4L (Video4Linux) Subsystem und den hier genutzten UVC-Treiber.

²⁵ <https://magpi.raspberrypi.org/articles/raspberry-pi-sales> RaspberryPi Verkäufe liegen 2017 schon über den des Commodore64, welcher als meistverkaufter Computer überhaupt galt.

²⁶ Z.B. via dem RaspberryPi-Forum, online erreichbar unter <https://www.raspberrypi.org/forums/>.

Abbildung 17: Raspberry Pi 3 Architektur – Abbildung aus ²⁷

3.3.2 Softwarekonzept

Für die FLIR Boson 640 USB-Kamera wurde ein Bash²⁸-Skript erstellt, welches in einem konfigurierbaren Zeitintervall ein Kamerabild mittels V4L2 von der Kamera als unkomprimierte Rohdatei abrufen, welches im Anschluss mittels gzip gepackt, komprimiert und abschließend auf der SD-Karte des Systems abgelegt wird. Ebenso möglich ist es, die Messdaten auf einer externen Festplatte (wie z.B. einer SSD) mit einer hohen Speicherkapazität für sehr lange Laufzeiten abzulegen. Zur Verbesserung der Ausfallsicherheit wird die Kamera bei neu gestartet, falls ein Fehler bei der Bildaufnahme auftritt. Dies geschieht über eine speziell für den RaspberryPi ausgelegten USB-Steuer-Software, die es ermöglicht, das angeschlossene USB-Device einem „power cycle“²⁹ zu unterziehen. Das gesamte Steuer-Skript findet sich im Anhang.

²⁷ <https://www.element14.com/community/community/raspberry-pi/blog/2017/01/16/raspberry-pi-3-block-diagram> (Abgerufen am 11.05.2021)

²⁸ „Bash“ ist ein Kommandozeilen-Interpreter in Linux-Betriebssystemen

²⁹ Power cycle bedeutet einen Neustart erzwingen, durch zwischenzeitliches Stromlosschalten

Abbildung 18 zeigt das Softwarekonzept für die Messdatenerfassung beider Thermografiekameras.

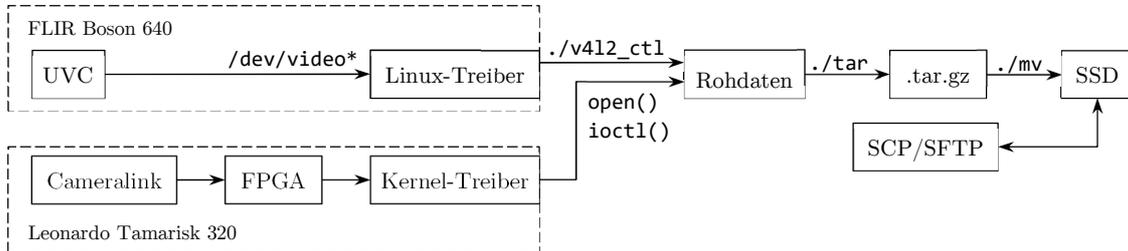


Abbildung 18: Softwarekonzept für die Messdatenerfassung der Thermografiekameras

In Abbildung 19 ist schematisch der Datenfluss für die Messdatenaufnahme des Pyranometers dargestellt. Der Sensor erzeugt eine differenzielle Spannung proportional zur Einstrahlungsdichte, die vom ADS1256 digitalisiert wird. Im Anschluss werden die digitalen Daten über den SPI³⁰-Bus und die entsprechenden Treiber von einer C-Anwendung gelesen. Diese speichert wiederum laufend die Messwerte in einer .csv³¹-Datei.

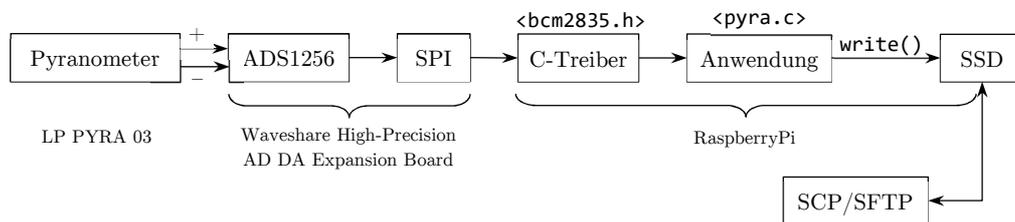


Abbildung 19: Softwarekonzept der Datenaufnahme des Pyranometers via der Erweiterungsplatine ADS1256.

Die Ausgangsspannungskonstante des Sensors beträgt laut Werkskalibrierung $c_{Pyr} = 13,23 \mu V/(W/m^2)$ und wird mit einer Auflösung von 24 Bit digitalisiert. Die Erweiterungsplatine basiert auf dem integrierten Analog-Digital-Umsetzer ADS1256 von Texas Instruments und enthält einen integrierten Messverstärker, der auf eine Verstärkung von bis zu 64 eingestellt werden kann. Dies ergibt bei einer Referenzspannung von 3,3V eine theoretische Messauflösung von:

³⁰ Serial Peripheral Interface – Eine digitale Schnittstelle auf Leiterkartenebene

³¹ Comma-separated values – Durch Kommata getrennte Messwerte in einer Textdatei

$$A_{\text{th}} = \frac{V_{\text{ref}}}{2^{\#Bits} \cdot PGA \cdot c_{\text{Pyr}}} = \frac{3,3 \text{ V}}{2^{24} \text{ LSB} \cdot 64 \cdot 13,23 \text{ } \mu\text{V} / \left(\frac{W}{m^2}\right)} = 2,32 \cdot 10^{-4} \frac{W}{\text{LSB}} \quad (42)$$

Diese theoretische Auflösung wird von den Rauscheigenschaften des Analog-Digital-Umsetzers begrenzt, sodass nicht die theoretische, sondern immer eine niedrigere, effektive Auflösung zur Verfügung steht. Das Datenblatt des genutzten ADS1256 nennt zwei weitere Bit-tiefen: die „*ENOB*³²“ und die „*rauschfreie Bittiefe*“. Diese beiden Werte sind abhängig von den gewählten Einstellungen in der analogen Verarbeitungskette des Umsetzers. Bei 5 SPS und einer PGA-Verstärkung von 64 ergeben sich ein *ENOB* von 21,8 Bits und eine *rauschfreie Bittiefe* von 19,3 Bits [60]. Der *ENOB*-Wert ist höher, da er den Signal-Rausch-Abstand von einem vollausgesteuerten Signal am Eingang des Umsetzers mit dessen, über die Fouriertransformation bestimmten, Grundrauschpegels vergleicht [61]. Der für diese Arbeit anwendbare Wert ist die *rauschfreie Bittiefe*.

Durch Einsetzen dieses Wertes ergibt sich nun die effektive Auflösung des Messsystems:

$$A_{\text{eff}} = \frac{3,3 \text{ V}}{2^{19,3} \text{ LSB} \cdot 64 \cdot 13,23 \text{ } \mu\text{V} / \left(\frac{W}{m^2}\right)} = 6 \cdot 10^{-3} \frac{W}{\text{LSB}} \quad (43)$$

Diese Auflösung übertrifft die Genauigkeitswerten von dem Sensor weit und ist damit geeignet zur Umsetzung des Sensorsignals. Die nicht genutzten Analogeingänge der Karte werden mit Masse verbunden, um ungewünschtes Übersprechen zu vermeiden.

Die Genauigkeit des Sensors selbst ist im Datenblatt [62] beschrieben und beläuft sich auf ca. $\pm 10 \text{ W}/m^2$. Andere systematische Fehler, wie die Empfindlichkeitsänderung über die Zeit oder Nicht-Linearität und einer Richtungsabhängigkeit können jeweils ca. $\pm 3\%$ relativen Fehler erzeugen.

An die Zeitsynchronisation sind in diesem Anwendungsfall nur geringe Anforderungen gestellt, da keine abrupten Events mit einer Genauigkeit von unter einer Sekunde synchronisiert werden müssen. Daher erfolgt sämtliche Synchronisierung über Zeitstempel des Systems, das bedeutet, das beim Ablegen der Messwerte die aktuelle Systemzeit als Wert mitabgelegt wird, um bei der Auswertung im Nachhinein als Zeitwert zu gelten. Hierbei wird zwar ein gewisser systematischer Fehler gemacht, der aber für diese Anforderungen vernachlässigbar gering ist.

³² ENOB = Effective Number Of Bits

3.3.3 Hardwarebeschreibung und Kernel-Treiber

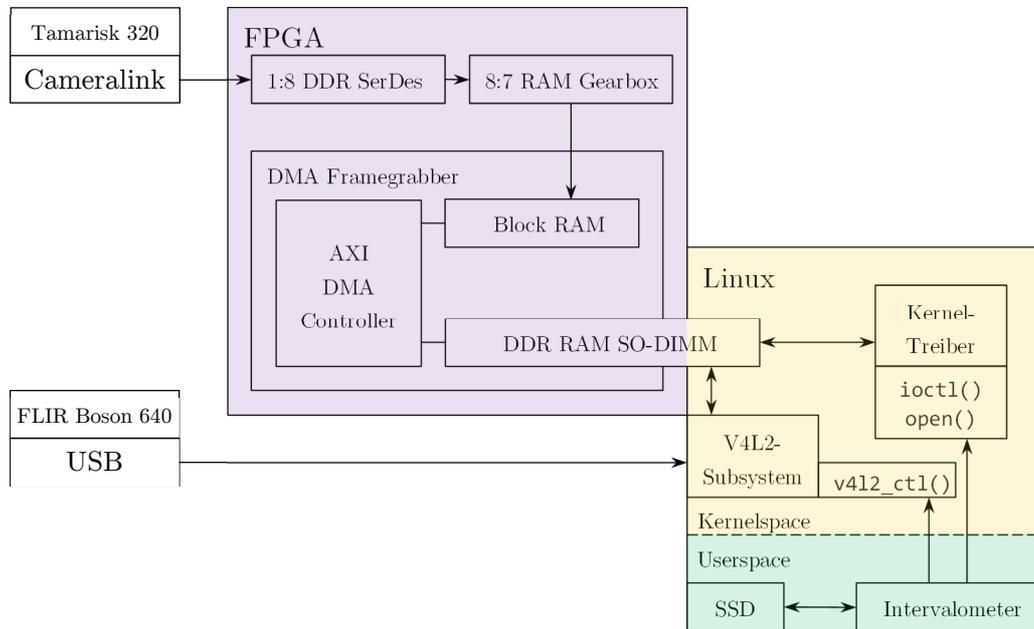


Abbildung 20: Übersicht über den Datenfluss der beiden verwendeten Kameras. Die farblich unterlegten Bereiche dienen zur visuellen Abtrennung der einzelnen Teilbereiche, für die separate Software geschrieben wurde.

Dieses Unterkapitel umfasst die Hardwarebeschreibung des FPGAs, im Detail die CameraLink-Schnittstelle, den Framegrabber und den Kerneltreiber, der zum Ansteuern und auslesen der einzelnen Frames geschrieben wurde. Abbildung 20 zeigt einen Überblick über den Datenfluss der Hardware. Die CameraLink-Implementierung wurde eigens angefertigt, um auf externe Komponenten zu verzichten, da so Kosten und Energiebedarf eingespart werden kann. Außerdem können weitere Funktionen, wie Auswertalgorithmen, direkt im FPGA nach Bedarf implementiert werden, um weitere Rechenzeit im Prozessor einzusparen.

Die CameraLink-Schnittstelle ist eine standardisierte Bildübertragungsspezifikation, die es erlaubt über mehrere LVDS-Lanes Rohbild-Daten zu übertragen [63]. Üblicherweise beträgt die Anzahl der Daten-Lanes vier und ein Signal dient als Takt und Synchronisierung.

Jede LVDS-Lane wird als ein Adernpaar ausgeführt. Damit beträgt die Anzahl der Eingänge am FPGA insgesamt zehn. Diese zehn Signale werden im FPGA mit differenziellen

Eingangsbuffern verbunden, die die fünf LVDS-Signale empfangen und der nachfolgenden Logik zur Weiterverarbeitung zur Verfügung stellen.

Der erste Schritt der Signalkette ist die Taktrückgewinnung mittels Phasenregelschleifenblock (MMCM/PLL). Diese vervielfacht die eingehende Clock und erzeugt dabei eine phasensynchrone Ausgangslock, die an die fünf Deserialisierungsblöcke (SERDES) angelegt wird. Diese dekodieren die vier Daten-Lanes und die Clock-Lane (zur Clock-Lane später mehr) und stellen acht empfangene Bits pro Ausgangslock der weiteren Logik zur Verfügung.

Die acht Bits pro Takt sind hardwarespezifisch festgelegt, und eine Umsetzung von acht zu sieben ist notwendig. Hierzu wird eine sogenannte „Gearbox“ verwendet, die in diesem Fall aus einem BRAM-Block besteht, der als Synchronisierungsstufe zwischen zwei Clock-Domänen dient, die im Verhältnis 8:7 stehen. Die Gearbox übernimmt das notwendige Schieben der einzelnen Bits an deren entsprechende Stellen, sodass für die nachfolgende Logik eine *sieben Bit pro Takt* Datenrate, wie sie CameraLink vorgibt, entsteht.

Die Clock-Lane, wird nicht nur zur Aufbereitung des Abtast-Taktes genutzt, sondern ebenfalls als Datenleitung interpretiert, da die Clock-Lane nicht nur als Taktgeber, sondern auch als Synchronisierung der Datenpakete dient. Abbildung 21 zeigt das Taktdiagramm eines Datenpaketes, welches einen Pixel über CameraLink überträgt. Zu erkennen ist, dass die Eingangsclock (1x CLK) in einem definierten Phasen-Verhältnis zu den übertragenen Daten steht. Eine korrekte Synchronisation ist erreicht, wenn die Clockbits in jedem 7-Bit-Datenpaket ‚1100011‘ lauten. Eine Fehlsynchronisation würde z.B. ein 7-Bit Datenwort von ‚1000111‘ erzeugen. In diesem Falle würde entweder die Gearbox, oder Eingangsverzögerungsleitungen angewiesen werden den Datenstrom um ein Bit zu verschieben.

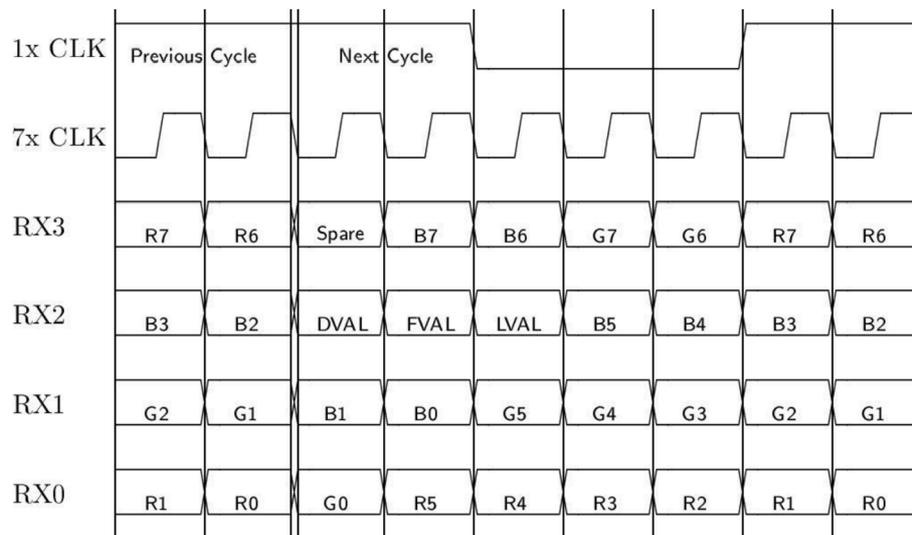


Abbildung 21: Taktdiagramm der CameraLink-Datenübertragung mit den vier Daten-Lanes (RX0-RC3) und der Clock-Lane (1x CLK) und den jeweiligen Bits. Die Werte DVAL, FVAL und LVAL dienen zur späteren Synchronisation der Pixel in Zeilen und Frames. R0-R7, G0-G7 und B0-B7 sind die einzelnen Bits der drei Farbkanäle. Diagramm entnommen aus [64].

Die resultierenden vier 7-Bit-Werte können nun zu den Bildinformationen umgesetzt werden. Die Ausgangsdaten sind: Rohe Pixelwerte (14 Bit), horizontale Synchronisation (1 Bit) und vertikale Synchronisation (1 Bit). Mit dieser Datenschnittstelle wird der Framegrabber aufgebaut.

Der Framegrabber hat die Aufgabe, die Zeilensynchronisierung und vertikale Synchronisierung (ganzes Frame) sicherzustellen und die einzelnen Pixelwerte in einem geeigneten Speicherbereich abzulegen, auf den später Linux-Software zugreifen kann. Dabei nutzt der hier implementierte Framegrabber einen sogenannten AXI-DMA-Block³³ und einen BRAM-Block als Zeilenspeicher. Zuerst wartet der Framegrabber auf das vertikale Synchronisationszeichen, welches den Start eines Bildes markiert, dann wartet er auf das Zeilensynchronisationszeichen und beginnt die nachfolgenden 320 Pixel in den Zwischenspeicher (BRAM) abzulegen. Parallel dazu wird der DMA-Controller angewiesen, die nach und nach eintreffenden Pixel-Daten vom BRAM in das (deutlich größere) DRAM zu übertragen. Dabei wurde der Framegrabber

³³ AXI: Advanced eXtensible Interface, on-chip Datenschnittstelle
DMA: Direct Memory Access, automatisierte Datenübertragung

im Vorfeld so konfiguriert, dass die entsprechende DRAM-Adresse bereits eingetragen ist (zum Kernel-Treiber später mehr). Ein DMA-Controller wird deshalb gewählt, da der DRAM-Zugriff nicht immer bedingungslos möglich ist und eine gewisse Logik vorhanden sein muss, die bei z.B. gleichzeitigem Zugriff die Transaktion pausiert, bis der DRAM-Controller neue Datenworte empfangen kann. Dies geschieht mit der Nutzung eines DMA-Controllers automatisch [65]. Das gesamte Thermografiebild wird nun Pixel für Pixel empfangen und in den DRAM übertragen. Nach dem Empfang von 240 Zeilen (vollständiges Bild) wird das Linux-Programm benachrichtigt und kann auf die vollständigen Bilddaten (im DRAM) zugreifen. Wird ein weiteres Bild angefordert, beginnt der Zyklus von vorn, der Framegrabber wartet auf die vertikale Synchronisation und beginnt die Datenablage im vorher definierten Speicherbereich.

Zum Steuern der Hardwareblöcke, wie des Framegrabbers, wird ein Kernel-Treiber geschrieben, der die entsprechenden Datenbewegungen im FPGA koordiniert und Speicherbereich für Bilddaten allokiert und dem DMA-Controller übergibt. Dabei stellt das Modul selber einen sogenannten „Character Device“ dar, also ein Treiber, der Daten über die Schnittstellen `read()` und `write()` überträgt. Das birgt den Vorteil, das Usersoftware im Anschluss bloß den Treiber in der entsprechenden `/dev/clfg`-Schnittstelle lediglich „lesen“ muss, um die Aufnahmekette FPGA->DMA->DRAM->Treiber->User zu initiieren. Die Datenkette ist in Abbildung 20 zu erkennen. Teile des Codes des Framegrabber-Kernel-Moduls sind im Anhang zu finden.

3.3.4 Auswertungsstrategie

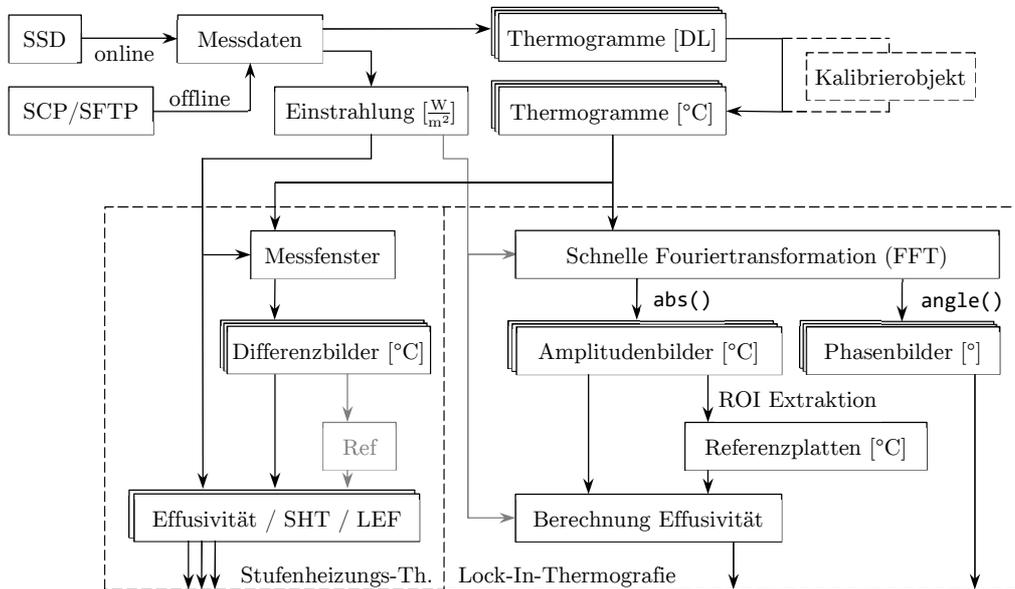


Abbildung 22: Übersicht über die Auswertungsverfahren und Einteilung in Frequenz- und Zeitbasierte Auswertungen.

In Abbildung 22 ist der schematische Datenfluss für die Auswertungsrechnungen dargestellt. Die Messdaten können dabei entweder „online“, das bedeutet direkt auf dem entsprechenden Aufnahmesystem, oder „offline“, das bedeutet nach der Messung, auf einem separaten Rechner, verarbeitet werden.

Die einzelnen Berechnungsvorschriften zum Erzeugen der entsprechenden Bilder wurden im vorigen Kapitel erläutert. In dieser Arbeit wird die Auswertung hauptsächlich offline getätigt, da sich sämtliche Auswertungsstrategien noch in Entwicklung befinden und dadurch schneller verschiedene Algorithmen getestet werden können. In Zukunft können so erprobte Algorithmen auf der Hardware implementiert und damit dezentral ausgeführt werden.

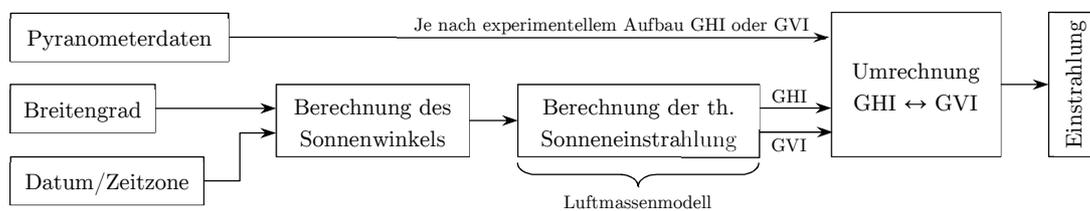


Abbildung 23: Berechnung der Sonneneinstrahlung und Umrechnung von GHI \leftrightarrow GVI

Bei der Aufzeichnung der Einstrahlungsdaten wird das Pyranometer in einer bestimmten Ausrichtung, je nach experimentellem Aufbau, ausgerichtet. Diese Ausrichtung bleibt über den gesamten Versuchsablauf bestehen. Üblicherweise zeichnet das Pyranometer die globale Horizontalstrahlung GHI auf. Um von diesen gemessenen GHI-Werten die Sonneneinstrahlung von vertikalen Oberflächen zu ermitteln wird eine Korrekturmethode eingesetzt, die in Abbildung 23 schematisch dargestellt ist. Hierbei wird das Luftmassenmodell nach Meinel und Meinel [66] genutzt, um einen theoretischen (Maximal-)Wert von direkter Horizontaler (DHI), direkter vertikaler (DVI), globaler horizontaler (GHI) und globaler vertikaler Strahlungsdichte (GVI) in bestimmten Winkeln zu berechnen. Der Korrekturfaktor wird wiederum aus den theoretischen Kurven für GHI und GVI bestimmt. Die genaue Beschreibung des Luftmassenmodells und die Durchführung einer solchen Korrektur wird in Kapitel 4.3.3 ausgeführt.

3.4 Zusammenfassung

An dieser Stelle sind alle relevanten Methoden zur Bestimmung von thermischen Eigenschaften, die im Kontext der solar angeregten Thermografie in dieser Arbeit angewandt werden, erläutert. Damit ist die Basis für die folgende Darstellung der Ergebnisse gelegt. Dabei ist ein rein analytischer Ansatz, der sämtliche Wärmeübertragungsmechanismen berücksichtigt ist nicht Fokus dieser Arbeit, sondern es wird auf Methoden aus der aktiven Thermografie zurückgegriffen und diese bezüglich Tauglichkeit und Ergebnisübereinstimmung untersucht.

Dabei wird sich im Folgenden auf zwei Auswertungsmethoden konzentriert: Auswertung im Zeitbereich und im Frequenzbereich. Die Auswertung im Frequenzbereich bietet sehr gute Rauschminderungseigenschaften, gerade im 24h-Bin, da eine große Anzahl Thermogramme einer Quasi-Mittelung unterzogen werden (Fouriertransformation). Nachteilig daran sind jedoch die lange Messdauer und das längere Wirken von nicht berücksichtigten Wärmequellen wie Konvektion und Wärmestrahlung.

Bei der Zeitbereichsauswertung werden in dieser Arbeit nur vergleichsweise kurze Zeitabschnitte betrachtet (ca. 10 – 100 Minuten), die zwar nicht von einer Rauschminderung, wie die Frequenzbetrachtung profitieren können, jedoch der Betrag der Fremdeinflüsse deutlich geringer ausfällt.

4 Ergebnisse

Dieses Kapitel gibt eine Übersicht über alle Versuchsergebnisse, die im Labor und im Feld gesammelt wurden. Hierbei werden die gefundenen Ergebnisse visuell dargestellt und erläutert. Dort wo es sinnvoll ist werden Schlüsse gezogen und die Ergebnisse diskutiert.

4.1 Simulation und Laborexperimente

Aufgegliedert ist das folgende Unterkapitel nach den jeweiligen Experimenten. Dabei wird zuerst eine Wärmepunktsimulation diskutiert und im Folgenden die Ergebnisse des Laborexperiments an den drei Referenzobjekten gezeigt und interpretiert.

4.1.1 Wärmepunktsimulation

Zunächst wird eine Computersimulation von Wärmepunkten durchgeführt, die den beiden Aluminiumplatten entsprechen. Ziel des Simulationsversuches ist, das Modell ohne Berücksichtigung der Konvektion aus Kapitel 3.1.3 unter der Berücksichtigung von verschiedenen Wärmeeintragsbedingungen zu testen. Formel (21) geht von einem sinusförmigen Wärmeeintrag (Quelle ist ebenso eine Senke) aus, wohingegen die Simulation rechteckförmige Anregung als reine Wärmequelle nutzt und Konvektion und Strahlungswärme als Wärmesenke. Das zu testende Modell zur Bestimmung der Temperaturamplitude thermisch dünner $|S'|$ und dicker Objekte $|S''|$ lautet (Wiederholung aus Kap. 3.1.3):

$$|S'| = \frac{p}{\rho d c_p \omega}; |S''| = \frac{p_{eq}}{e \cdot \sqrt{\omega}}$$

Die Simulation wird für verschiedene Anregungsperioden durchgeführt, die mit denen vom Laborexperiment übereinstimmen (2:49 min, 5:37 min, 11:15 min, 22:30 min, 45:00 min und 90:00 min). Außerdem wird die Simulation dazu genutzt um die Linearität des Systems auf unterschiedliche Anregungsintensitäten zu untersuchen. Dazu wird die Anregungsamplitude variiert zwischen 0 – 1200 W/m² in Schritten von jeweils 200 W/m².

Abbildung 24 zeigt das Ergebnis der Auswertung des Simulationsversuches bei Variation der Anregungsamplitude und zeigt anschaulich, dass ein nahezu linearer Zusammenhang, wie die theoretische Formel beschreibt, besteht. Außerdem ist ein leichter Abfall bei hohen Anregungsintensitäten zu erkennen, den die steigenden nichtlinearen Strahlungs-Wärmeverluste verursachen.

Außerdem sind die Phasenzusammenhänge aufgetragen, die nach der theoretischen Formel -90° ergeben sollte, sich aber nach der Simulation, je nach Dicke der Platte, um bis zu ca. 30° unterscheidet.

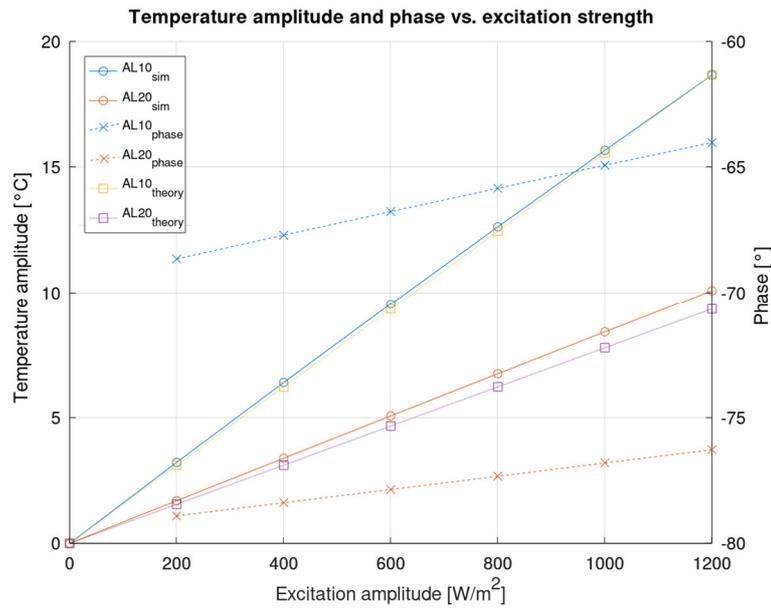


Abbildung 24: Vergleich der Simulation (blau und rot) mit dem Ergebnis des Modells ohne Konvektion (gelb und violett) für die Aluminiumplatten. Entnommen aus [22]

Die Ergebnisse für die Variation der Anregungsperiode sind gemeinsam mit den Laborexperiment-Daten in Kapitel 4.1.2 (Abbildung 27) dargestellt.

Bei steigender Wärmedichte, fällt die über die Simulation bestimmten Temperaturamplitude leicht ab. Dies ist zu erwarten, da die Effekte Konvektion und Wärmestrahlung, die zusätzlich zur regelmäßigen Wärmeeinwirkung bei höheren Temperaturamplituden als Wärmenenke wirken und damit die Temperaturamplitude verringern. Generell zeigt diese Auswertung jedoch, dass der Fehler der Linearitätsannahme bis 1200 W/m^2 unter 10 % liegt.

4.1.2 Laborexperiment

Zur Validierung der Annahme, dass die Algorithmen der Lock-In-Thermografie (Kapitel 3.1.3) ihre Gültigkeit auch bei sehr langen Perioden (bis zu 24h) behalten, wird ein Experiment aufgestellt, das verschiedene Anregungsperioden im Labor untersucht. Dazu werden die

drei Referenzobjekte genutzt (10 und 20 mm Aluminiumplatten und 30x30x30 cm Betonblock, Kapitel 3.2.2). Die Prüfung geschieht im Lock-In-Verfahren, durch periodisches Schalten des Heizstrahlers. Dieser erzeugt dadurch eine nahezu rechteckförmige Wärmeanregung. Für dieses Experiment werden sechs Anregungsperioden gewählt: 2:49 min, 5:37 min, 11:15 min, 22:30 min, 45:00 min und 90:00 min.

Idealerweise sollte die längste gewählte Periode möglichst lang sein, ist jedoch in diesem Fall begrenzt durch die Dicke des Beton-Prüfobjekts. Die längste Periode wird so gewählt, dass die Wärmewellenlänge λ_T kürzer als die Dicke $d = 300$ mm ist. Bei einer Anregungsperiode von 90 min ergibt sich die Wärmewellenlänge in Beton zu 285 mm³⁴. Damit werden Reflexionen von der Rückseite des Betonblockes um einen Dämpfungsfaktor von mindestens $e^{2 \cdot 2\pi}$ abgeschwächt.

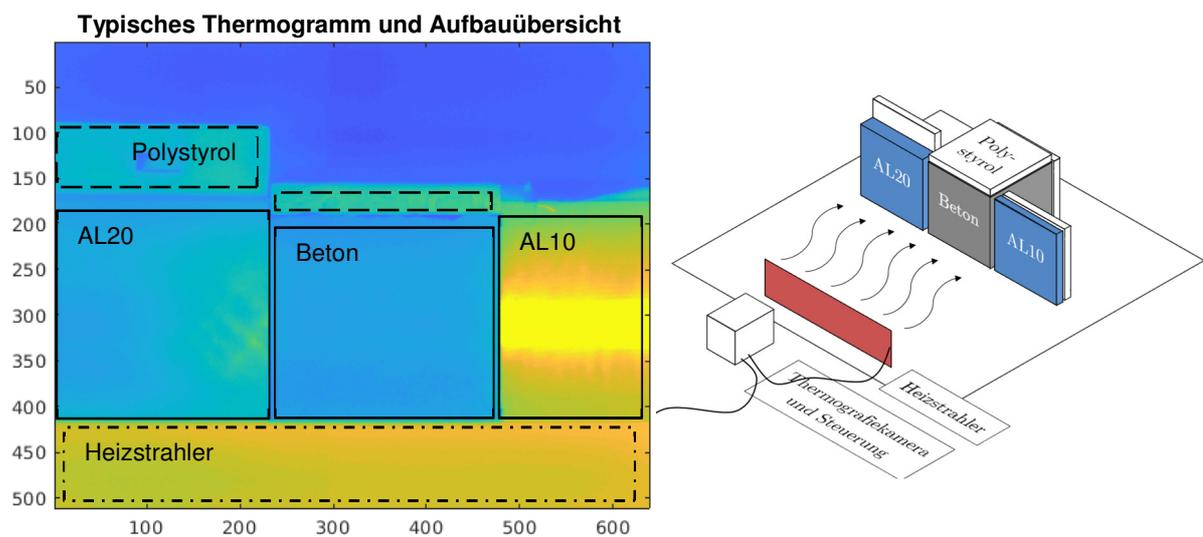


Abbildung 25: Typisches Thermogramm des Labor-Versuchsaufbaus mit Beschriftung (links). Auf der rechten Seite ist der Aufbau aus Abbildung 11 noch einmal gezeigt.

Abbildung 25 zeigt ein typisches Thermogramm des Laborversuches. Zu erkennen sind die beiden Aluminium-Referenzplatten außen und der Betonblock in der Mitte. Am unteren Bildrand ist die Rückseite des Heizstrahlers abgebildet. Außerdem ist die Polystyrol-Wärmedämmung zu erkennen.

³⁴ Siehe Anhang 10.1

In Abbildung 26 sind vier Zeitverläufe der Lock-In-Versuche dargestellt. Hierbei ist gut zu erkennen, dass gerade bei niedrigen Anregungsperioden ein „Aufheizeffekt“ dem periodischen Signal überlagert ist. Dieser rührt daher, dass die Durchschnittsleistung, die auf die Probekörper fällt, nicht sofort über Konvektion und Strahlungswärme abgeführt werden. Erst bei längeren Perioden verbringen die Testkörper genug Zeit damit „abzukühlen“, wobei beim Betonblock, durch seine hohe gesamte, thermische Masse, auch bei einer Periode von 90 Minuten noch eine Aufheizung erkennbar ist.

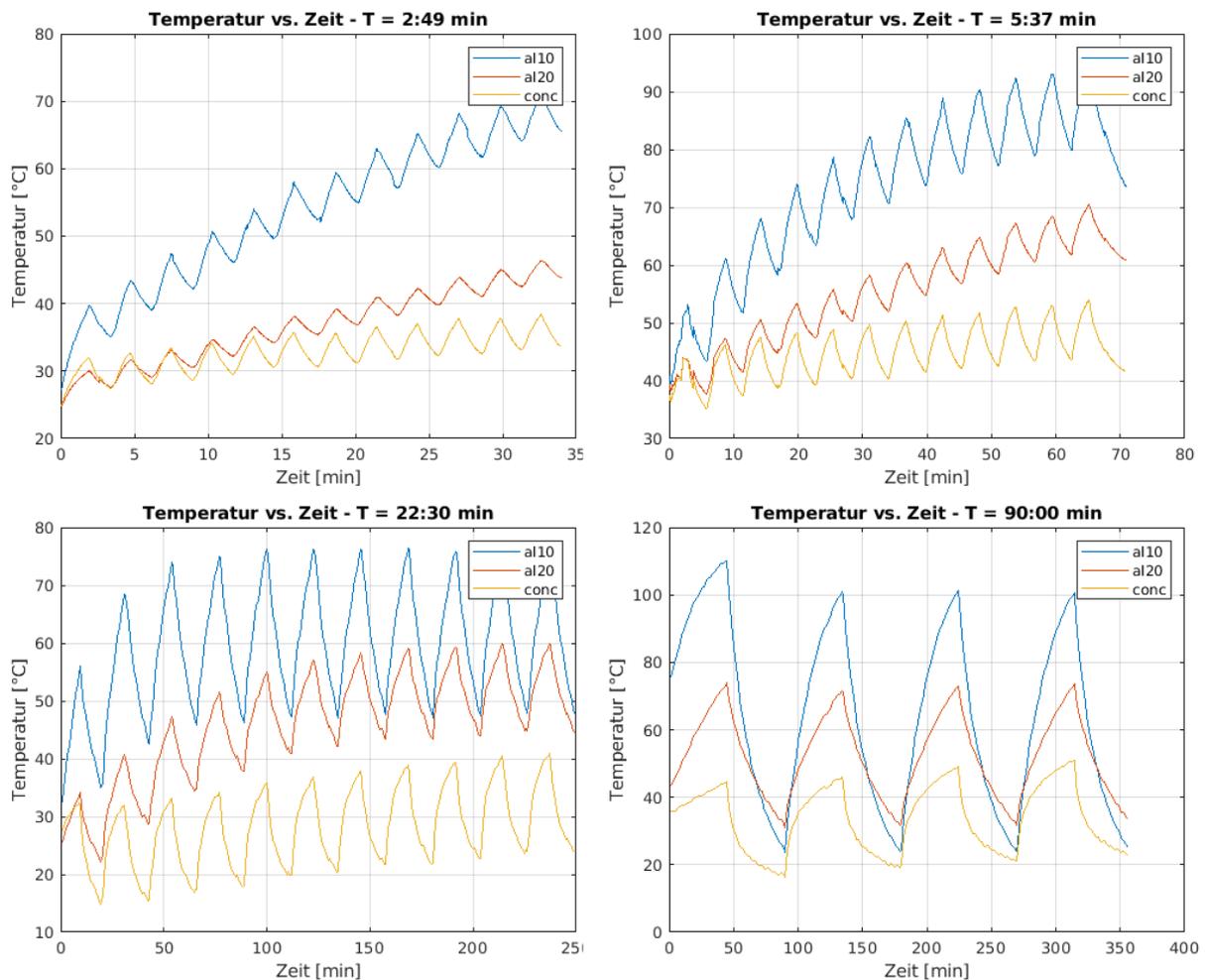


Abbildung 26: Auswahl von vier Temperaturdiagrammen unterschiedlicher Anregungsperioden der Lock-In-Versuche im Labor

Die hier dargestellten Zeitverläufe werden mittels Fouriertransformation in den Frequenzbereich überführt, danach entsprechend skaliert, und dann in Abbildung 27 zusammenfassend dargestellt. Ebenfalls ist dort der Wert für die Amplituden angegeben, berechnet aus dem

Modell ohne Berücksichtigung der Konvektion (Formel (20) und (21), Kapitel 3.1.3). Hier treten bei niedrigen Anregungsperiode eher Abweichungen der experimentellen Messung nach oben und bei hohen Anregungsperioden eher Abweichungen nach unten auf. Diese Abweichungen nach unten lassen sich dadurch erklären, dass die Wärmeübertragungsphänomene Konvektion und Wärmestrahlung nicht bei den theoretischen Formeln mitberücksichtigt werden. Die Abweichung nach oben lässt Messungenauigkeiten (vor allem Reflexionen) der Oberflächen vermuten. Infolge der sehr rauen Oberflächen und da die Emissivität von Beton nahe eins ist, treten dort deutlich weniger Reflexionen auf, als an den Aluminiumplatten. Die gemessene Temperatur stimmt hier gut mit der des Modells ohne Konvektion überein.

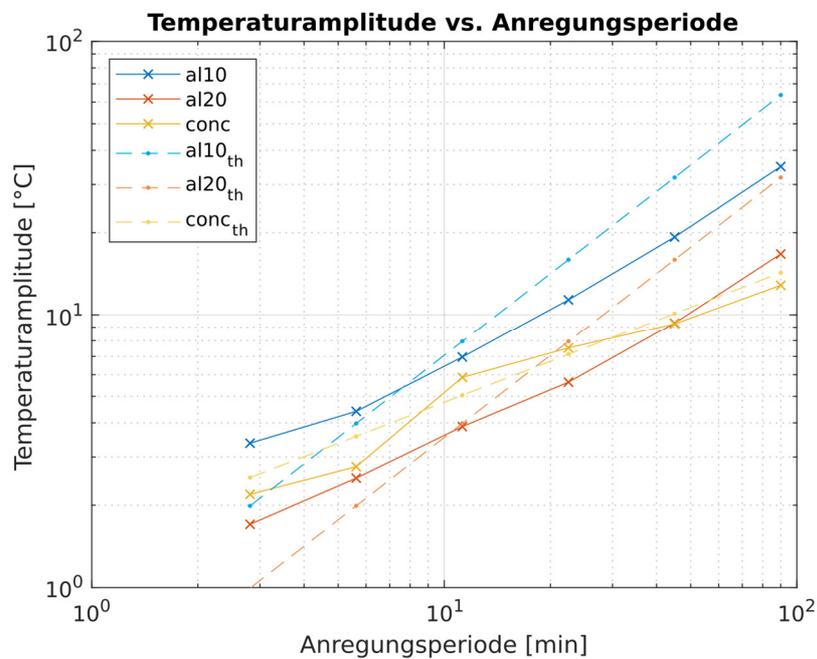


Abbildung 27: Vergleich der resultierenden Temperaturamplituden bei verschiedenen Anregungsperioden, 10mm Aluminiumplatte in blau, 20mm Aluminiumplatte in Orange und Betonblock in Gelb mit den aus dem Modell berechneten Werten (gestrichelt)

Die Phasenwinkel belaufen sich im Modell ohne Konvektion bei thermisch dünnen Objekten auf -90° und bei thermisch dicken auf -45° . Diese Phasenwinkel lassen sich auch im Experiment beobachten, wobei bei niedrigeren Frequenzen, gerade bei den thermisch dünnen Proben Fehler dominieren, die die Phasenbeziehung in Richtung anregende Phase (0°) verschieben. Dies ist, ebenso wie der Amplitudenfehler, den Wärmeübertragungsphänomenen

geschuldet, die eine „Speicherung“ der Wärme und damit ein Phasenwinkel von -90° , verhindern. Je länger die Anregungsperiode ist, desto weniger stimmt die Annahme, dass die Wärmesenken Konvektion und Wärmestrahlung vernachlässigt werden können. Bei dem Betonblock verhält sich die Phasenbeziehung wie erwartet, jedoch steigt sie schon bei einer Anregungsperiode von ca. 20 min an, wobei sie in der Theorie bis zu einer Anregungsperiode konstant auf -45° verharren sollte, bis die Periodendauer so lang wird, dass der Block nicht mehr als thermisch dick zu betrachten ist ($\lambda_T \sim 30$ cm bei $T = 90$ min). Der in Abbildung 28 dargestellte Effekt zeigt jedoch eine Phasenänderung in positive Richtung, was nicht der thermischen Dicke geschuldet ist, sondern, ebenso wie bei den Aluminiumplatten, durch Konvektion und Strahlungswärmeabgabe verursacht wird. Wenn der Wärmeübergangskoeffizient sehr groß wird, folgt die Phase der Oberflächentemperatur der Phase der Anregung. Dies liegt daran, dass in diesem, theoretischen Fall die Wärmespeichereigenschaften des Materials irrelevant werden.

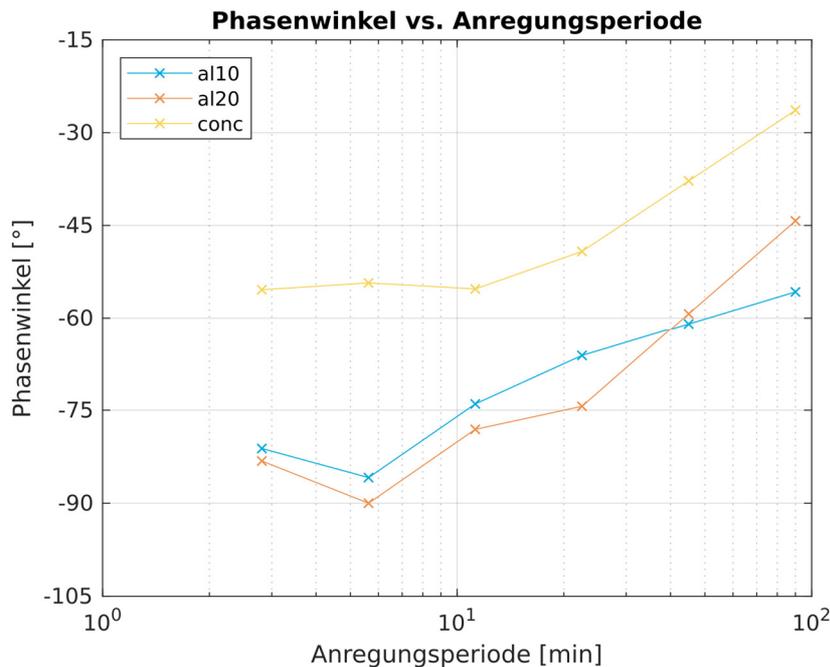


Abbildung 28: Vergleich der Phasenwinkel bei verschiedenen Anregungsamplituden

Wie in Abbildung 27 zu erkennen ist, benötigen die im Laborexperiment bestimmten Temperaturamplitudenwerte eine Korrektur, um den über die Formel bestimmten Wert zu erreichen (vgl. durchgezogene mit gestrichelter Linie). Dieser benötigte Korrekturfaktor wird

im Folgenden als $c(\omega)$ bezeichnet und ist ein empirisch ermittelter Wert, der als Korrektur erster Ordnung eingeführt wird. Die folgende Formel beschreibt die Berechnungsgrundlage des eingeführten Korrekturwertes durch den Quotienten aus theoretischer Temperaturamplitude und gemessener Temperaturamplitude:

$$c(\omega) = \frac{S_{th}}{S} \quad (44)$$

Die gelbe Linie in Abbildung 27 zeigt die Temperaturamplitude S für den Betonblock und ist wie zu erwarten etwa proportional zur Wurzel der Anregungsperiode $|S| \propto \sqrt{T}$, beziehungsweise, wie in Formel (21) dargestellt, umgekehrt proportional zu ω , der Anregungsfrequenz³⁵.

³⁵ Dieser Zusammenhang stellt sich im doppellogarithmisch aufgetragenen Diagramm als halbe Steigung dar.

4.2 Fehlerbehaftetes Prüfobjekt

Dieses Unterkapitel zeigt die Versuchsergebnisse der Experimente an den fehlerbehafteten Prüfobjekten, die zur Einordnung des Verfahrens in den ZfP-Kontext dienen sollen. Hier soll unter anderem gezeigt werden, inwiefern das vorgestellte Verfahren der solar angeregten Thermografie mit anderen Thermografieverfahren verglichen werden kann, wo seine einzigartigen Stärken und wo die jeweiligen Grenzen des Verfahren sind.

4.2.1 Laborexperimente

Als Vergleichsmessung wird der fehlerbehaftete Betonblock mehreren Messungen im Labor unterzogen. Die Messungen können eingeteilt werden in einen Stufenheizungsversuch und eine Messreihe Lock-In-Thermografie-Versuche unterschiedlicher Periodendauer.

Das Stufenheizungsexperiment wird mittels eines Impulses der Dauer 30 Minuten durchgeführt.

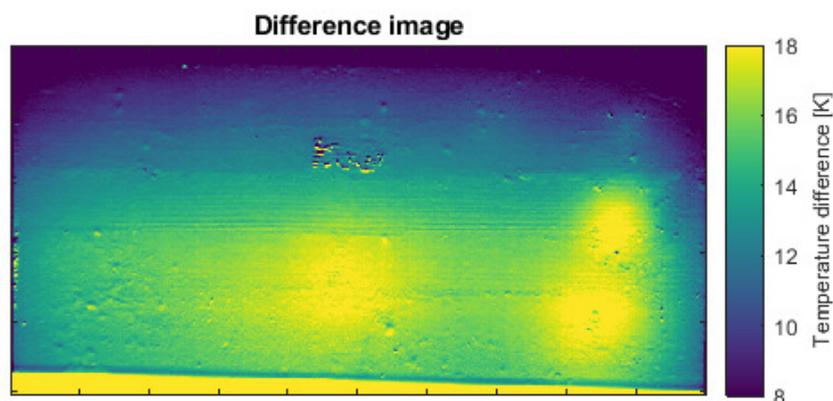


Abbildung 29: Differenzbild des Stufenheizungs-Laborexperiments am fehlerbehafteten Betonblock, die Stufendauer beträgt 30 Minuten.

Das in Abbildung 29 dargestellte Differenzbild unterliegt einer gewissen Anregungsinhomogenität, die durch die Platzierung des Heizstrahlers ausgelöst wird. Diese Inhomogenität wird in folgender Abbildung korrigiert. Der Balken am unteren Bildrand zeigt die Oberkante des Heizstrahlers. Die Punkte auf der Oberfläche resultiert einerseits aus der Rauheit des Betonblocks, andererseits sind die Holzstifte, die zur Befestigung der Ungängen dienen, zu erkennen.

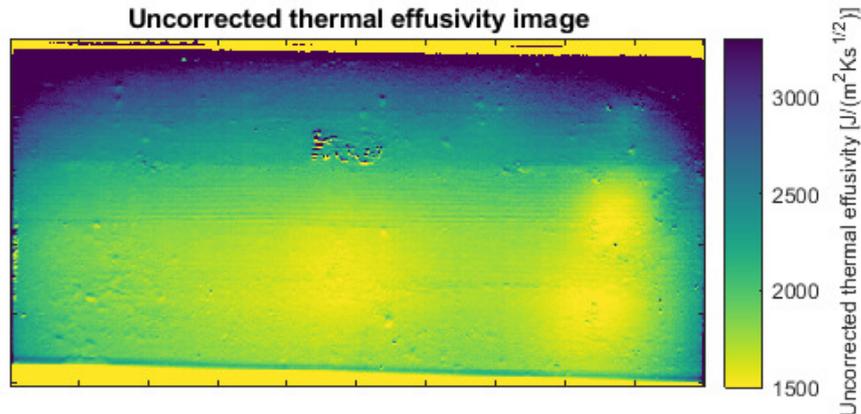


Abbildung 30: Nicht korrigierte Effusivität nach dem Modell von Boué und Fournier [55]

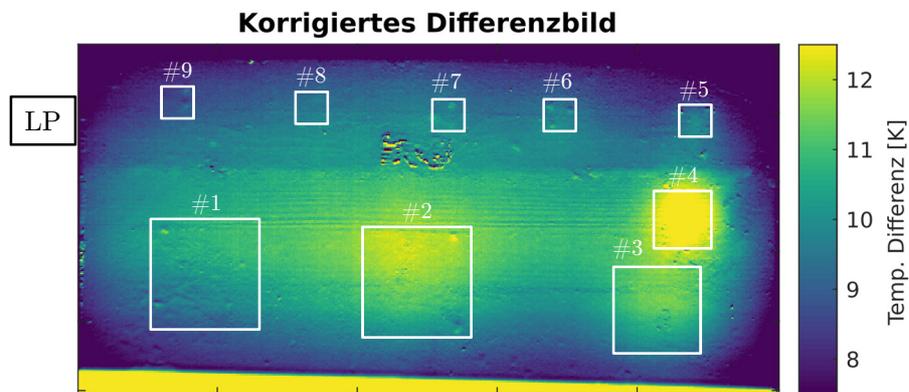


Abbildung 31: Differenzbild mit korrigierter Anregungs-Inhomogenität und ungefähren Positionen der eingebrachten Ungängen. Der „LP“ angemerkte Bereich an der linken Seite zeigt den Bereich des nachfolgenden Linienprofils.

Abbildung 30 zeigt das nicht korrigierte Differenzbild, welches die inhomogene Anregung der Quelle nicht ausgleicht. Auf dem in Abbildung 31 dargestellten Differenzbild sind gut die Ungängen #2 bis #6 erkennbar. Fehler #3 und #4 überlappen sich dabei, und der näher an der Oberfläche befindliche Fehler #4 zeigt die größte Temperaturdifferenz im gesamten Bild. Die kleinen Ungängen #5 und #6 sind sichtbar, jedoch immer schlechter, was an dem niedrigen Aspektverhältnis liegt. Hier kommt außerdem der Störfaktor des lateralen Wärmetransports hinzu, der die Detektion von #7 bis #9 erschwert. Die zu erkennenden Punkte innerhalb der Ungängenbereiche sind die Enden der hölzernen Stützstrukturen. Die erkennbaren horizontalen Balken resultieren wahrscheinlich aus der Oberflächenbeschaffenheit der Leimholzform.

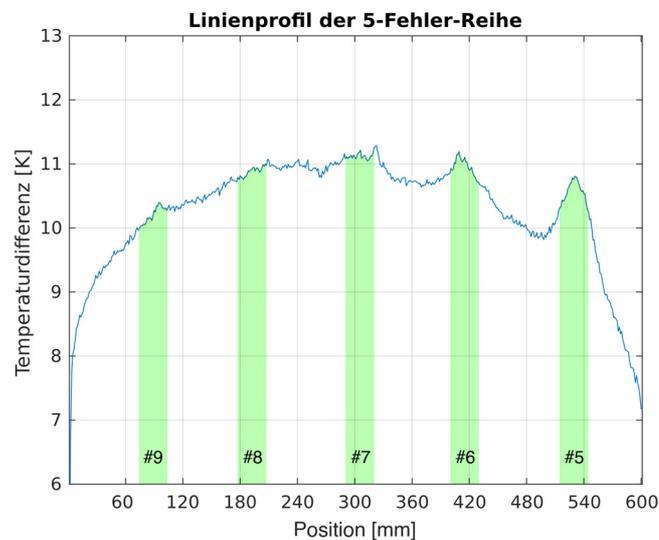


Abbildung 32: Linienprofil der 5-Fehler-Reihe im oberen Bereich des Betonblocks. Die jeweiligen Bereiche, mit den eingebrachten Fehlern sind farblich hinterlegt. Die Breite der Balken entspricht der Breite der Ungängen im Betonblock.

In Abbildung 32 ist das gemittelte Linienprofil der Temperaturdifferenzen für den in Abbildung 31 mit „LP“ bezeichneten Bereich dargestellt. Hierbei sind die Fehler #5 und #6 gut erkennbar, Fehler #7 ist nur sehr schwer erkennbar. Die beiden verbleibenden Werte der Fehler #8 und #9 sind nicht mehr vom Bulk-Material zu unterscheiden. Die grün hinterlegten Bereiche zeigen die ungefähre Position und die Größe der Fehler (3 cm). Ebenso erkennbar ist die Randabschattung, hervorgerufen durch die Tatsache, dass der Betonblock an den Rändern nicht isoliert ist und somit Wärmeaustausch an die Umwelt stattfindet.

Durch den Anregungsimpuls von 30 min und den Materialeigenschaften von Beton ergibt sich eine thermische Diffusionslänge von $\mu = 23,2$ mm. Die Detektionstiefe der kleinen Fehler (#5-#9) entspricht hier also etwa einer Diffusionslänge (1μ). Bei größerem Aspektverhältnis werden auch tiefere Fehler detektiert: Fehler #2 ist erkennbar in der Tiefe von 50 mm ($\sim 2\mu$), Fehler #3 bei 30 mm ($\sim 1,3\mu$) und Fehler #4 ist sehr gut erkennbar, bei einer Tiefe von 20 mm ($\sim 0,8\mu$).

4.2.2 Vergleichsmessung Ultraschall

Zusätzlich zur thermischen Untersuchung mittels solar-angeregter Thermografie und Stufenheizungsthermografie im Labor wird der fehlerbehaftete Betonblock einer Ultraschalluntersuchung unterzogen. Diese Messung soll als Referenz dienen, um das Verfahren des bildgebenden Ultraschalls mit der aktiven Thermografie zu vergleichen.

Hierzu wird der tragbare Ultraschall-Tomograph A1040 MIRA der Fa. ACS-Solutions³⁶ genutzt. Im Anschluss werden die Daten mittels einer speziell dafür entwickelten Darstellungssoftware zu den folgenden Abbildungen verarbeitet.

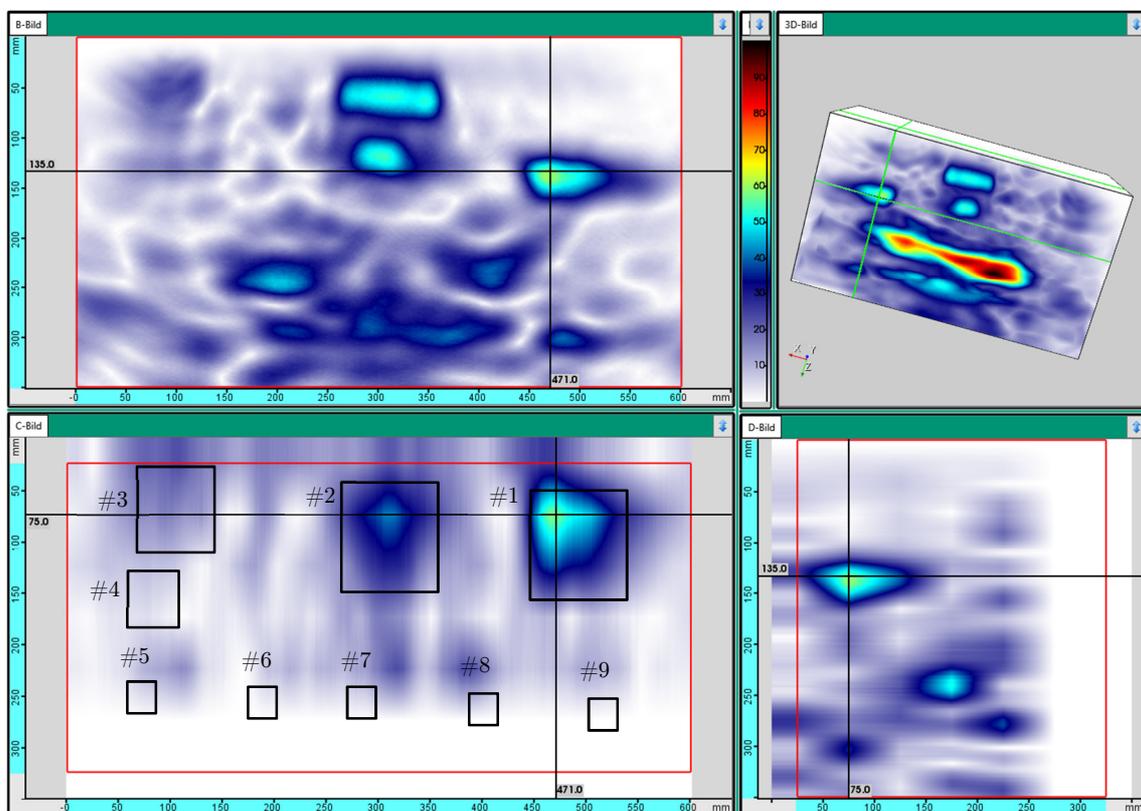


Abbildung 33: Ultraschallvergleichsmessung mit Fokus auf Fehler 1 des fehlerbehafteten Betonblocks. Die gemessene Tiefe beträgt 135 mm. Dargestellt sind die drei Schnittbilder, die im 3D-Bild (oben rechts) grün markiert sind. Von besonderem Interesse für diese Arbeit ist das C-Bild (unten rechts), da dieses eine Draufsicht, ähnlich zur Thermografiemessung abbildet.

³⁶ ACS-Solutions GmbH, Science Park 2, 66123 Saarbrücken

Durch das Nutzen der Ultraschallfrequenz von 55 kHz können nur Fehler detektiert werden, die eine gewisse geometrische Größe aufweisen. Laut Herstellerangaben sind dies mindestens 20 mm in Beton. Auch eine bestimmte Mindesttiefe muss von den eingebrachten Fehlern erreicht werden. Deshalb sind in Abbildung 33 und Abbildung 34 lediglich Fehler 1 und 2 zu erkennen. Die Fehler 3 – 7 befinden sich zu nah an der Oberfläche um einen messbaren Kontrast zu erzeugen. Fehler 8 und 9 sind geometrisch sehr klein und durch ihre Nähe am Rand von Randeffekten so überlagert, dass auch diese nicht erfasst werden konnten.

Die gemessene Tiefe von 135 mm legt außerdem nahe, dass sich eine Stützstruktur beim Einbetonieren gelöst haben könnte, was auch die schlechte Detektierbarkeit in den Thermografie-Experimenten miterklären könnte.

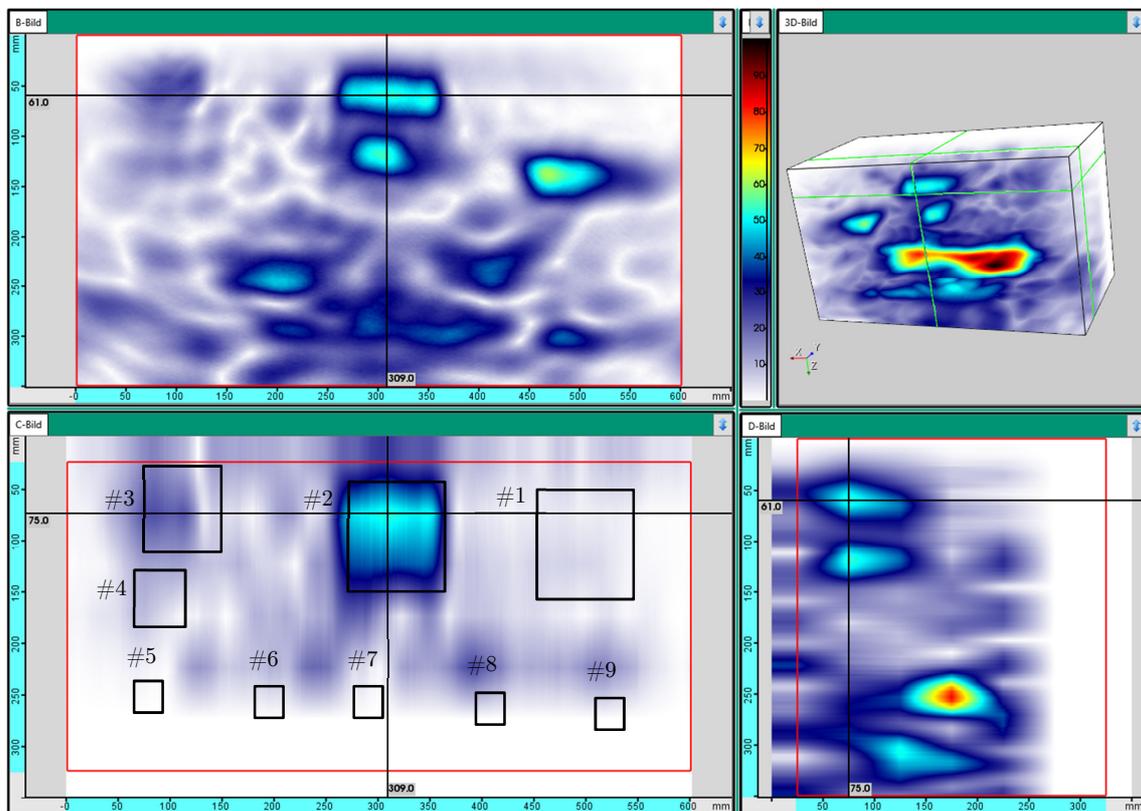


Abbildung 34: Ultraschallvergleichsmessung mit Fokus auf Fehler 2 des fehlerbehafteten Betonblocks. Die gemessene Tiefe beträgt ca. 60 mm. Ansicht ebenso wie oben.

Generell zeigt das Ultraschallverfahren ein gutes Auflösungsvermögen für geometrisch große (> 50 mm) Ungängen, die in einer gewissen Tiefe (> 50 mm) eingebracht sind. Bei dieser Fehlerart kann die Ultraschall-Tomografie zudem die Tiefe der Ungänge bestimmen.

Kleine, randnahe oder oberflächennahe Ungängen, wie die 30x30 mm Quader, können nur schlecht oder gar nicht aufgelöst werden, sodass die Thermografie, gerade bei oberflächennahen Ungängen einen deutlichen Detektionsvorteil aufweist.

Da es sich um Validierungsmessungen handelt, deren Erforschung nicht Kern dieser Arbeit sind, wird die Optimierung unterschiedlicher Einstellparameter, wie Anregungsfrequenz, Raster und anderer außer Acht gelassen. Die hier genutzten Messparameter sind Erfahrungswerte die bei vergleichbaren Prüfaufgaben gute Ergebnisse liefern und daher auf das vorliegende Messproblem übertragen worden sind.

4.3 Feldexperimente

Dieses Unterkapitel beschreibt die Ergebnisse sämtlicher Feldexperimente und präsentiert die dazugehörigen Auswertungsergebnisse. Das Kapitel ist in die einzelnen Experiment-Kategorien eingeteilt, die über die Art und Anzahl der genutzten Hilfsmittel definiert wird. Die Hilfsmittelnutzung entspricht außerdem dem chronologischen Verlauf der Experimente, die für diese Arbeit durchgeführt wurden, anhand dessen der kontinuierliche Verbesserungsverlauf der Mess- und Auswertungsstrategien mittels der, für das jeweilige Experiment neuen, Hilfsmittel dargestellt wird.

4.3.1 Ohne Referenz

Erste Vorversuche, um das Konzept der solar angeregten Thermografie zu untersuchen werden ohne jegliche Referenz durchgeführt. Hierbei wird lediglich eine Thermografiekamera vor der zu prüfenden Struktur aufgestellt und 96 Stunden aufgezeichnet. Die resultierenden Daten werden anschließend „blind“ ausgewertet.

Der Vorteil dieser Methode ist die Einfachheit des Aufbaus und die Möglichkeit, Kontraste und andere qualitative Auswertungen zu tätigen. Die Auswertungsstrategie zur Gewinnung der Amplituden- und Phasenbilder gestaltet sich hierbei wie in Abbildung 22 beschrieben.

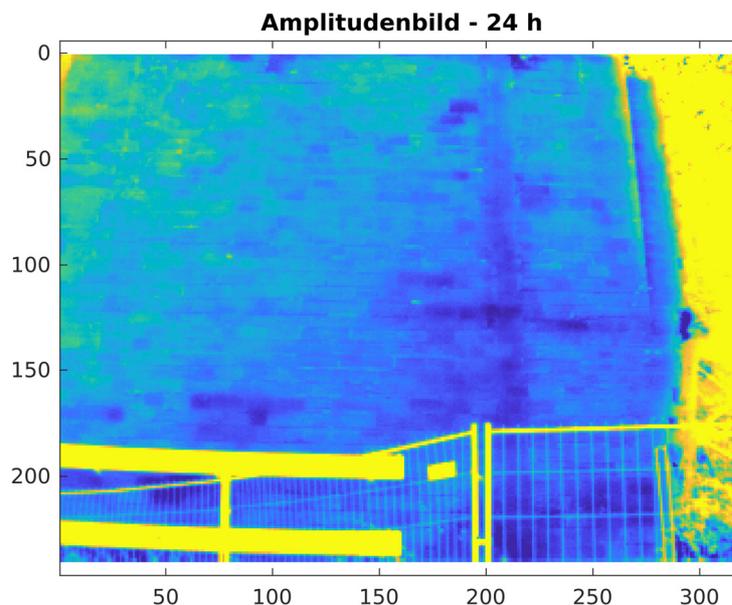


Abbildung 35: Amplitudenbild der Standmauer ohne Referenzplatten

In Abbildung 35 ist das Amplitudenbild der viertägigen Messung aufgezeichnet, wobei, wie bei den anderen Auswertungen, nur die 24 h-Periode betrachtet wird. Gut zu erkennen ist die Inhomogenität der einzelnen Wandsteine untereinander, die auf sowohl Änderungen im Material, als auch am Grünbelag resultieren. In Abbildung 37 ist eine Überlagerung dieses Amplitudenbildes auf ein optisches Bild dargestellt, an dem man die thermografisch gewonnenen Daten visuell überlagert anzeigt, sodass direkt Korrelationen zu den optischen Features des Material aufgezeigt werden.

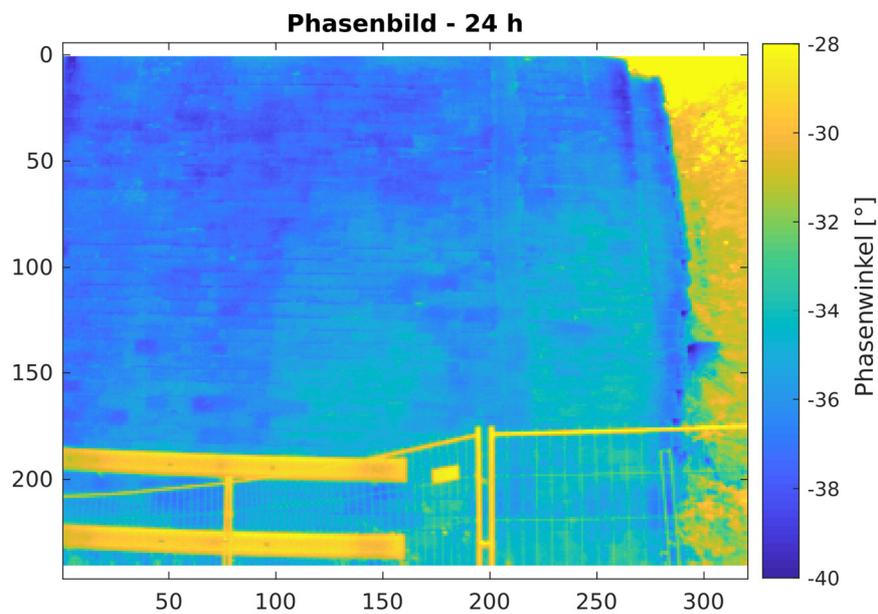


Abbildung 36: Phasenbild der selbigen Standmauer ohne Referenzplatten

Im Phasenbild (dargestellt in Abbildung 36) sind gut die Mauerstrukturen zu erkennen. Zudem kann, wie in späteren Auswertungen noch gezeigt wird, auf die thermische Dicke von Materialien geschlossen werden.

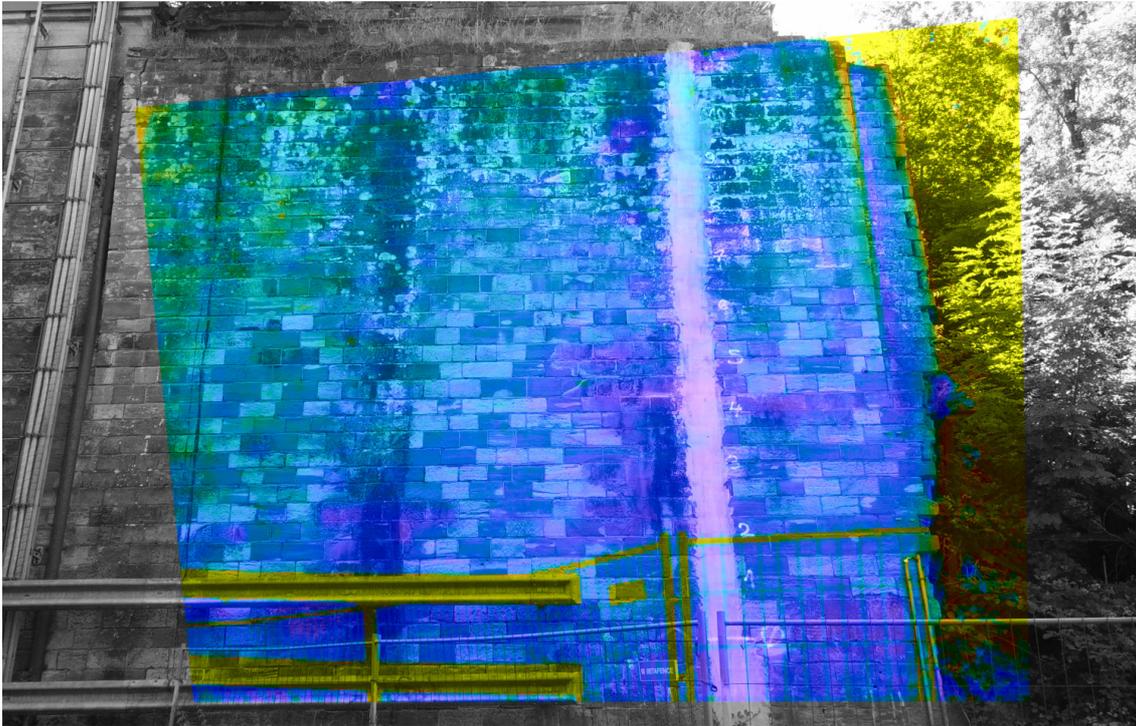


Abbildung 37: Überlagerung des 24 h-Amplitudenbildes auf ein optisches Bild. Die Thermografiedaten bilden den Farb- und die optischen Daten den Helligkeitskanal des Bildes.

Die Registrierung des Thermografiebildes in Abbildung 37 auf das Optische wird händisch, mittels einer Käfigtransformation³⁷ durchgeführt. Die Perspektive beider Bilder ist nicht identisch, sodass es im Randbereich, und bei nahen Objekten, zu Registrierungsfehlern kommt. Die zentralen Bereiche sind jedoch ausreichend genau zueinander registriert, um aussagekräftig zu sein.

Diese Form der Auswertung hilft dabei die in den Thermografiedaten enthaltenen Informationen besser mit den physischen Positionen zu korrelieren und erleichtert das Finden von Ungängen. Dieser Ansatz wird, unter anderem, in kommerziellen Geräten für die industrielle Inspektion genutzt³⁸.

³⁷ Das Käfigwerkzeug – <https://docs.gimp.org/2.10/de/gimp-tool-cage.html>

³⁸ Vergleiche FLIR MSX[®], Fluke IR-Fusion[™]

4.3.2 Mit Referenzplatten

Als thermisch dünne Referenz werden zwei Aluminiumplatten in die zu messende Szene an der Standmauer angebracht. Diese werden an zwei EPS³⁹-Panellen befestigt, um die Wärmeübertragung nach hinten so gut wie möglich zu unterbinden.



Abbildung 38: Ansicht des Versuchsgeländes mit eingezeichnetem Blickfeld der Kamera (rot) und Zoom auf die Referenzplatten (rechts)

In Abbildung 38 ist die Ansicht der Standmauer gezeigt und der ungefähre Bildbereich der Thermografiekamera eingezeichnet. Gut zu erkennen sind die zwei schwarzen Aluminium-Referenzplatten. Die beiden Platten „AL20“ und „AL10“ werden so in der Szene platziert, dass keine zu prüfende Oberfläche verdeckt wird, sie jedoch nicht zu nah am Bildrand aufgezeichnet werden. Ebenso zu erkennen ist der hellgraue Gipsstreifen, der sich aus früheren Experimenten mit Ultraschall und Georadar noch an der Standmauer befindet [59].

Das Thermografiesystem zeichnete insgesamt 96 Stunden Thermogramme in einem Abstand von etwa 60 Sekunden auf. Diese werden im Anschluss an das Experiment wie in Kapitel 3.3.4 beschrieben, ausgewertet. Von besonderem Interesse bei diesem Experiment sind

³⁹ Expandiertes Polystyrol

die auftretenden Amplituden der Referenzplatten. Die vorgestellte Methode der quantitativen Ermittlung der Effusivität nutzt diese Werte, um die Amplitudenwerte der restlichen Szene zur Effusivität umzurechnen.

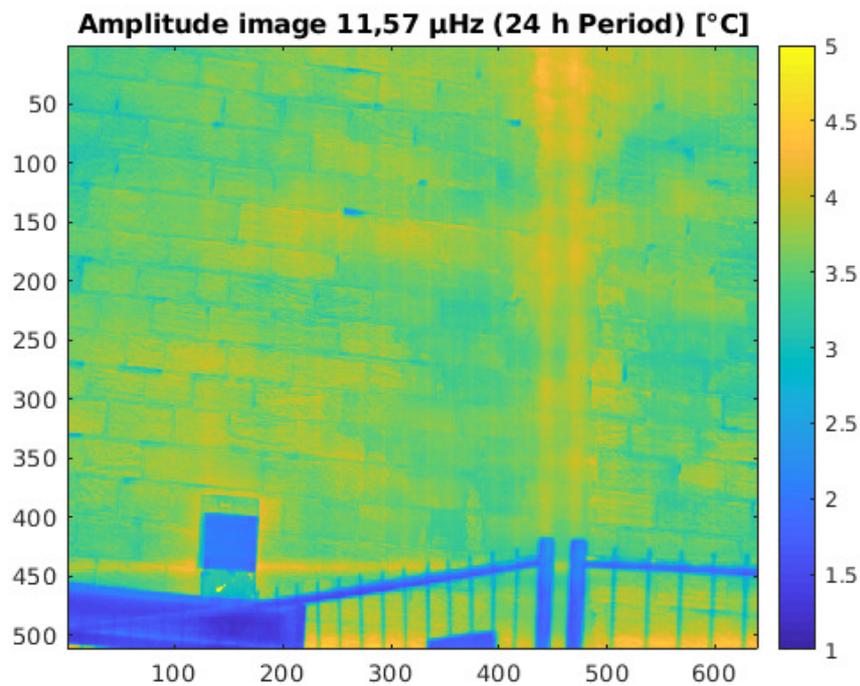


Abbildung 39: Amplitudenbild des Langzeitversuches an der Standmauer in Camphausen. Zu erkennen sind die zwei Referenzplatten in der unteren linken Ecke der Szene. (Eine der Platten ist etwa halb verdeckt)

Das Amplitudenbild der Auswertung der 96 Stunden ist in Abbildung 39 dargestellt. Aus diesem Amplitudenbild werden die beiden Zahlenwerte für die Amplituden der Referenzplatten bestimmt, um eine Abschätzung der äquivalenten Wärmestromdichteamplitude zu erhalten. Mit der so bestimmten Wärmestromdichteamplitude und dem Korrekturwert, der aus den Literaturwerten der vorhandenen Materialien gewonnen wird, wird im Anschluss das Effusivitäts-Bild erzeugt.

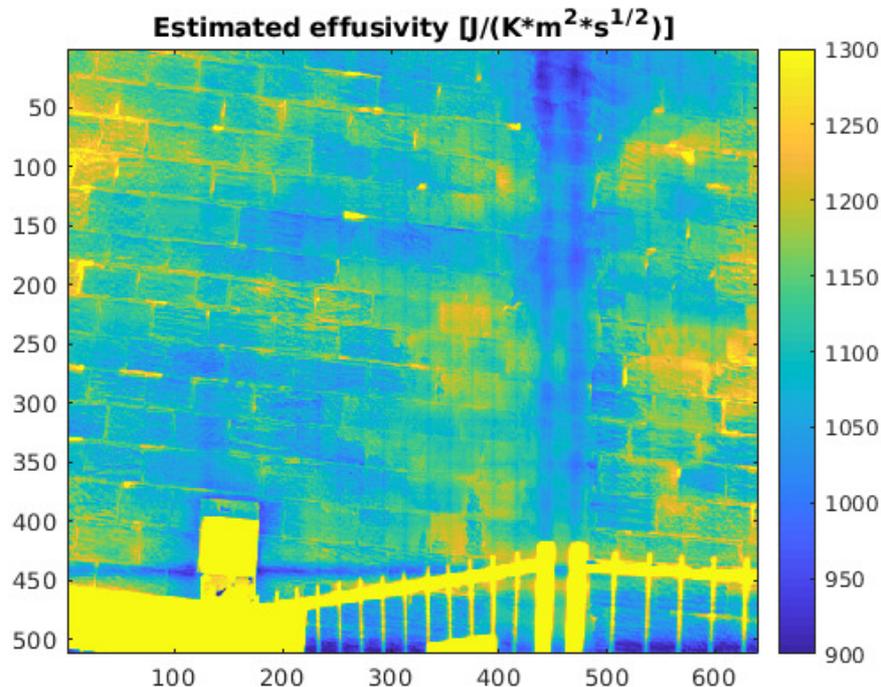


Abbildung 40: Resultierendes Bild der Effusivität, aus dem oben gezeigten Amplitudenbild, den Referenz- und Korrekturwerten. Hinweis: Die Bestimmung der Effusivität gilt nur an Stellen der Szene, die thermisch dick sind, wie hier an der Mauer, jedoch nicht am Gitter.

Das dargestellte Effusivitätsbild in Abbildung 40 zeigt die geschätzte Effusivität der Standmauer aufgrund der Temperaturamplitude des Langzeitthermografieversuches mit Analogie aus der Lock-In-Thermografie. Da zur Korrektur der Absolutwerte die Literaturwerte des vorhandenen Materials zu Hilfe genommen wurden, wird im Folgenden lediglich auf die relative Auslenkung der Effusivität eingegangen.

Gut zu erkennen sind die Fugen der einzelnen Mauersteine, die insgesamt eine etwas höhere Effusivität aufweisen, was mit den jeweiligen Literaturwerten übereinstimmt⁴⁰. Ebenso verhält sich der Gipsstreifen, wie zu erwarten zeigt dieser eine etwas geringere Effusivität. Hierbei muss beachtet werden, dass der Gipsauftrag nur einen Bruchteil der thermischen Eindringtiefe ausmacht und daher der Wert der Effusivität nicht auf die Hälfte, wie in

⁴⁰ Die Effusivität von Mörtel ist ca. 10% höher, als die von Sandstein. Gips hat etwa den halben Wert von Sandstein. ([16])

der Literatur, absinkt. In welchem Verhältnis die Bestimmung der Effusivität zu einem Materialmix in bestimmten Tiefen steht ist nicht pauschal bekannt und Gegenstand zukünftiger Forschung. Dazu mehr in Kapitel 6.2.

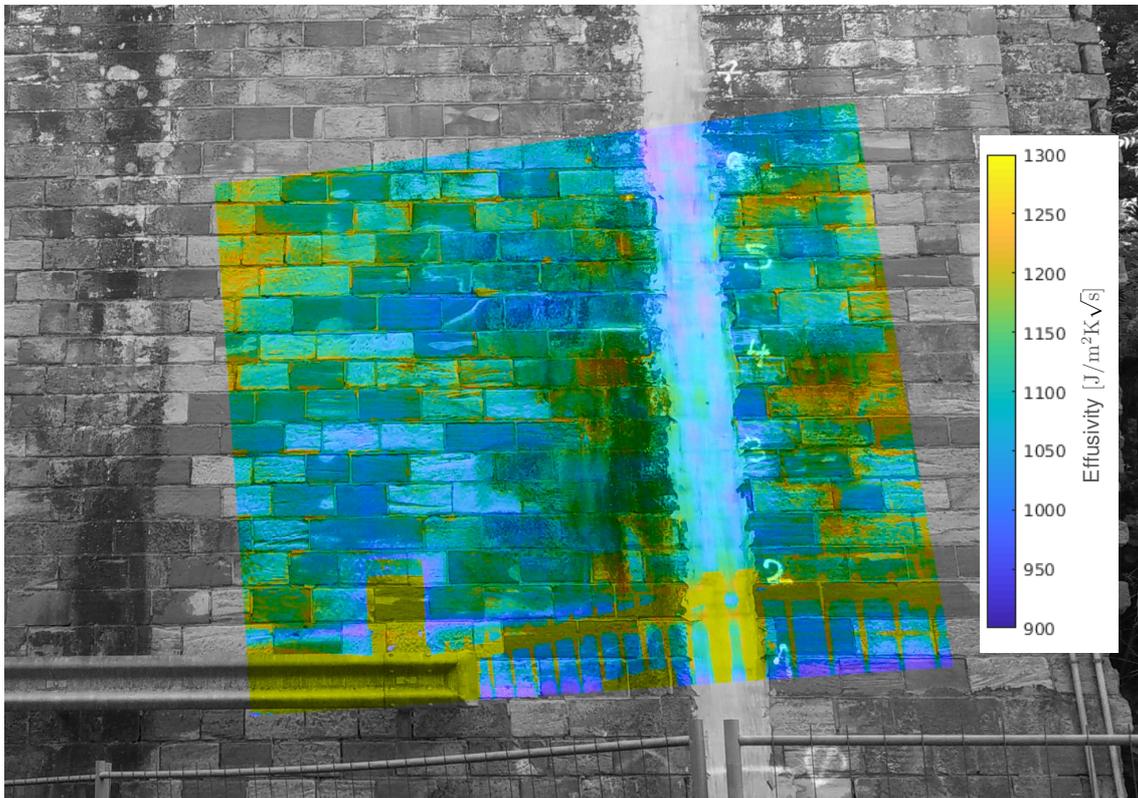


Abbildung 41: Überlagerung des Effusivitäts-Bildes mit einem optischen Bild der Szene. Die Effusivität stellt den Farb- und das optische Bild die Helligkeitskomponente dar.

Ebenso wie im vorgegangenen Kapitel wird eine Überlagerung der Daten zu besseren Zuordnung von thermografisch erfassten Kontrasten und der echten Mauer erstellt (dargestellt in Abbildung 41). In dieser Darstellung können einzelne Mauersteine mit unterschiedlicher Effusivität leicht identifiziert werden. Die Registrierung weist, wie oben, durch die zwei verschiedenen Perspektiven Fehler im unteren Bereich (vor allem am Metallzaun) auf, jedoch ist sie auf der Mauer weitestgehend exakt. Gut zu erkennen sind einzelne Mörtelfugen, die eine höhere Effusivität aufweisen.

Die Bestimmung der Effusivität gilt nur für Bildbereiche in denen sich thermisch dicke Materialien befinden. Zur einfacheren Segmentierung des Bildes nach thermisch dick und dünn kann das Phasenbild als Hilfsmittel herangezogen werden. Dieses ist in Abbildung 42 dargestellt.

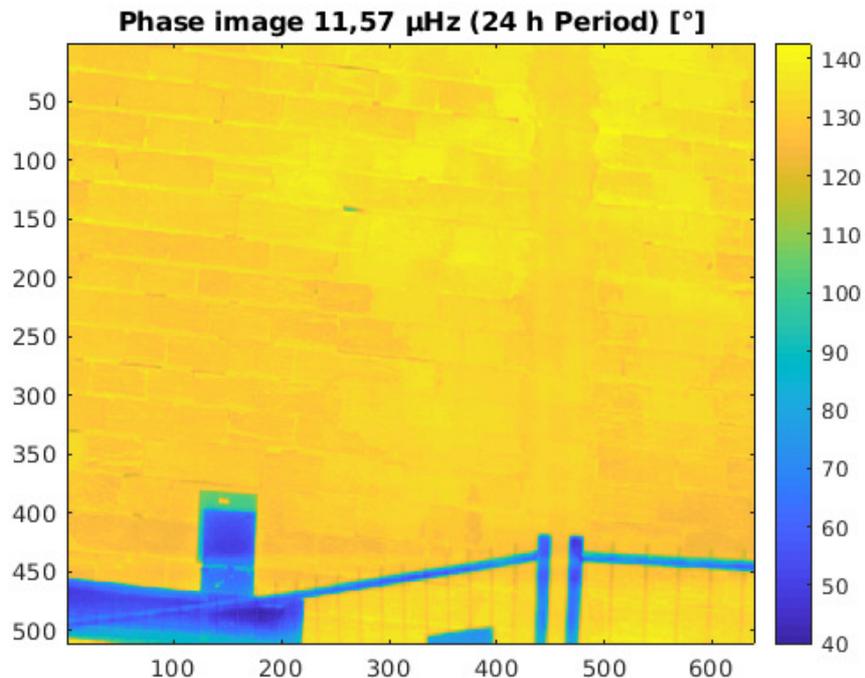


Abbildung 42: Phasenbild zugehörig zum oben gezeigten Amplitudenbild

Nach der theoretischen Betrachtung aus Kapitel 3.1.3 steht die Phase bei thermisch dicken Materialien im Winkel von -45° zur Anregungsphase. Die Phase bei thermisch dünnen Objekten steht theoretisch jedoch -90° zur Anregungsphase. Dieser Unterschied wird im dargestellten Phasenbild deutlich. Objekte, wie die Referenzplatten, der im Vordergrund stehende Bauzaun (verzinkter Stahl) und die an die Mauer angebrachte Schutzplanke besitzen eine niedrigere Phase, als die Standmauer selbst. Hier zu beachten ist, dass keine Referenzphase vorhanden ist, sodass sämtliche Phasenwerte nur relativ zueinander zu betrachten sind. Durch das Nutzen der FFT wird die Referenzphase effektiv durch den Startzeitpunkt der Messung und die aufgezeichneten Temperatursignale festgelegt.

Das Phasenbild wird in dieser Arbeit nur für die Veranschaulichung der thermischen Dicke genutzt, wird jedoch im Feldexperiment von mehr beeinflusst, als nur der tatsächlichen

thermischen Dicke. Die Phaseninformation wird in der Lock-In-Thermografie als eigenständige Auswertungsmethode zur Erzeugung von Kontrasten genutzt. Weiterhin geben Bortolin et al. [67] an, dass der Phasenwinkel φ ebenso in einem bestimmten Verhältnis zur Effusivität e und dem Wärmeübergangskoeffizient h steht (siehe Formel (45)).

$$\tan(\varphi) = \frac{\sqrt{\omega} \cdot e \cdot h^{-1}}{\sqrt{2} + \sqrt{\omega} \cdot e \cdot h^{-1}} \quad (45)$$

Der dominierende Effekt der Phasenbeeinflussung bleibt nach Erkenntnissen dieser Arbeit jedoch die thermische Dicke (siehe Abbildungen oben). Inwiefern innerhalb der thermisch dicken Bereichen obige Formel für die quantitative Auswertung geeignet ist, kann Gegenstand zukünftiger Forschung werden. Dazu mehr in Kapitel 6.2.

4.3.3 Mit Pyranometer

Zum Test und zur Funktionsbestimmung wird ein Vorabexperiment mit Pyranometer durchgeführt. Das Experiment bestand aus der Thermografiekamera FLIR Boson 640 und dem Pyranometer LP PYRA 03, das mittels eigen entwickelter Hardwareplattform koordiniert wird. Dazu wird auf einem Balkon das Pyranometer horizontal aufgestellt und die Thermografiekamera in Richtung Straße gerichtet.

Es wird je alle ~61 Sekunden ein Thermogramm aufgenommen. Die Pyranometerdaten werden im Abstand von ca. 2,2 Sekunden aufgezeichnet. Die aufgezeichneten Einstrahlungsdaten sind in Abbildung 43 zu erkennen. Hier erkennt man deutlich den Tag-Nacht-Zyklus und dass zwei der fünf Tage durchgehend bedeckt waren. Der theoretische Maximalwert der Mittagsstunde (GHI) von ca. 730 W/m^2 wurde nicht überschritten. Durchgehende Mittagssonne war ebenso an keinem der gemessenen Tage vorhanden.

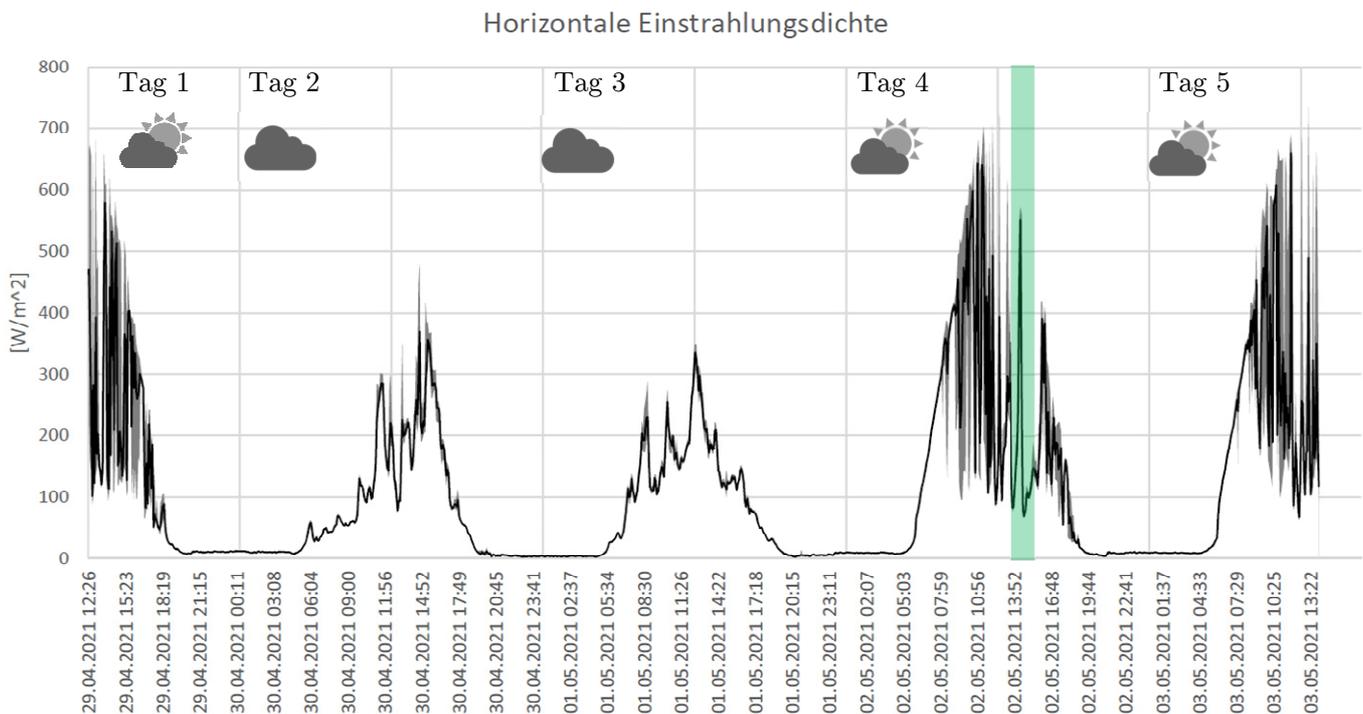


Abbildung 43: Horizontale Einstrahlungsdichte gemessen über ca. 96 Stunden. Die schwarze Linie stellt den 5-Minuten-Durchschnitt dar. Die graue Hinterlegung gibt die Minimal- und Maximalwerte für diesen Zeitabschnitt an. Der grün markierte Bereich wird für die Stufenheizungs-Methode genutzt, die im Folgenden erläutert wird.

An den teilweise bewölkten Tagen kann man ebenfalls eine hohe 5-Minuten-Variabilität erkennen, was mit dem sporadischen Auf- und Abziehen der Bewölkung zu erklären ist. Diese Faktoren geben der Sonneneinstrahlung hochfrequente harmonische Bestandteile.

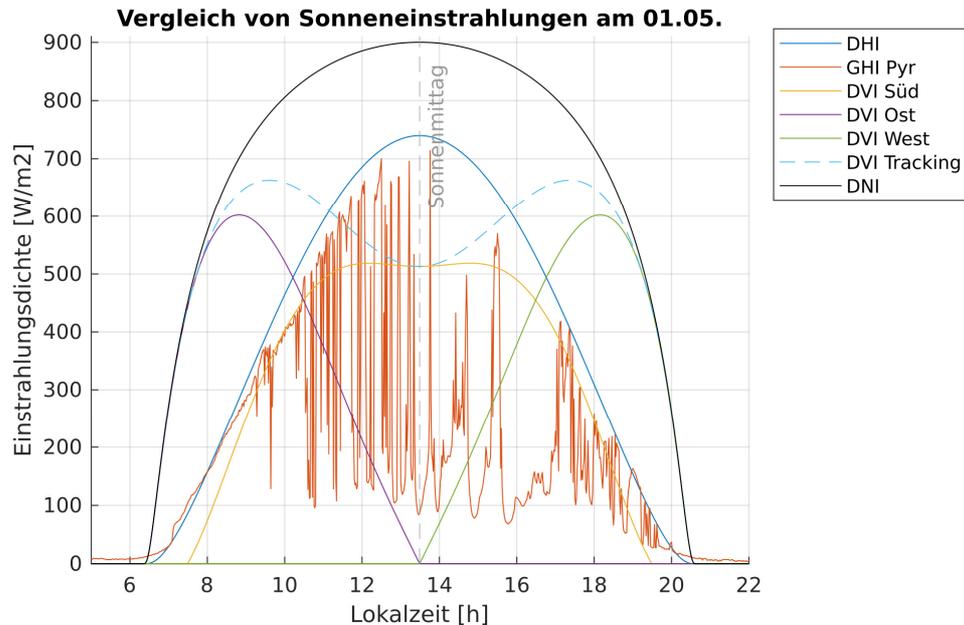


Abbildung 44: Vergleich der theoretischen mit der gemessenen Sonneneinstrahlung für verschiedene Winkel über die Tageszeit. DNI-Berechnung nach Meinel und Meinel [68] über die „Luftmassenkoeffizient-Methode“⁴¹ (engl. Air Mass Coefficient). DVI gibt die vertikale direkte Einstrahlungsdichte an, die eine vertikale Fläche je nach Ausrichtung (Süd, West, Ost und Tracking) erfährt. DHI stellt die horizontale direkte Einstrahlungsdichte dar. GHI Pyr stellt die Messdaten des Pyranometers vom 02.05.2021 dar.

In Abbildung 44 sind verschiedene Einstrahlungsdichten über den Tagesverlauf für die Position Saarbrücken (49,3 °N; 6,99 °E) dargestellt. DNI gibt dabei die Direktstrahlung der Sonne an, die eine Oberfläche theoretisch empfängt, die ständig normal zur Sonne ausgerichtet ist. Wenn Objekte jedoch in festem Winkel zur Erde stehen so verändert sich die Strahlungsdichte über den Tagesverlauf. DHI resultiert bei einer Oberfläche, die horizontal (parallel zur Erdoberfläche) ausgerichtet ist und DVI resultiert bei einer Oberfläche, die vertikal ausgerichtet ist. Bei der vertikalen Ausrichtung kommt es zudem auf die Himmelsrichtung

⁴¹ $DNI = I_0 \cdot 0,7^{(AM^{0,678})}$ mit $AM = 1/\cos(\theta)$ und $I_0 = 1353 \text{ W/m}^2$, dabei gibt θ den Zenitwinkel der Sonne an.

an, in die die Oberfläche ausgerichtet ist. Zur Verdeutlichung dient das Schaubild in Abbildung 45.

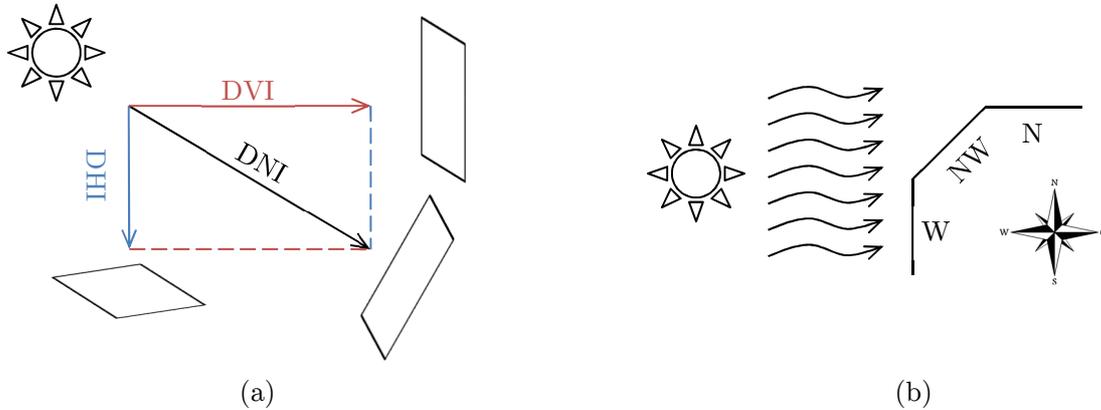


Abbildung 45: Schaubild zur Veranschaulichung des Unterschiedes der Strahlungsbegriffe

(a) Unterschied zwischen DNI, DVI und DHI

(b) Unterscheidung der Ausrichtung bei DVI. Steht die Sonne im Westen, ist die nach Westen ausgerichtete Fläche der vollen Bestrahlungsstärke, eine Fläche nach Nord-Westen nur noch einem gewissen Teil und eine Fläche nach Norden keiner direkten Strahlung mehr ausgesetzt

Um von der Direktstrahlung auf die Globalstrahlung zu schließen fehlt noch der diffuse Anteil. Dieser kann ebenfalls modelliert werden, wird jedoch von Meinel und Meinel [68] in einer Näherung zu 10% der DNI bestimmt. Damit ergibt sich für die senkrecht zur Sonne gerichtete Globalstrahlung (GNI):

$$\begin{aligned} GNI &= 1,1 \cdot DNI \\ &= 1,1 \cdot I_0 \cdot 0,7^{(AM^{0,678})} \end{aligned} \quad (46)$$

Im Messaufbau des Pyranometers kam es durch den Aufbau nahe der Hauswand auf dem Balkon zu großen Abschattungen der Diffusstrahlung (keine freie Sicht zu einem Großteil des Himmels), sodass die Messung keine signifikanten Diffusstrahlungsanteile aus dem Himmel, sondern lediglich Reflexionen der Hauswand zeigt. Die gemessene Strahlung liegt durch die ständige Teilbewölkung sogar dauerhaft unter dem theoretischen Wert für die Direktstrahlung GHI.

Für senkrecht stehende Wände wird eine Näherung des theoretischen Verlaufs von DVI genutzt, um von den gemessenen Werten (GHI) auf DVI/GVI zu schließen. Laut Meinel und

Meinel [68] ist bei senkrechten Oberflächen die Diffusstrahlung etwa halbiert und beträgt somit nur etwa 5% der DNI. Da bei der Aufnahme der Daten der Himmel etwa halb bedeckt war, wird die eventuelle Abnahme der Diffusstrahlung bei der Umrechnung nicht berücksichtigt. Die Umrechnung von der gemessenen GHI auf die entsprechenden GVIs ist hier vorteilhaft, da es mit nur einem aufgestellten Pyranometer eine Abschätzung aller senkrecht stehenden Flächen ermöglicht. Dies ist für die solar angeregte Thermografie von besonderer Bedeutung, da somit die eintreffende solare Leistung bekannt ist. Diese wird im weiteren Verlauf für die Bestimmung der Werkstoffkennwerte, wie der Effusivität, genutzt.

Das Resultat der vorgestellten Umrechnung von GHI auf GVI ist in Abbildung 46 und Abbildung 47 dargestellt.

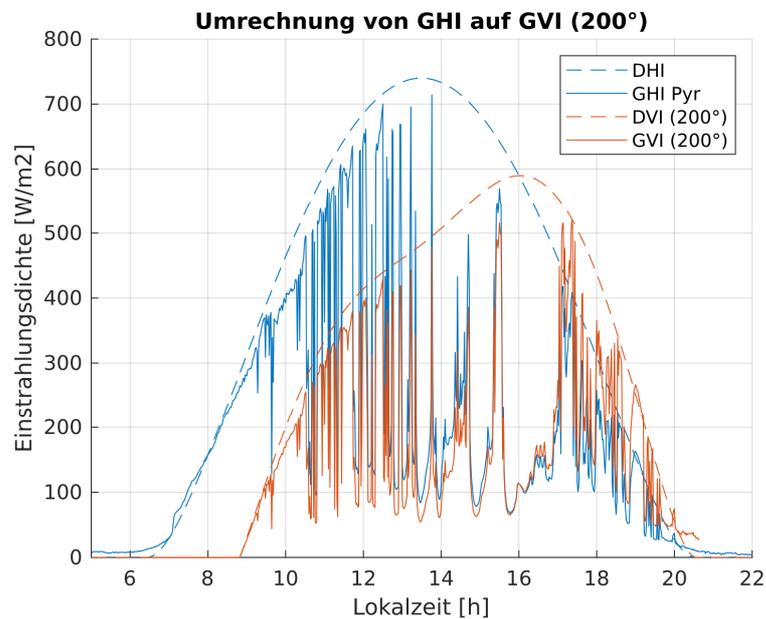


Abbildung 46: Umrechnung der horizontal aufgenommenen Messdaten (blau) auf eine vertikale Oberfläche, die im nach 200° SSW zeigt (rot) am 02.05. Die gestrichelten Linien geben den jeweiligen theoretischen Wert der Strahlungsdichte, bei Wolkenlosigkeit, an.

Die senkrechten Wände im Experiment stehen im Winkel von ca. 200° SSW. Über die in Abbildung 44 gezeigten Verläufe wird von der aufgezeichneten GHI auf die GVI bei 200° geschlossen. Damit ergibt sich die in Abbildung 46 gezeigte GVI für die senkrechten Wände.

In diesem Fall bewirkt die Korrektur lediglich eine Änderung von ca. 10%. An anderen Tageszeiten, oder an anderen Ausrichtungen kann die Korrektur jedoch deutlich mehr Änderung bewirken, sodass diese einen nicht vernachlässigbaren Schritt zur Abschätzung der Bestrahlungsstärke darstellt.

Analogie zur Stufenheizungsthermografie

Abbildung 47 zeigt einen vergrößerten Abschnitt der solaren Einstrahlungsdichte vom 02.05.2021. Dieser wird gewählt, da er einen besonders steilen Anstieg in der Einstrahlungsdichte hat, der ca. 12 Minuten anhält. Dieser Anstieg wird analog zur Stufenheizungsthermografie [69] genutzt und ausgewertet.

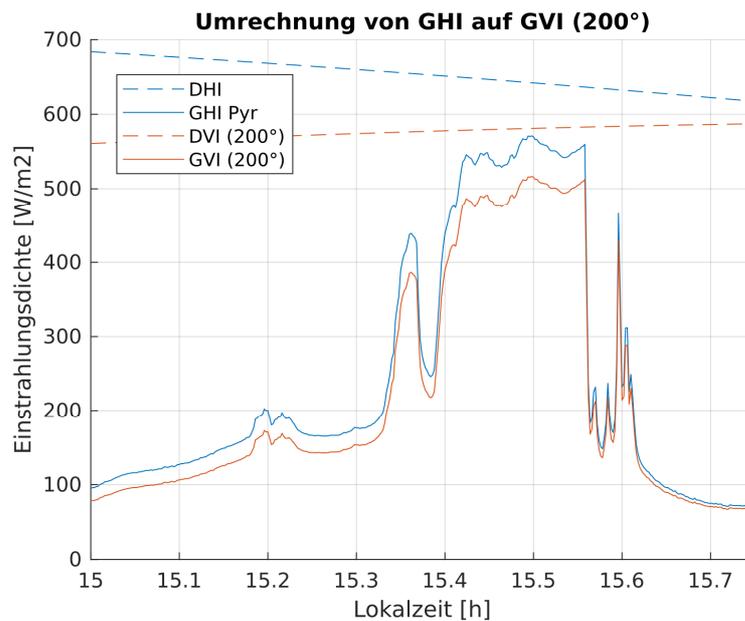


Abbildung 47: Abschnitt der Einstrahlungsdichte am 02.05. Besonders gut zu erkennen ist der sprungartige Anstieg der Bestrahlungsdichte (15,4 h), der als Stufenheizungs-Thermografie-Anregung genutzt werden kann. „GHI Pyr“ ist die vom Pyranometer gemessene Größe, die für horizontale Flächen gilt und GVI (200°) wurde umgerechnet für die vertikalen Flächen, die nach ca. 200° SSW zeigen.

In Abbildung 48 ist das experimentelle Sichtfeld der Thermografiekamera dargestellt und es sind vier ROI-Bereiche eingezeichnet, die jeweils der Hauswand links, der Hauswand rechts, der Garage und der Straße entsprechen.

Abbildung 49 zeigt die vorher aufgezeigten ROIs in ihrer zeitlichen Veränderung. Dabei fällt auf, dass alle Oberflächen eine unterschiedliche Start-Temperatur vor dem Strahlungsanstieg besitzen und sich zudem unterschiedlich stark aufheizen, aber sich alle in einem ähnlichen Verlauf jedoch mit unterschiedlichem Offset entwickeln. Generell ist die Heizperiode

gut zu erkennen (Abbildung 49, ab ca. Stunde 15,3). Zudem auch die Abkühlphase ab ca. 15,55 h, wo alle Kurven ein lokales Maximum erreichten.

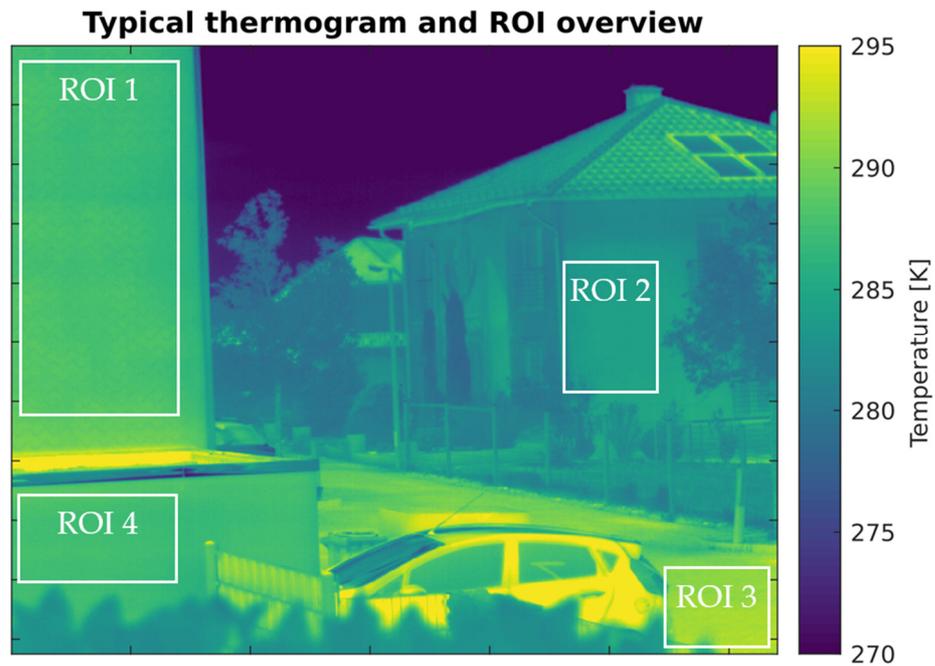


Abbildung 48: Thermogramm des Experiments mit eingetragenen ROIs (Region of Interest).

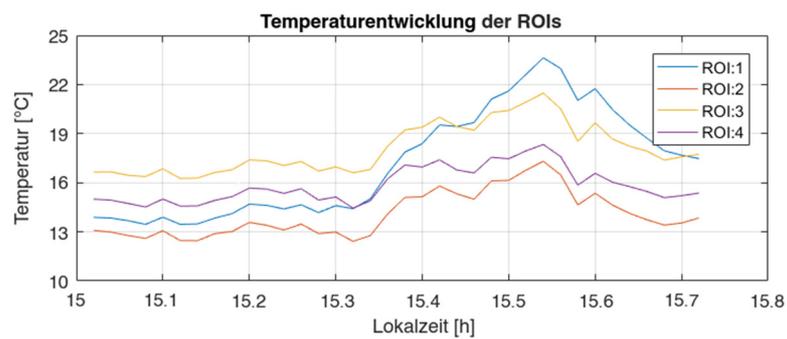


Abbildung 49: Zeitliche Entwicklung der Temperaturverläufe der einzelnen ROIs

Aufgrund dieser Messreihe werden nun verschiedene Auswertelgorithmen erprobt und im Folgenden zusammengefasst. Die Messergebnisse sind in Tabelle 6 zusammengefasst:

Region of Interest	Temperaturdifferenz °C	Anregungsintensität W/m ²	Wärmeeindringkoeffizient	
			SHT	Referenz [†]
			J/(Km ² √s)	
(1) Hauswand links	7	300	324	490-780
(2) Hauswand rechts	5	300	454	490-780
(3) Straße	4	320 [‡]	2132	1730-2120
(4) Garage	3	300	1362	1100-1400

Tabelle 6: Aufheiz-Temperaturdifferenzen, Temperatursteigungen und die daraus resultierende Oberflächenwärmekapazität und Effusivität nach Kapitel 3.1.3, 3.1.4 und 0.

[†] Die Referenzwerte wurden entnommen/berechnet aus [16, 70, 71]

[‡] Da die Straße waagrecht liegt, wird GHI statt GVI zur Berechnung genutzt

Als Emissivität im visuellen Wellenlängenbereich werden die folgenden Werte zur Bestimmung der Werte in Tabelle 6 genutzt: Hauswände 1 und 2: $\varepsilon_{vis} = 0,35$; Asphalt: $\varepsilon_{vis} = 0,88$; Garage: $\varepsilon_{vis} = 0,45$. Die genutzten Emissivitäten werden nach Reagan und Acklam [72] gewählt. Diese Emissivität gilt nur im Solarbereich (0,3 – 1 μm), wo jedoch der Hauptteil der Sonnenenergie aufgenommen wird. Generell besitzen Hausfarben und raue Naturmaterialien (wie Stein und Bitumen) hohe Emissivitäten im LWIR-Band ($\varepsilon_{IR} > 0,91$) [15^{S. 316}], sodass bei der Berechnung der tatsächlich eintretenden solaren Wärmemenge der Faktor ε_{vis} berücksichtigt werden muss, jedoch die Temperatur noch mit ausreichender Genauigkeit von der LWIR-Kamera erfasst wird (kalibriert auf $\varepsilon_{IR} = 0,95$).

Der via Stufenheizungsthermografie-Analogie bestimmte Wärmeeindringkoeffizient zeigt gut Übereinstimmung mit den Referenzwerten für die entsprechenden Materialien in diesem Versuchsaufbau. Die via Linear Effusivity Fit bestimmten Werte ergeben bei den beiden Hauswänden deutlich höhere Werte, als erwartet. Die Ursache hierfür wurde nicht weiter untersucht, da das Verfahren empfindlich auf Rauscheinflüsse reagiert [14] und im solar angeregten Kontext schlechte Reproduzierbarkeit vorliegt.

Die bestimmte Oberflächenwärmekapazität kann im Kontext thermisch dünner Körper zur Materialeigenschaftsbestimmung genutzt werden, jedoch stellen die hier gezeigten vier Regionen alle thermisch dicke Materialien für den entsprechenden Frequenzbereich dar.

Differenzbildanalyse:

Die Differenzbildanalyse ist eine Methode zur grafischen Darstellung der Temperaturänderung zwischen zwei Zeitpunkten. In diesem Fall wird als erstes Bild das Thermogramm kurz vor der Beleuchtung gewählt (14:20 Uhr) und als letztes Bild das Thermogramm mit der höchsten absoluten Temperatur (14:32 Uhr). Daraus resultierte eine zeitliche Spanne von 12 Minuten, welche etwa dem Anregungspuls entspricht. Das Differenzbild ist in Abbildung 50 dargestellt.

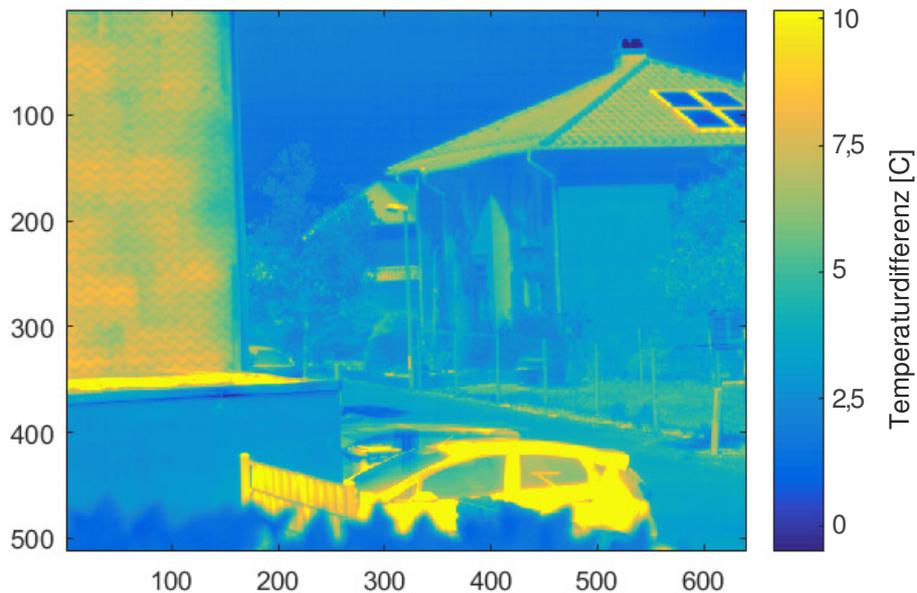


Abbildung 50: Differenzbild des solar angeregten Stufenheizungsversuchs. Zur erkennen sind die verschiedenen Aufheizzonen der verschiedenen Materialien.

In diesem Bild sind außerdem Details erkennbar, die vorher nicht im Thermogramm sichtbar waren, wie beispielsweise das Wellenmuster hinter der Wärmedämmung der Hauswand links. Diese Form der Darstellung ist jedoch abhängig von der Emissivität des jeweiligen Objekts (im Gegensatz zum Phasenbild einer PPT).

Hauptkomponentenanalyse:

Die Messdaten werden zudem einer Hauptkomponentenanalyse unterzogen, die zur Steigerung des lokalen Kontrastes etwaiger Ungängen in der Thermografie eingesetzt wird. In Abbildung 51 werden die ersten vier Hauptkomponenten der Hauptkomponentenanalyse dargestellt. Jede Komponente stellt dabei andere Kontraste dar, sodass je nach Ungänge unterschiedliche Darstellungen zur Analyse zur Verfügung stehen. Die Hauptkomponentenanalyse kann jedoch nur für die qualitative Auswertung genutzt werden, da physikalische Zusammenhänge nicht gewahrt werden [44^{S. 44}].

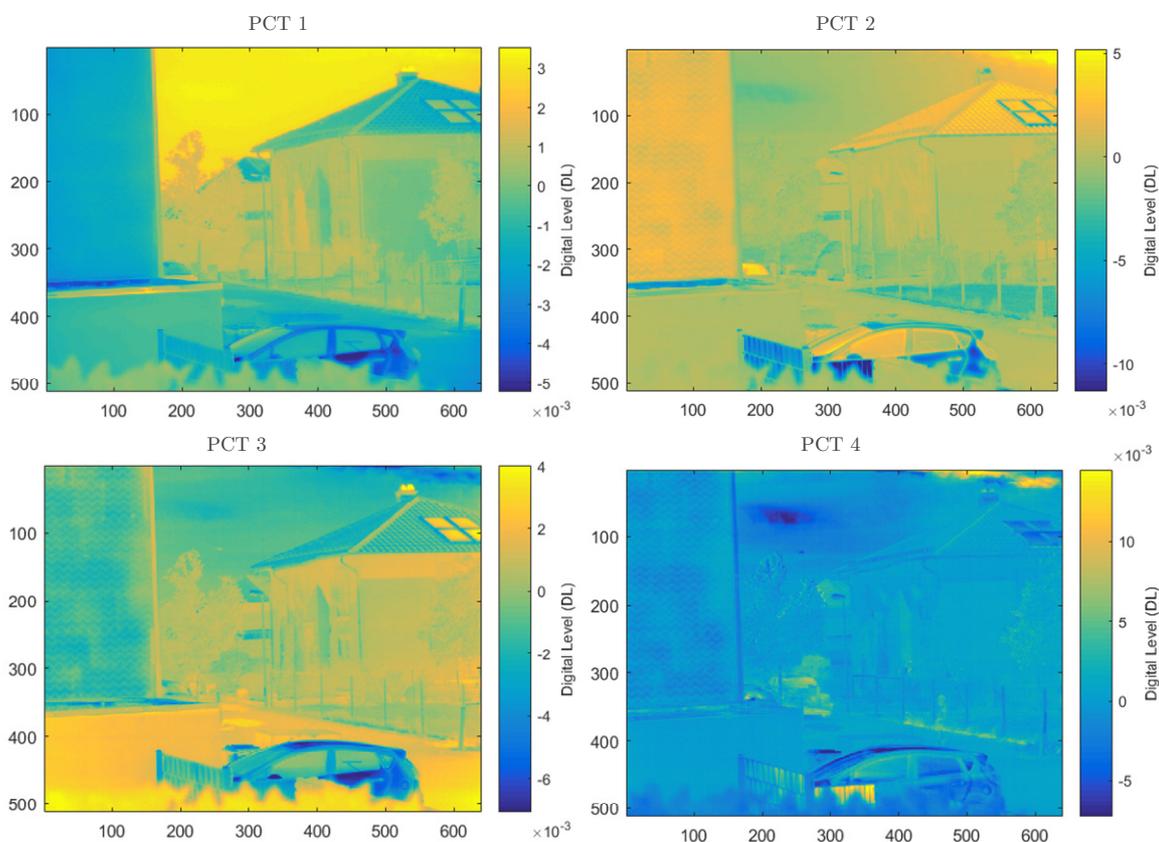


Abbildung 51: Hauptkomponentenanalyse des Stufenheizungs-Versuchs

In der ersten Komponente (PCT 1) ist ein etwa umgekehrt proportionaler Zusammenhang zu der Steigungsanalyse erkennbar. Sich stark aufheizende Bereiche ergeben niedrige Werte, sich weniger stark aufheizende Bereiche höhere. In dem zweiten Bild (PCT 2) hingegen sind besonders schnell reagierende Temperaturbereiche herausgestellt, was auch reflektierende Be-

reiche miteinschließt, da diese ihre scheinbare Temperatur sehr rasch ändern. Die dritte Komponente (PCT 3) zeigt kontrastbildendes Verhalten, welches zur Ungänzendetektion genutzt werden kann. Hier werden kleine Details, wie die wellenförmige Struktur in der Hauswand links herausgestellt. Das hier letzte Komponentenbild (PCT 4) zeigt nur Bereiche lokalen Kontrastes, große Oberflächen wurden angeglichen. Dieses eignet sich ebenso zur lokalen Ungänzendetektion, da es wie PCT 3 kleine lokale Unterschiede herausstellen kann (ebenso die wellenförmige Struktur in der Hauswand).

Da sämtliche Oberflächen in der gezeigten Szene nicht rechtwinklig zur Kameraachse stehen, wird außerdem eine Trapezkorrektur der einzelnen ROIs durchgeführt, die im Folgenden dargestellt ist. Dabei wird in jedem Einzelbild die Farbskala auf maximalen Kontrast eingestellt. Die Trapezkorrektur bezeichnet dabei eine perspektivische Verzerrung, die die Bilddaten so verzerrt, dass ursprünglich trapezförmige Strukturen rechtwinklig erscheinen. Dabei ist zu beachten, dass keine Wertänderung stattfindet, sondern lediglich der Anschein einer rechtwinkligen Aufnahme entsteht.

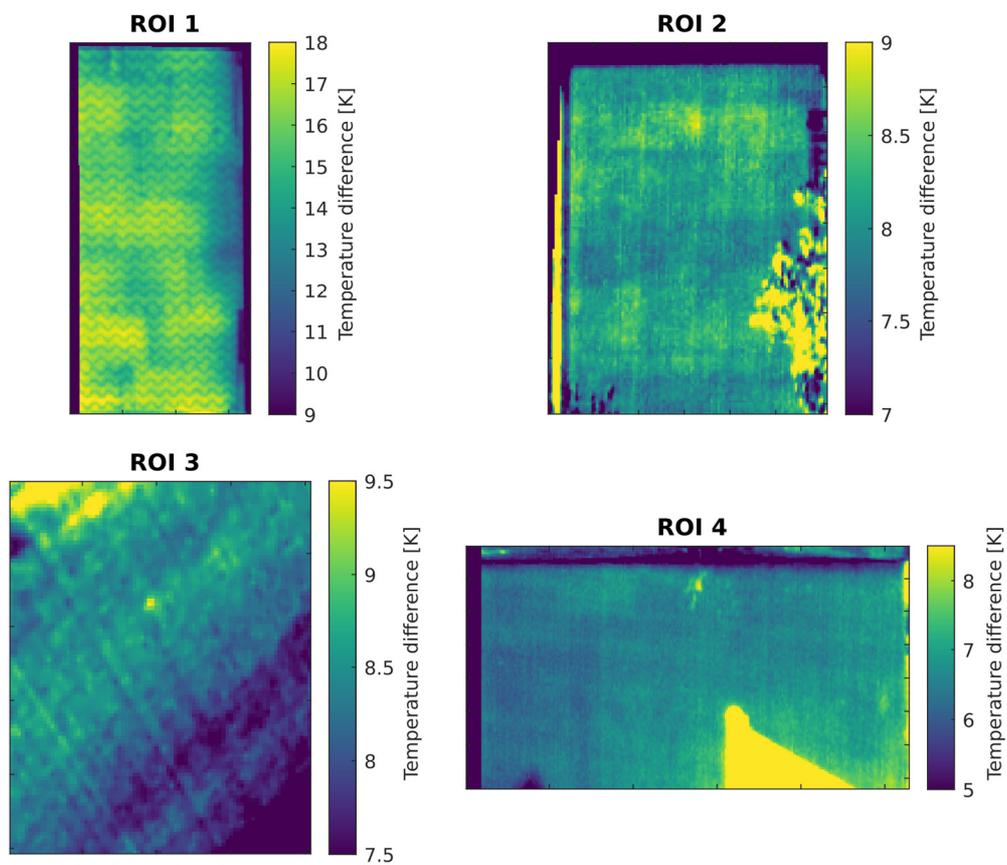


Abbildung 52: Trapezkorrektur der einzelnen ROIs

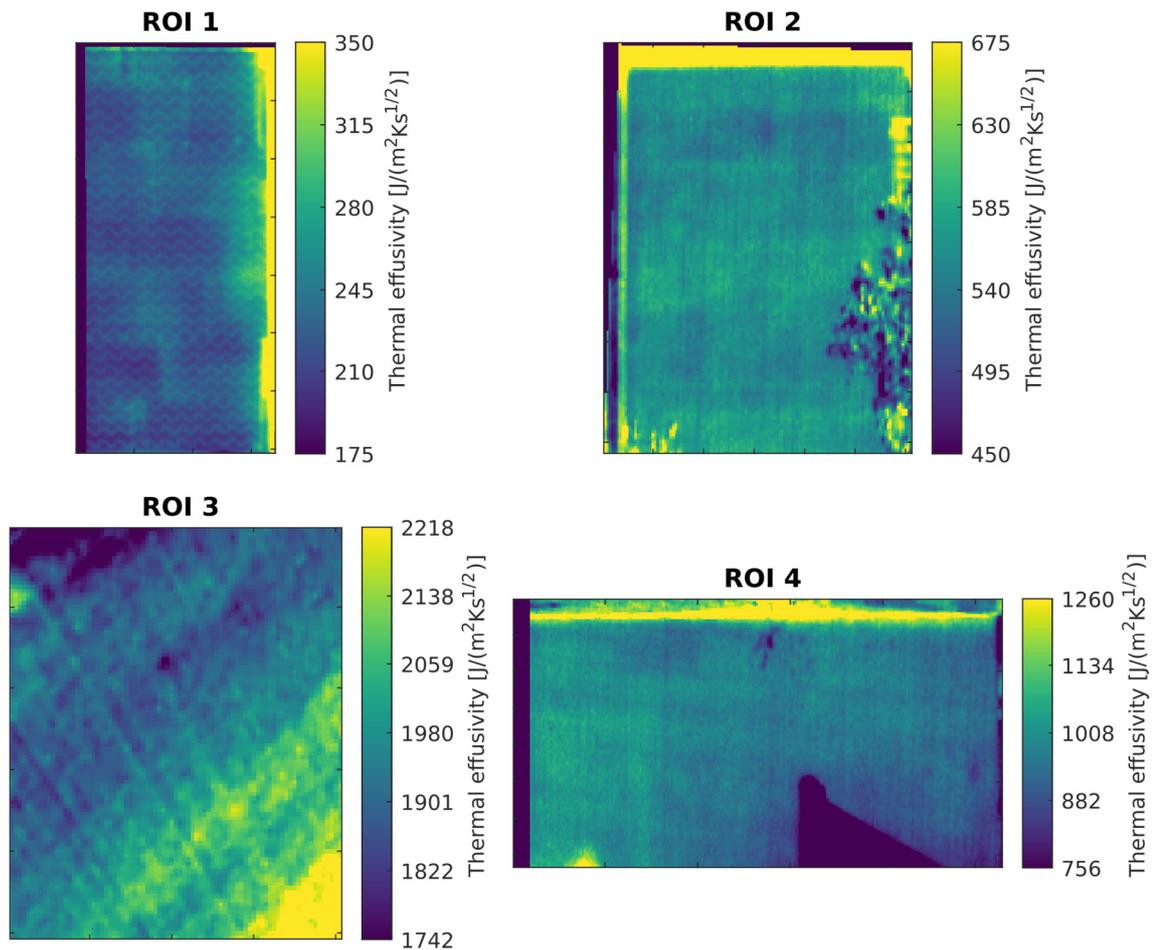


Abbildung 53: Trapez- und Albedokorrigierte Effusivitätsbilder nach dem Modell von Boué und Fournier [55]

In Abbildung 53 sind die sowohl Albedo- als auch emissivitätskorrigierten Effusivitätsbilder dargestellt, berechnet auf Grundlage des Modells von Boué und Fournier [55]. Emissivitätskorrektur bedeutet in diesem Schaubild, dass die vorher bestimmte Strahlungsdichte p mit dem Emissivitätswert ε_{vis} (siehe oben) der jeweiligen Struktur korrigiert wird: $p_{korr} = p \cdot \varepsilon_{vis}$. Diese Darstellung erlaubt sowohl eine Übersicht über die resultierende Effusivität und ermöglicht zudem auch das Erkennen von Ungängen und Strukturen unter der Oberfläche. So ist gut zu erkennen, dass die Hauswand 1 (ROI 1) eine deutlich niedrigere Effusivität, als die Hauswand 2 (ROI 2) besitzt. Ebenso ist die wellenartige Struktur, welche als Klebmasse für Isolierung vermutet wird, zu erkennen, die eine höhere Effusivität als die umliegenden Bereiche aufweist. Das wiederum weist darauf hin, dass an den Stellen ohne „Welle“ eine bessere Isolierung stattfindet (Luft). Ebenso kann die höhere Effusivität bei ROI 2 darauf

hindeuten, dass an diesem Haus keine nachträgliche Isolierung, wie bei ROI 1, stattgefunden hat. Ebenso zeigt die Höhe der Effusivität in ROI 4 (Garage), dass es sich um einen nicht isolierten Baustein handelt. Auch ist in dem Bild eine Ungänze im oberen Bereich zu erkennen, die als Lufteinschluss, oder Ablösung des Verputzes vermutet wird, da die Effusivität deutlich geringer ist, als im umliegenden Bereich.

5 Diskussion der Ergebnisse

Dieses Kapitel diskutiert die im vorherigen Abschnitt vorgestellten Ergebnisse und geht dabei besonders auf die Einschränkungen der Auswertbarkeit und Aussagekräftigkeit der quantitativen Berechnungen ein. Im Anschluss wird die solar angeregte Thermografie, insbesondere die in dieser Arbeit eingeführte Auswertungsstrategie in den Kontext der zerstörungsfreien Prüfung eingeordnet und damit die gestellten Forschungsfragen beantwortet.

5.1 Einordnung in den Kontext der zerstörungsfreien Prüfung

Die Nutzung, der in dieser Arbeit vorgestellten Methoden der solar angeregten Thermografie stellt eine besondere Messmethode dar, die in bestimmten Fällen Prüfaufgaben bewältigen kann, die nicht durch konventionelle, labormaßstäbliche Thermografie abgedeckt werden kann. Dabei gelten bestimmte Voraussetzungen an die Auswertbarkeit der gesammelten Thermografiedaten. Der hier vorgestellte Ansatz entwickelte sich im Laufe der Arbeit zu einer Messaufgabe, die verglichen werden kann mit einer Wetterstation. Die „Wetterstation“ erfasst Umweltparameter, wie Einstrahlung und Temperatur, die im späteren Verlauf die Auswertung beeinflussen.

Die Auswahl des geeigneten Auswertungsverfahrens muss abhängig vom experimentellen Aufbau, Wetterlage, Experimentdauer und weiteren Faktoren gemacht werden. Gewisse Grundvoraussetzungen und Bedingungen für die Erzeugung gewünschter Ergebnisse des Versuches sind im Folgenden festgehalten. Diese beinhalten sowohl physikalische Grundvoraussetzungen, als auch Erfahrungswerte des Autors für ein gelungenes Experiment. Die folgende Liste beinhaltet sowohl externe, als auch systeminterne Voraussetzungen. Sie soll dazu dienen, eine bestehende Prüfaufgabe als geeignet oder ungeeignet für die in dieser Arbeit vorgestellten thermografischen Verfahren einzuordnen.

Ein Haupteinflussfaktor stellt das lokale Wetter dar. Der Überbegriff Wetter wird in den folgenden Punkten weiter eingeteilt und jeweils vertieft. Generell hat das Wetter den größten Einfluss auf die gewonnenen Daten. Um besonders hohe thermische Kontraste zu erzeugen ist ein hoher Wärmeeintrag über Tag und ein hoher Wärmeentzug nachts wünschenswert. Weitere Faktoren bestimmen den Oberwellengehalt, der zudem Auswirkungen auf die Messung übt.

Wichtiger Faktor für die Lock-In-Thermografie und notwendig für die Stufenheizungsanalogie ist die direkte Sonneneinstrahlung. Ein gewisses Maß an direkter Sonneneinstrahlung

dient als Hauptwärmequelle für die meisten in dieser Arbeit vorgestellten Versuche. Die Sonneneinstrahlung sollte außerdem gut von der zu prüfenden Struktur aufgenommen werden, was beispielsweise eine Schwarzbemalung ermöglicht. Außerdem ist es für die Stufenheizungs-thermografie-Analogie notwendig, den Wärmeeintrag quantitativ zu wissen, entweder über eine eingebrachte Referenz, oder über das direkte Messen, zum Beispiel via Pyranometer. Eine weitere Möglichkeit (bei wolkenlosen Wetter) kann das manuelle Erzeugen eines Stufenimpulses durch händisches Verdecken des Prüfobjekts sein. Dazu kann zum Beispiel eine große Decke verwendet werden, die durch zeitliches hin- und wegbewegen den gewünschten Impuls darstellt. Das so gewonnene Verfahren ist prinzipiell mit der aktiven Thermografie gleichzustellen.

Die Jahreszeit, unter der der Versuch durchgeführt wird, spielt eine entscheidende Rolle in der zu erwartenden solaren und nicht-solaren Wärmequellenausbeute. Auch Pozzer et al. [4] zeigen, dass die Sommermonate einen deutlich höheren durchschnittlichen Kontrast darstellen als die Wintermonate. Ein höherer Kontrast ist in den meisten Prüfanwendungen vorteilhaft. Außerdem ist die Sonnenzeit pro Tag im Sommer (in deutschen Breitengraden) deutlich höher, als im Winter, so dass mehr Energie pro Tag in das Prüfobjekt eingebracht werden kann.

Die Ausrichtung der zur prüfenden Struktur spielt eine Rolle. Ist eine Struktur so ausgerichtet, dass kein natürliches Sonnenlicht sie trifft, so geht ein großer Teil der eintreffenden Energie verloren. Dies kann entweder durch Abschattung oder durch vertikale Ausrichtung nach Norden geschehen. Dadurch ist der Energieeintrag auf die konvektive Wärmeübertragung und den diffusen Teil der Himmelsstrahlung begrenzt. Diese Begrenzung ist gerade für quantitative Betrachtung nicht wünschenswert, da diese weniger berechenbar ist, als die periodische Sonneneinstrahlung.

Die Messdauer ist ein zentraler Bestandteil dieser Messmethode, denn eine lange Messdauer ermöglicht, bei der Lock-In-Analogie, sonnenarme Tage auszugleichen. Außerdem sinkt die Messunsicherheit bei steigender Messdauer. Zeitlich begrenzte Wetterphänomene, wie Bewölkung an einem Tag, kann so effektiv unterdrückt werden. Außerdem ermöglicht eine längere Messdauer für die Stufenheizungsanalogie, dass die Wahrscheinlichkeit eines „stufenförmigen“ Ereignisses erhöht wird.

Prämisse für sämtliche in dieser Arbeit vorgestellten Auswertungsmethoden sind genau zueinander ausgerichtete (registrierte) Thermogramme. Dies kann einfach durch eine ortsfeste Kamera geschehen, oder im Nachgang durch eine Registrierung. Die Ausrichtung der Kamera

sollte so stabil wie möglich gehalten werden, was bei Messungen über einige Tage einen robusten Aufbau erfordert.

Oft war bei den hier vorgestellten Prüfaufgaben keine Stromversorgung über das Netz möglich, sodass es nötig war, die Plattform über einen eigenen Akku zu versorgen. Für kurze Messungen (<24 h) konnte dafür ein interner Akku verwendet werden und für längere Prüfungen (bis 14 Tage) wurde ein handelsüblicher PKW-Akku (12V; 85Ah) verwendet. In Zukunft kann die Leistungsaufnahme der Plattform jedoch noch weiter optimiert werden, sodass auch längere Prüfungen mit dem internen Akku abgebildet werden können.

Je mehr externe Referenzdaten miteinbezogen werden, desto genauer können quantitative Auswertungen getätigt werden. Die Kombination aus mehreren Referenzdaten kann zudem ermöglichen genauere Auswertungen zu erreichen, oder andere Werte, wie den Wärmeübergangskoeffizienten zu bestimmen.

Die optische Auflösung der Kamera: Je geringer die Auflösung der genutzten Thermografiecamera, desto weniger thermische Bildpunkte werden aufgelöst. Das bedeutet, dass für große Messoberflächen große örtliche Unschärfe in Kauf genommen werden muss. Die Praxis in dieser Arbeit hat gezeigt, dass Auflösungen von 640x512 Bildpunkten eine sehr gute örtliche Unterscheidung von Fehlstellen bietet. Geht es rein um die Eigenschaftsbestimmung von Objekten, so sind geringere Auflösungen ebenso ausreichend.

Die thermische Auflösung: Oft als NETD bezeichnet (äquivalentes Temperaturrauschen) ist die thermische Auflösung der Kamera. Sie bestimmt welche Temperaturdifferenzen wahrgenommen werden können. Die NETD der beiden, in dieser Arbeit genutzten Kameras, sind 40 und 50 mK und waren in allen hier durchgeführten Experimenten mehr als ausreichend. Die geringe Anforderung an die thermische Rauschfreiheit wird dadurch begründet, dass sehr viele Aufnahmen n durch die Fouriertransformation oder durch die lange Messzeit gemittelt werden, wodurch das (statistische) Rauschen um den Faktor \sqrt{n} reduziert wird.

5.2 Verbleibende Fehlerquellen und Lösungsansätze

Dieses Kapitel geht auf die einzelnen Messunsicherheiten ein, denen das Verfahren in der vorliegenden Arbeit ausgesetzt ist und die nicht explizit korrigiert wurden. Dabei werden verschiedene intrinsische und extrinsische Fehlerquellen genannt und soweit möglich Lösungsansätze zur Vermeidung vorgeschlagen. Die vorgestellte Liste erhebt keinen Anspruch auf Vollständigkeit und gibt lediglich die Sicht des Autors wieder, welche Fehler in besonderem Maße auftreten.

5.2.1 Bolometerkamera

Das Nutzen einer ungekühlten Bolometerkamera ist mit verschiedenen inhärenten Messungenauigkeiten verbunden. Einer der Hauptmessungenauigkeiten besteht darin, dass die Temperatur der Sensorik der Bolometerkamera (FPA) selbst schwankt. Die Änderung der FPA-Temperatur rührt aus dem betrachteten Objekt, der Eigenwärme der Kameraelektronik und der Umgebungstemperatur. Hersteller von ungekühlten Bolometerkameras bieten hierzu verschiedene Kalibrierungsmethoden, wie z.B. ein elektronisch gesteuerten „Shutter“, die sowohl relative Fehler einzelner Pixel untereinander (Flat field correction FFC), als auch Absolutwertfehler bis zu einem gewissen Grad korrigieren können. Diese Kamerainternen Kalibrierungsmethoden, auch „Radiometrie“-Modi genannt, sind jedoch weiterhin fehlerbehaftet, so dass Ungenauigkeiten, besonders bei starken Temperaturänderungen der Kamera selbst, sich auf die aufgezeichneten Thermogramme übertragen. Dieses Verhalten wird auch als „Drift“ bezeichnet. Die Einheit des Drifts ist Messwertänderung/°C.

Die Hysterese der eingesetzten Kamera FLIR Boson ist in Abbildung 10 dargestellt. Mögliche Abhilfe schaffte ein im Versuchsfeld eingebrachter Kalibrierstrahler, der mit einem hinreichend genauen Thermometer ausgestattet ist, und so eine absolute Temperaturreferenz für die gesamte Szene darstellt. Dieses Verfahren wird in dieser Arbeit vorgeschlagen (siehe Kapitel 3.2.1), wurde jedoch durch die späte Verfügbarkeit des Kalibrierstrahlers nicht in den Experimenten aufgestellt.

5.2.2 Atmosphäre

Bei der Messung von Objekten in gewissem Abstand zur Thermografiekamera müssen unterschiedliche Tiefen Luft durchdrungen werden. Da Luft nur zu einem gewissen Grad transparent für Infrarotstrahlung ist, treten ab einer gewissen Distanz Dämpfungseffekte auf,

bei denen die Gastemperatur der Luft die vom Objekt ausgesendete Infrarotstrahlung überlagert. Dieser Effekt skaliert mit der Differenz der Objekttemperatur zur Lufttemperatur.

Mögliche Abhilfe schafft hier, analog zur oben genannten Messungengenauigkeit der Kamera selbst, ein innerhalb der Szene aufgestellter Kalibrierstrahler. Dieser muss jedoch zur Korrektur der atmosphärischen Dämpfung im selben Abstand zur Kamera platziert werden wie das Prüfobjekt.

5.2.3 Konvektion, Strahlungswärmeabgabe und Verdunstungswärme

Die solar angeregte Thermografie arbeitet, verglichen zur labormaßstäblichen Thermografie, mit zeitlich langen Anregungsperioden. Diese (oft viele Stunden) langen Experimente unterliegen nicht nur dem Effekt der Sonneneinstrahlung, sondern auch maßgeblich dem Effekt der Wärmeübertragung per Konvektion und Strahlung.

Die Konvektionswärmeübertragung ist wiederum abhängig von externen Luftbewegungen (erzwungene vs. natürliche Konvektion), Ausrichtung, Oberflächenbeschaffenheit und Temperaturdifferenz zum Fluid. Außerdem sind Außenoberflächen in vielen Monaten des Jahres in Europa oft mit einer gewissen Menge Morgentau beaufschlagt, damit gewinnt die Oberfläche die entsprechende Verdunstungsenthalpie. Im Laufe des Tages verdunstet der Tau üblicherweise und damit wird der Struktur die entsprechende Verdunstungsenthalpie wieder entzogen. Diese Art der Wärmeübertragung (Verdunstungswärme) ist von vielen Faktoren abhängig, unter anderem dem Standort, Wetter und der Oberflächenbeschaffenheit.

Mögliche Abschätzungsverfahren für die Konvektionswärme sind die Annahme, dass diese linear zur Temperatur stattfindet. Damit lässt sich ein Wärmeübergangskoeffizient definieren, der bei freier Konvektion als Konstant angenommen wird. Ebenso können Wärmeübergangskoeffizienten bei der Linearisierung der Strahlungswärme bestimmt werden, um auch diesen Einfluss quantitativ zu erfassen. Zum Bestimmen der Wärmemenge, die via Konvektion fließt, muss die Lufttemperatur über den gesamten Versuchsablauf bekannt sein. Dies kann über aufgestellte Thermometer oder über hinreichend genaue Wetterdaten geschehen. Zum Bestimmen des Wärmeübergangskoeffizienten der Strahlungswärme muss die „Strahlungs-Umgebungstemperatur“ bekannt sein. Diese ist deutlich aufwändiger zu bestimmen, da diese unter anderem vom Wolkenbedeckungsgrad und der Ausrichtung der zu prüfenden Struktur abhängt⁴².

⁴² Siehe Pyrgeometer.

In dieser Arbeit wurde bewusst auf die Berücksichtigung der einzelnen Wärmeübertragungsphänomene verzichtet, um einen blinden Vergleich des Verfahrens mit den verwandten Verfahren aus der Laborthermografie zu ziehen. Es wird erwartet, dass zukünftige Arbeiten von einer quantitativen Berücksichtigung dieser Effekte profitieren [73].

5.2.4 Emissivität und Albedo

Als Emissivität einer Oberfläche wird üblicherweise die Effektivität (ein Faktor zwischen 0 und 1) der Wärmestrahlungsabgabe im Vergleich zum idealen schwarzen Strahler bezeichnet. Der Hauptteil der Wärmestrahlung umfasst bei üblichen Umgebungstemperaturen etwa den LWIR-Bereich (siehe Abbildung 2 in Kapitel 2.5.1). Das bedeutet, dass bei üblichen natürlichen Temperaturen der Wert der Emissivität durch den Wert der Emissivität im LWIR-Bereich dominiert wird. Der Emissionsgrad ist jedoch meist stark abhängig von der betrachteten Wellenlänge und weiteren Faktoren [34^{S. 14}]. Diese Abhängigkeit ist bei vielen Stoffen nur dann vernachlässigbar, wenn ein entsprechend enger Wellenlängenbereich betrachtet wird.

Wird jedoch die Emissivität im LWIR-Bereich und die Emissivität im sichtbaren Bereich verglichen, können erhebliche Unterschiede auftreten, wie z.B. bei weißem Heizkörperlack (Emissivität LWIR ca. 0,95, im sichtbaren Bereichen ca. 0,1-0,2). Dieser Unterschied kommt in dieser Arbeit besonders zum Tragen, da für den Wärmeeintrag (Sonneneinstrahlung) die Emissivität im sichtbaren Bereich relevant ist, jedoch für die Strahlungswärmeabgabe die Emissivität im LWIR-Bereich. Diese Diskrepanz muss bei den Berechnungen berücksichtigt werden, um eine hinreichend genaue Wärmebilanz aufstellen zu können. In Kapitel 4.3.3 werden diese Unterschiede in der Emissivität zwar berücksichtigt, jedoch nur anhand ihrer Literaturwerte. Eine Messung der Emissivität in den oben genannten Wellenlängenbereichen kann in zukünftigen Arbeiten das Aufstellen der Wärmebilanz deutlich verbessern.

In dieser Arbeit wurde zur besseren Unterscheidung für die Emissivität im sichtbaren Bereich der Begriff *Albedo* gewählt. Der Albedofaktor gibt im Gegensatz zur Emissivität nicht die Aussendungsfähigkeit, sondern das Reflexionsvermögen an. Damit ergibt sich der Albedowert in erster Näherung zu: $\alpha = 1 - \varepsilon$.

Die Emissivität ist ebenso abhängig vom Betrachtungswinkel. Generell führen flachere Betrachtungswinkel zu einer Reduktion der Emissivität [74]. Eine Betrachtungswinkelkorrektur kann ebenso wie das Bestimmen der Emissivität zu einer Verbesserung der Messgenauigkeit führen.

5.3 Beantwortung der Forschungsfragen

Forschungsfrage 1: Welche Untersuchungsformen können bei solar angeregter Thermografie angewandt werden, welche eignen sich in besonderem Maße?

Zu den geeigneten Untersuchungsarten bei der solar angeregten Thermografie wurden in dieser Arbeit vor allem die Form „in Reflexion“ betrachtet und herausgestellt. Diese Untersuchungsmethode zeichnet sich dadurch aus, dass Anregungsquelle und Thermografiekamera von der selben Richtung das Prüfobjekt betrachten. In besonderem Maße geeignet zeigten sich die beiden Vorgehensweisen der Pseudo-Lock-In-Thermografie und der Pseudo-Stufenheizungsthermografie. Beide Verfahren können durch den Einsatz geeigneter Mittel qualitative als auch quantitative Prüfaufgaben bewältigen. Diese beiden Verfahren wurden im Detail eingeführt, mit entsprechenden Messmitteln ergänzt und ausgewertet.

Forschungsfrage 2: Wie können Analogien zu Lock-In-Thermografie und Stufenheizungsthermografie auf solar angeregt gewonnene Thermogramme angewandt werden?

Die grundlegende Unterscheidung der zwei Analogien zu Lock-In- und Stufenheizungsthermografie folgt der Unterscheidung von Frequenz- und Zeitbereich. Die Lock-In-Thermografie nutzt die hohen Rauschminderungseigenschaften des Lock-In-Verfahrens und kann sehr rauscharme Bilder in Amplitude und Phase erzeugen. Beide eignen sich zur zerstörungsfreien Prüfung in unterschiedlicher Art, welche in Kapitel 4 erläutert werden. Durch den Einsatz von Referenzplatten kann die vorgestellte Pseudo-Lock-In-Thermografie quantitative Messergebnisse liefern.

Die Stufenheizungsthermografie nutzt die direkte Messung der Sonneneinstrahlung um Quasi-Stufenevents zu erkennen und infolge dessen eine Pseudo-Stufenheizungs-Auswertung zu leisten. Die Messergebnisse dieser Methode sind intrinsisch quantitativ, sodass auch hier eine direkte Beziehung der Temperaturantwort zu den Materialeigenschaften messbar wird.

Die Arbeit zeigt welche Messmittel nötig sind, um die entsprechenden Ergebnisse zu reproduzieren. Zusammenfassend wurden als Hilfsmittel Referenzplatten, in Form von Aluminiumplatten eingeführt und ein Pyranometer zur Bestimmung der eingehenden Globalstrahlungsdichte.

Forschungsfrage 3: Wie ordnet sich die solar angeregte Thermografie in den Kontext der zerstörungsfreien Prüfung, insbesondere der verwandten, labormäßiglichen Verfahren ein? Welche Grenzen der Anwendbarkeit ergeben sich bei realistischen Einsatzbedingungen?

Es wurden Parallelen zur labormäßiglichen Thermografie als Basis dieser Arbeit genutzt, um die beiden Pseudo-Verfahren (Lock-In und Stufenheizung) zu untersuchen. Dabei können die Analogien nur unter Beachtung spezieller Randbedingungen genutzt werden. Bei der Lock-In-Thermografie wird die Wärmeabgabe via Konvektion und Strahlungswärme im Labor häufig vernachlässigt und es existieren keine einfachen Korrekturverfahren, die den Wärmeverlust beschreiben. Daher müssen separate Korrekturen, in dieser Arbeit in Form von Referenzplatten, erbracht werden. Diese Korrektur ist bei der Pseudo-Stufenheizungsthermografie nicht notwendig, da die betrachteten Zeiträume mit einigen Minuten deutlich geringer sind, als die mehrere Tage dauernde Messung bei der Pseudo-Lock-In-Thermografie. Hierbei wird in dieser Arbeit lediglich eine Emmissivitätskorrektur angewandt, die jedoch in labormäßiglichen Thermografieverfahren ebenso üblich ist.

Diese Arbeit zeigt, dass die Wetterphänomene in der Lage sind, analog zum Labor, bestimmte Thermografieverfahren abzubilden. Die Abbildung kommt mit eigenen Fehlerquellen, die teilweise korrigiert werden können. Verbleiben Fehlerquellen werden im Anschluss aufgezeigt.

Grenzen der Anwendbarkeit sind vor allem dann gegeben, wenn ein Prüfobjekt keinem direkten Sonnenlicht ausgesetzt ist, da dies die Wärmestromdichteamplitude im Vornherein auf den diffusen Strahlungsanteil reduziert. Außerdem ist die Pseudo-Lock-In-Thermografie besonders für die Betrachtung von thermisch dicken Objekten geeignet, da thermisch dünne Objekte von den natürlich unsteady Umgebungsbedingungen stärker beeinflusst werden. Eine detaillierte Einordnung in den Kontext der zerstörungsfreien Prüfung wird in Kapitel 5.1 gegeben.

6 Zusammenfassung und Ausblick

Dieses Kapitel fasst die wesentlichen Aspekte der Arbeit noch einmal zusammen. Außerdem wird ein Ausblick auf zukünftige Forschungsfelder gegeben und es werden Verwertungsmöglichkeiten der vorgestellten Technologie aufgeführt.

6.1 Zusammenfassung

Die solar angeregte Thermografie erlaubt eine Vielzahl von Auswertungsmöglichkeiten und Algorithmen. Zwei davon (Stufenheizungsthermografie und Lock-In-Thermografie) wurden angeführt und erfolgreich validiert. Durch die hohe Variabilität der Sonneneinstrahlung und anderer wesentlicher Wetterphänomene lässt sich kein universell geeignetes Verfahren benennen.

Allgemein kann festgehalten werden, dass eine längere Messdauer zu besseren Verwertungsmöglichkeiten führt. Eine hohe, konstante Sonnenbeleuchtung ist vorteilhaft zur Anwendung vieler Algorithmen. Die Ausrichtung einer vertikalen Prüfoberfläche nach Süden ist vorteilhaft, da mehr Sonnenenergie in Summe auf sie trifft.

Selbst bei sonnenlosen Wetterverhältnissen oder bei Prüfobjekten, deren Oberfläche nur wenig oder keine direkte Sonneneinstrahlung erfährt, kann die solar angeregte Thermografie über die Auswertung der 24h-Komponente im Frequenzbereich verwertbare Kontraste erzeugen. Mit der solar angeregten Thermografie können viele, vorher logistisch unmögliche, Mess- und Prüfaufgaben durchgeführt werden. Durch die hohe Verfügbarkeit von periodischer Sonnenenergie eignet sich diese Thermografiemethode besonders in den Sommermonaten und in Gebieten mit sonnenreichem Klima.

Durch das Nutzen von Hilfsmitteln, wie Referenzplatten, Pyranometer und Kalibrierstrahler kann die Nutzungsbandbreite der solar angeregten Thermografie erhöht werden. Es wird dadurch ermöglicht, quantitative Auswertungsmethoden in Feldmessungen durchzuführen. Durch das Aufzeichnen von diesen Hilfsgrößen lässt sich der unbekannte Wärmefluss auf der Prüfobjektoberfläche abschätzen. Dies ermöglicht die Nutzung von Analogien zu vormals nur laborthermografisch verwendeten Methoden für die solar angeregte Thermografie.

In dieser Arbeit wurden einige Einsatzmöglichkeiten, sowie Auswertungsstrategien aufgezeigt und ausgeführt. Vorteile der Lock-In-Thermografie sind die hohe Rauschunterdrückung und die Möglichkeit quantitative Messergebnisse zu erzeugen. Nachteilig ist der hohe Fehlerterm, der durch die Annahme keiner Konvektions- und Strahlungswärmeabgabe herrührt.

Der Stufenheizungsansatz hingegen betrachtet deutlich kürzere Messintervalle, in denen dieser Messfehler nicht so schwer ins Gewicht fällt und vernachlässigt werden kann. Der Nachteil dieser Methode ist jedoch, dass ein stufenförmiger Impuls auftreten muss, was bei wolkenlosen Tagen nicht möglich ist. Generell hat sich die solar angeregte Thermografie hierbei als adäquate Prüfmethode herausgestellt, die es ermöglicht anhand unterschiedlicher Wärmeübertragungsszenarien einen Mehrwert an Information über das Prüfobjekt zu gewinnen. Gerade für große, geometrisch ausgedehnte Objekte, die nicht mit laborthermografischen Methoden untersucht werden können, ermöglicht diese Methode eine vergleichbare Messung.

Außerdem wurde ein Systemkonzept entwickelt und vorgestellt, welches die Prüfaufgabe mit einem dezentralen System abbildet. Hierfür wurden die dafür benötigten Soft- und Hardwarekomponenten erstellt und deren Funktionsweise dokumentiert. Diese Komponenten ermöglichen einen flexiblen Prüfablauf und bieten zudem genügend Rechenleistung, um einige Auswertungsstrategien dezentral auszuführen.

Schließlich wurden Ergebnisse präsentiert, die als Grundlage für die Einführung des Verfahrens in den Kontext der zerstörungsfreien Prüfung dienen. Diese Ergebnisse wurden chronologisch präsentiert, da Erkenntnisse eines vorangegangenen Experiments den Aufbau und die Ausführung des nächsten beeinflussten.

6.2 Ausblick auf zukünftige Forschungsthemen

Die Vorschläge für zukünftige Forschungsthemen rühren von direkten Erfahrungen, die während der Forschung am Thema gemacht wurden, oder stammen aus Überlegungen bei der Themenfindung. Einige Vorschläge für fortführende Arbeiten sind:

- Gemeinsame Nutzung von Referenzplatten und Pyranometer

Durch die Nutzung von Aluminiumplatten und Pyranometer kann sowohl auf die thermografischen Daten der Referenzplatten und auf die gemessene Einstrahlungsdichte zurückgegriffen werden. Dies ermöglicht neue Auswertungsstrategien, die so in der solar angeregten Thermografie noch nicht gezeigt worden sind [23]. Hierbei sind besonders zu erwähnen: Die Stufenheizungsthermografie mittels Pyranometer und die Kalibrierung dessen mit Hilfe der Referenzplatten. Die Lock-In-Thermografie mithilfe der Referenzplatten und dem Pyranometer zur genauen Bestimmung der 24h-Energiemenge. Dieser experimentelle Aufbau ermöglicht eine Kombination der vorher eingeführten Messmethoden. Zum Beispiel kann eine bestimmte Wolkenformation dazu genutzt werden einen

Stufenheizungsversuch durchzuführen, und parallel kann die 24 h-Auswertung dazu genutzt werden, über Amplituden- und Phasenbilder die Ergebnisse zu verbessern. Außerdem können sich beide Auswertungsverfahren gegenseitig validieren und stützen, sodass mit den eingebrachten Referenzplatten belastbare Eigenschaftswerte ermittelt werden können. Zukünftige Experimente können von dieser Mehrinformation profitieren.

- Erweiterung der Analysen auf mehr Materialien

In der aktuellen Arbeit wurde sich auf die Baustoffe Stein und Beton konzentriert. Eine Erweiterung der Analyse auf weitere Materialien erweitert zum einen das Prüfspektrum und eröffnet zum anderen die Möglichkeit weitere Forschungsfragen zu beantworten. So bietet die Nutzung von Holzwerkstoffen die Möglichkeit thermisch dicke Materialien ohne sehr hohe Wandstärken zu betrachten. Das Charakterisieren von Stahl stellt ebenso eine interessante Aufgabe dar, besonders vor dem Hintergrund bestimmter Stahlstrukturen und deren Alterungsprozesse. Auch Armierung/Bewehrung in Beton ist in der zerstörungsfreien Prüfung ein wichtiges Thema. Oberflächennahe Armierung könnte mittels solar angeregter Thermografie charakterisierbar sein.

- Erweiterung der Auswertungsstrategie im Bereich Lock-In-Thermografie

Die Lock-In-Thermografiemethode die in dieser Arbeit vorgestellt wurde, begrenzt sich auf die Auswertung der Amplitudenbilder im 24h-Bin der Fouriertransformation. Wie andere Frequenzbereiche weiter genutzt werden können, kann Ziel weiterer Untersuchungen sein. Einzelne Kontraste könnten durch Kombination vieler Stützstellen profitieren. Ebenso könnten andere Defekte charakterisiert werden, die nicht direkt Einfluss auf die Effusivität haben.

- Erweiterung der Phasenbildauswertung

Die Phasenbildauswertung im Kontext dieser Arbeit wird lediglich als Entscheidungshilfe für die Bestimmung der thermischen Dicke herangezogen. Dabei bietet das Phasenbild im speziellen sehr vorteilhafte Eigenschaften, wie das Unterdrücken der Anregungsinhomogenitäten [44]. Damit stellt es ein eigenständiges Auswertungsprinzip dar. Außerdem könnte das Phasenbild zur Erhöhung der Kontraste dienen oder neue Kontraste sichtbar machen. Ebenso kann laut Bortolin et al. [67] das Phasenbild zur quantitativen Eigenschaftsbestimmung genutzt werden, was in dieser Arbeit durch das Fehlen einer Referenzphase nicht weiter untersucht wurde. Eine Bestimmung der Referenzphase kann beispielsweise durch Einbringen eines thermisch dicken Kalibrierobjekts erfolgen.

Auch die Kombination der Auswertungen über Amplitude und Phase kann in Betracht gezogen werden, so können unter Umständen Einflussfaktoren, wie der Wärmeübergangskoeffizient h isoliert werden.

- Erweiterung der Auswertungsstrategie des Stufenheizungsversuches

Analog zum Stufenheizungsversuch können noch andere thermografische Auswertungsverfahren angewandt werden. Denkbar sind hier die TSR oder eine Entfaltung der Ergebnisbilder (Thermal Deconvolution). Ebenso stellen Vavilov und Burleigh [44] mehrere Auswertungsverfahren, wie Wärmebildtomografie und Wavelet-Transformation vor, die im Rahmen dieser Arbeit nicht angewandt wurden, aber theoretisch in die Rahmenbedingungen der Anregungsform passen.

- Erweiterung des Messaufbaus für die solar angeregte Thermografie

Durch Nutzen längerer Beobachtungszeiträume wird es ermöglicht viele verschiedene Anregungsszenarien separat zu beobachten. Denkbar wäre eine Langzeitmessung über viele Wochen hinweg, sodass der Prüfer im Nachhinein ein bestimmtes Messfenster mit gewünschten Anregungsbedingungen, wie Wetter und Außentemperatur, wählen kann. Dies wiederum könnte es ermöglichen unterschiedliche Kontraste sichtbar zu machen.

- KI-basierte Ansätze zur Modellbildung

Durch den Einsatz von Werkzeugen aus der Künstlichen Intelligenz können Modelle gebildet werden, die einen Zusammenhang zwischen den aufgezeichneten Daten und einer oder mehrerer Materialeigenschaften bestimmen. Dazu ist es jedoch notwendig, wie für jedes KI-Modell, eine hohe Anzahl von Messdaten aufzunehmen, um das Modell nicht überanzupassen.

6.3 Verwertung und Einsatzgebiete

Durch die Universalität des Messverfahrens und die Verfügbarkeit von lässt sich das in dieser Arbeit gezeigte Verfahren auf unzählbar viele Verwertungsfälle anwenden. Denkbar sind nicht nur ständige Überwachungsfunktionen (*Condition Monitoring*), sondern auch einzelne oder wiederholende Prüfaufgaben im Sinne einer Materialprüfung. Da dieses Verfahren zudem analog zur aktiven Labor-Thermografie gesehen werden kann, sind ebensolche Prüfaufgaben auf die solar beladene Thermografie übertragbar.

Einige denkbare Verwendungsgebiete sind im Folgenden aufgelistet. Dies ist keine erschöpfende Liste.

-
- Isolationsmessung an Strukturen
 - Gebäudeinstandhaltung
 - Wärmebrückenmessung an Gebäuden
 - Wärmedämmungsbeurteilung
 - Prüfung von großen geklebten Platten, die thermisch und statisch verbunden sind
 - Materialeigenschaftsbestimmung bei thermisch dicken Materialien, wie Stützmauern oder anderen dicken Strukturen
 - *Condition Monitoring* an Infrastruktur
 - Monitoring der thermischen Materialeigenschaften
 - Thermografische Prüfung auf Risse oder Ähnliches
 - Bestimmung der thermischen Dicke von Objekten mittels Phasenbild
 - Bestimmung des Wassergehalts in thermisch dicken Materialien via der Effusivität

Der Hauptvorteil der solar angeregten Thermografie, im Gegensatz zur labormaßstäblichen, aktiven Thermografie, liegt in der großen Anregungsfläche und -energie. Besonders profitieren hiervon Strukturen, die mit herkömmlichen Methoden nicht signifikant thermisch angeregt werden können, und somit eine „übliche“ aktive Thermografieprüfung ausschließen.

7 Literaturverzeichnis

1. Breitenstein, O., Warta, W., Langenkamp, M.: *Lock-in Thermography*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2010. 10. ISBN 978-3-642-02416-0.
2. Vernotte P.: La mesure du coefficient d'arrachement thermique des isolants par la méthode du touchau [Measurement of the thermal pull-off coefficient of insulating materials using the touchau method] Französisch. *Chaleur et industrie*, 1937, 1937(208:331–7).
3. Vavilov, V.: Thermal NDT: historical milestones, state-of-the-art and trends. *Quantitative InfraRed Thermography Journal*, 2014, 11(1), 66-83. doi: 10.1080/17686733.2014.897016.
4. Pozzer, S., Dalla Rosa, F., Pravia, Z.M.C., Rezazadeh Azar, E., Maldague, X.: Long-Term Numerical Analysis of Subsurface Delamination Detection in Concrete Slabs via Infrared Thermography. *Applied Sciences*, 2021, 11(10), 4323. doi: 10.3390/app11104323.
5. Tu, K., Ibarra-Castanedo, C., Sfarra, S., Yao, Y., Maldague, X.P.V.: Multiscale Analysis of Solar Loading Thermographic Signals for Wall Structure Inspection. *Sensors (Basel, Switzerland)*, 2021, 21(8). doi: 10.3390/s21082806.
6. Ibarra-Castanedo, C., Sfarra, S., Klein, M., Maldague, X.: Solar loading thermography: Time-lapsed thermographic survey and advanced thermographic signal processing for the inspection of civil engineering and cultural heritage structures. *Infrared Physics & Technology*, 2017, 82(2), 56-74. doi: 10.1016/j.infrared.2017.02.014.
7. Sfarra, S., Bison, P., Bortolin, A., Cadelano, G., Ferrarini, G., Paoletti, D., Ibarra-Castanedo, C., Maldague, X., Peron, F.: Solar Loading Thermography For Architectural Heritage Surveys Plumb The Depth By Looking At The Façade. *13th International Workshop on Advanced Infrared Technology & Applications*, 2015, 2015, 259-262.
8. Duan, Y., Huebner, S., Hassler, U., Osman, A., Ibarra-Castanedo, C., Maldague, X.P.V.: Quantitative evaluation of optical lock-in and pulsed thermography for aluminum foam material. *Infrared Physics & Technology*, 2013, 60(1), 275-280. doi: 10.1016/j.infrared.2013.05.009.
9. Lerma, J.L., Cabrelles, M., Portalés, C.: Multitemporal thermal analysis to detect moisture on a building façade. *Construction and Building Materials*, 2011, 25(5), 2190-2197. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2010.10.007.
10. Fox, M., Coley, D., Goodhew, S., Wilde, P. de: Time-lapse thermography for building defect detection. *Energy and Buildings*, 2015, 92, 95-106. doi: 10.1016/j.enbuild.2015.01.021.
11. Chrysafi, A.P., Athanasopoulos, N., Siakavellas, N.J.: Damage detection on composite materials with active thermography and digital image processing. *International Journal of Thermal Sciences*, 2017, 116(9), 242-253. doi: 10.1016/j.ijthermalsci.2017.02.017.

12. Bagavathiappan, S., Lahiri, B.B., Saravanan, T., Philip, J., Jayakumar, T.: Infrared thermography for condition monitoring – A review. *Infrared Physics & Technology*, 2013, 60, 35-55. doi: 10.1016/j.infrared.2013.03.006.
13. Suchan, J., Hendorfer, G.: Thermal Effusivity Determination of Carbon Fibre Reinforced Polymers by means of Active Thermography. *14th Quantitative InfraRed Thermography Conference*, 2018. doi: 10.21611/qirt.2018.084.
14. Suchan, J., Hendorfer, G.: Thermal effusivity determination of carbon fibre-reinforced polymers by means of active thermography. *Quantitative InfraRed Thermography Journal*, 2020, 17(3), 210-222. doi: 10.1080/17686733.2019.1646464.
15. Vavilov, V., Burleigh, D.: *Infrared Thermography and Thermal Nondestructive Testing*. Cham: Springer International Publishing, 2020. ISBN 978-3-030-48001-1.
16. John H. Lienhard, IV, John H. Lienhard, V.: *A Heat Transfer Textbook, 5th edition*. Cambridge, Massachusetts: Phlogiston Press, 2020.
17. Schuster, N., Kolobrodow, V.G.: *Infrarotthermographie*. 2. Auflage: Wiley-VCH Verlag, 2004. ISBN 9783527405091.
18. Maldague, X.P.V.: *Theory and practice of infrared technology for nondestructive testing*. New York, NY: Wiley, 2001. Wiley series in microwave and optical engineering. ISBN 0471181900.
19. Garrido, I., Lagüela, S., Arias, P.: Infrared Thermography's Application to Infrastructure Inspections. *Infrastructures*, 2018, 3(3), 35. doi: 10.3390/infrastructures3030035.
20. Maldague, X.P.V.: *Nondestructive Evaluation of Materials by Infrared Thermography*. London: Springer London Limited, 1993. ISBN 978-1-4471-1995-1.
21. Rosina, E., Robison, E.C.: Applying Infrared Thermography to Historic Wood-Framed Buildings in North America. *APT Bulletin*, 2002, 33(4), 37. doi: 10.2307/1504807.
22. Klein, S., Fernandes, H., Herrmann, H.-G.: Estimating Thermal Material Properties Using Solar Loading Lock-in Thermography. *Applied Sciences*, 2021, 11(7), 3097. doi: 10.3390/app11073097.
23. Klein, S., Heib, T., Herrmann, H.-G.: Estimating Thermal Material Properties Using Step-Heating Thermography Methods in a Solar Loading Thermography Setup. *Applied Sciences*, 2021, 11(16), 7456. doi: 10.3390/app11167456.
24. Fixsen, D.J.: The Temperature of the Cosmic Microwave Background. *The Astrophysical Journal*, 2009, 707(2), 916-920. doi: 10.1088/0004-637X/707/2/916.
25. Mark A. Goforth, George W. Gilchrist, Joseph D. Sirianni: Cloud effects on thermal downwelling sky radiance. *Thermosense XXIV (Proceedings of SPIE)*, 2002, (4710).
26. Gliah, O., Kruczek, B., Etemad, S.G., Thibault, J.: The effective sky temperature: an enigmatic concept. *Heat and Mass Transfer*, 2011, 47(9), 1171-1180. doi: 10.1007/s00231-011-0780-1.
27. Straube, H., Breitenstein, O., Wagner, J.-M.: Thermal wave propagation in thin films on substrate: the time-harmonic thermal transfer function. *physica status solidi (b)*, 2011, 248(9), 2128-2141. doi: 10.1002/pssb.201147014.
28. Crisóstomo, J., Pitarma, R.: The Importance of Emissivity on Monitoring and Conservation of Wooden Structures Using Infrared Thermography. In: M. H.M. Hassan, Hg. *Advances in Structural Health Monitoring*: IntechOpen, 2019. ISBN 978-1-83962-872-6.

29. Zurich Instruments AG: Principles of lock-in detection and the state of the art, 2018.
30. Harris, F.J.: On the use of windows for harmonic analysis with the discrete Fourier transform. *Proceedings of the IEEE*, 1978, 66(1), 51-83. doi: 10.1109/PROC.1978.10837.
31. InfraTec GmbH. *Einführung in Theorie und Praxis der Infrarot-Thermografie* [online], 2004. Verfügbar unter: <https://www.thermografie.co.at/files/infratec.pdf>
32. Shaw, J.A., Nugent, P.W.: Physics principles in radiometric infrared imaging of clouds in the atmosphere. *European Journal of Physics*, 2013, 34(6), S111-S121. doi: 10.1088/0143-0807/34/6/S111.
33. Iowa State University. *Applied Agricultural Meteorology - Radiation Spectrum* [online], 2021. Verfügbar unter: <http://agron-www.agron.iastate.edu/courses/Agron541/classes/541/lesson09a/9a.3.html>
34. Quirin, S.: Multispektraler Ansatz zur Verbesserung der thermografischen Prüfbarkeit von Werkstoffverbunden Dissertation, 2020.
35. InfraTec GmbH. *Spectral Thermography* [online]. *Special systems by InfraTec – ImageIR® and VarioCAM® hr head*, 2010. Verfügbar unter: https://www.infratec.de/downloads/en/company/publications/spectral_thermography.pdf
36. Chiao, J.-C., X. Chen, Z. Zhou und X. Li, Hg.: *MEMS/MOEMS Technologies and Applications III*: SPIE, 2007. SPIE Proceedings.
37. FLIR Systems Inc. *Electrical Panel Monitoring and Inspection* [online], 2021. Verfügbar unter: <https://www.flir.com/globalassets/instruments/global-manufacturing-market/application-spotlight---electrical-panel-monitoring-and-inspection.pdf>
38. Institut Dr. Foerster GmbH & Co. KG. *DEFECTOVISION®IR* [online]. *Zerstörungsfreie Prüfung von Stahlknüppeln und Rohren*. Verfügbar unter: https://www.foerster-group.de/fileadmin/user_upload/downloads/Broschueren/FOERSTER_DEFECTOVISION_DE.pdf
39. Wiecek, B.: *2005 27th Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society. Shanghai, China, 31 August - 03 September 2005*. Piscataway N.J.: IEEE Operations Center, 2005. ISBN 9780780387409.
40. Verfahren zur Herstellung von Kunststoff-Formteilen. Erfinder: Schwalm, G. DE. DE 10 2010 042 759 B4.
41. Summa, J., Schwarz, M., Bernarding, S., Herrmann, H.-G.: Thermography assisted characterisation of production-induced defects in CFRP and their influence on the mechanical behaviour. In: J.M. Hausmann und M. Siebert, Hg. *Euro Hybrid - Materials and Structures 2016 - Proceedings*: DGM, 2016, S. 201-206. ISBN 978-3-88355-414-3.
42. Mendioroz, A., Fuente-Dacal, R., Apiñaniz, E., Salazar, A.: Thermal diffusivity measurements of thin plates and filaments using lock-in thermography. *The Review of scientific instruments*, 2009, 80(7), 74904. doi: 10.1063/1.3176467.
43. Ishizaki, T., Nagano, H.: Measurement of 3D thermal diffusivity distribution with lock-in thermography and application for high thermal conductivity CFRPs. *Infrared Physics & Technology*, 2019, 99(3), 248-256. doi: 10.1016/j.infrared.2019.04.023.

44. Vavilov, V.P., Burleigh, D.D.: Review of pulsed thermal NDT: Physical principles, theory and data processing. *NDT & E International*, 2015, 73(1), 28-52. doi: 10.1016/j.ndteint.2015.03.003.
45. Ibarra-Castanedo, C., Maldague, X.: Pulsed phase thermography reviewed. *Quantitative InfraRed Thermography Journal*, 2004, 1(1), 47-70. doi: 10.3166/qirt.1.47-70.
46. Schwarz, M., Summa, J., Herrmann, H.-G.: Using nondestructive testing methods to characterise production-induced defects in a metal-CFRP hybrid structure. In: J.M. Hausmann und M. Siebert, Hg. *Euro Hybrid - Materials and Structures 2016 - Proceedings: DGM*, 2016, S. 207-210. ISBN 978-3-88355-414-3.
47. Hendorfer, G., Mayr, G., Zauner, G., Haslhofer, M., Pree, R.: Quantitative Determination of Porosity by Active Thermography, 2007, 702-708. doi: 10.1063/1.2718039.
48. Balageas, D.L., Roche, J.-M.: Common tools for quantitative time-resolved pulse and step-heating thermography – part I: theoretical basis. *Quantitative InfraRed Thermography Journal*, 2014, 11(1), 43-56. doi: 10.1080/17686733.2014.891324.
49. Chung, Y., Shrestha, R., Lee, S., Kim, W.: Thermographic Inspection of Internal Defects in Steel Structures: Analysis of Signal Processing Techniques in Pulsed Thermography. *Sensors (Basel, Switzerland)*, 2020, 20(21). doi: 10.3390/s20216015.
50. Giorleo, G., Meola, C.: Comparison between pulsed and modulated thermography in glass–epoxy laminates. *NDT & E International*, 2002, 35(5), 287-292. doi: 10.1016/S0963-8695(01)00062-7.
51. Couturier, J.-P., Maldague, X.P.: Pulsed phase thermography of aluminum specimens. In: R.N. Wurzbach und D.D. Burleigh, Hg. *Thermosense XIX: An International Conference on Thermal Sensing and Imaging Diagnostic Applications: SPIE*, 1997, S. 170-175.
52. Tu, K., Sfarra, S., Ibarra-Castanedo, C., P.V. Maldague, X., Yao, Y.: Multiscale Analysis of Solar loading Thermographic Data for the Inspection of Civil Engineering Structures, 2020. doi: 10.21611/qirt.2020.077.
53. Worzewski, T., Krankenhagen, R., Doroshtnasir, Röllig, Maierhofer, Steinfurth: Thermografie unter wechselnden Witterungsbedingungen zur Zustandsüberwachung eines Windkraftanlagen-Rotorblattes. In: *DGZfP-Jahrestagung 2014*.
54. Qidwai, U., Maqbool, M.: Image deconvolution for enhancing IR images in order to detect defects in metallic plates. *Uvais Qidwai Computer Science & Engineering Department, Qatar University, Doha-Qatar*, 2009, 230-235. doi: 10.1109/ISSPIT.2009.5407573.
55. Boué, C., Fournier, D.: Infrared thermography measurement of the thermal parameters (effusivity, diffusivity and conductivity) of materials. *Quantitative InfraRed Thermography Journal*, 2009, 6(2), 175-188. doi: 10.3166/qirt.6.175-188.
56. Hendorfer, G.: *Quantitative Bestimmung von Materialeigenschaften mittels aktiver Thermografie*. Eugendorf, 2018. Thermografieforum Eugendorf.
57. Wilcox, D.J., Gibson, I.S.: Numerical laplace transformation and inversion in the analysis of physical systems. *INTERNATIONAL JOURNAL FOR NUMERICAL METHODS IN ENGINEERING*, 1984, (20), 1507-1519.

58. Bosch, J.A., Hg.: *Coordinate measuring machines and systems*. New York: Dekker, 1995. Manufacturing engineering and materials processing. 42. ISBN 9780824795818.
59. Moser, D., Klein, S., Wiggenhasuer, H., Behrens, M., Moryson, R.M., Pudovikov, S., Herrmann, H.G.: Zerstörungsfreie Prüfung der Stützmauer einer ehemaligen Kohlegrube im Saarland. *DGZfP Jahrestagung 2019, May, Friedrichshafen, Germany (DGZfP 2019)*, 2019, (2019-08).
60. Texas Instruments Inc.: ADS1255 datasheet (Rev. K) Very Low Noise, 24-Bit Analog-to-Digital Converter.
61. IEEE Std 1241-2000: *IEEE guide for terminology and test methods for analog-to-digital converters*. New York, N.Y., USA: Institute of Electrical and Electronics Engineers. ISBN 9780738127248.
62. Delta OHM: Delta OHM - LP PYRA 02, 03, 12 Datasheet, 2013.
63. : Camera Link Interface Standard Specification Version 2.0, 2012.
64. DRS Technologies Tamarisk 320 Electrical Interface Control Document, 2014.
65. : AXI DMA v7.1 LogiCORE IP Product Guide.
66. Meinel, A.B., Meinel, M.P.: *Applied solar energy. An introduction*, 1976.
67. Bortolin, A., Cadelano, G., Ferrarini, G., Bison, P., Peron, F., Maldague, X.: High-resolution survey of buildings by lock-in IR thermography. In: G.R. Stockton und F.P. Colbert, Hg. *Thermosense: Thermal Infrared Applications XXXV*: SPIE, 2013, S. 870503.
68. Meinel, A.B., Meinel, M.P.: *Applied solar energy. An introduction*. Reading, Mass., 1977. ISBN 9780201047196.
69. J.-M Roche, D Balageas: *Common tools for quantitative pulse and step-heating thermography - Part II: experimental validation*: Unpublished, 2014.
70. Ouakarouch, M., Azhary, K.E., Laaroussi, N., Garoum, M.: Thermal Performances of Hollow Concrete Blocks based on ISO Norm Calculations. In: *Thermal Performances of Hollow Concrete Blocks based on ISO Norm Calculations: IEEE*, 27. November 2019 - 30. November 2019, S. 1-5. ISBN 978-1-7281-5152-6.
71. : *2017 ASHRAE handbook. Fundamentals : SI edition*. Inch-pound edition. Atlanta, GA: ASHRAE, 2017, ©2017. ISBN 9781939200570.
72. Reagan, J.A., Acklam, D.M.: Solar reflectivity of common building materials and its influence on the roof heat gain of typical southwestern U.S.A. residences. *Energy and Buildings*, 1979, 2(3), 237-248. doi: 10.1016/0378-7788(79)90009-4.
73. Kyncl, J., Vetoschkin, L., Musalek, L., Bryscejn, J., Sova, J.: The correction of the influence of wind on thermographic measurement. *Conference: 2016 17th International Scientific Conference on Electric Power Engineering (EPE)*, 2013, 1-4. doi: 10.1109/EPE.2016.7521772.
74. Warren, T.J., Bowles, N.E., Donaldson Hanna, K., Bandfield, J.L.: Modeling the Angular Dependence of Emissivity of Randomly Rough Surfaces. *Journal of Geophysical Research: Planets*, 2019, 124(2), 585-601. doi: 10.1029/2018JE005840.
75. Xilinx, I.: LVDS Source Synchronous 7:1 Serialization and Deserialization Using Clock Multiplication Application Note (XAPP1315), 2017.

8 Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Spektrum der terrestrischen Strahlung bei einer Oberflächentemperatur von 305 K. Die einzelnen Einbrüche der Strahlungsdichte sind Absorptionsbanden, mit den jeweiligen verursachenden Substanzen beschriftet. Der grau hinterlegte Bereich wird als „Atmosphärisches Fenster“ bezeichnet.....	26
Abbildung 2: Atmosphärische Durchlässigkeit in Prozent nach Wellenlänge und Einteilung der Infrarotbereiche in SWIR (rot), MWIR (grün), LWIR (grau) über eine Distanz senkrecht vom Weltraum auf die Meeresoberfläche gesehen. Entnommen aus Shaw und Nugent 2013.....	27
Abbildung 3: Transmissionsgrade für das LWIR- und MWIR-Band unter Berücksichtigung von (a) zwei verschiedenen Umweltbedingungen und alleinige Absorption von CO ₂ (b). Entnommen aus (Quirin 2020: S. 14).....	28
Abbildung 4: Einteilung der Wirkprinzipien von IR-Detektoren.....	29
Abbildung 5: Frequenzinhalt der Sonnenanregungsintensität GHI vom 02. und 03.05.2021. Gut zu erkennen sind die nicht zu vernachlässigen Oberwellenanteile ≤ 12 h.....	42
Abbildung 6: Ablaufdiagramm zur Berechnung der äquivalenten Leistungsamplitude.....	43
Abbildung 7: Vergleich von einem Anregungsimpuls $q(t)$ und Temperaturantwort $T(t)$ (links) zu deren diskreter Laplace-Transformation q_s, T_s (rechts). Entnommen aus Suchan und Hendorfer 2020.....	48
Abbildung 8: Übertragungsfunktion $Z(s)$ für drei theoretische Werte von e (links) und selbige aufgetragen nach $1/s$. Gut erkennbar ist der Zusammenhang zwischen der Steigung der Funktion rechts und $1/e$, welcher zur Eigenschaftsbestimmung genutzt wird. Entnommen aus Suchan und Hendorfer 2020.....	48
Abbildung 9: Kalibrierkurve Digital Level gegenüber Temperatur (links). Kalibrierkurve Digital Level gegenüber äquivalenter Strahlungsintensität (rechts).....	51
Abbildung 10: Schematischer Laboraufbau mit Betonblock (grau) und Aluminiumplatten (blau). Auch dargestellt ist der Polystyrol-Wärmedämmstoff, der an Rück- und Seitenwände angebracht wurde.....	54
Abbildung 11: Blick von oben in die gefertigte Schalungsform für den Betonblock mit den eingebrachten Ungängen. Zu erkennen sind die einzelnen EPS-Quader, die als Pseudo-Lufteinschlüsse in verschiedenen Größen und Tiefen an Holzspießen befestigt sind.....	55
Abbildung 12: Schematischer Laboraufbau des Versuchs mit dem Betonblock mit eingebrachten Ungängen.....	57
Abbildung 13: Kartenbild des Versuchsgeländes Camphausen. Bilder © 2021 Google, Kartendaten © 2021 GeoBasis-DE/BKG (© 2009).....	59
Abbildung 14: Schrägansicht des Versuchsgeländes mit Sicht auf die Messfläche. In Rot dargestellt ist der Bildbereich und der Blickwinkel der Kamera. Bilder © 2021 Google, Kartendaten © 2021 GeoBasis-DE/BKG (© 2009).....	59
Abbildung 15: Übersicht über das Systemkonzept der verwendeten Plattform. Ein- und Ausgänge sind jeweils links und rechts angeordnet.....	60
Abbildung 16: Raspberry Pi 3 Architektur – Abbildung aus	63

Abbildung 17: Softwarekonzept für die Messdatenerfassung der Thermografiekameras	64
Abbildung 18: Softwarekonzept der Datenaufnahme des Pyranometers via der Erweiterungplatine ADS1256.	64
Abbildung 19: Übersicht über den Datenfluss der beiden verwendeten Kameras. Die farblich unterlegten Bereiche dienen zur visuellen Abtrennung der einzelnen Teilbereiche, für die separate Software geschrieben wurde.	66
Abbildung 20: Taktdiagramm der CameraLink-Datenübertragung mit den vier Daten-Lanes (RX0-RC3) und der Clock-Lane (1x CLK) und den jeweiligen Bits. Die Werte DVAL, FVAL und LVAL dienen zur späteren Synchronisation der Pixel in Zeilen und Frames. R0-R7, G0-G7 und B0-B7 sind die einzelnen Bits der drei Farbkanäle.....	68
Abbildung 21: Übersicht über die Auswertungsverfahren und Einteilung in Frequenz- und Zeitbasierte Auswertungen.	70
Abbildung 22: Berechnung der Sonneneinstrahlung und Umrechnung von GHI ↔ GVI.....	70
Abbildung 23: Vergleich der Simulation (blau und rot) mit dem Ergebnis des Modells ohne Konvektion (gelb und violett) für die Aluminiumplatten. Entnommen aus Klein et al. 2021a	73
Abbildung 24: Typisches Thermogramm des Labor-Versuchsaufbaus mit Beschriftung (links). Auf der rechten Seite ist der Aufbau aus Abbildung 10 noch einmal gezeigt.....	74
Abbildung 25: Auswahl von vier Temperaturdiagrammen unterschiedlicher Anregungsperioden der Lock-In-Versuche im Labor	75
Abbildung 26: Vergleich der resultierenden Temperaturamplituden bei verschiedenen Anregungsperioden, 10mm Aluminiumplatte in blau, 20mm Aluminiumplatte in Orange und Betonblock in Gelb mit den aus dem Modell berechneten Werten (gestrichelt)	76
Abbildung 27: Vergleich der Phasenwinkel bei verschiedenen Anregungsamplituden.....	77
Abbildung 28: Differenzbild des Stufenheizungs-Laborexperiments am fehlerbehafteten Betonblock, die Stufendauer beträgt 30 Minuten.....	79
Abbildung 29: Nicht korrigierte Effusivität nach dem Modell von Boué und Fournier	80
Abbildung 30: Differenzbild mit korrigierter Anregungs-Inhomogenität und ungefähren Positionen der eingebrachten Ungängen. Der „LP“ angemerkte Bereich an der linken Seite zeigt den Bereich des nachfolgenden Linienprofils.	80
Abbildung 31: Linienprofil der 5-Fehler-Reihe im oberen Bereich des Betonblocks. Die jeweiligen Bereiche, mit den eingebrachten Fehlern sind farblich hinterlegt. Die Breite der Balken entspricht der Breite der Ungängen im Betonblock.....	81
Abbildung 32: Ultraschallvergleichsmessung mit Fokus auf Fehler 1 des fehlerbehafteten Betonblocks. Die gemessene Tiefe beträgt 135 mm.....	82
Abbildung 33: Ultraschallvergleichsmessung mit Fokus auf Fehler 2 des fehlerbehafteten Betonblocks. Die gemessene Tiefe beträgt ca. 60 mm.....	83
Abbildung 34: Amplitudenbild der Standmauer ohne Referenzplatten	85
Abbildung 35: Phasenbild der selbigen Standmauer ohne Referenzplatten.....	86
Abbildung 36: Überlagerung des 24 h-Amplitudenbildes auf ein optisches Bild. Die Thermografiedaten bilden den Farb- und die optischen Daten den Helligkeitskanal des Bildes.	87

Abbildung 37: Ansicht des Versuchsgeländes mit eingezeichnetem Blickfeld der Kamera (rot) und Zoom auf die Referenzplatten (rechts)	88
Abbildung 38: Amplitudenbild des Langzeitversuches an der Standmauer in Camphausen. Zu erkennen sind die zwei Referenzplatten in der unteren linken Ecke der Szene. (Eine der Platten ist etwa halb verdeckt)	89
Abbildung 39: Resultierendes Bild der Effusivität, aus dem oben gezeigten Amplitudenbild, den Referenz- und Korrekturwerten. Hinweis: Die Bestimmung der Effusivität gilt nur an Stellen der Szene, die thermisch dick sind.....	90
Abbildung 40: Überlagerung des Effusivitäts-Bildes mit einem optischen Bild der Szene. Die Effusivität stellt den Farb- und das optische Bild die Helligkeitskomponente dar.....	91
Abbildung 41: Phasenbild zugehörig zum oben gezeigten Amplitudenbild	92
Abbildung 42: Horizontale Einstrahlungsdichte gemessen über ca. 96 Stunden. Die schwarze Linie stellt den 5-Minuten-Durchschnitt dar. Die graue Hinterlegung gibt die Minimal- und Maximalwerte für diesen Zeitabschnitt an. Der grün markierte Bereich wird für die Stufenheizungs-Methode genutzt, die im Folgenden erläutert wird.....	94
Abbildung 43: Vergleich der theoretischen mit der gemessenen Sonneneinstrahlung für verschiedene Winkel über die Tageszeit. DNI-Berechnung nach (Meinel und Meinel 1977) über die „Luftmassenkoeffizient-Methode“ (engl. Air Mass Coefficient). DVI gibt die vertikale direkte Einstrahlungsdichte an, die eine vertikale Fläche je nach Ausrichtung (Süd, West, Ost und Tracking) erfährt. DHI stellt die horizontale direkte Einstrahlungsdichte dar. GHI Pyr stellt die Messdaten des Pyranometers vom 02.05.2021 dar.....	95
Abbildung 44: Umrechnung der horizontal aufgenommenen Messdaten (blau) auf eine vertikale Oberfläche, die im nach 200° SSW zeigt (rot) am 02.05. Die gestrichelten Linien geben den jeweiligen theoretischen Wert der Strahlungsdichte, bei Wolkenlosigkeit, an.	98
Abbildung 45: Abschnitt der Einstrahlungsdichte am 02.05. Besonders gut zu erkennen ist der sprunghafte Anstieg der Bestrahlungsdichte (15,4 h), der als Stufenheizungs-Thermografie-Anregung genutzt werden kann. „GHI Pyr“ ist die vom Pyranometer gemessene Größe, die für horizontale Flächen gilt und GVI (200°) wurde umgerechnet für die vertikalen Flächen, die nach ca. 200° SSW zeigen.	99
Abbildung 46: Thermogramm des Experiments mit eingetragenen ROIs (Region of Interest).	100
Abbildung 47: Zeitliche Entwicklung der Temperaturverläufe der einzelnen ROIs.....	100
Abbildung 48: Differenzbild des solar angeregten Stufenheizungsversuchs. Zur erkennen sind die verschiedenen Aufheizzonen der verschiedenen Materialien.....	102
Abbildung 49: Hauptkomponentenanalyse des Stufenheizungs-Versuchs	103
Abbildung 50: Trapezkorrektur der einzelnen ROIs	105
Abbildung 51: Trapez- und Albedokorrigierte Effusivitätsbilder nach dem Modell von Boué und Fournier	106

9 Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Übersicht gängiger Radiometerarten	19
Tabelle 2: Vergleich der Tiefenempfindlichkeit ausgewählter Thermografieverfahren	36
Tabelle 3: Realteil und Imaginärteil der Temperaturamplituden verschiedener Anregungsgeometrien bei thermisch dicken und dünnen Materialien. Entnommen aus (Breitenstein et al. 2010: S. 126), verändert und ergänzt.	40
Tabelle 4: Transformation der Wärmeleitungsgleichung und zugehörigen Bedingungen in den Laplace-Raum nach (Hendorfer 2018).	46
Tabelle 5: Übersicht über die eingebrachten Ungängen und deren jeweiliges Aspektverhältnis	56
Tabelle 6: Aufheiz-Temperaturdifferenzen, Temperatursteigungen und die daraus resultierende Oberflächenwärmekapazität und Effusivität nach Kapitel 3.1.3, 3.1.4 und 3.1.5. † Die Referenzwerte wurden entnommen/berechnet aus 2017 ASHRAE handbook; John H. Lienhard, IV und John H. Lienhard 2020; Ouakarrouch et al. 2019 - 2019 ‡ Da die Straße waagrecht liegt, wird GHI statt GVI zur Berechnung genutzt	101

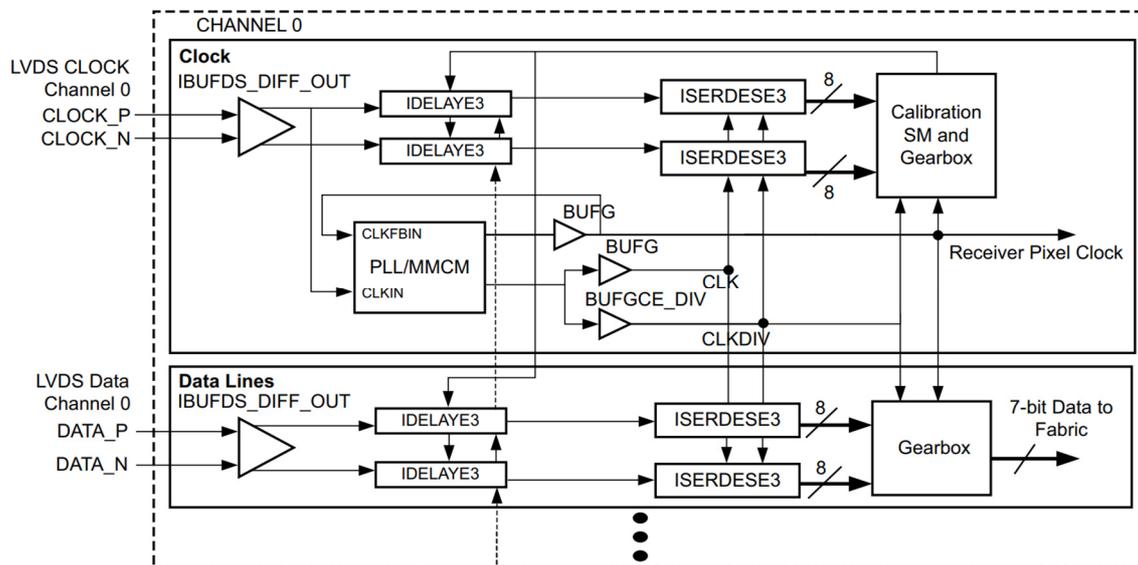
10 Anhang

10.1 Thermische Eigenschaften ausgewählter Materialien

Folgende Tabelle gibt einen Überblick über die thermischen Materialeigenschaften von Materialien die in dieser Arbeit vorkommen. Gerade die Genauigkeit von Naturmaterialien, wie Stein und Erdreich unterliegen sehr großen lokalen Schwankungen. Die unten angegebenen Werte sind lediglich Durchschnittswerte des zu erwartenden Wertebereichs und damit nur als Anhaltspunkt zu sehen.

Material	Eigenschaften				Wärmewellenlänge für Periodendauer in [mm]			
	Dichte [kg/m ³]	Spez. Wärmekapazität [J/(Kkg)]	Wärmeleitfähigkeit [W/mK]	Effusivität [J/(m ² K√s)]	24h	12h	90min	10min
Aluminium	2700	900	167	20000	8638	6108	2106	720
Stahl	7800	470	50	13540	3848	2721	962	321
Asphalt	1800	900	0,75	1100	709	501	177	59
Beton	2240	900	1,9	1957	1012	715	253	84
Gips	640	1150	0,16	343	486	344	121	40
Erdreich nass	1930	2500	2	3106	671	474	168	56
Erdreich trocken	1500	1840	2	2349	887	627	222	74
Eichenholz	600	2390	0,25	599	435	308	109	36
Kalkstein	2300	900	1,1	1509	760	537	190	63
Sandstein	2420	780	3	2380	1314	929	328	109
Zement	2100	920	0,7	1163	627	443	157	52
Ziegel	1920	800	0,9	1176	798	564	199	66
Luft	1,225	1005	0,025	6	4695	3320	1174	391
Polystyrol, gesch.	20	1300	0,035	30	1209	855	302	101
Steinwolle	45	800	0,034	35	1013	716	253	84

10.2 Hardware



LVDS-Dateneingabe und Tank-Generierung im FPGA nach [75]

Beim Cameralink/LVDS-Datenstrom beträgt die Pixelclock $1/7$ der Bitclock, daher ist eine Clockrecovery mittels PLL/MMCM notwendig, die außerdem mittels der Hilfe von programmierbaren Delay-Gliedern (IDELAYE3) das korrekte Timing sicherstellen. Im Anschluss werden die Daten vom 1:8 Block deserialisiert. Schlussendlich werden die Daten 8:7 umgesetzt (Gearbox). Die dazu nötigen Clocks werden ebenso der PLL/MMCM entnommen.

10.3 Quellcode

Dieser Abschnitt enthält Codeabschnitte, die als fundamental für die vorliegende Arbeit gewertet worden sind. Darunter ist MATLAB Skript-Code, sowie C-Code und Bash-Skripte, die bei der Datenaufnahme, Datenverarbeitung und Datenauswertung kritische Rollen spielen. Die Unterkapitel sind nach Programmiersprache unterteilt.

10.3.1 MATLAB

Lockin

```

1 %% About
2 % Author: Samuel Klein, UdS LLB
3 % Copyright 2019-2021 Saarland University
4 %% FFT Whole image, correct FFT Gain
5 Sxy = fft(raw_images,[],3)./size(raw_images,3).*2;
6
7 image_of_interest = 4; % Bin (4 Days = 5, 3 Days = 4)
8
9 Sxy_a = abs(Sxy(:, :, image_of_interest)); % Amplitude image
10 Sxy_ph = angle(Sxy(:, :, image_of_interest)); % Phase image

```

Schnelle Diskrete Laplacetransformation

```

1 %% About
2 % Author: Samuel Klein, UdS LLB
3 % Copyright 2019-2021 Saarland University
4 %% Description
5 % DLT Discrete laplace transform of a signal
6 % Usage: dlt(y,delta,sigma)
7 % Computes the discrete laplace transform for a signal y
8 % delta is the value of a single timestep of the data
9 % sigma is the, in this case constant, real part of s and is fixed
10 % The X result only depends on the input length, not the data
11 %% Examples - LEF computation
12 % Calculate two DLTs, and plot the quotient over sqrt(1/s).
13 % [X,IRR] = dlt(irradiation,delta,sigma);
14 % [~,IXY] = dlt(T_specimen,delta,sigma);
15 % https://dsp.stackexchange.com/questions/66428/how-to-compute-laplace-transform-in-python
16
17 function [X,Y] = dlt(y,delta,sigma)
18     N = length(y); % Number of elements
19
20     x = 0:delta:(delta*(N-1)); % Helper x
21     y = exp(-x*sigma/delta).*y;
22
23     Y = fft(y);
24     Y = Y(1:round(end/2)); % Cut FFT in half (is symmetrical)
25
26     X = sigma+1i*(0:(N/2-1))./delta./N./2./pi;
27 end

```

Sonneneinstrahlungsberechnungen

```

1 %% About
2 % Author: Samuel Klein, UdS LLB
3 % Copyright 2019-2021 Saarland University
4 %% Description
5 % Calculate global normal irradiation (GNI) estimates
6 % Physical background formulas:
7 % GNI = DNI * cos(theta) + DGI
8 % theta: solar zenith angle
9 % cos(theta) = sin(lat)*sin(delta)+cos(lat)*cos(delta)*cos(h)
10 % delta = -23.44° * cos(360/365*(dayOfTheYear+10))
11 % h: hour angle
12 % LSTM = 15°*deltaUTC
13 % EoT = 9.87*sin(2B)-7.53*cos(B)-1.5*sin(B)
14 % B = 360/365*(dayOfTheYear-81)
15 % TC = 4*(Lon - LSTM)+EoT
16 % LST = LT + TC/60
17 % h = 15° * (LST -12)
18 dayOfTheYear = 120; % 02.05.
19 lat = 49.234; % location
20 lon = 6.99;
21 deltaUTC = +2;
22 LSTM = 15*deltaUTC;
23 LT = 0:0.002:23; % Time vector 0-23h
24 B = 360/365*(dayOfTheYear-81);
25 EoT = 9.87*sind(2*B)-7.53*cosd(B)-1.5*sind(B); % Equation of time
26 TC = 4*(lon - LSTM)+EoT;
27 LST = LT + TC/60;
28 h = 15*(LST-12); % hour angle
29 delta = -23.44 * cosd(360/365*(dayOfTheYear+10));
30 cosTheta = sind(lat)*sind(delta)+cosd(lat)*cosd(delta)*cosd(h);
31 cosTheta(cosTheta < 0) = 0; % theta = sun angle
32 AM = 1./cosTheta; % Air mass
33 dnitheo = 1353 * 0.7.^(AM.^0.678); % th. DNI from AM
34 dniLT = dnitheo;
35
36 dhi = dniLT.*cosTheta; % DHI from DNI
37 ghi = dhi+ 0.1*dniLT; % GHI from air mass approx.
38
39 %% Calculate DVI from DNI
40 wallangle = 200;
41 dviwall = dniLT .* sin(acos(cosTheta)) .* cosd(h-wallangle+180);
42 dviwall ( dviwall < 0 ) =0;
43
44 %% Data correction GHI -> GVI
45 ghiPyr = pyranometerData; % read pyranometer data
46 corr = dviwall./dhi;
47 corr(corr > 3) = 3; % clamp max. correction factor
48 gviPyr = ghiPyr.*corr;

```

10.3.2 Bash

Datenaufnahme:

```

1 #!/bin/bash
2 # Author: Samuel Klein - Saarland University
3
4 d=$(date +%y%m%d-%H%M%S)
5 filepath="/home/pi/${d}.raw"
6 v4l2-ctl --device /dev/video0 --set-fmt-video=pixelformat=1\
7         --stream-mmap --stream-to=$filepath --stream-count=1
8 tar -cvzf $filepath.tar.gz $filepath
9 rm $filepath

```

Überprüfung auf korrekten Empfang:

Dieses Bashskript überprüft die Dateigröße der letzten aufgenommenen Daten, wenn diese unter 200kB groß ist, wird die USB-Schnittstelle neugestartet.

```

1 #!/bin/bash
2 # Author: Samuel Klein - Saarland University
3
4 latestFileSize=$(du -b $(ls -t 21* | head -n1) | cut -f -1)
5
6 if (($latestFileSize < 200000))
7 then
8     echo "The file is corrupt"
9     echo "Resetting the USB Ports"
10    uhubctl -L 1-1 -p 2 -a 0
11    sleep 2
12    uhubctl -L 1-1 -p 2 -a 1
13 fi

```

Intervalometer

```

1 #!/bin/bash
2 # Author: Samuel Klein - Saarland University
3 # Usage: ./regular.sh [time in s to sleep]
4 while sleep $1; do ./saveImage.sh; done

```

Datenübertragung via SCP

```

1 #!/bin/bash
2 # Author: Samuel Klein - Saarland University
3
4 scp pi@192.168.1.101:~/21* .*
5 scp pi@192.168.1.101:~/pyra_voltage.csv .

```

10.3.3 C

Pyranometer Read

Auslesecode für das Pyranometer, zur besseren Lesbarkeit verändert und gekürzt.

```

1  /*****
2  * \file    pyra.c
3  * \author  Universitaet des Saarlandes
4  * \author  Samuel Klein
5  *
6  * \date    25.09.2021
7  * \brief   Pyranometer read driver
8  * \details Periodically reads the ADS1256 chip and writes into a CSV
9  *
10 * \version 1.0
11 *****/
12 #include <stdlib.h>    //exit()
13 #include <signal.h>   //signal()
14 #include "ADS1256.h"
15 #include "stdio.h"
16 #include <sys/time.h>
17 #include <time.h>     // time_t, time, ctime
18 #include <unistd.h>
19
20 FILE* f = NULL;
21 time_t rawtime;
22 struct tm * timeinfo;
23 struct timeval tval;
24
25 int main(int argc, char ** argv)
26 {
27     int interval = 1000;
28
29     // Init bcm2835
30     DEV_ModuleInit();
31     ADS1256_init();
32
33     char filename[255] = "pyra_voltage.csv";
34     char buffer[255];
35     float ch3;
36     size_t len;
37
38     f = fopen(filename,"a");           // open file
39
40     uint32_t ms;
41     while(){
42         gettimeofday(&tval, NULL);    // time function
43
44         time (&rawtime);
45         timeinfo = localtime (&rawtime); // convert time to string
46         strftime(buffer,255,"%F %T",timeinfo);
47         ms = ((long int)tval.tv_usec+500)/1000; // get ms part from time struct
48
49         ch3 = (ADS1256_GetChannalValue(3)*5.0)/0x7fffff;
50         len = sprintf(buffer,"%s.%03d, %f\r\n",buffer,ms,ch3); // assemble string
51
52         fwrite(buffer,len,1,f);       // write string to file
53         usleep(interval*1000);       // sleep for interval ms
54     }
55     fclose(f);
56     return 0;
57 }

```

Auszüge aus Kernel-Treiber CameraLink Framegrabber „clfg“

Der nachfolgende Code zeigt die „probe“-Funktion, also die Funktion, die beim Aufruf des Moduls (üblicherweise beim Start) ausgeführt wird. Code zur besseren Lesbarkeit gekürzt.

```

1 static int pz_cl_fg_probe(struct platform_device *pdev)
2 {
3     struct resource *r_irq; /* Interrupt resources */
4     struct resource *r_dma, *r_gpio, *r_meta; /* IO mem resources */
5     struct device *dev = &pdev->dev;
6
7     int rc = 0;
8     dev_info(dev, "Device Tree Probing\n");
9     dev_info(dev, "Number of resources: %d", pdev->num_resources);
10    /* Get iospace for the device */
11    r_dma = platform_get_resource(pdev, IORESOURCE_MEM, 0);
12    r_gpio = platform_get_resource(pdev, IORESOURCE_MEM, 1);
13    r_meta = platform_get_resource(pdev, IORESOURCE_MEM, 2);
14    lp = (struct pz_cl_fg_local *) kmalloc(sizeof(struct pz_cl_fg_local), GFP_KERNEL);
15    dev_set_drvdata(dev, lp);
16    dev_info(dev, "Reserving image memory: 320x240x2B (150kB)\n");
17    // 150kB => 256kB => 64*4kB => 2^6*4kB => order 6
18
19    dma_addr_t dma_handle;
20    lp->image_vaddr = dma_alloc_coherent(dev, PAGE_ALIGN(IMAGE_BYTES), &dma_handle,
21    GFP_KERNEL);
22    lp->image_paddr = dma_handle;
23
24    //lp->image_paddr = virt_to_phys(lp->image_vaddr);
25    dev_info(dev, "image_vaddr allocation successful\nimage_vaddr: %p\nimage_paddr: %p",
26    lp->image_vaddr, lp->image_paddr);
27
28    lp->wimage_vaddr = __get_free_pages(GFP_DMA, 6);
29    lp->wimage_paddr = virt_to_phys(lp->wimage_vaddr);
30    dev_info(dev, "wimage_vaddr allocation successful\nwimage_vaddr: %p\nwimage_paddr: %p",
31    lp->wimage_vaddr, lp->wimage_paddr);
32
33    lp->dma_start = r_dma->start;
34    lp->dma_end = r_dma->end;
35
36    lp->gpio_start = r_gpio->start;
37    lp->gpio_end = r_gpio->end;
38
39    lp->meta_start = r_meta->start;
40    lp->meta_end = r_meta->end;
41
42    lp->dma_base_addr = ioremap(lp->dma_start, lp->dma_end - lp->dma_start + 1);
43    lp->gpio_base_addr = ioremap(lp->gpio_start, lp->gpio_end - lp->gpio_start + 1);
44    lp->meta_base_addr = ioremap(lp->meta_start, lp->meta_end - lp->meta_start + 1);
45
46    r_irq = platform_get_resource(pdev, IORESOURCE_IRQ, 0);
47
48    lp->irq = r_irq->start;
49    rc = request_irq(lp->irq, &pz_cl_fg_irq, 0, DRIVER_NAME, lp);
50    return rc;
51
52 error3:
53    free_irq(lp->irq, lp);
54 error2:
55    kfree(lp);
56    dev_set_drvdata(dev, NULL);
57    return rc;
58 }

```

Im folgenden Codeabschnitt wird die Funktion „read()“ dargestellt. Diese ist zur besseren Übersichtlichkeit ebenfalls gekürzt.

```
1 static ssize_t dev_read(struct file *filep, char *buffer, size_t len, loff_t *offset){
2     int error_count = 0;
3
4     if (len != IMAGE_BYTES)
5     {
6         printk("User requested %d Bytes instead of 153600. IO error",len);
7         return -EIO; // Wrong usage
8     }
9
10    // Start framegrabbing
11    if (!(cl_gpio_in() & GPIO_IN_BITMASK_CL_MMCM_LOCKED)) // If no mmcm_locked
12    {
13        printk(KERN_INFO "clfg: No CameraLink signal present! Is the camera unplugged?\n",
14                error_count);
15        return -EFAULT;
16    }
17
18    cl_start_grabbing(lp);
19    // Wait for a fresh image
20    cl_get_frame();
21    // copy_to_user has the format ( * to, *from, size) and returns 0 on success
22    error_count = copy_to_user(buffer, lp->image_vaddr, IMAGE_BYTES);
23
24    if (error_count==0){ // if true then have success
25        printk(KERN_INFO "clfg: Sent %d characters to the user\n", 320*240*2);
26        return (error_count=0); // clear the position to the start and return 0
27    }
28    else {
29        printk(KERN_INFO "clfg: Failed to send %d characters to the user\n", error_count);
30        return -EFAULT; // Failed -- return a bad address message (i.e. -14)
31    }
}
```

10.3.4 FPGA

CameraLink Decoder

Zur besseren Lesbarkeit gekürzt.

```

1 -----
2 --! @author      Universitaet des Saarlandes
3 --! @author      Samuel Klein (orig. Tobis Gruen)
4 --!
5 --! @brief       CL -> RGB Interface Decoder
6 --! @details
7 --!
8 --!
9 --! Project Name: picozed_ir_cam
10 --! Target Devices: 7Z030
11 --! Tool Versions: Vivado/PetaLinux 2018.1
12 --!
13 --! @version     2.0
14 -----
15 library IEEE;
16 use IEEE.STD_LOGIC_1164.ALL;
17
18 -- Uncomment the following library declaration if using
19 -- arithmetic functions with Signed or Unsigned values
20 use IEEE.NUMERIC_STD.ALL;
21
22 -- Uncomment the following library declaration if instantiating
23 -- any Xilinx leaf cells in this code.
24 library UNISIM;
25 use UNISIM.VComponents.all;
26
27 entity cl_decoder is
28     Port ( reset : in STD_LOGIC;
29           clk_p  : in STD_LOGIC;
30           clk_n  : in STD_LOGIC;
31           x0_p   : in STD_LOGIC;
32           x0_n   : in STD_LOGIC;
33           x1_p   : in STD_LOGIC;
34           x1_n   : in STD_LOGIC;
35           x2_p   : in STD_LOGIC;
36           x2_n   : in STD_LOGIC;
37           x3_p   : in STD_LOGIC;
38           x3_n   : in STD_LOGIC;
39           R      : out STD_LOGIC_VECTOR (7 downto 0);
40           G      : out STD_LOGIC_VECTOR (7 downto 0);
41           B      : out STD_LOGIC_VECTOR (7 downto 0);
42           sync   : out STD_LOGIC_VECTOR (2 downto 0);
43           clk    : out STD_LOGIC;
44           mmcm_locked : out STD_LOGIC);
45 end cl_decoder;
46
47 architecture Behavioral of cl_decoder is
48
49 -- Internal Clocks
50 signal clkkin      : std_logic;
51 --
52 signal bit_clk_mmcm      : std_logic;
53 signal pixel_clk_mmcm   : std_logic;
54 --
55 signal bit_clk_int      : std_logic;
56 signal bit_clk_int_b    : std_logic;
57 signal pixel_clk_int    : std_logic;
58
59 -- MMCM
60 signal clk_feedback     : std_logic;
61 signal mmcm_locked_int : std_logic;
62 signal reset_n          : std_logic;
63

```

```

64 -- Internal Data Signale
65 signal x0_int : std_Logic;
66 signal x1_int : std_Logic;
67 signal x2_int : std_Logic;
68 signal x3_int : std_Logic;
69
70 -- Bitslip Signals
71 signal bitslip_sig      : std_Logic := '0';
72 signal bitslip_pulse   : std_Logic_vector(7 downto 0) := "1000000";
73 signal bitslip_enable  : std_Logic := '0';
74 signal bitslip_locked  : std_Logic := '0';
75
76 -- ISERDES
77 signal clk_iserdes_data : std_Logic_vector (6 downto 0);
78 signal x0_iserdes_data  : std_Logic_vector (6 downto 0);
79 signal x1_iserdes_data  : std_Logic_vector (6 downto 0);
80 signal x2_iserdes_data  : std_Logic_vector (6 downto 0);
81 signal x3_iserdes_data  : std_Logic_vector (6 downto 0);
82
83 signal reset_sig        : std_Logic := '1';
84 signal reset_counter    : unsigned (4 downto 0) := (others => '0');
85
86 begin
87 -- Differentieller Eingang des Clock-Signals
88 iob_clk_in : IBUFGDS
89     generic map( DIFF_TERM => TRUE )
90     port map (
91         I  => clk_p,
92         IB => clk_n,
93         O  => clk_in ) ;
94
95
96 -- Differentieller Eingaenge der Datenleitungen
97 iob_x0_in : IBUFDS
98     generic map( DIFF_TERM => TRUE )
99     port map (
100        I  => x0_p,
101        IB => x0_n,
102        O  => x0_int ) ;
103
104 iob_x1_in : IBUFDS
105     generic map( DIFF_TERM => TRUE )
106     port map (
107        I  => x1_p,
108        IB => x1_n,
109        O  => x1_int ) ;
110
111 iob_x2_in : IBUFDS
112     generic map( DIFF_TERM => TRUE )
113     port map (
114        I  => x2_p,
115        IB => x2_n,
116        O  => x2_int ) ;
117
118 iob_x3_in : IBUFDS
119     generic map( DIFF_TERM => TRUE )
120     port map (
121        I  => x3_p,
122        IB => x3_n,
123        O  => x3_int ) ;
124
125 -- Clock-Buffer fuer Pixel-Clock
126 bufg_ref_clk : BUFG
127     port map (
128        I  => pixel_clk_mmcm,
129        O  => pixel_clk_int ) ;
130
131 -- Clock-Buffer fuer Bit-Clock
132 bufio_bit_clk_p : BUFIO
133     port map (
134        I  => bit_clk_mmcm,
135        O  => bit_clk_int ) ;

```

```

135
136 bit_clk_int_b <= not bit_clk_int;
137
138 clk <= pixel_clk_int;
139 --debug(0) <= mmcm_locked_int;
140 reset_n <= not reset;
141
142 -- MMCM erzeugt phasensynchronen Takt aus Clock-IN, sowie den 7-fachen Bittakt
143 mmcm_adv_inst : MMCM_ADV
144     generic map (
145         BANDWIDTH           => "OPTIMIZED",
146         CLKFBOUT_MULT_F     => 35.0,
147         CLKFBOUT_PHASE     => 0.0,
148         CLKIN1_PERIOD       => 48.0,
149         CLKOUT0_DIVIDE_F    => 5.0,
150         CLKOUT0_DUTY_CYCLE  => 0.5,
151         CLKOUT0_PHASE       => 0.0,
152         CLKOUT1_DIVIDE     => 35,
153         CLKOUT1_DUTY_CYCLE  => 0.5,
154         CLKOUT1_PHASE       => 0.0,
155         COMPENSATION        => "ZHOLD",
156         DIVCLK_DIVIDE       => 1)
157     port map (
158         CLKFBOUT             => clk_feedback,
159         CLKOUT0              => bit_clk_mmcm,
160         CLKOUT1              => pixel_clk_mmcm,
161         CLKFBIN              => clk_feedback,
162         PSCLK                => '0',
163         PSEN                  => '0',
164         PSINCDEC              => '0',
165         PWRDWN                => '0',
166         LOCKED                => mmcm_locked_int,
167         CLKIN1                => clk_in,
168         CLKIN2                => '0',
169         CLKINSEL              => '1',
170         DADDR                 => "0000000",
171         DCLK                   => '0',
172         DEN                    => '0',
173         DI                     => "0000000000000000",
174         DWE                     => '0',
175         RST                    => reset_n);
176
177 mmcm_locked <= mmcm_locked_int;
178
179 iserdes_clk : ISERDESE2
180     generic map(
181         DATA_RATE           => "SDR",
182         DATA_WIDTH          => 7,
183         DYN_CLKDIV_INV_EN    => "FALSE",
184         DYN_CLK_INV_EN       => "FALSE",
185         INIT_Q1               => '1',
186         INIT_Q2               => '1',
187         INIT_Q3               => '1',
188         INIT_Q4               => '1',
189         INTERFACE_TYPE       => "NETWORKING",
190         IOBDELAY              => "NONE",
191         NUM_CE                 => 2,
192         OFB_USED              => "FALSE",
193         SERDES_MODE           => "MASTER",
194         SRVAL_Q1              => '0',
195         SRVAL_Q2              => '0',
196         SRVAL_Q3              => '0',
197         SRVAL_Q4              => '0')
198     port map (
199         D                       => clk_in,
200         DDLY                     => '0',
201         CE1                       => '1',
202         CE2                       => '1',
203         CLK                       => bit_clk_int,
204         CLKB                      => bit_clk_int_b,
205         RST                       => reset_sig,

```

```

206         CLKDIV           => pixel_clk_int,
207         CLKDIVP         => '0',
208         OCLK           => '0',
209         OCLKB          => '0',
210         DYNCLKSEL      => '0',
211         DYNCLKDIVSEL   => '0',
212         SHIFTIN1       => '0',
213         SHIFTIN2       => '0',
214         BITSLLIP       => bitslip_sig,
215         0               => open,
216         Q8             => open,
217         Q7             => clk_iserdes_data(6),
218         Q6             => clk_iserdes_data(5),
219         Q5             => clk_iserdes_data(4),
220         Q4             => clk_iserdes_data(3),
221         Q3             => clk_iserdes_data(2),
222         Q2             => clk_iserdes_data(1),
223         Q1             => clk_iserdes_data(0),
224         OFB            => '0',
225         SHIFTOUT1      => open,
226         SHIFTOUT2      => open);
227
228 bitslip_process:
229 process(pixel_clk_int)
230 begin
231     if(rising_edge(pixel_clk_int)) then
232
233         bitslip_pulse <= bitslip_pulse(6 downto 0) & bitslip_pulse(7);
234         if bitslip_enable = '1' then
235             if (clk_iserdes_data = "1100011") then
236                 bitslip_locked <= '1';
237             else
238                 bitslip_locked <= '0';
239             end if;
240         end if;
241     end if;
242 end process;
243
244 reset_process:
245 process(pixel_clk_int)
246 begin
247     if(rising_edge(pixel_clk_int)) then
248         if(mmc_locked_int = '1') then
249             if(reset_counter = 31) then
250                 reset_sig <= '0';
251             else
252                 reset_sig <= '1';
253                 reset_counter <= reset_counter + 1;
254             end if;
255         else
256             reset_counter <= (others => '0');
257         end if;
258     end if;
259 end process;
260
261 bitslip_enable <= not reset_sig;
262 bitslip_sig <= bitslip_pulse(7) and (not bitslip_locked);
263 --debug(1) <= bitslip_locked;
264
265 -- ISERDESE zur Parallelisierung der Nutzdaten
266 iserdes_x0 : ISERDESE2
267     generic map(
268         DATA_RATE       => "SDR",
269         DATA_WIDTH      => 7,
270         DYN_CLKDIV_INV_EN => "FALSE",
271         DYN_CLK_INV_EN   => "FALSE",
272         INIT_Q1          => '1',
273         INIT_Q2          => '1',
274         INIT_Q3          => '1',
275         INIT_Q4          => '1',
276         INTERFACE_TYPE   => "NETWORKING",

```

```

277         IOBDELAY           => "NONE",
278         NUM_CE             => 2,
279         OFB_USED           => "FALSE",
280         SERDES_MODE        => "MASTER",
281         SRVAL_Q1           => '0',
282         SRVAL_Q2           => '0',
283         SRVAL_Q3           => '0',
284         SRVAL_Q4           => '0')
285     port map (
286         D                   => x0_int,
287         DDLY                => '0',
288         CE1                 => '1',
289         CE2                 => '1',
290         CLK                 => bit_clk_int,
291         CLKB                => bit_clk_int_b,
292         RST                 => reset_sig,
293         CLKDIV              => pixel_clk_int,
294         CLKDIVP             => '0',
295         OCLK                => '0',
296         OCLKB               => '0',
297         DYNCLKSEL           => '0',
298         DYNCLKDIVSEL       => '0',
299         SHIF TIN1           => '0',
300         SHIF TIN2           => '0',
301         BITS LIP           => bit slip_sig,
302         0                   => open,
303         Q8                  => open,
304         Q7                  => x0_iserdes_data(6),
305         Q6                  => x0_iserdes_data(5),
306         Q5                  => x0_iserdes_data(4),
307         Q4                  => x0_iserdes_data(3),
308         Q3                  => x0_iserdes_data(2),
309         Q2                  => x0_iserdes_data(1),
310         Q1                  => x0_iserdes_data(0),
311         OFB                 => '0',
312         SHIF TOUT1         => open,
313         SHIF TOUT2         => open);
314
315
461
462 -- Bit-Mapping
463 -- X3
464 B(7 downto 6) <= x3_iserdes_data(5 downto 4);
465 G(7 downto 6) <= x3_iserdes_data(3 downto 2);
466 R(7 downto 6) <= x3_iserdes_data(1 downto 0);
467
468 -- X2
469 sync(2 downto 0) <= x2_iserdes_data(6 downto 4);
470 B(5 downto 2) <= x2_iserdes_data(3 downto 0);
471
472 -- X1
473 B(1 downto 0) <= x1_iserdes_data(6 downto 5);
474 G(5 downto 1) <= x1_iserdes_data(4 downto 0);
475
476 -- X0
477 G(0) <= x0_iserdes_data(6);
478 R(5 downto 0) <= x0_iserdes_data(5 downto 0);
479
480 end Behavioral;

```

RGB -> AXI Converter

```

1 -----
2 --! @author    Saarland University
3 --! @author    Samuel Klein
4 --!
5 --! @brief     RGB to AXI Stream Converter
6 --!
7 --! Revision 0.01 - File Created
8 --! Revision 0.02 - Uebernahme in PicoZed
9 --! Revision 0.03 - TLAST Generierung nach jedem kompletten Frame (Nicht Zeile)
10 --!
11 --! Project Name: picozed_ir_cam
12 --! Target Devices: 7Z030
13 --! Tool Versions: Vivado/PetaLinux 2018.1
14 --!
15 --! @version   0.03
16 -----
17
18 library IEEE;
19 use IEEE.STD_LOGIC_1164.ALL;
20 use IEEE.NUMERIC_STD.ALL;
21
22 entity axis_converter is
23     Port (
24         R          : in  STD_LOGIC_VECTOR (7 downto 0);
25         G          : in  STD_LOGIC_VECTOR (7 downto 0);
26         B          : in  STD_LOGIC_VECTOR (7 downto 0);
27         sync       : in  STD_LOGIC_VECTOR (2 downto 0);
28         enable     : in  STD_LOGIC;
29         axis_aclk  : in  STD_LOGIC;
30         axis_aresetn : in  STD_LOGIC;
31         TDATA      : out STD_LOGIC_VECTOR (15 downto 0);
32         TVALID     : out STD_LOGIC;
33         TLAST      : out STD_LOGIC;
34         TREADY     : in  STD_LOGIC
35     );
36 end axis_converter;
37
38 architecture Behavioral of axis_converter is
39
40     TYPE state_t IS (idle, wait_for_start, active);
41
42     signal state : state_t := idle;
43
44     -- Synchronsignale
45     signal dval      : std_logic := '0';
46     signal fval      : std_logic := '0';
47     signal lval      : std_logic := '0';
48     signal dval_del  : std_logic := '0';
49     signal fval_del  : std_logic := '0';
50     signal lval_del  : std_logic := '0';
51     signal enable_del : std_logic := '0';
52     signal enable_r0  : std_logic := '0';
53     signal enable_r1  : std_logic := '0';
54     signal frame_start : std_logic := '0'; -- Steigende Flanke
55     signal frame_end   : std_logic := '0'; -- Fallende Flanke
56     signal line_end    : std_logic := '0';
57     signal enable_rise : std_logic := '0';
58     signal active_sig  : std_logic := '0';
59
60     -- AXI Stream Signale
61     signal t_data      : std_logic_vector(15 downto 0) := (others => '0');
62     signal t_last      : std_logic := '0';
63     signal t_valid     : std_logic := '0';
64
65 begin
66
67     dval <= sync(2);
68     fval <= sync(1);
69     lval <= sync(0);

```

```

70  t_data <= "00" & G(5 downto 0) & R(7 downto 0);
71  -- verzögert die ankommenden Signale um einen Takt
72  process(axis_aclk)
73  begin
74      if(rising_edge(axis_aclk)) then
75          dval_del <= dval;
76          fval_del <= fval;
77          lval_del <= lval;
78      end if;
79  end process;
80
81  process(axis_aclk)
82  begin
83      if(rising_edge(axis_aclk)) then
84          enable_r0 <= enable;
85          enable_r1 <= enable_r0;
86      end if;
87  end process;
88
89  enable_rise <= enable_r0 and (not enable_r1);
90  -- Erzeugung von Impulsen bei steigender/fallender Flanke von fval
91  frame_start <= fval and (not fval_del);
92  frame_end <= (not fval) and fval_del;
93  line_end <= (not lval) and lval_del;
94
95  -- Statemaschine Framegrabber
96  process(axis_aclk)
97  begin
98      if(rising_edge(axis_aclk)) then
99          if(axis_aresetn = '0') then
100             state <= idle;
101         else
102             case state is
103                 when idle =>
104                     if(enable_r1 = '1') then
105                         state <= wait_for_start;
106                     end if;
107                 when wait_for_start =>
108                     if(frame_start = '1') then
109                         state <= active;
110                     end if;
111                 when active =>
112                     if(frame_end = '1') then
113                         state <= idle;
114                     end if;
115             end case;
116         end if;
117     end if;
118 end process;
119
120 active_sig <= '1' when state = active else '0';
121 t_valid <= active_sig and lval and dval;
122 t_last <= active_sig and line_end;
123
124 -- Mapping der Signale auf die Ausgangsports
125 process(axis_aclk)begin
126 if (rising_edge(axis_aclk))then
127     TDATA <= t_data;
128     TVALID <= t_valid;
129 end if;
130 end process;
131
132 TLAST <= t_last;
133 end Behavioral;

```