



Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg
Hamburg University of Applied Sciences

Bachelorthesis

Christian Schuch

Automatisierte Solarzellenprüfung unter Einsatz
einer Thermographiekamera

Christian Schuch

Automatisierte Solarzellenprüfung unter Einsatz
einer Thermographiekamera

Bachelorthesis eingereicht im Rahmen der Bachelorprüfung
im Studiengang Informations- und Elektrotechnik
am Department Informations- und Elektrotechnik
der Fakultät Technik und Informatik
der Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg

Betreuender Prüfer : Prof. Dr. Ing. Dipl. Kfm. Jörg Dahlkemper
Zweitgutachter : Prof. Dr. Ing. Henry Reetmeyer

Abgegeben am 20. Mai 2010

Christian Schuch

Thema der Bachelorthesis

Automatisierte Solarzellenprüfung unter Einsatz einer Thermographiekamera

Stichworte

Thermographiekamera, LabVIEW, Solarzellen, Lock-in Thermographie, statische Thermographie, induktiv angeregt Thermographie, automatische optische Inspektion

Kurzzusammenfassung

Die Bachelorthesis behandelt die Entwicklung eines automatisierten Messplatzes für die Solarzellenprüfung. Hierfür kommt eine Thermographiekamera in Verbindung mit der Programmiersoftware LabVIEW zum Einsatz. Drei Prüfmethode stehen zur Auswahl, die im Detail vorgestellt werden. Auf Basis einer Analyse der Anforderungen wird eine Auswahl von zwei Prüfmethode getroffen und diese in LabVIEW umgesetzt. Anschließend erfolgt ein Test des Prüfsystems.

Christian Schuch

Title of the paper

Automated solar cell test based on thermography

Keywords

Thermography camera, LabVIEW, solar cells, Lock-in Thermography, static Thermography, inductive Thermography, automated optical inspection

Abstract

This bachelor thesis deals with the development of an automated device for solar cell inspection. This is realized by using a thermography camera in conjunction with the programming software LabVIEW. Three different methods are available which are presented in detail. Based on an analysis of the requirements two methods are selected and implemented in LabVIEW. The performance of the system is demonstrated.

Danksagung

Ich bedanke mich bei Herrn Prof. Dr. Ing. Dipl. Kfm. Jörg Dahlkemper für die Betreuung meiner Arbeit. Das entgegengebrachte Vertrauen und die gewährten Freiheiten ermöglichten ein selbstständiges und interessantes Arbeiten.

Gleichfalls möchte ich mich bei Herrn Prof. Dr. Ing. Henry Reetmeyer für die freundliche Übernahme der Zweitkorrektur bedanken.

Des Weiteren danke ich Diana Loos und Benjamin Meyer für das Korrekturlesen der Arbeit.

Mein besonderer Dank gilt meiner Familie, deren Unterstützung ich mir während meines gesamten Studiums sicher sein konnte.

Verwendete Symbole

Formelzeichen	Beschreibung	Einheit
p	Reflexionsfaktor	
α	Absorptionsfaktor	
τ	Durchlässigkeit	
M_λ	spektrale spezifische Ausstrahlung	$[W \cdot m^{-2} \cdot \mu m^{-1}]$
λ	Wellenlänge	[m]
h	plancksche Wirkungsquantum	$4,13566733 \cdot 10^{-15} [eV s]$
c	Lichtgeschwindigkeit im Vakuum	$2,998 \cdot 10^8 [m/s]$
k	Boltzmann-Konstante	$8,617343 \cdot 10^{-5} [eV/K]$
T	Temperatur	[K]
ϵ	Emissivität	
$\vec{\nabla}$	Nabla-Operator	
κ	Wärmeleitfähigkeit	$W/(m \cdot K)$
Q	Wärmefluss	[W]
c_p	spezifische Wärmekapazität	$[J/kg \cdot K]$
ρ	Massendichte	[m/V]
q	Leistung pro Volumen	[W/V]
r	Radius	[m]
t	Zeit	[s]
A_{max}	Maximalwert thermischer Kontrast	
f	Frequenz	[Hz]
$f_{lock-in}$	Lock-in Frequenz	[Hz]
A	Amplitude	
ϕ	Phasenwinkel	[°]
f_s	Framerate	[Hz]
L	Induktivität	[H]
N	Windungszahl	
l	Spulenlänge	[m]
I	Stromstärke	[A]
V	Spannung	[V]
B	Magnetische Flussdichte	$[V \cdot s/m^2]$
A_s	Spulenfläche	$[m^2]$
D	Durchmesser einer Spule	[m]
H	Magnetische Feldstärke	[A/m]
μ_p	absolute Permeabilität	$[V \cdot s/A \cdot m]$
μ_r	materialabhängigen Permeabilität	$[V \cdot s/A \cdot m]$
μ_0	Permeabilität im Vakuum	$4 \cdot \pi \cdot 10^{-7} [V \cdot s/A \cdot m]$

Verwendete Abkürzungen

Abkürzung	Beschreibung
GPIB	General Purpose Interface
LabVIEW	Laboratory Virtual Instrumentation Engineering Workbench
VI	Virtuelles Instrument
MAX	Measurement & Automation Explorer
VISA	Virtual Instrument Software Architecture
IP	Internet Protocol
CPU	Central Processing Unit
RAM	Random-Access Memory

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
1.1	Einführung und Motivation	1
1.2	Zielsetzung	1
2	Ausgangssituation	3
2.1	Rahmenbedingungen	3
2.1.1	Hardware	3
2.1.2	Software	7
2.2	Thermographie für Solarzellen	10
2.2.1	Statische Thermographie	14
2.2.2	Lock-in Thermographie	16
2.2.3	Induktiv angeregte Thermographie	22
2.3	Ermittlung der Emissivität	25
3	Analyse der Anforderungen	27
3.1	Generelle Anforderungen	27
3.2	Technische Anforderungen	29
3.3	Anforderungsliste	31
4	Konzeption	32
4.1	Alternativen	32
4.1.1	Statische Thermographie	32

4.1.2	Lock-in Thermographie	33
4.1.3	Induktiv angeregte Thermographie	34
4.2	Entscheidungsmatrix	35
5	Entwicklung des automatisierten Messplatzes	36
5.1	Ansteuerung des Netzteils	36
5.2	Ansteuerung der Kamera	38
5.3	Verarbeitungszeiten	40
5.4	Momentaufnahme	41
5.5	Datensicherung	42
5.6	Textdatei	44
5.7	Zugriffsfehler	45
5.8	Übersicht	46
6	Entwicklung des Lock-in Messplatzes	49
6.1	Ansteuerung der Kamera	49
6.2	Bilderfassung	50
6.3	Mittelwert und Algorithmus	53
6.4	Datensicherung	56
6.5	Verarbeitungszeiten	57
6.6	Übersicht	59
7	Realisierung	61
7.1	Messplatz	61
7.2	Statische Thermographie	62
7.3	Lock-in Thermographie	67
7.4	Vergleich mit dem Elektrolumineszenzverfahren	72
8	Zusammenfassung	77

Abbildungsverzeichnis

2.1	Die Thermographiekamera A320 der Firma Flir [10]	3
2.2	Das Kamerastativ RA1 der Firma Kaiser	5
2.3	Frontansicht (links) und Rückansicht (rechts) vom PM2811[11]	5
2.4	Bustopologie	6
2.5	Sterntopologie	6
2.6	Der GPIB-USB Controller[16]	6
2.7	Programmbeispiel in LabVIEW	8
2.8	Oberfläche des Measurement and Automation Explorers	8
2.9	Software-Architektur	9
2.10	Programmbeispiel VISA in LabVIEW	10
2.11	Planksches Strahlungsspektrum	11
2.12	Angepasstes Planksches Strahlungsspektrum	12
2.13	Thermische Absorption in der Atmosphäre[3]	13
2.14	Schema der statischen Thermographie	15
2.15	Messaufbau der Lock-in Thermographie	16
2.16	Tiefenreichweite der Lock-in Thermographie	17
2.17	Die Korrelationsfunktionen $K(t)$	18
2.18	Phasen-Zusammenhang im Lock-in Prozess	19
2.19	Prinzip der Lock-in Thermographie	20
2.20	Schema der induktiv angeregten Thermographie	22
2.21	Tiefenreichweite der induktiv angeregten Thermographie	23

2.22	Temperaturbestimmung des Prüfobjekts	25
2.23	Temperaturbestimmung der Wärmequelle	26
3.1	Ergebnis einer Elektrolumineszenzmessung	29
3.2	Ergebnis einer Thermographiemessung	30
5.1	Blockdiagramm für die Ansteuerung des PM2811	36
5.2	Ansteuerung der Flir A320 (Links: Frontpanel, rechts: Blockdiagramm)	38
5.3	Blockdiagramm zur Parametrierung der Kamera	39
5.4	Eingabe-Elemente für die Kameraparameter	39
5.5	Zeitmessung für die Bilderfassung	40
5.6	Zeitmessung für das Speichern eines Bildes	41
5.7	Blockdiagramm der Momentaufnahme	41
5.8	Datensicherung der Messergebnisse	42
5.9	Eingabe-Elemente für die Benennung Indizierung	43
5.10	Textdatei	44
5.11	Eingabe-Element für die Textdatei	45
5.12	Windowsfehler in LabVIEW	45
5.13	Blockdiagramm statische Thermographie	46
5.14	Frontpanel LabVIEW	48
6.1	Blockdiagramm für die Initialisierung der Kamera	49
6.2	Blockdiagramm der Datenerfassung	50
6.3	Benennung der Messpunkte	51
6.4	Blockdiagramm des Sub-VIs für die Datenerfassung	51
6.5	Mittelwertbildung	53
6.6	Berechnung des Amplituden- und Phasenbildes	54
6.7	Graph der Funktion $\arctan(x)$	55
6.8	Graph der Funktion $\arctan2(y,x)$	55

6.9	Blockdiagramm der Datenspeicherung	56
6.10	Messprogramm für das Einlesen eines Bildes	57
6.11	Messprogramm für die Verarbeitungszeiten	58
6.12	Blockdiagramm des Lock-in Thermographie Messplatzes . . .	59
6.13	Frontpanel des Lock-in Thermographie Messplatzes	60
7.1	Messplatz	61
7.2	Messung der statischen Thermographie bei 1 Ampere Stromstärke	62
7.3	Amplitudenverlauf der 130. Zeile bei 1 Ampere Stromstärke .	63
7.4	Messung der statischen Thermographie bei 2 Ampere Stromstärke	64
7.5	Amplitudenverlauf der 130. Zeile bei 2 Ampere Stromstärke .	65
7.6	Amplitudenverlauf bei 2 Ampere Stromstärke	66
7.7	Amplitudenbild	67
7.8	Phasenbild	67
7.9	Amplitudenverlauf bei 01 Hz Anregungsfrequenz	68
7.10	Amplitudenverlauf der 130. Zeile	68
7.11	Phasenverlauf bei 01 Hz Anregungsfrequenz	69
7.12	Phasenverlauf der 130. Zeile	69
7.13	Phasenbild über 4 Perioden	70
7.14	Phasenbild über 12 Perioden	70
7.15	Amplitudenbild über 4 Perioden	70
7.16	Amplitudenbild über 12 Perioden	70
7.17	Phasenbild bei 1 Ampere Stromstärke	71
7.18	Phasenbild bei 2 Ampere Stromstärke	71
7.19	Amplitudenbild bei 1 Ampere Stromstärke	71
7.20	Amplitudenbild bei 2 Ampere Stromstärke	71
7.21	Amplitudenbild der Lock-in Thermographie	72
7.22	Amplitudenverlauf der Lock-in Thermographie-Messung . . .	73

7.23 Statische Thermographie 74

7.24 Elektrolumineszenzmessung 75

7.25 Amplitudenverlauf der Elektrolumineszenzmessung 76

Tabellenverzeichnis

- 4.1 Entscheidungsmatrix 35
- 5.1 Verarbeitungszeiten bei der statischen Thermographie 40
- 6.1 Verarbeitungszeiten bei der Lock-in Thermographie 57
- 6.2 Ermittlung der offline-Verarbeitungszeit 58

Kapitel 1

Einleitung

1.1 Einführung und Motivation

Die deutsche Solarindustrie erlebt in den letzten Jahren ein signifikantes Wachstum. Im Jahr 2009 konnte das Wachstum um 60% gesteigert werden[7]. Der Umsatz der Photovoltaik-Branche lag in diesem Jahr bei 10,2 Milliarden Euro[7]. Die Anzahl der Beschäftigten konnte seit 2004 von 17000 auf 60000 gesteigert werden.

Dieses Wachstum geht mit steigenden Ansprüchen an die Qualität von Solarzellen einher. Automatische, zerstörungsfreie Prüfverfahren in einem möglichst frühen Stadium der Produktion helfen hierbei, Fehler frühzeitig zu detektieren und somit die Kosten zu senken. Durch Auswertung der Fehler lassen sich Rückschlüsse auf Verbesserungen im Produktionsprozess ziehen und somit eine Steigerung der Lebenserwartung und des Wirkungsgrades einer Solarzelle erreichen. Thermographische Messverfahren bieten hierbei eine Möglichkeit, nicht nur optische Fehler einer Solarzelle zu detektieren, sondern auch elektrische Fehlstellen nachzuweisen.

1.2 Zielsetzung

Ziel dieser Bachelorthesis ist es, ein automatisiertes Prüfsystem für eine Solarzellenprüfung mittels Thermographiekamera zu entwickeln. Prüfverfahren unter Zuhilfenahme einer Thermographiekamera sind bereits auf dem Markt verfügbar. Ein relativ neues Prüfsystem stellt hierbei die Lock-in Thermographie dar. Teil dieser Arbeit ist, die Umsetzbarkeit unter den gegebenen Rahmenbedingungen zu prüfen und zu realisieren. Hierbei ist es zunächst nötig, die Rahmenbedingungen für das Projekt zu analysieren und die Prüfmetho-

vorzustellen. Diese beinhaltet die Vorstellung der statischen-, der Lock-in- und der induktiv angeregten Thermographie. Im Anschluss daran wird eine Analyse der Anforderungen an ein automatisches Prüfsystem vorgenommen. Auf Basis dieser Analyse wird ein Konzept für die Entwicklung des Prüfsystems erstellt. Diese schließt die Auswahl der Prüfmethoden mit ein. Anschließend wird das Prüfsystem entwickelt und die Ergebnisse der Entwicklung beschrieben. Ihren Abschluss findet die Arbeit in einer Zusammenfassung über die Ergebnisse und einem Ausblick.

Kapitel 2

Ausgangssituation

2.1 Rahmenbedingungen

In diesem Kapitel werden die Rahmenbedingungen dieser Arbeit näher betrachtet. Zunächst wird die zur Verfügung stehende Hard- und Software vorgestellt. Anschließend wird auf die statische-, die Lock-in- und die induktiv angeregte Thermographie eingegangen. Das Kapitel schließt mit der Erläuterung eines Verfahrens für die Ermittlung der Emissivität.

2.1.1 Hardware



Abbildung 2.1: Die Thermographiekamera A320 der Firma Flir [10]

Für diese Arbeit steht die in Bild 2.1 zu sehende Thermographiekamera A320 der Firma Flir zur Verfügung. Sie liefert 16 Bit Bilder mit einer thermischen Auflösung von 50 mK bei 30°C.

Die Kamera verfügt über den GigE Vision Standard¹ für Kameraschnittstellen, mit dessen Hilfe es möglich ist, die Kamera über das Internet weltweit zu bedienen. Die Stromversorgung erfolgt ebenfalls über das Ethernet-Kabel, welches eine Länge von bis zu 100 m aufweisen kann. Dies ist für einen industriellen Einsatz von großem Vorteil, da nur ein Kabel für die Kamera verlegt werden muss und so Kosten, Fehleranfälligkeit und Installationsaufwand minimiert werden.

Der Fokus des Objektivs ist motorgesteuert und kann sowohl im Automatik-, als auch im Konfigurationsmodus betrieben werden. Es ist möglich, die Kamera mittels der Ethernet Verbindung zu parametrieren. Hierbei können Parameter wie die Emissivität oder die Umgebungstemperatur eingestellt werden. Des Weiteren erlaubt die A320 die Ermittlung der Emissivität eines Objektes. Auf die Prüfmethode und die Bedeutung der Emissivität wird in der folgenden Arbeit näher eingegangen.

Technische Daten

- Ethernet, Typ: 100 Mbps
- Ethernet, Standard: IEEE 802.3
- Ethernet, Kommunikation: TCP/IP
- IR Auflösung: 320 x 240 Pixel
- 16 Bit Bilddaten
- Temperaturbereich: -15 bis +50°C
- F-number: 1.3
- Spektralbereich: 7,5 bis 13 μm

¹GigE Vision ist ein Interface-Standard aus der industriellen Bildverarbeitung.[2]



Abbildung 2.2: Das Kamerastativ RA1 der Firma Kaiser

Für die Befestigung und die Justierung der Kamera wird das Stativ RA1 von Kaiser (Abbildung 2.2) verwendet. Hiermit lassen sich Entfernungen von Kamera und Objekt von bis zu 90 cm realisieren. Das Kamerastativ verfügt über ein reflexfreies, mattgrau beschichtetes Grundbrett mit aufgedrucktem Feinraster. Somit ist eine reproduzierbare Positionierung des Objekts gewährleistet. Durch die höhenverstellbaren Füße und die integrierte Wasserwaage im Sockel kann das Stativ genau ausgerichtet werden. Die Führungssäule ist besonders vibrationsarm.

Um die Solarzelle mit einem elektrischen Strom zu beaufschlagen, wird das Netzteil PM2811 von Philips genutzt.

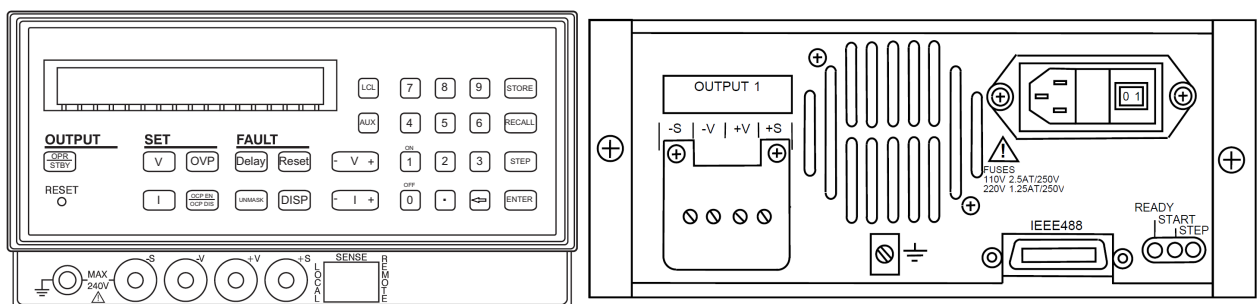


Abbildung 2.3: Frontansicht (links) und Rückansicht (rechts) vom PM2811[11]

In Abbildung 2.3 ist die Front- und Rückansicht des PM2811 zu sehen. Der Spannungsbereich ist von 0 bis 30 V frei einstellbar. Der Strom kann in einem Bereich von bis zu 10 A gewählt werden. Die maximale Ausgangsleistung beträgt 60 W. Das Netzteil verfügt über eine Schnittstelle für den GPIB Bus. GPIB steht für „General Purpose Interface“ und wurde in den 1960er Jah-

ren von der Firma Hewlett-Packard entwickelt. Hier kommt der IEEE 488.1 Standard zum Einsatz. Dieser Standard definiert die physikalische Dimension des Steckers, elektrischen Signale und das Übertragungsprotokoll. Bis zu 15 Geräte können an einen BUS angeschlossen werden. Die maximale Übertragungsgeschwindigkeit beträgt 1 MByte/s. Da es sich um einen parallelen 8 Bit Bus handelt, wird mit jeder Taktung ein ganzes Zeichen übertragen. Als Verbindungs-Topologie ist sowohl eine Bus- als auch eine Sterntopologie möglich.

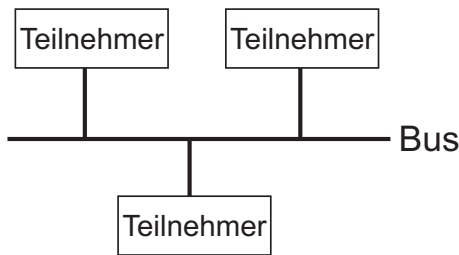


Abbildung 2.4: Bustopologie

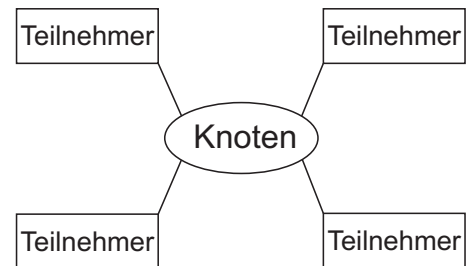


Abbildung 2.5: Sterntopologie

Der GPIB Bus stellt die Kommunikation mit dem verwendeten PC sicher. Als Laborrechner kommt ein Fujitsu-Siemens Celsius W370 zum Einsatz. Er verfügt über eine Intel Core 2 Duo CPU mit 3 Ghz Taktrate, 2 GB Arbeitsspeicher und eine Nvidia Quadro NVS 290 Grafikkarte. Da der Rechner nicht über einen GPIB Bus Anschluss verfügt, wird ein GPIB-USB Controller von National Instruments genutzt.



Abbildung 2.6: Der GPIB-USB Controller[16]

Abbildung 2.6 zeigt den verwendeten GPIB-USB Controller. Mit diesem ist es möglich, das Netzteil PC-seitig über einen der USB Ports zu steuern. Es können durch den Einsatz des Controllers noch 14 weitere Geräte mit dem GPIB Bus verbunden werden.

2.1.2 Software

LabVIEW ist eine professionelle Programmiersoftware der Firma National Instruments und steht für „Laboratory Virtual Instrumentation Engineering Workbench“. Die Markteinführung war 1986. Diese frühe Version war nur für Macintosh Computer geeignet. In dieser Arbeit kommt die Version 8.6 zum Einsatz.

LabVIEW vereint eine Entwicklungsumgebung und eine grafische Programmiersprache in sich. Auch wenn sich die Wurzeln von LabVIEW in der Messtechnik finden lassen, hat sich das Programm zu einer universellen Programmiersprache entwickelt[13]. Programmiert wird mit einer grafischen Programmiersprache, genannt 'G', nach dem Datenfluss-Modell. Dem Datenfluss-Modell liegt das Prinzip zu Grunde, dass eine Aktivität erst dann arbeitet, wenn ihre benötigten Datenflüsse eingetroffen sind und neue Datenflüsse generiert werden[14].

Ein in LabVIEW erstelltes Programm wird als Virtuelles Instrument bezeichnet. Häufig wird die Abkürzung VI benutzt. Dieses Akronym steht ebenfalls für die einzelnen Funktionsblöcke im Blockdiagramm.

Jedes VI kann als Unterprogramm eines anderen, als so genanntes Sub-VI, laufen. Ein VI besteht aus zwei Komponenten. Die grafische Benutzeroberfläche wird als Frontpanel bezeichnet. Hier können Ein- und Ausgabe-Elemente ausgewählt und platziert werden. Die zweite Komponente stellt das Blockdiagramm dar. Dieses ist mit dem Frontpanel verknüpft und enthält den Programmcode.

Der Programmierer verbindet die Funktionsblöcke im Blockdiagramm mit Verbindungslinien und definiert so den Datenfluss.

Jedes VI und die Verbindungslinien im Blockdiagramm sind mit einer Farbe kodiert. Die Farbe und Dicke einer Linie zeigt den Datentyp an. LabVIEW unterstützt eine Vielzahl von Datentypen, wie zum Beispiel Strings oder 16 Bit unsigned Integer.

Mit der Abarbeitung eines VIs wird erst dann begonnen, wenn alle Eingangsdaten vorhanden sind. An den Ausgängen liegen erst Ergebnisse an, wenn das komplette VI durchlaufen wurde. So wird die Abarbeitungsreihenfolge der einzelnen Schritte durch Datenabhängigkeiten eindeutig definiert.

Bestandteil der zur Verfügung stehenden Software ist das „LabVIEW Vision Development Module“. Dieses Tool ist speziell für Bilddatenverarbeitungs- bzw. Maschinenüberwachungsanwendungen geeignet. Es beinhaltet „IMAQ Vision“, eine Bibliothek für Bilddatenverarbeitungs- und -visualisierungsfunktionen.

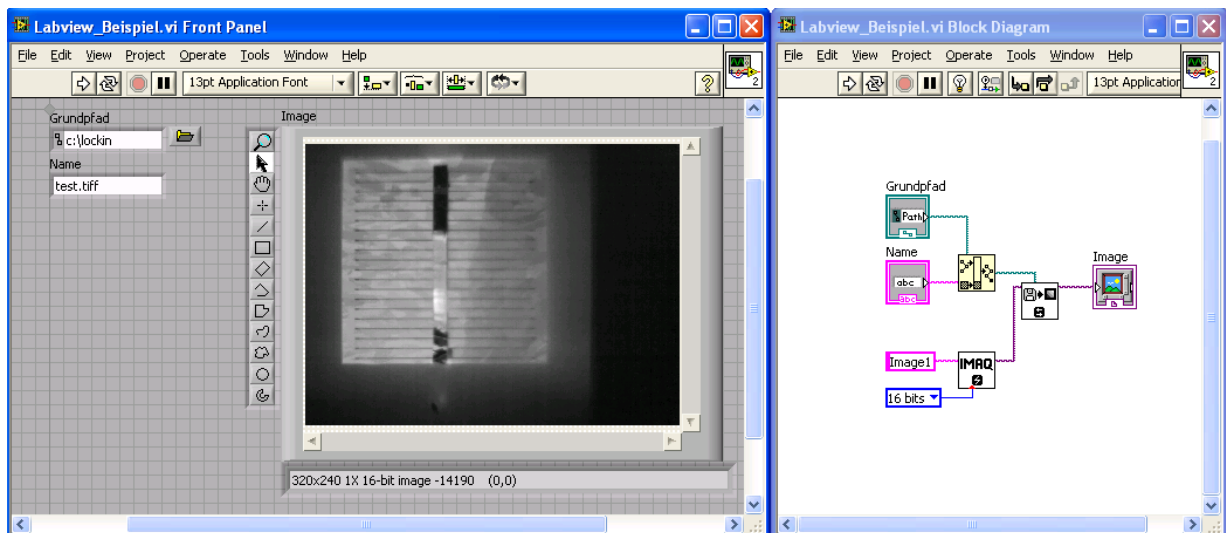


Abbildung 2.7: Programmbeispiel in LabVIEW

In Abbildung 2.7 ist ein Programmbeispiel zu sehen, in dem ein Bild von der Festplatte eingelesen und auf dem Frontpanel angezeigt wird. Dies geschieht unter Zuhilfenahme der „IMAQ Vision“ Bibliothek. Die Parameter für den Speicherort und den Dateinamen werden vom Benutzer auf dem Frontpanel in ein Eingabefenster eingetragen und durch die automatische Verknüpfung von Frontpanel und Blockdiagramm an die einzelnen Funktionsblöcke übergeben.

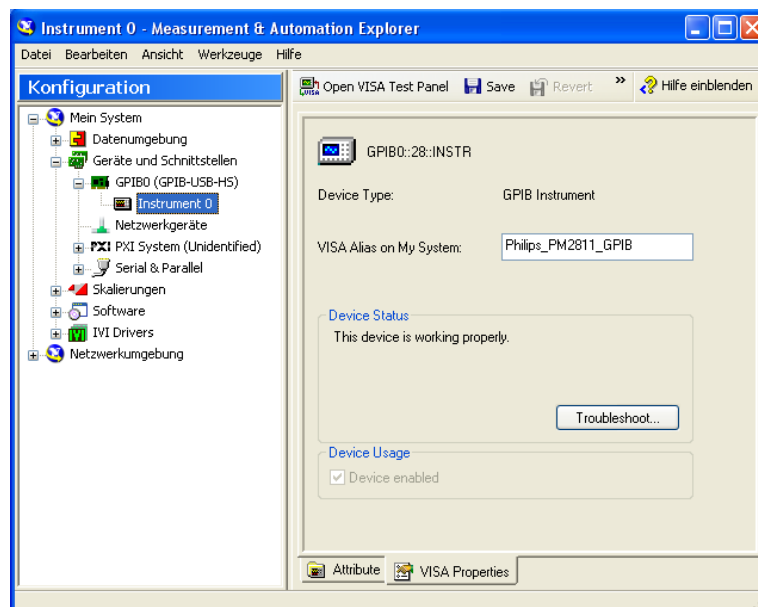


Abbildung 2.8: Oberfläche des Measurement and Automation Explorers

Ein Element des LabVIEW Softwarepaketes ist der „Measurement & Automation Explorer“. Dieser wird im folgenden mit MAX bezeichnet. Im MAX wird

die Hard- und Software von National Instruments konfiguriert und die mit dem System verbundenen Geräte angezeigt. Außerdem ist es möglich, Sicherungskopien der Konfigurationsdaten anzulegen und Systemdiagnosen auszuführen. Die Benutzeroberfläche des MAX ist in Abbildung 2.8 zu sehen. Hier wird der Konfigurationsdialog für das Philips PM2811 angezeigt. Die Bezeichnung „Philips_PM2811_GPIB“ ist für den Anwender frei definierbar und stellt die Identifikation des Geräts in LabVIEW dar.

Die Firma National Instruments stellt außerdem eine Software namens VISA zur Verfügung. VISA ist die Abkürzung für „Virtual Instrument Software Architecture“ und ist ein Softwarestandard für die Konfiguration, Programmierung und Fehlerbehebung von Systemen.

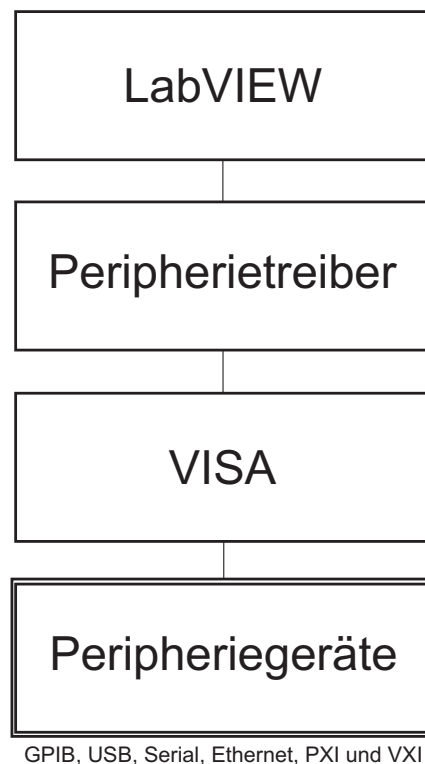


Abbildung 2.9: Software-Architektur

Ein schematischer Aufbau der Software-Architektur ist in Abbildung 2.9 dargestellt. Wie in der Abbildung zu sehen ist, bildet VISA die Schnittstelle zwischen Hardware und LabVIEW. Durch diese Software ist es möglich, externe Hardware über den GPIB Bus von LabVIEW aus zu konfigurieren und Informationen auszulesen.

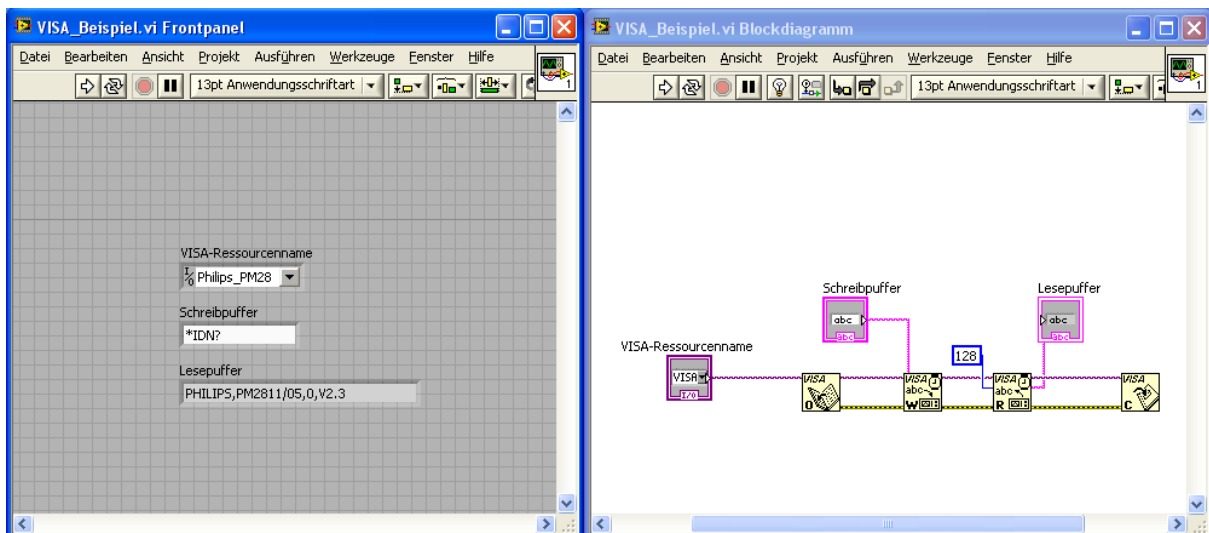


Abbildung 2.10: Programmbeispiel VISA in LabVIEW

Abbildung 2.10 zeigt ein Programmbeispiel, in dem mittels VISA eine Identifikationsanfrage an das Netzteil geschickt wird und die Antwort über den Bus eingelesen wird. Das Softwarepaket der Firma Flir umfasst das LabVIEW Toolkit 3.2. Dieses beinhaltet einige VIs, die die Ansteuerung in LabVIEW möglich machen. Eine genaue Beschreibung der Funktionsblöcke ist in Kapitel 5 zu finden.

2.2 Thermographie für Solarzellen

Fällt Licht auf eine Oberfläche, so wird es entweder reflektiert, absorbiert oder transmittiert. Die Wahrscheinlichkeit, dass diese drei Ereignisse auftreten, werden mit dem Reflexionsfaktor p , Absorptionsfaktor α und der Durchlässigkeit τ beschrieben. Diese drei Koeffizienten sind dimensionslos. Des Weiteren sind sie abhängig von der Wellenlänge und ihre Summe ist immer gleich Eins. Für eine ideal reflektierende Oberfläche ist p Eins und α und τ Null. Bei einer transparenten Oberfläche ist τ Eins, p und α sind Null. Eine schwarze Oberfläche äußert sich durch die Koeffizienten $\alpha=1$, $\tau=0$ und $p=0$.

Jeder Körper strahlt bei einer endlichen Temperatur von sich aus elektromagnetische Strahlung aus, die so genannte thermale Strahlung. Die Größe M_λ dieser Strahlung wird spektrale spezifische Ausstrahlung genannt.

Diese wird für einen schwarzen Körper als eine Funktion der Wellenlänge λ durch das Plancksches Strahlungsgesetz

$$M_\lambda(T) = \frac{2 \cdot \pi \cdot h \cdot c^2}{\lambda^5} \cdot \frac{1}{e^{\frac{h \cdot c}{\lambda \cdot k \cdot T}} - 1} \quad (2.1)$$

beschrieben. h ist das plancksche Wirkungsquantum, c die Lichtgeschwindigkeit, k die Boltzmann-Konstante und T die absolute Temperatur in Kelvin.

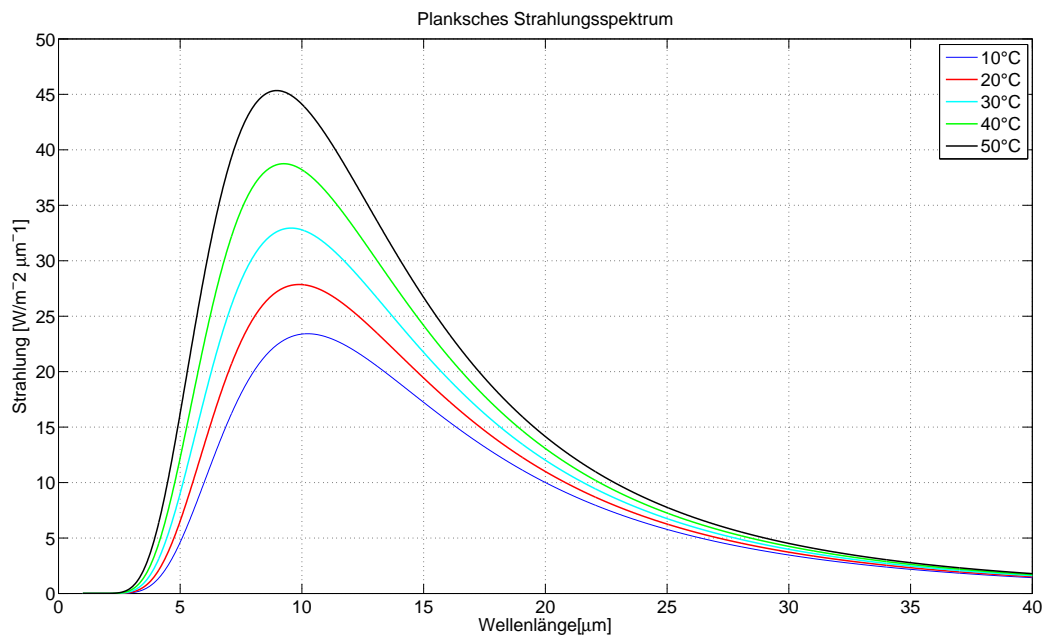


Abbildung 2.11: Plancksches Strahlungsspektrum

Abbildung 2.11 zeigt die Strahlungsverteilung eines schwarzen Körpers für fünf Temperaturen. Auffällig ist der ähnliche Verlauf aller Temperaturkurven. Die Strahlung beginnt bei allen fünf Temperaturen bei etwa $3 \mu\text{m}$ Wellenlänge. Die Höhe der Strahlung ist abhängig von der Temperatur. Bei 10°C liegt das Maximum bei $10 \mu\text{m}$, bei 50°C ist der maximale Strahlungswert bereits bei $8 \mu\text{m}$ Wellenlänge erreicht. Die übrigen drei Temperaturverläufe liegen zwischen diesen beiden Werten. Alle fünf Kurven flachen bis $40 \mu\text{m}$ ab. Die Formel 2.1 gilt nur für einen ideal schwarzen Körper. Ein nicht schwarzer Körper besitzt eine so genannte Emissivität ϵ , mit der die Gleichung 2.1 multipliziert werden muss. Die Emissivität ist immer kleiner als 1 und abhängig von der Wellenlänge.

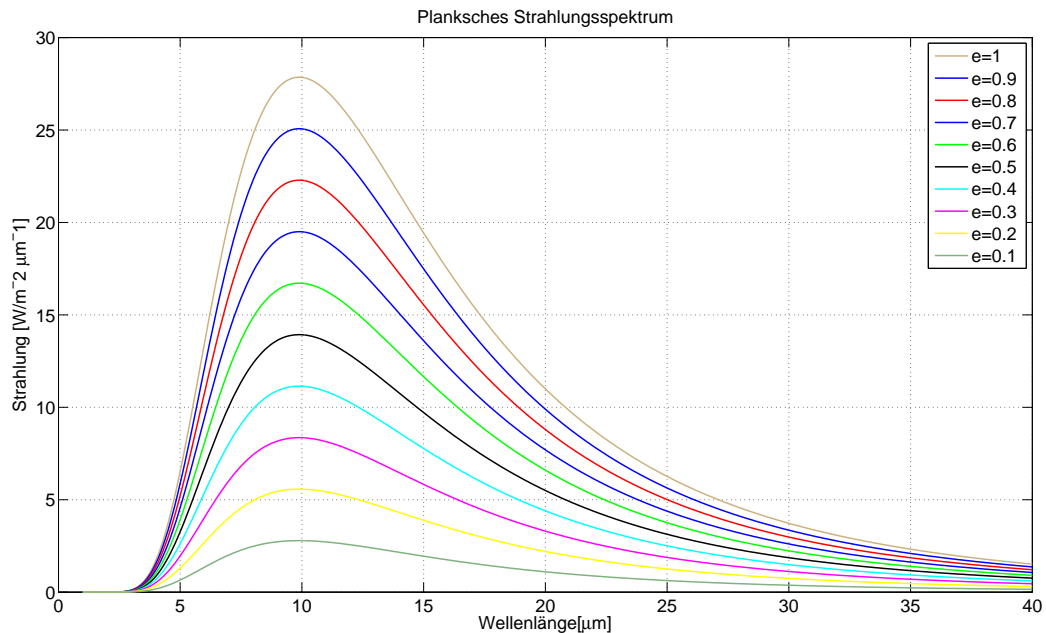


Abbildung 2.12: Angepasstes Planksches Strahlungsspektrum

Wie in Abbildung 2.12 dargestellt, wirkt sich die Emissivität auf die Quantität der Strahlung aus. Hier sind für die Emissivitätswerte 1 bis 0,1 bei 20°C die Strahlungswerte grafisch dargestellt. Die Strahlungsmaxima liegen unter denen eines ideal schwarzen Körpers.

Eine Oberfläche verliert Energie durch thermale Strahlung und nimmt Energie durch Strahlungsabsorption auf. Diese beiden Größen müssen bei jeder Wellenlänge im Gleichgewicht sein. Nach dem Kirchhoffschen Gesetz ist die Emissivität ϵ bei gegebener Wellenlänge und Abstrahlungsrichtung gleich dem entsprechenden Absorptionsfaktor α :

$$\epsilon(\lambda) = \alpha(\lambda) \quad (2.2)$$

Die größte Unzuverlässigkeit bei der Thermographie ist die Tatsache, dass die Emissivität ϵ des Prüfobjekts oft unbekannt ist. Deshalb ist es bei einer unbekanntem Emissivität wichtig, diese experimentell zu bestimmen. Ein Verfahren zur Emissivitätsbestimmung wird in Abschnitt 2.3 vorgestellt.

Silizium ist im Wellenlängenbereich thermischer Strahlung nominell transparent[5]. Infrarotlicht kann also weder absorbiert, noch emittiert werden. In dotiertem Silizium gibt es jedoch die Freie-Träger-Absorption. Diese ist eine Art

Wirbelstromdämpfung der elektromagnetischen Wellen durch die freien Ladungsträger und ist proportional zur Wellenlänge λ und zur Konzentration der freien Ladungsträger p und n [5]. Dotiertes Silizium verfügt also über eine geringe Absorption und Emissivität. Dies hat zur Folge, dass Infrarotkameras, die bei einer großen Wellenlänge arbeiten, besser geeignet sind Fehlstellen in Solarzellen zu detektieren. Messungen unter zur Hilfenahme einer Thermographiekamera erfolgen mit einer gewissen Distanz zum Objekt. Diese Distanz behaftet die Messung mit einem Fehler, da die Luft einen Teil der thermalen Strahlung absorbiert.

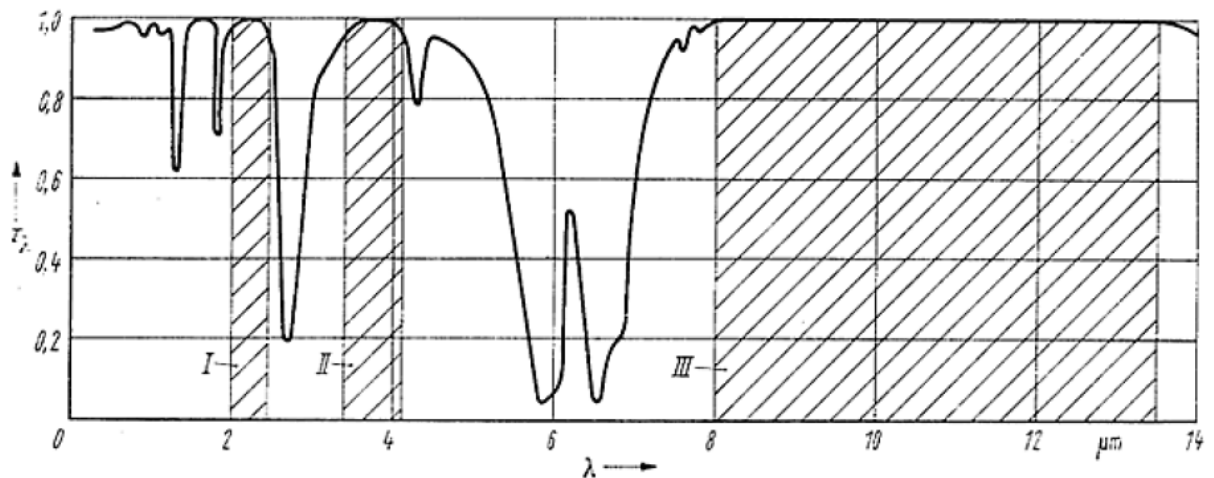


Abbildung 2.13: Thermische Absorption in der Atmosphäre[3]

In Abbildung 2.13 ist die Übertragung von thermaler Strahlung in der Atmosphäre in Abhängigkeit der Wellenlänge dargestellt. Der höchste Transmissionsgrad der Luft liegt in den zwei so genannten atmosphärischen Fenstern. Der mittlere Bereich liegt zwischen zwischen 3 und 5 μm . Der Bereich zwischen 8 und 14 μm bildet das zweite atmosphärische Fenster.

Die hier verwendete Kamera Flir A320 arbeitet in dem Bereich von 7,5 bis 13 μm . Damit ist die Kamera für eine Messung an einer Solarzelle, die zum großen Teil aus Silizium besteht, gut geeignet.

Mit einer Thermographiekamera lässt sich das Wärmebild eines Objekts aufnehmen. Man erhält auf diese Weise Tausende von Temperaturmesspunkten, die detaillierte Informationen über räumliche und zeitliche Wärmeentwicklungen auf Materialien und Bauteilen liefern.

Die Infrarot-Thermographie wird seit Jahren zur zerstörungsfreien Werkstoffprüfung eingesetzt. Bei der Herstellung von Solarzellen ist eine Rissbildung im Silizium-Material möglich, die die Funktion und die Haltbarkeit der Zellen

negativ beeinträchtigen. Um einen gleich bleibenden Qualitätsstandard in der Produktion gewährleisten zu können, ist eine effektive Prüfung der Solarzellen auf sowohl äußerlich sichtbare, als auch auf innere Risse unabdingbar.

Während des Prozesses sind durchgehende Risse teilweise mit Durchlichtaufnahmen detektierbar. Spätestens nach der vollflächigen Rückseitenkontaktierung ist dieser Ansatz nicht mehr geeignet anwendbar. An diesem Punkt ist ein alternatives Verfahren, wie beispielsweise die Thermographie, unumgänglich, um die Qualität zu gewährleisten.

2.2.1 Statische Thermographie

Eine Solarzelle verfügt nicht über eine innere Wärmequelle im abgeschatteten Zustand. Trotzdem können Wärmeflüsse und damit Temperaturunterschiede auftreten, und zwar durch transiente Wärmeleitungsvorgänge. Dies setzt einen Erwärmungs- oder Abkühlungsvorgang voraus.

Der Zusammenhang von Temperaturunterschieden und Wärmeflüssen wird mit der Gleichung

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{Q} = \vec{\nabla} \cdot (\vec{\nabla}(\kappa T)) = \rho \cdot c_p \cdot \frac{\delta T}{\delta t} - q \quad (2.3)$$

beschrieben. $\vec{\nabla}$ ist der Nabla-Operator, κ die Wärmeleitfähigkeit, Q der Wärmefluss, c_p die spezifische Wärmekapazität, ρ die Massendichte und q die im Material durch Wärmequellen generierte Leistung pro Volumen[4].

Thermographiebilder sind in der Lage, solche Bereiche zu unterscheiden, die sich im Zuge Erwärmungs- oder Abkühlungsvorgänge in mindestens einer der Größen ρ , κ oder c_p unterscheiden. Hierbei müssen die Fehlstellen nicht zwangsläufig auf der Oberfläche des Prüfobjekts liegen, sondern können sich auch tiefer im Material befinden.[4]

Der statischen Thermographie liegt, wie beschrieben, die Theorie zu Grunde, dass eine Solarzelle durch einen eingepägten Strom thermisch angeregt wird.

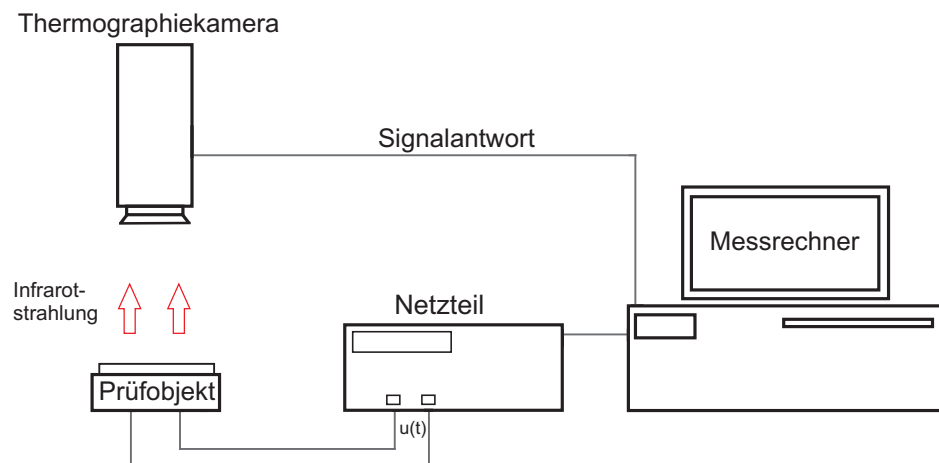


Abbildung 2.14: Schema der statischen Thermographie

Der theoretische Messaufbau ist in Abbildung 2.14 dargestellt. Diese thermische Anregung verursacht eine Wärmefront, die das Objekt durchdringt. Wird der Wärmefluss durch eine Fehlstelle behindert, bleibt diese Stelle länger warm, da sich die Wärmefront hier langsamer ausbreiten kann. Dieser Effekt kann bei einer Messung mit einer Thermographiekamera ausgenutzt werden, da so die Fehlstellen detektiert werden. Wird ein Strom an eine intakte Solarzelle angelegt, wird sich diese homogen erwärmen.

Das Auflösungsvermögen dieses Messverfahrens ist begrenzt. Thermographiekameras verfügen über eine Linse um die einfallende Strahlung zu sammeln. Diese Linse ist der Grund, dass die räumliche Auflösung einer Kamera durch Beugungserscheinungen negativ beeinflusst wird.[4]. Die Abbildung eines Pixels erzeugt ein Interferenzmuster aus konzentrischen Ringen. Der Radius des zentralen Ringes lässt sich mathematisch mit der Formel

$$r = \frac{1,22 \cdot \lambda \cdot f}{\alpha} \quad (2.4)$$

beschreiben. Der Radius ist abhängig von dem Linsendurchmesser α , der Brennweite f und der Wellenlänge λ .

Ein weiteres Kriterium ist die Zeitabhängigkeit der Temperaturdifferenz ΔT . Es gibt eine optimale Zeit $t_m(\Delta T)$, bei der die Temperaturdifferenz ΔT einen maximalen Wert annimmt. Mit Hilfe des thermischen Kontrastes A , der sich mit der Formel

$$A := \frac{\Delta T}{t_h} \quad (2.5)$$

beschreiben lässt, ist es möglich, ΔT in Beziehung zu der mittleren Differenz zwischen Objekt- und Umgebungstemperatur, t_h , zu setzen[4]. Der thermische Kontrast ist des Weiteren von der Zeit abhängig. Dies hat zur Folge, dass es zu einer bestimmten Zeit $t_m(A)$ einen Maximalwert A_{max} gibt. Mit Hilfe der beiden Faktoren A_{max} und ΔT_{max} lassen sich Rückschlüsse darauf ziehen, ob die Temporauflösung von der Kamera noch ausreichend für eine Fehlererkennung ist[4].

Den dritten begrenzenden Faktor stellt die Kamera dar. Parameter wie die Temporauflösung und Pixelzahl begrenzen das Auflösungsvermögen.

2.2.2 Lock-in Thermographie

Die Lock-in Thermographie wird benutzt, um Inhomogenitäten in Objekten zu detektieren, wobei die Tiefenreichweite über die Modulationsfrequenz variiert werden kann. Hierbei wird dem Prüfobjekt ein frequenzmodulierter Strom aufgeprägt, um eine thermische Welle zu generieren.

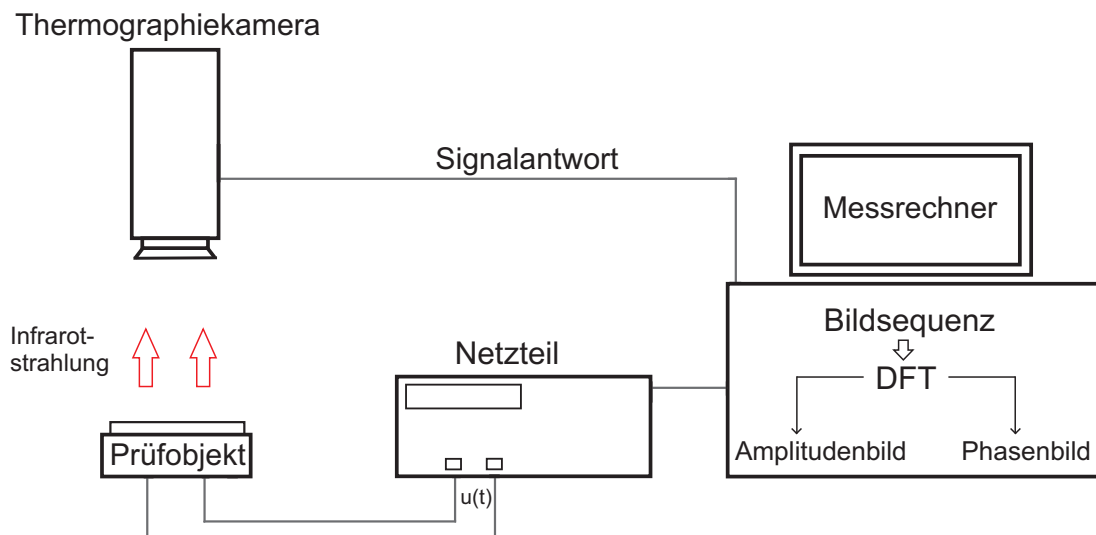


Abbildung 2.15: Messaufbau der Lock-in Thermographie

Ein schematischer Aufbau der Lock-in Thermographie ist in Abbildung 2.15 dargestellt.

Die Tiefenreichweite der thermischen Anregung μ lässt sich mit der Formel

$$\mu = \sqrt{\frac{\lambda}{\rho \cdot c_p \cdot \pi \cdot f}} \quad (2.6)$$

berechnen[5]. λ ist die thermische Leitfähigkeit, c_p ist die spezifische Wärme, ρ ist die Dichte und f die Modulationsfrequenz. Die Tiefenreichweite ist nicht nur abhängig von der Frequenz, sondern auch von den Materialeigenschaften.

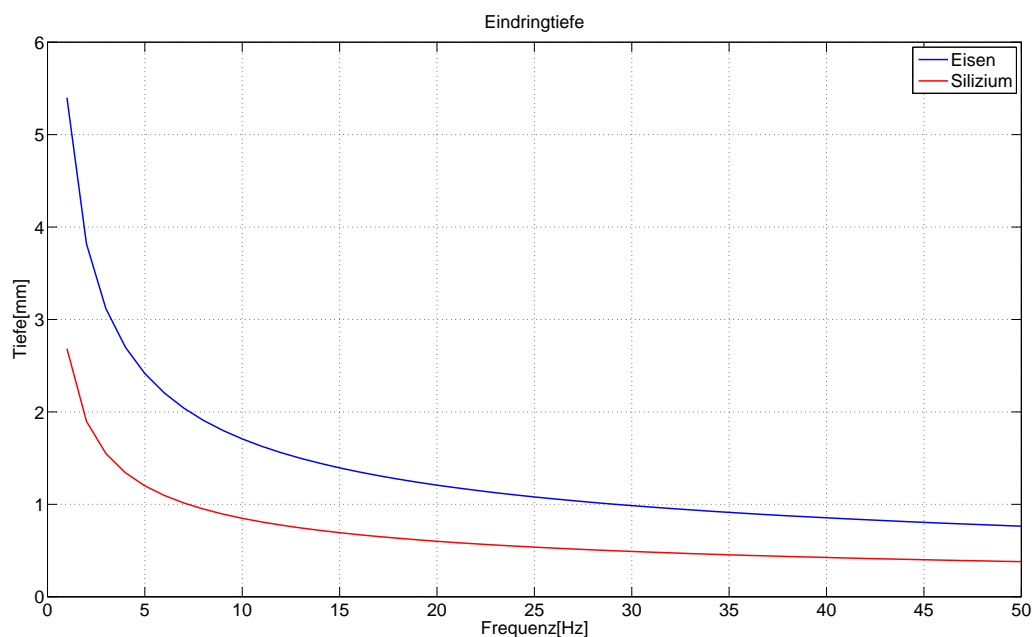


Abbildung 2.16: Tiefenreichweite der Lock-in Thermographie

Abbildung 2.16 zeigt die Tiefenreichweite in Abhängigkeit der Modulationsfrequenz für Silizium und Eisen. Für Silizium beträgt die Tiefenreichweite 3 mm bei einer Modulationsfrequenz von 3 Hz, 2 mm bei 7 Hz und etwa 1 mm bei 30 Hz. Wegen der höheren Dichte und der geringeren Wärmeleitung ist die Eindringtiefe bei Eisen geringer. Bei einer Modulationsfrequenz von 7 Hz ergibt sich eine Tiefenreichweite von nur noch 1 mm.

Ist ein Prüfobjekt signifikant dünner als die thermische Wellenlänge, dann wird das Prüfobjekt als thermisch dünn bezeichnet[5]. Die vertikalen Temperaturunterschiede sind bei thermisch dünnen Prüfobjekten gegenüber den horizontalen vernachlässigbar klein. Bei einer solchen Probe tritt eine horizontale, ebene thermische Welle neben einer Wärmequelle auf. Von einem

thermisch dicken Prüfobjekt wird gesprochen, wenn die thermische Wellenlänge klein gegenüber der Objektdicke ist.

Die Messtechnik muss sich mit dem Problem auseinandersetzen, dass ein Messsignal immer mit einem Rauschen behaftet ist. Bei kleinen Messsignalen lassen sich häufig gültige Signale nicht mehr von dem Rauschen unterscheiden. Durch die Lock-In Technik ist es jedoch möglich, Signale zuverlässig zu messen, die noch deutlich schwächer als das überlagerte Rauschen sein können. Dies erhöht die Ortsauflösung der Messung deutlich.

Voraussetzung für die Lock-in Technik ist eine periodische Anregung des zu untersuchenden Objekts mit einer bestimmten Frequenz, die „Lock-in Frequenz“ genannt wird. Abkürzend wird in dieser Arbeit die „Lock-in Frequenz“ auch als $f_{lock-in}$ bezeichnet.

Das verrauschte Eingangssignal lässt sich mathematisch mit der Formel

$$S = \frac{1}{t} \int_0^t F(t)K(t) dt \quad (2.7)$$

beschreiben [6]. t ist die Integrationszeit, $F(t)$ ist das detektierbare Signal und $K(t)$ ist die Korrelationsfunktion.

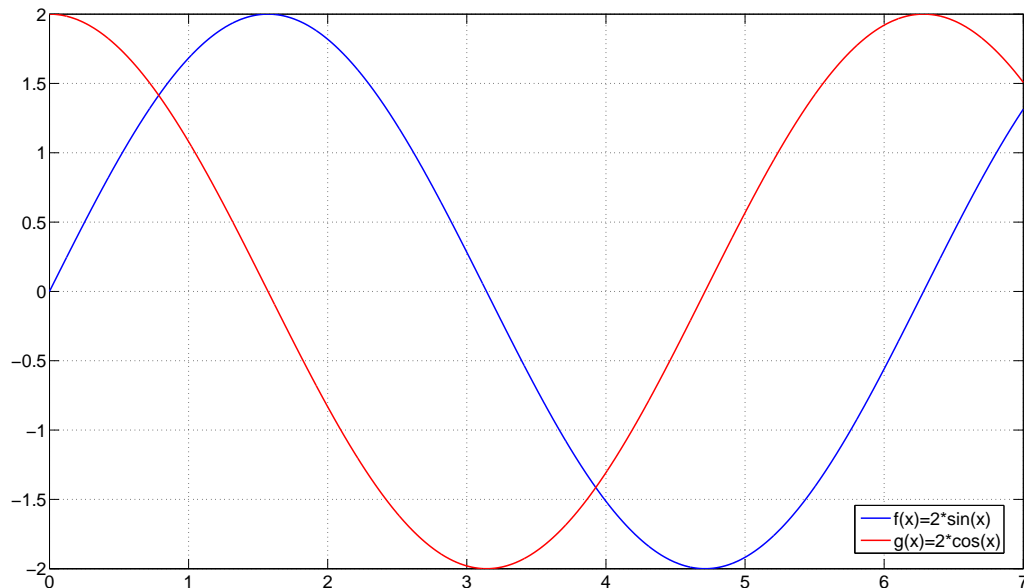


Abbildung 2.17: Die Korrelationsfunktionen $K(t)$

Das Eingangssignal wird mit den Korrelationsfunktionen in Abbildung 2.17 multipliziert und anschließend über mehrere Signalperioden integriert. Handelt es sich um ein zeitdiskretes Signal, so wird das Integral durch eine Summe

ersetzt[4]. Der Faktor 2 bei den Korrelationsfunktionen ist nötig, um die korrekte Amplitude zu erhalten[6].

Mit Hilfe des Additionstheorems für die Sinus-Funktion, ergibt sich die Gleichung

$$\begin{aligned} F(t) &= A \cdot \sin(2\pi f_{lock-in} \cdot t + \phi) \\ &= A \cdot \sin(2\pi f_{lock-in} \cdot t) \cos\phi + A \cdot \cos(2\pi f_{lock-in} \cdot t) \sin\phi \end{aligned} \quad (2.8)$$

für das detektierbare Signal[6]. Wählt man für $K^{0^\circ} = 2 \cdot \sin(2\pi f_{lock-in} \cdot t)$ und für $K^{90^\circ} = 2 \cdot \cos(2\pi f_{lock-in} \cdot t)$ und setzt man Gleichung 2.8 in Gleichung 2.7 ein, so lautet das Ergebnis für die zwei Korrelationen über eine ganze Periode:

$$S^{0^\circ} = A \cdot \cos(\phi) \quad (2.9)$$

und

$$S^{90^\circ} = A \cdot \sin(\phi). \quad (2.10)$$

Das Signal für S^{0° und S^{90° kann sowohl positiv, als auch negativ sein. Ein negatives 0° Signal entspricht einer Signalkomponente bei 180° . Ein negatives 90° Signal zeigt auf eine 270° Signalkomponente[6].

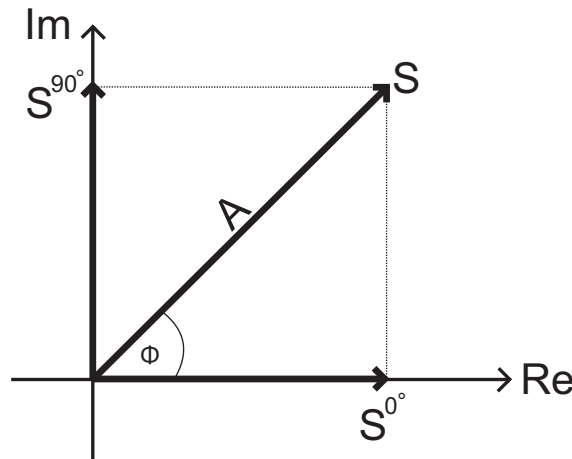


Abbildung 2.18: Phasen-Zusammenhang im Lock-in Prozess

In Abbildung 2.18 ist dieser Zusammenhang dargestellt.

Die phasenunabhängige Amplitude A , die immer positiv ist, und die Phase ϕ lässt sich aus den Gleichungen 2.9 und 2.10 errechnen.

$$A = \sqrt{(S^{0^\circ})^2 + (S^{90^\circ})^2} \quad (2.11)$$

$$\phi = \arctan \left(\frac{S^{90^\circ}}{S^{0^\circ}} \right) \quad (2.12)$$

Bei einer nichtharmonischen Anregung findet eine Fourier-Analyse von jeweils vier Messpunkten pro Periode statt[6]. Dies vereinfacht die Amplituden- und Phasenberechnung[12].

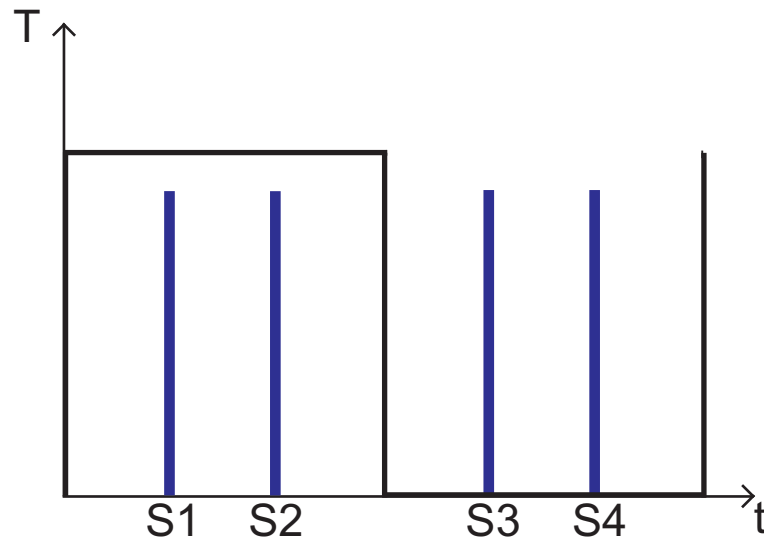


Abbildung 2.19: Prinzip der Lock-in Thermographie

In Abbildung 2.19 ist die äquidistante Verteilung der vier Messpunkte für eine Periode zu sehen. Die Synchronisation zwischen Anregung und Detektion der thermischen Welle ist für das Messverfahren fundamental. Der Zeitpunkt für die vier Messpunkte ist variabel, solange die äquidistante Verteilung und die Synchronisation eingehalten werden. Für jeden Bildpunkt ergeben sich vier zeitliche Messdaten (S1 bis S4), aus denen die thermische Welle an diesem Punkt vollständig rekonstruierbar ist. Die Amplitude A an dieser Stelle ist gegeben durch die Formel

$$A = \sqrt{[S_1(x) - S_3(x)]^2 + [S_2(x) - S_4(x)]^2}. \quad (2.13)$$

Der entsprechende Phasenwinkel ϕ lässt sich mit der Formel

$$\phi = \arctan \left(\frac{S_1(x) - S_3(x)}{S_2(x) - S_4(x)} \right) \quad (2.14)$$

berechnen[12]. Negative Effekte, wie Inhomogenität der Beleuchtung oder infrarote Emission auf der Oberfläche, kürzen sich bei der Berechnung der Phase weg. Dies hat zur Folge, dass die lokale Phasenverschiebung ein störunanfälliger Indikator für Grenzflächendefekte ist.[6]

Die Quantität der detektierten Wärmequelle ist ein entscheidendes Ergebnis der Untersuchung. Hier ist das Amplitudenbild aussagekräftiger, denn nur dieses trägt die Information des Betrages der abgeführten Leistung in sich. [6]

Das Amplitudenbild ist universeller einsetzbar und der Standard für die Interpretation von Defekten. [6] Es zeigt ein deutliches Maximum an der Stelle von lokalen Hitzequellen. Ein Überschwingen ins Negative ist nicht möglich. Das Phasenbild hat die einzigartige Eigenschaft, lokale Hitzequellen verschiedener Intensität mit vergleichbarer Helligkeit darzustellen. Dies ist sehr nützlich für die Unterscheidung benachbarter Hitzequellen von unterschiedlicher Intensität[6].

Mögliche Lock-In Frequenzen $f_{lock-in}$ erhält man in Abhängigkeit der Frame-rate f_s .

$$f_{lock-in} = \frac{f_s}{n} \quad (2.15)$$

n steht hierbei für die Samplinganzahl. Bei einer feststehenden Samplinganzahl ergibt sich eine obere Grenze für die Lock-in Frequenz. Diese Grenze beschreibt die Formel

$$f_{lock-in} \leq \frac{f_s}{n}. \quad (2.16)$$

Werden pro Periode vier Signalwerte aufgenommen, spricht man von einer „4-Punkt“ Korrelation[6].

Für das Lock-in Prüfverfahren gibt es verschiedene Wege der Realisierung. Die Bildauswertung kann sowohl online, als auch offline durchgeführt werden. Für eine offline Auswertung ist die Sicherung des gesamten Bildstapels nötig, da die Berechnung der Phasen- und Amplitudenbilder nach der Messung stattfindet. Die online Auswertung findet während der Aufnahmen statt und nur die Ergebnisse der Berechnungen können dokumentiert werden.

2.2.3 Induktiv angeregte Thermographie

Bei der induktiv angeregten Thermographie wird einem elektrisch leitenden Prüfobjekt induktiv ein oberflächennaher Wirbelstrom aufgeprägt.

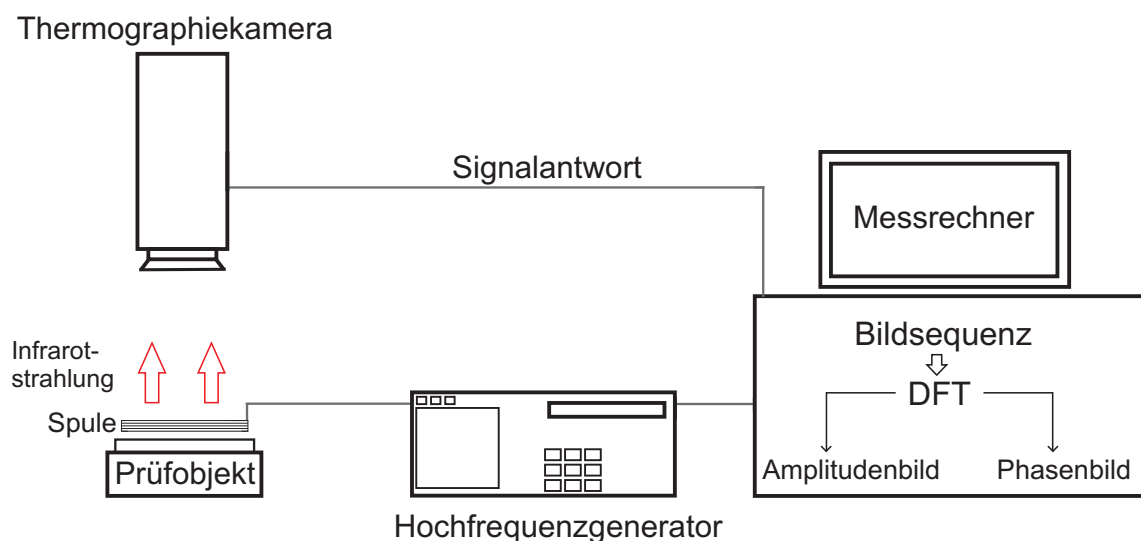


Abbildung 2.20: Schema der induktiv angeregten Thermographie

In Abbildung 2.20 ist ein Schema dieses Messsystems dargestellt. Die Spule wird mit einer bestimmten Frequenz in der Größenordnung von einigen kHz angeregt[4]. Die Tiefenlage des induzierten Stromes hängt von der Anregungsfrequenz f ab[9].

Mit der bereits für das Lock-in Verfahren in Abschnitt 2.2.2 vorgestellten Formel

$$\mu = \sqrt{\frac{\lambda}{\rho \cdot c_p \cdot \pi \cdot f}} \quad (2.17)$$

lässt sich die Tiefenlage berechnen. Die induktiv angeregte Thermographie zielt im Vergleich zur Lock-in Thermographie auf deutlich höhere Frequenzen ab.

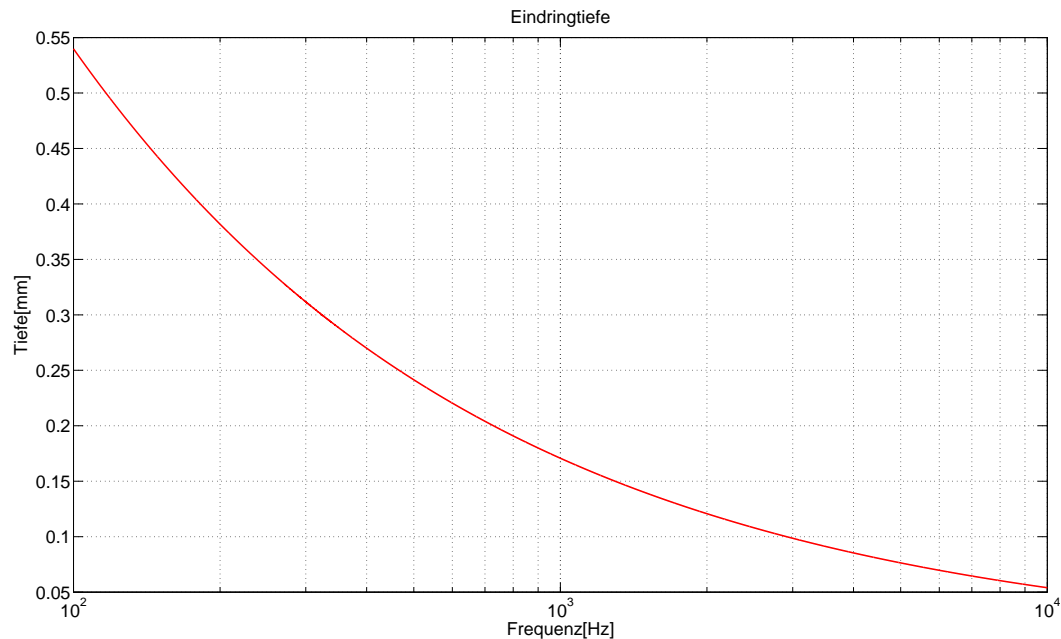


Abbildung 2.21: Tiefenreichweite der induktiv angeregten Thermographie

In Abbildung 2.21 ist die logarithmische Darstellung der Tiefenreichweite in Silizium zu sehen. Bei einer Frequenz von 100 Hz liegt die Tiefenreichweite bei etwa 0,54 mm, eine Tiefe von 0,17 mm wird bei 1 kHz erreicht und bei einer Frequenz von 10 kHz beträgt die Tiefenreichweite 0,06 mm. Die durch die induktive Anregung entstehenden Wirbelströme nahe der Oberfläche des Prüfobjekts erzeugen eine Wärmefront. Diese Wärmefront kann sich bei einem fehlerbehafteten Bauteil nicht homogen ausbreiten. Die Wirbelströme können einen Fehler im Prüfobjekt nicht auf direktem Wege passieren. So entstehen zusätzliche stromdurchflossene Flächen, was sich in einer geänderten Temperaturverteilung äußert. Diese Veränderungen kann mit einer Thermographiekamera sichtbar gemacht werden.

Durch die schnelle Pulsung der Spule wird das Prüfobjekt nur einer Erwärmung von maximal einigen zehn Grad ausgesetzt[4]. Außerdem ist die Belastung für das Prüfobjekt bei einer Messzeit von 150 bis 500 ms nur kurz[4]. Dies ist für empfindliche Bauteile von großer Wichtigkeit, da bei großen thermischen Belastungen das Bauteil beschädigt oder zerstört werden kann.

Bei dem Messsignal handelt es sich um einen idealen Sinus. Dies hat zur Folge, dass die Fourieranalyse nur drei Messwerte pro Periode für die Bestimmung von Amplitude und Phase benötigt[17]. Vier Messpunkte pro Periode begünstigen jedoch eine schnellere und einfachere Berechnung dieser Größen[17]. Oberflächennahe Fehlstellen stehen im Fokus dieses Prüfsystems,

die den induzierten Stromverlauf ändern und somit die Temperaturveränderung herbeiführen. Wie bereits erwähnt, wird eine Spule für das Prüfsystem benötigt. Die Dimensionierung der Spule wird im folgenden erläutert[17].

Die Induktivität einer Zylinderspule ohne Kern kann durch die Formel

$$L = N \cdot \frac{\phi}{I} \quad (2.18)$$

bestimmt werden. N ist die Windungszahl der Spule, ϕ der magnetische Fluss und I der anliegende Strom. Der magnetische Fluss ϕ ist abhängig von der Fläche der Spule A_s und der magnetischen Flussdichte B.

$$\phi = B \cdot A_s = B \cdot \frac{\pi}{4} \cdot D^2 \quad (2.19)$$

D ist der Durchmesser einer Spule. Die magnetische Flussdichte B wird durch die magnetische Feldstärke H und die absolute Permeabilität μ_p bestimmt. Diese setzt sich aus der materialabhängigen Permeabilität μ_r und der Permeabilität im Vakuum μ_0 zusammen. l ist die Länge einer Spule.

$$B = \mu_p \cdot H = \mu_p \cdot N \frac{I}{l} = \mu_0 \cdot \mu_r \cdot N \frac{I}{l} \quad (2.20)$$

Gleichung 2.20 gibt diesen Zusammenhang wieder. Aus den Gleichungen 2.19 und 2.20 ergibt sich die Gleichung zur Berechnung der Spule mit

$$L = \mu_0 \cdot \mu_r \cdot \frac{N^2 \cdot \frac{\pi}{4} \cdot D^2}{l}. \quad (2.21)$$

2.3 Ermittlung der Emissivität

Um die Emissivität eines Prüfobjekts zu bestimmen, gibt es für die Flir A320 zwei Prüfmethode[n] [10]. In diesem Abschnitt wird eine dieser Methoden im Detail vorgestellt.

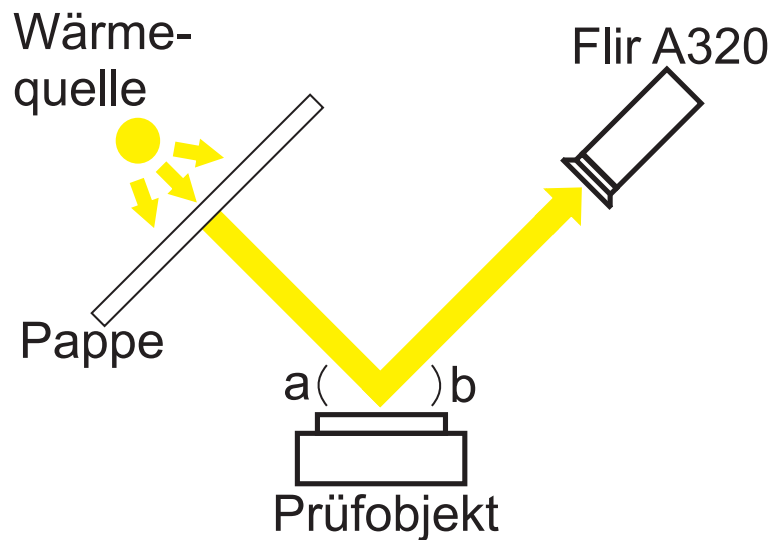


Abbildung 2.22: Temperaturbestimmung des Prüfobjekts

Abbildung 2.22 zeigt den schematischen Messaufbau für den ersten Schritt der Emissivitätsbestimmung. Das Prüfobjekt wird zwischen die Kamera und einer Wärmequelle positioniert. Wichtig hierbei ist, dass der Einfallswinkel a gleich dem Ausfallwinkel b ist. Bei einer punktförmigen Wärmequelle muss eine Pappe zwischen Wärmequelle und Prüfobjekt installiert werden. Ein Thermoelement ist als Wärmequelle nicht zu empfehlen, da ein direkter Kontakt zur Oberfläche für die Wärmeübertragung nötig ist [10].

Nachdem der Messaufbau realisiert ist, wird die Temperatur T_1 des Prüfobjekts ermittelt.

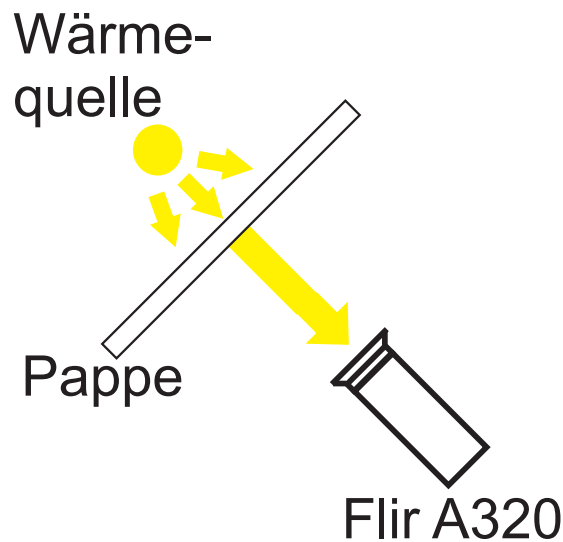


Abbildung 2.23: Temperaturbestimmung der Wärmequelle

Als nächstes muss die Temperatur der Wärmequelle, wie in Abbildung 2.23 zu sehen, ermittelt werden. Hierfür muss die Kameraeinstellung für die Emissivität auf $\epsilon=1$ geändert werden. Der Kameraparameter für die Distanz von Messobjekt und Kamera muss auf 0 eingestellt werden. Der Abstand von Wärmequelle und Kamera muss mit dem Abstand von Prüfobjekt und Kamera aus Abbildung 2.22 übereinstimmen. Im Anschluss daran wird die Temperatur T_2 der Wärmequelle bestimmt.

Die Emissivität lässt sich mit der Formel

$$\epsilon = \frac{T_1}{T_2} \quad (2.22)$$

berechnen.

Kapitel 3

Analyse der Anforderungen

In diesem Kapitel werden die Anforderungen an das Prüfsystem festgelegt. Dies soll zum einen sicherstellen, dass das zu erstellende Prüfsystem die grundlegenden Anforderungen erfüllt und zum anderen, soll die bestmögliche Lösung ermittelt werden.

3.1 Generelle Anforderungen

Für die Konzeption des Messplatzes ist eine Analyse der Anforderungen unumgänglich. Das zu entwickelnde Prüfsystem muss mit den in Kapitel 2.1 beschriebenen Komponenten realisiert werden. Zu beachten ist, dass sich der Messplatz im optischen Prüflabor der HAW Hamburg befindet. Im Rahmen einer Laborveranstaltung soll auch Studenten der Umgang mit dem System möglich gemacht werden. Aus diesem Grund nimmt der Aspekt der Automatisierung eine zentrale Stellung ein. Dies hat zum einen den Vorteil, dass auch Studenten einen leichten Einstieg in das Prüfsystem haben, und zum anderen eine eventuell spätere Weiterentwicklung für den industriellen Sektor erleichtert wird. Um den Aspekt der Automatisierung zu gewährleisten, muss der Prüfvorgang völlig selbstständig vom System durchgeführt werden. Einzig die Parameter für die Messungen sind vom Benutzer softwaremäßig auf der Bedienoberfläche einzugeben. Für die Kommunikation zwischen Netzteil und Laborrechner soll der GPIB Bus eingesetzt werden. Da es möglich ist, neben dem GPIB-USB Controller, bis zu 14 weitere Geräte an diesen Bus anzuschließen, hat die Auswahl eines Gerätes auf der Bedienoberfläche zu erfolgen. Dabei soll eine Änderung für jede Messung möglich sein. Um eine potentielle Weiterentwicklung zu erleichtern, soll das Prüfsystem auf einem beliebigen Rechner mit USB Schnittstelle und Internetzugang nutzbar sein.

Die Installation der Software LabVIEW und VISA wird hierbei vorausgesetzt. Um diesem Anspruch Rechnung zu tragen, soll die Auswahl des Kameratyps und die Eingabe des Internet Protocols(IP) ebenfalls vom Anwender vorgenommen werden.

Um die in Kapitel 2.2 beschriebene Fehleranfälligkeit einer Infrarotmessung zu minimieren, soll die Parametrierung der Kamera für jede Messung angepasst werden können. Dies umfasst die Distanz von Objekt und Kamera, die Raumtemperatur und die Emissivität. Nicht jede Solarzelle verfügt über die gleiche Größe oder die gleiche Charakteristik. Aus diesem Grund kann die thermische Anregung der Solarzelle von Messung zu Messung eine andere Intensität erfordern. Da die thermische Anregung von dem Philips PM2811 ausgeht, müssen Strom und Spannung für jede Messung einstellbar sein. Ein weiterer wichtiger Punkt ist die Dokumentation der Messergebnisse. Die Kamera liefert Bilddaten in der Dimension 320*240 Pixel. Das System muss in der Lage sein, diese Daten automatisch einzulesen, zu verarbeiten und zu speichern. Die Verarbeitung umfasst die Berechnung von Amplituden- und Phasenbildern nach den in Kapitel 2.2.2 vorgestellten Algorithmen. Für eine genaue Zuordnung der Messergebnisse muss das Programm ebenfalls eine variable Benennung und Indizierung der Messungen enthalten. Die Eingabe dieser Daten soll dem Anwender auf der Bedienoberfläche möglich gemacht werden.

Um einen Kommentar während der Messreihe dokumentieren zu können, soll die Eingabe eines Kommentars auf der Bedienoberfläche integriert werden. Die Abspeicherung, Benennung und Indizierung der Textdatei soll automatisch im Zusammenhang mit der Messung erfolgen. Um das System mit möglichst geringen Modifikationen auf anderen Rechnern einsetzen zu können, soll die Textdatei die Endung „.txt“ aufweisen, da sich dieses Format unter jedem Rechner mit einem Microsoft Windows Betriebssystem ohne Zusatzprogramme öffnen und bearbeiten lässt.

Auch bei einem automatisierten Prüfsystem kann es zu fehlerhaften Messungen kommen. Aus diesem Grund ist es nötig, dass bei einem neuen Durchlauf die alten Daten überschrieben werden. Dies hat den Vorteil, dass der Benutzer nicht von Hand die Daten von der Festplatte löschen muss, um den Messbetrieb fortzuführen. Um einem wissenschaftlichen Standard gerecht zu werden und um Verluste bei den Bilddaten zu vermeiden, soll das Tiff-Format zur Datensicherung gewählt werden. Das Tiff-Format garantiert, dass die Bilddaten beim Abspeichern keinerlei Komprimierungs- oder Optimierungsvorgänge durchlaufen. Die Ergebnisse einer Messung sind auf der Benutzeroberfläche darzustellen. Für die statische Thermographie ist sowohl eine Momentauf-

nahme des Prüfobjekts während der Messung, als auch eine Abbildung des zuletzt gespeicherten Bildes vorgesehen. Bei der Lock-in- und induktiv angeregten Thermographie liegen als Ergebnis ein Amplituden- und Phasenbild vor. Diese müssen auf der Bedienoberfläche als Ansicht für den Anwender zur Verfügung stehen. Für alle Messergebnisse und Momentaufnahmen ist ein Histogramm zu erstellen. Dies dient der Unterstützung bei der Diskussion der Messergebnisse. Da der Messplatz für Laborzwecke eingesetzt wird, stehen industrielle Anforderungen in dieser Arbeit nicht im Vordergrund.

3.2 Technische Anforderungen

Bereits existierende Messverfahren, wie die Elektrolumineszenz, realisieren eine Messdauer von einer Sekunde. Bei diesem Verfahren wird eine Solarzelle wie eine Diode in Durchlassrichtung betrieben. Hierdurch werden Photonen durch strahlende Rekombination erzeugt. Diese Photonen können mit Hilfe einer Elektrolumineszenzkamera detektiert werden.



Abbildung 3.1: Ergebnis einer Elektrolumineszenzmessung

Die Qualität und die Geschwindigkeit des zu entwickelnden Prüfsystems soll die der Elektrolumineszenzmessung noch übertreffen. Dies soll eine mögliche Weiterentwicklung für den industriellen Sektor erleichtern, da hier der Zeit-

faktor eine große Rolle bei der Produktion von Solarzellen spielt. Abbildung 3.1 zeigt das Ergebnis einer Elektrolumineszenzmessung bei einer Solarzelle, aufgenommen im optischen Prüflabor der HAW Hamburg.

Ein entscheidender Faktor bei einem thermischen Messverfahren ist die Informationsfülle der Bilddaten und die Interpretierbarkeit der Ergebnisse. Bei der Fabrikation einer Solarzelle kann eine Vielzahl von unterschiedlichen Fehlertypen entstehen. Zum einen sind oberflächliche Beschädigungen wie Haarrisse, ein Bruch der Zelle oder abgebrochene Kanten möglich. Zum anderen können fehlerhafte Kontaktierungen, Unterbrechungen in den Kontaktierungen oder Kurzschlüsse, so genannte Shunts, auftreten.

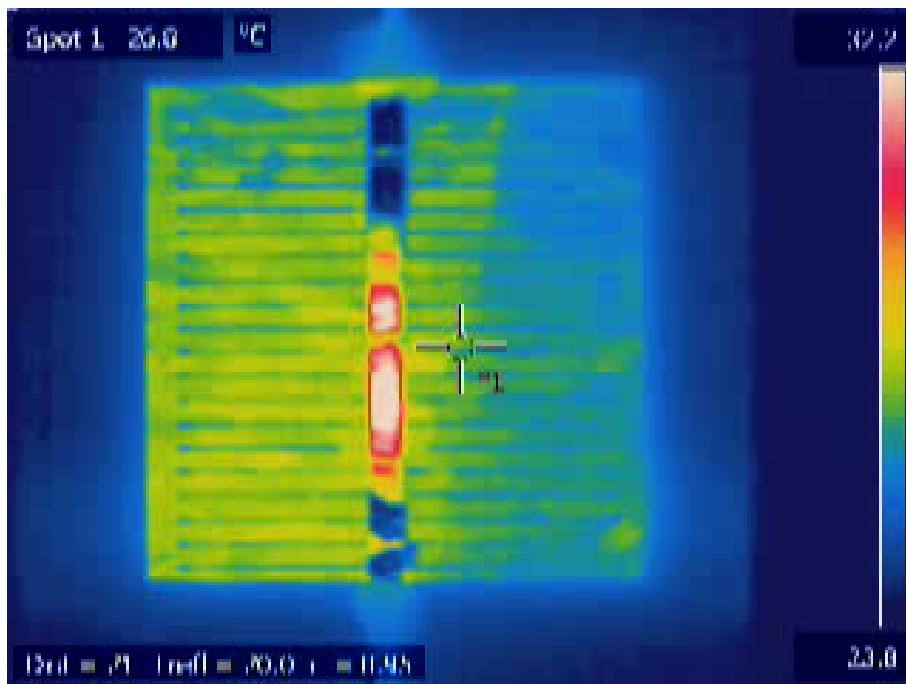


Abbildung 3.2: Ergebnis einer Thermographiemessung

In Abbildung 3.2 ist die Aufnahme einer defekten Solarzelle zu sehen, aufgenommen mit der Flir A320 im optischen Prüflabor der HAW Hamburg. Die unterschiedlichen Fehlertypen stellen besondere Anforderungen an das Prüfsystem. Durch die unterschiedliche Tiefe, in der die Fehler vorkommen können, ist die Nachweistiefe für das Prüfsystem von besonderer Bedeutung. Auch Fehler, die nicht an der Oberfläche des Prüfobjekts liegen, müssen mit dem System zuverlässig erkannt werden können.

Wie in Kapitel 2.2.2 beschrieben, gibt es für das Lock-in Verfahren verschiedene Wege der Realisierung. Das Prüfsystem muss in der Lage sein, wenigstens eine der Möglichkeiten umzusetzen.

Aufgabe ist eine automatisierte Solarzellenprüfung. Solarzellen bestehen zu

einem großen Teil aus Silizium. Daher ist die maximale Temperaturerhöhung des Prüfobjekts zu beachten. Wird eine Solarzelle zu stark thermisch belastet, kommt es zu einer Beschädigung oder Zerstörung der Solarzelle. Das Prüfsystem muss eine zerstörungsfreie Prüfung gewährleisten.

Wie bereits in Kapitel 2 erläutert, unterliegen Thermographiemessungen einigen Störgrößen. Diese Störungen sollen durch das zu entwickelnde System minimiert werden.

Bei der statischen Thermographie ist die thermische Veränderung des Prüfobjekts über die Zeit sichtbar, da ein konstanter Strom an der Solarzelle anliegt. Diese zeitliche Veränderung spielt bei einer Messung eine große Rolle. Deshalb ist es nötig, dass dem Anwender Momentaufnahmen der thermischen Veränderung zugänglich gemacht werden. Aus diesen kann er einzelne Bilder aussuchen und abspeichern.

3.3 Anforderungsliste

Aus der Analyse der Anforderungen lässt sich die folgende Anforderungsliste erstellen:

- Automatische Messdurchführung
- Automatische Dokumentation der Messergebnisse
- Umsetzung mit den im Labor zur Verfügung stehenden Mitteln
 - Die Flir A320 Thermographiekamera
 - Das Netzteil Philips PM2811
 - Das Kamerastativ RA1 von Kaiser
 - Der GPIB-USB Controller der Firma National Instruments
 - Die Software LabVIEW der Firma National Instruments
- Kurze Messzeit
- Variable Detektionstiefe
- Störgrößenunterdrückung
- Nachweistiefe
- Maximale kurzzeitige Temperaturerhöhung des Prüfobjekts

Kapitel 4

Konzeption

In diesem Kapitel werden die Messplätze konzipiert. Hierfür wird eine Auswahl der in Abschnitt 2.2 vorgestellten Prüfmethoden getroffen. Die im vorangegangenen Kapitel ermittelten Anforderungen stellen hierfür die Auswahlkriterien dar. Diese werden in einer Entscheidungsmatrix zusammengefasst.

4.1 Alternativen

4.1.1 Statische Thermographie

Die statische Thermographie stellt die geringsten technischen Anforderungen an das Prüfsystem. Die zur Verfügung stehenden Mittel reichen aus, um das System zu realisieren. Für einen automatischen Prüfablauf ist die Ansteuerung des Netzteils und der Kamera nötig. Die thermische Anregung des Prüfobjekts geschieht mit einem konstanten Strom, der der Solarzelle aufgeprägt wird. Dies hat zur Folge, dass die Ansteuerung des Netzteils mittels GPIB Bus unkompliziert umzusetzen ist. Die Kamera ist im Stande, mit einer maximalen Frequenz von 9 Hz Bilder zu liefern. Dies ist für die notwendigen Momentaufnahmen der thermischen Veränderung der Solarzelle von großer Bedeutung. Eine automatische Dokumentation der Messergebnisse in Form von Bildern ist mit Hilfe von LabVIEW möglich. Das Prüfobjekt wird bei einer längeren Messung einem größeren thermischen Stress ausgesetzt. Die Detektionstiefe von Fehlern ist durch den konstanten Strom nicht variabel. Auch Fehlstellen, die nicht an der Oberfläche vorhanden sind, können mit dieser Methode nachgewiesen werden. Die Störgrößenunterdrückung ist gering und die in Abschnitt 2.2.1 vorgestellten Kriterien begrenzen das örtliche Auflösungsvermögen einer Messung. Die benötigte Messzeit ist vergleichsweise hoch. Als Ergebnis der Messung wird eine Thermographiemessung in Form eines Bildes vorliegen.

Ein Auswertalgorithmus ist nicht nötig, was die Umsetzung in LabVIEW erleichtert. Dies macht die Prüfmethode besonders für den Lehrbetrieb interessant, da Studenten einen leichten Einstieg in die Thematik erhalten.

4.1.2 Lock-in Thermographie

Die Umsetzung eines Lock-in Thermographie Messplatzes stellt eine größere Herausforderung dar. Die modulierte Frequenz, die für die thermische Anregung notwendig ist, setzt eine umfangreichere Ansteuerung des Netzteils voraus. Die Automatisierung des Prüfvorgangs steht bei dieser Arbeit im Vordergrund. Die Realisierung dieser Forderung ist in LabVIEW möglich, erhöht jedoch den Aufwand gegenüber der statischen Thermographie deutlich. Durch den in Abschnitt 2.2.2 vorgestellten Algorithmus zur Auswertung des aufgenommenen Bildstapels, vergrößert sich das Programm in LabVIEW zusätzlich. Ein großer Vorteil dieser Prüfmethode ist die Tatsache, dass Störgrößen besser kompensiert werden können, als bei der statischen Thermographie. Ebenfalls die in Abschnitt 2.2.1 beschriebenen begrenzenden Kriterien bei einer Messung können ausgeglichen werden. Dies hat zur Folge, dass die örtliche Auflösung verbessert werden kann. Die Tiefenreichweite der thermischen Anregung ist durch die modulierte Frequenz variabel. Dies ermöglicht eine gezielte Suche der Fehlstellen.

Die Verteilung der in Abbildung 2.19 gezeigten vier Messpunkte erhöht den Anspruch an die Programmierung, da die äquidistante Verteilung und die Synchronisation zwischen Anregung und Detektion eingehalten werden muss. Ein weiterer wichtiger Aspekt ist die Grundsatzfrage, ob die Auswertung online oder offline durchgeführt werden soll. Die Machbarkeit dieser beiden Methoden wird in Kapitel 6 erläutert. Im Gegensatz zur statischen Thermographie, wird ein Amplituden- und Phasenbild generiert. Diese verfügen neben den bereits genannten Vorteilen auch über deutlich mehr Informationsfülle, die eine Interpretation der Messergebnisse erleichtern. Die auftretende thermische Belastung ist geringer als bei der statischen Thermographie, da das Prüfobjekt mit einer modulierten Frequenz angeregt wird. Da die Frequenzen aber vergleichsweise niedrig sind, ist die Messzeit höher als bei der induktiv angeregten Thermographie.

4.1.3 Induktiv angeregte Thermographie

Die in Kapitel 2 vorgestellten Labormittel reichen nicht aus, um einen Messplatz für die induktiv angeregte Thermographie zu realisieren. Um eine Solarzelle thermisch durch einen induzierten Strom anzuregen, wird eine Spule benötigt. Diese müsste für das gewünschte Einsatzgebiet sowohl dimensioniert, als auch extra angeschafft werden. Dies stellt einen entscheidenden Nachteil dar, da das System mit den zur Verfügung stehenden Mitteln realisiert werden soll.

Durch einen Hochfrequenzgenerator sind höhere Frequenzen möglich. Somit lassen sich deutlich geringere Detektionstiefen realisieren. Dies ist ein Vorteil für die meist dünnen Solarzellen. Das Philips PM2811 Netzteil ist nicht in der Lage, Frequenzen von mehreren Hertz zu produzieren, womit ein Messsystem mit Labormitteln nicht in der Lage wäre, das volle Potential der induktiv angeregten Thermographie auszunutzen.

Des Weiteren ist bei hohen Frequenzen auch eine höhere Samplerate nötig, da pro Periode mindestens drei Bilder aufgenommen werden müssen. Die Flir A320 liefert Bilder mit einer maximale Bildwiederholrate von 9 Hz. Dies würde eine maximale Anregungsfrequenz von 3 Hz bedeuten. Bei der empfohlenen Samplerate von vier Bildern pro Periode, liegt die maximale Anregungsfrequenz nur noch bei 2,25 Hz, wobei Lauf- und Verarbeitungszeiten in LabVIEW nicht mit eingerechnet sind.

Die Flir A320 ist auch in der Lage, Bilder mit einer maximalen Bildwiederholrate von 30 Hz zur Verfügung zu stellen. Diese Daten liegen nur in Form eines Videostreams im MPEG-4 Format vor. Eine Extrahierung der Bilder aus diesem Videostream würde den Programmieraufwand unter LabVIEW zu groß werden lassen. Auch diese Tatsache schränkt den Anwendungsumfang dieser Prüfmethode weiter ein.

Die Prüfzeiten liegen dank der deutlich höheren Frequenzen unter den der beiden anderen Prüfmethoden. Dies hat zur Folge, dass der thermische Stress für ein Prüfobjekt geringer ausfällt.

4.2 Entscheidungsmatrix

Mit Hilfe einer Entscheidungsmatrix wird nun die Auswahl der Prüfmethode für das Prüfsystem getroffen.

	Statische Thermographie	Lock-in Thermographie	Induktiv angeregte Thermographie
Automatische Messdurchführung	+	+	+
Automatische Dokumentation der Messergebnisse	+	+	+
Umsetzung mit Labormitteln	+	o	-
Kurze Messzeit	o	o	+
Variable Detektionstiefe	-	+	+
Störgrößenunterdrückung	-	+	+
Nachweistiefe	o	+	+
Thermische Belastung für das Prüfobjekt	o	+	+

Tabelle 4.1: Entscheidungsmatrix

Da sich ein Messplatz für die induktiv angeregte Thermographie nicht mit den zur Verfügung stehenden Mitteln realisieren lässt, scheidet diese Methode bei der Auswahl aus.

Die statische Thermographie benötigt den geringsten Programmieraufwand. Die Tatsache, dass die Messergebnisse die größte Fehleranfälligkeit aufweisen, wird durch die leichte Realisierung kompensiert.

Um das Prüfsystem konstruktiv zu erweitern, wird die Lock-in Methode ebenfalls umgesetzt. Sie ergänzt die statische Thermographie durch die variable Tiefenreichweite der thermischen Anregung und die verbesserte örtliche Auflösung.

Kapitel 5

Entwicklung des automatisierten Messplatzes

In diesem Kapitel wird die Entwicklung des automatisierten Messplatzes für die statische Thermographie vorgestellt. Hierfür werden zuerst die einzelnen Komponenten des LabVIEW Programms im Detail erläutert. Im Anschluss daran wird ein Überblick über das realisierte Prüfsystem gegeben.

5.1 Ansteuerung des Netzteils

Die Ansteuerung des Philips PM2811 Netzteils geschieht mit Hilfe der in Abschnitt 2.12 vorgestellten Software VISA.

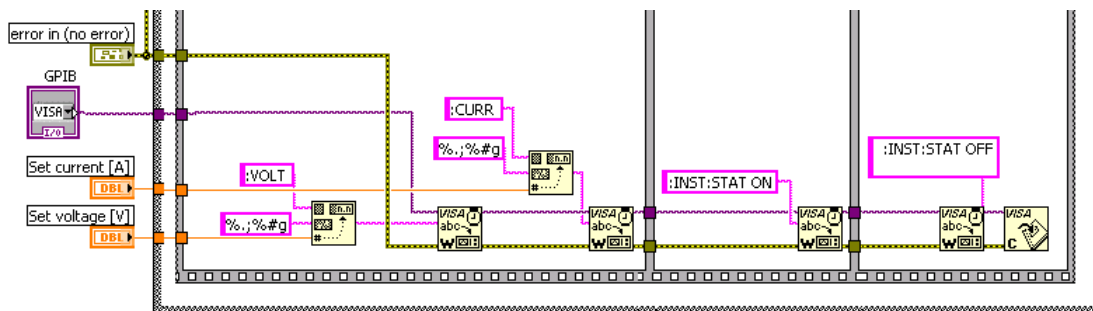
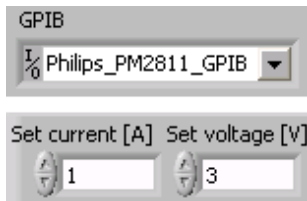


Abbildung 5.1: Blockdiagramm für die Ansteuerung des PM2811

Abbildung 5.1 zeigt die Ansteuerung des Netzteils in LabVIEW. Der violette Funktionsblock links im Bild mit der Überschrift „GPIB“ ist für die Auswahl des Peripheriegerätes am GPIB Bus verantwortlich.



Dieser Funktionsblock ist mit dem MAX verknüpft und hält die dort konfigurierten Geräte mittels Drop-down Menü zur Auswahl auf dem Frontpanel bereit. „Set current [A]“ und „Set current [V]“ sind Integerwerte, die auf dem Frontpanel eingegeben werden können.

Diese legen die Strom- und Spannungswerte für die jeweilige Messung fest. Als Defaultwerte sind hier 1 A und 3 V eingestellt.

Das Philips PM2811 benötigt eine spezielle Konvertierung der Übergabeparameter[11]. Der String „:VOLT 3“ initialisiert einen Spannungswert von 3 Volt. Um einen Wert für den Strom einzustellen, muss der String die Form „:CURR 1“ haben. In diesem Fall wäre der Strom auf 1 Ampere begrenzt. Um diese Konvertierung zu gewährleisten, ist ein weiterer Funktionsblock nötig. Dieser setzt aus einem String „:VOLT“ und dem Integerwert für die Spannung den gewünschten Übergabeparameter in Form eines Strings zusammen. Nachkommastellen können ebenfalls eingestellt werden. Wird ein Integerwert ohne Nachkommastelle eingegeben, wird dies automatisch als Null hinter dem Komma interpretiert. Die Konvertierung für den Strom geschieht auf gleiche Weise. Um das System nicht zu beschränken, ist kein Maximalwert für die Spannung oder den Strom vordefiniert.

Um diesen String von LabVIEW aus an das Netzteil zu senden, wird ein weiterer Funktionsblock aus der VISA Software eingesetzt. Dieses VI ist mit einem „W“ gekennzeichnet. Das „W“ steht für „write“ und ermöglicht das Senden von Daten an ein Peripheriegerät. Das Netzteil befindet sich nach dem Einschalten im Standby Mode. Diese Einstellung ist im Netzteil fest eingestellt und nicht von LabVIEW aus veränderbar. Dies hat den Grund, dass der Stromfluss in LabVIEW erst per Knopfdruck erfolgen soll, um die thermische Ausbreitung in der Solarzelle genau zu beobachten. Nachdem die Strings für Strom- und Spannungswerte übermittelt sind, ist es nötig, dass der Standby Mode beendet wird. Dies geschieht mit dem String „:INST:STAT ON“. Der Parameter „:INST:STAT OFF“ stellt den Standby Mode wieder her.

Der Funktionsblock, der mit einem „C“ gekennzeichnet ist, schließt die Verbindung zu dem PM2811 wieder. Dieser Vorgang ist in einer Sequenz eingebettet und wird bei jeder Messung durchlaufen.

5.2 Ansteuerung der Kamera

Um mit LabVIEW ein Bild von der Flir A320 einlesen zu können, sind folgende Schritte notwendig.

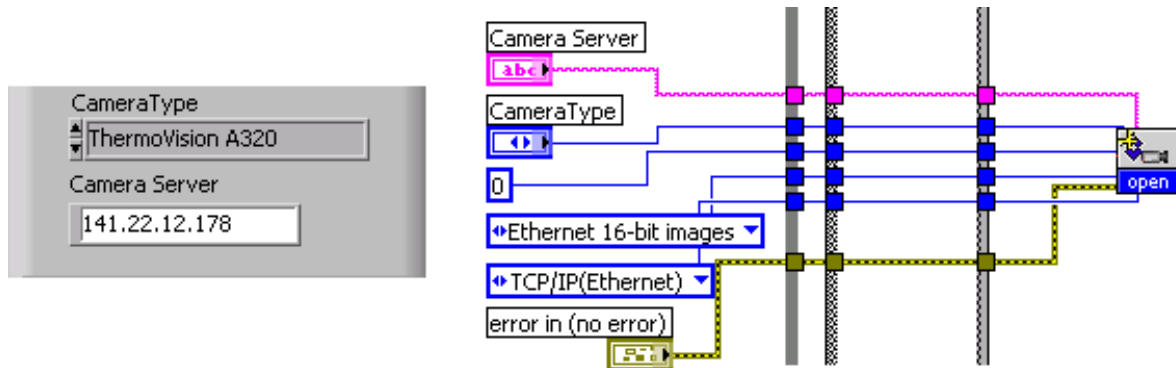


Abbildung 5.2: Ansteuerung der Flir A320 (Links: Frontpanel, rechts: Blockdiagramm)

In Abbildung 5.2 ist der erste Schritt der Kameraansteuerung dargestellt. Dieser beinhaltet die Übergabe der Parameter für die im Labor eingesetzte Kamera. Wie bereits in Abschnitt 2.1.1 erläutert, erfolgt die Ansteuerung der Kamera über das Ethernet.

Das LabVIEW Toolkit der Firma Flir beinhaltet einen Funktionsblock zum Öffnen einer Kameraverbindung. Dieser ist in Abbildung 5.2 rechts dargestellt. Damit dieser Funktionsblock ordnungsgemäß durchlaufen werden kann, sind eine Reihe von Eingängen zu belegen. Hierbei spielt das Anwendungsgebiet des Prüfsystems eine entscheidende Rolle. Da die Möglichkeit gegeben sein muss, das System auch mit anderen Kameras der Firma Flir über das Ethernet zu betreiben, muss ein Teil der Parameter variabel bleiben. Diese werden auf dem Frontpanel eingegeben und umfassen den Kameratyp und die IP. Standardmäßig ist für die IP „141.22.12.178“ und für den Kameratyp „ThermoVision A320“ eingestellt. Diese Einstellungen beziehen sich auf die im Labor eingesetzte Kamera. Zu beachten ist, dass diese IP nur im Gebäude der HAW Hamburg Gültigkeit besitzt. Der Porteingang des VIs wird mit einer Konstanten „0“ belegt. Durch diese Belegung wird der Port automatisch erkannt. Die übrigen beiden Eingänge „Device“ und „Interface“ werden ebenfalls für das Prüfsystem konstant gehalten. Als Interface wird „TCP/IP(Ethernet)“ gewählt. Da die A320 nur in der Lage ist, 16 Bit Bilder zu liefern, wird der Parameter „Ethernet 16-bit images“ ebenfalls fest vorgegeben.

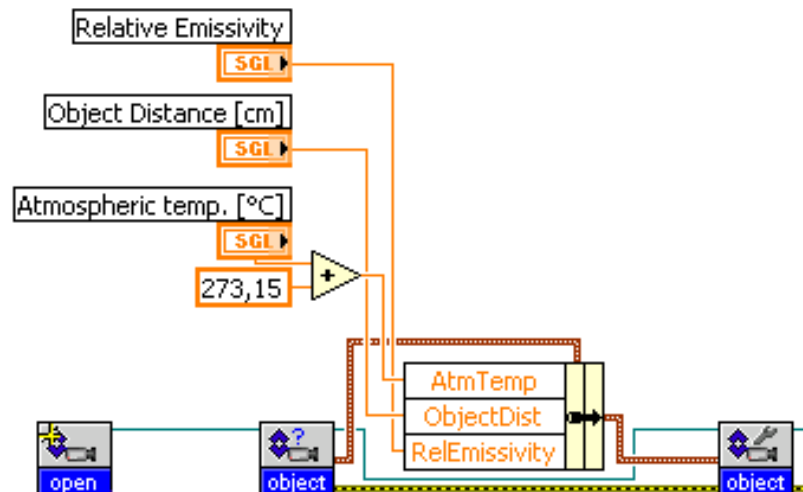


Abbildung 5.3: Blockdiagramm zur Parametrierung der Kamera

Der zweite Schritt besteht aus der Parametrierung der Kamera. Abbildung 5.3 zeigt das Blockdiagramm dieses Vorganges. Abschnitt 2.2 beschreibt die Faktoren, die eine Thermographiemessung negativ beeinflussen. Um diese Fehler bei einer Messung zu minimieren, kann die Distanz zum Objekt, die Umgebungstemperatur und die Emissivität auf dem Frontpanel eingegeben werden.

Object Distance [cm]	▲▼ 21,00
Relative Emissivity	▲▼ 0,95
Atmospheric temp. [°C]	▲▼ 20,00

Abbildung 5.4: Eingabe-Elemente für die Kameraparameter

In Abbildung 5.4 sind die Eingabe-Elemente auf dem Frontpanel für diese Parameter dargestellt. Als Defaultwerte sind für die Umgebungstemperatur 20°C , für die Distanz zum Objekt 21 cm und für die Emissivität 0,95 eingestellt. Diese Einstellungen können vor jeder Messung angepasst werden. Da die Kamera die Einstellung für die Umgebungstemperatur in Kelvin erwartet, ist die Umrechnung von Grad Celsius in Kelvin Bestandteil des Codes. Dies erleichtert dem Anwender die Handhabung.

5.3 Verarbeitungszeiten

Um die Leistungsfähigkeit des Systems zu analysieren, werden eine Reihe von Zeitmessungen durchgeführt. Zuerst wird die Zeit gemessen, die für das Einlesen eines Bildes mit dem „getImg“ Funktionsblock benötigt wird. Bestandteil dieser Messung ist die Berechnung eines Histogramms und die Ausgabe des Bildes und des Histogramms auf dem Frontpanel.

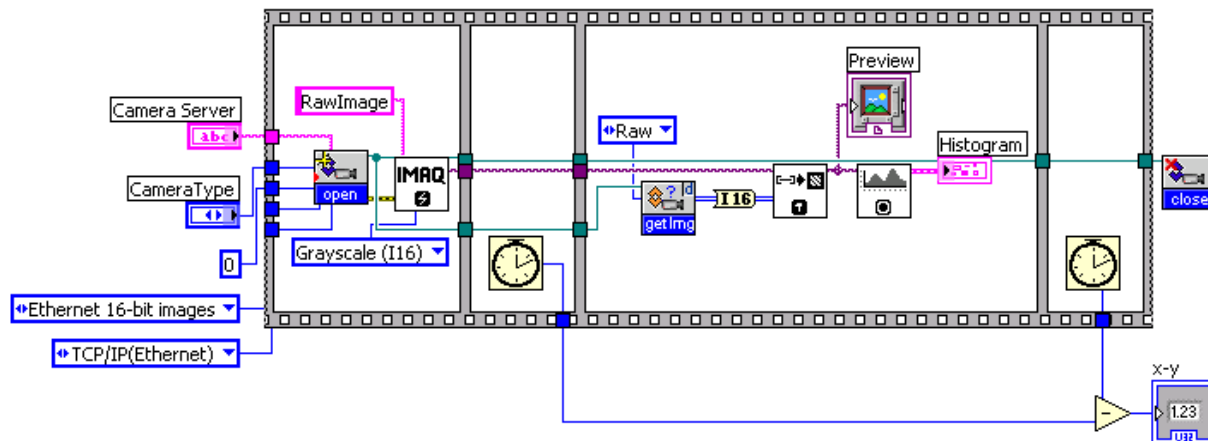


Abbildung 5.5: Zeitmessung für die Bilderfassung

Abbildung 5.5 zeigt das Blockdiagramm des Messprogramms.

Versuch	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Verarbeitungszeit [ms]	828	848	268	359	97	995	254	708	169	874	421

Tabelle 5.1: Verarbeitungszeiten bei der statischen Thermographie

Die Auswertung der Messergebnisse ergibt, dass sich die Werte zwischen 97 und 848 ms bewegen. Diese Differenz ist sehr groß und um einen fehlerfreien Datenempfang zu gewährleisten, wird die Frequenz für die Momentaufnahme auf 1 Hz festgelegt.

Für die Ermittlung der Verarbeitungszeit bei der Datenspeicherung wird eine zweite Messung durchgeführt. Hierfür werden drei Prozessschritte bei der Verarbeitungszeit berücksichtigt. Erstens das Abspeichern eines Bildes, zweitens die Berechnung eines Histogramms und drittens die Ausgabe von beiden auf dem Frontpanel.

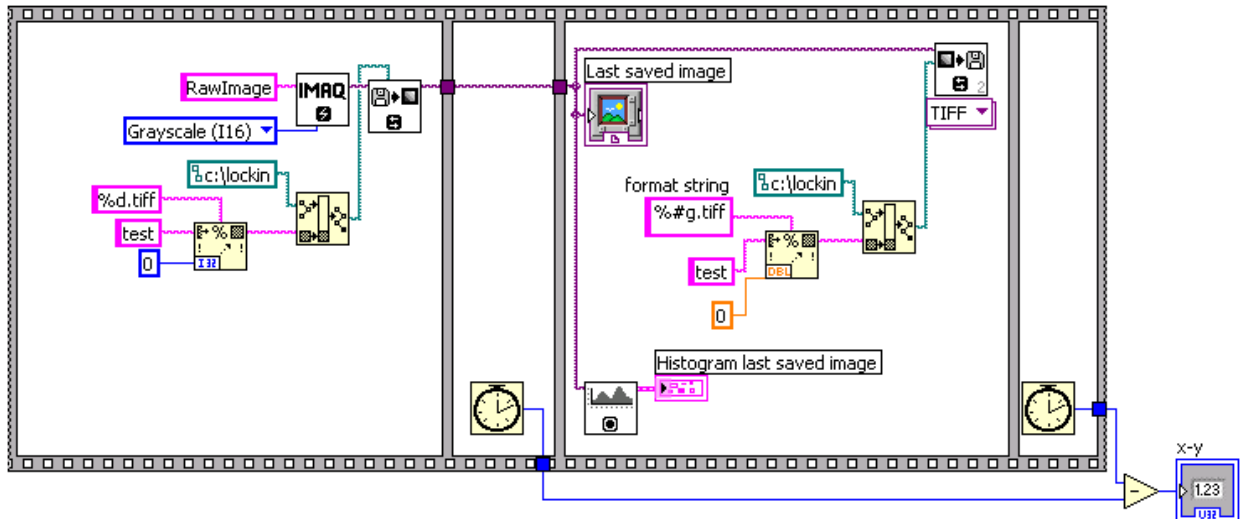


Abbildung 5.6: Zeitmessung für das Speichern eines Bildes

In Abbildung 5.6 ist das Blockdiagramm dieser Zeitmessung zu sehen. Die Messungen ergeben Werte von 1 bis 2 ms. Damit ist diese Zeit vernachlässigbar klein gegenüber der Bildaufnahme.

5.4 Momentaufnahme

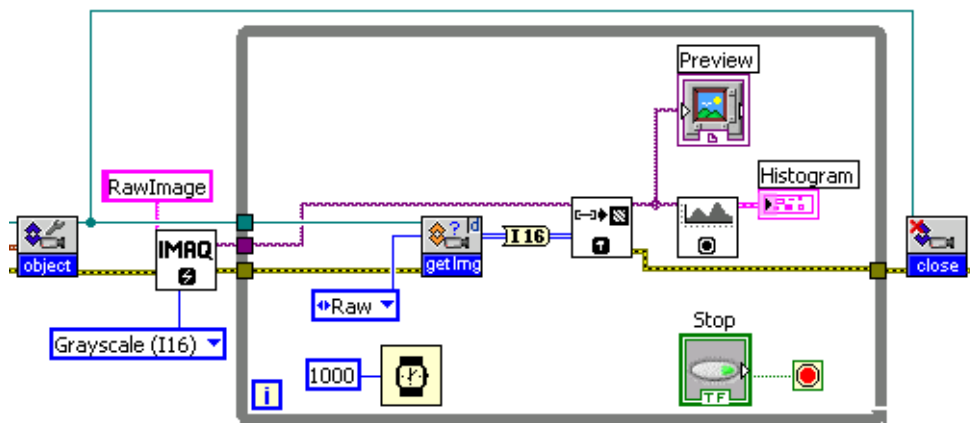


Abbildung 5.7: Blockdiagramm der Momentaufnahme

Um die thermischen Veränderungen in einer Solarzelle zu detektieren, ist eine Momentaufnahme nötig. In LabVIEW steht hierfür eine While-Schleife zur Verfügung. In Abbildung 5.7 ist das Blockdiagramm für die Momentaufnahme dargestellt. Das Vision Tool stellt einen Funktionsblock zur Verfügung, der durch die Parameter „Grayscale I16“ und „Raw Image“ eine Referenz für den

in der While-Schleife positionierten Funktionsblock „ArrayToImage“ erzeugt. Dieser ist nötig, da die Daten von der Kamera in Form eines 2D Arrays empfangen werden. Der Funktionsblock „getImg“ empfängt das 2D Array eines Bildes. Diese werden in das 16 Bit Integer Datenformat konvertiert und an das „ArrayToImage“ VI übergeben. Dieses konvertiert das Array in ein Bild. Von diesen Bilddaten wird ein Histogramm berechnet und anschließend Bild und Histogramm auf dem Frontpanel angezeigt. Die Zeitverzögerung in der While-Schleife ist auf Grund der in Abschnitt 5.3 ermittelten Verarbeitungszeiten auf 1000 ms eingestellt. Dies hat zur Folge, dass jede Sekunde ein neues Bild eingelesen und auf dem Frontpanel angezeigt wird. Das Histogramm aktualisiert sich für jedes Bild automatisch. Mit dem „Stop“ Button auf dem Frontpanel wird die While-Schleife verlassen und die Verbindung zur Kamera mit dem „close“ Funktionsblock getrennt.

5.5 Datensicherung

Um die gewünschten Bilder aus den Momentaufnahmen zu speichern, ist eine Erweiterung des Blockdiagramms in Abbildung 5.7 notwendig.

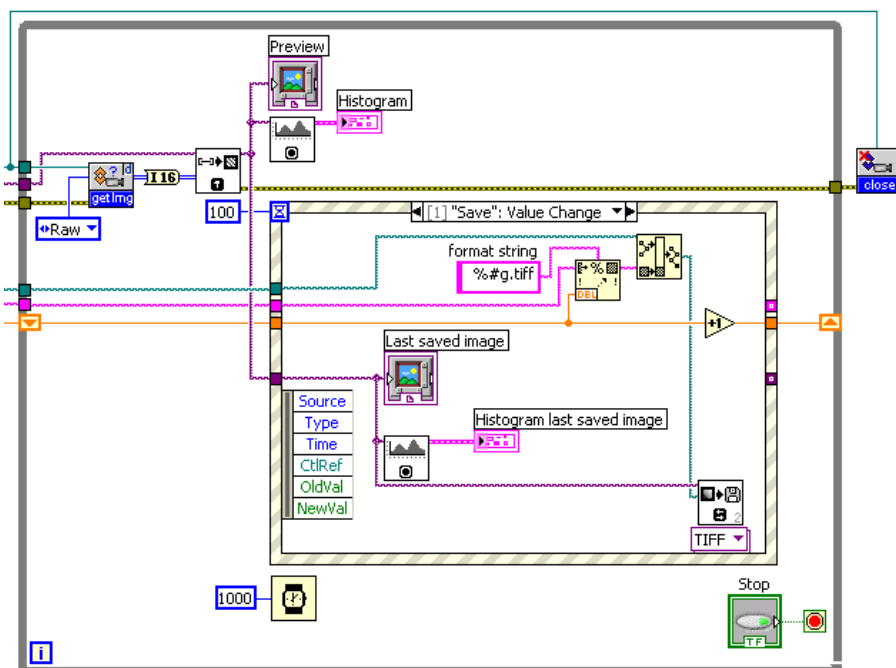


Abbildung 5.8: Datensicherung der Messergebnisse

Hauptbestandteil der Erweiterung ist eine Event-Struktur. Diese hat ein oder mehrere Ausführungen, von denen eine zur Zeit durchlaufen wird. Hierbei

wartet die Event-Struktur, bis ein definiertes Ereignis eintritt und springt in die entsprechende Ausführung. In diesem Programm gibt es zwei mögliche Ausführungen. Wird der „Save“ Button auf dem Frontpanel betätigt, wird die Event-Struktur entsprechend Abbildung 5.8 ausgeführt. Tritt dieses Ereignis nicht ein, wird die zweite Ausführung ohne Inhalt durchlaufen und ein neues Bild eingelesen. Für die Benennung und Indizierung der Messergebnisse sind einige Übergabeparameter nötig.

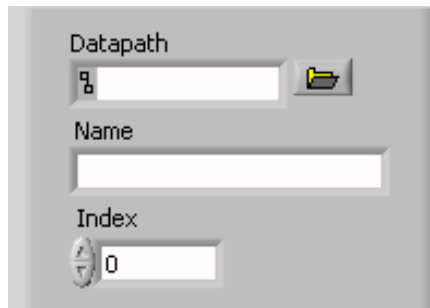


Abbildung 5.9: Eingabe-Elemente für die Benennung Indizierung

In Abbildung 5.9 sind die Eingabe-Elemente auf dem Frontpanel dargestellt. Der Datenpfad für den Speicherort, der Name für die Messung und der Index werden an die Event-Struktur übergeben. Die Verbindungslinie für den Datenpfad ist grün, für den Index orange und für den Namen pink. Der Name und der Index werden in dem „FormatIntoString“ VI zusammen mit der Konstante „%#g.tiff“ zu einem String zusammengefasst. „#g“ ist hierbei für die Konvertierung des Indexes verantwortlich. „#g“ steht für eine Ganze Zahl und es werden keine Nachkommastellen in den String übernommen.

Um den Index bei einer Messung automatisch um einen Wert hochzuzählen, stellt LabVIEW ein Shift-Register bereit. Dieses befindet sich an den beiden gegenüberliegenden Rändern der While-Schleife. Durch einen mathematischen Funktionsblock wird bei jedem Durchlauf der Schleife der jeweils letzte Wert mit Eins addiert. Der zusammengesetzte String wird an den „BuildPath“ Funktionsblock übergeben und setzt aus dem Datenpfad und dem String den Übergabeparameter für das „WriteFile“ VI zusammen. Dieser Funktionsblock erzeugt eine Tiff-Datei an dem gewählten Speicherort. Außerdem wird das zuletzt gespeicherte Bild mit dem entsprechenden Histogramm auf dem Frontpanel angezeigt.

Die Verzögerungszeit der Event-Struktur ist auf 100 ms Sekunden eingestellt. Das bedeutet, dass die Struktur 100 ms auf die Betätigung des „Save“ Buttons wartet, bevor die zweite Ausführung durchlaufen wird. Diese Zeit darf nicht zu groß gewählt werden, da LabVIEW nach dem Datenfluss-Modell arbeitet

und sich sonst die 1000 ms Wartezeit der While-Schleife verzögern könnten.

5.6 Textdatei

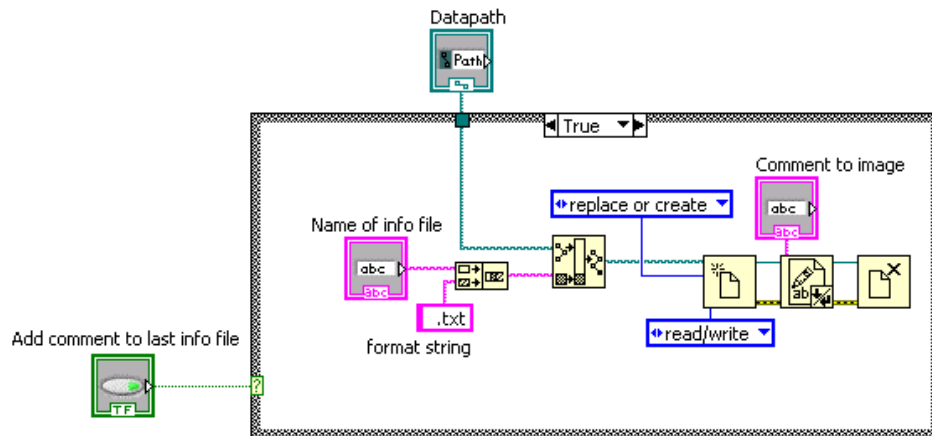


Abbildung 5.10: Textdatei

Um einen Kommentar zu einer Messung zu speichern, wird eine weitere Programmiererweiterung vorgenommen. In Abbildung 5.10 ist das Blockdiagramm für die Erzeugung einer Textdatei dargestellt. Eine Besonderheit hierbei ist die Tatsache, dass der Programmteil mit Hilfe eines Sub-VIs eingebunden wird. Dies hat den Vorteil, dass das Hauptprogramm übersichtlich bleibt. Die Funktionsblöcke befinden sich in einer Case-Struktur, die ausgeführt wird, sobald der „Add comment to last info file“ Button auf dem Frontpanel betätigt wird. Die Parameter für den Datenpfad und den Namen der Textdatei werden vom Hauptprogramm an das VI übergeben. Um die Korrelation bei der Benennung von Bildern und Textdateien aufrecht zu erhalten, sind es die gleichen Parameter.

Der gewählte Name für die Textdatei wird zuerst mit der Konstanten „.txt“ zu einem String zusammengefügt. Dies hat den Grund, dass das Öffnen einer Textdatei unter Windows ohne weitere Modifikationen möglich ist. Im Anschluss daran wird dieser String mit dem Datenpfad verknüpft. Diese Verknüpfung wird an die „Open/Create/Replace File Function“ übergeben. Die Konstanten „replace or create“ und „read/write“ konfigurieren die Eigenschaften dieses Funktionsblocks. Somit kann eine Textdatei sowohl erstellt, als auch überschrieben werden. Dies ist bei einer fehlerhaften Messung wichtig, da die alten Dateien sonst manuell von der Festplatte gelöscht werden müssten, um keine Fehlermeldung des VIs zu erhalten. Um die Textdatei mit Inhalt zu fül-

len, ist der Funktionsblock „WriteToFile“ notwendig. Der auf dem Frontpanel eingegebene Kommentar wird in Form eines Strings an das Sub-VI übergeben.

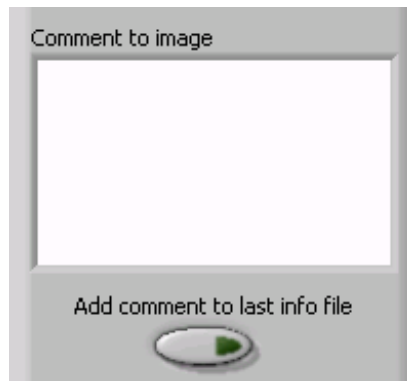


Abbildung 5.11: Eingabe-Element für die Textdatei

In Abbildung 5.11 ist das Eingabe-Element auf dem Frontpanel für den Textinhalt dargestellt. Mit dem „CloseFile function“ VI wird die Datei geschlossen und das Sub-VI verlassen.

5.7 Zugriffsfehler

Aufgrund eines Fehlers ist es nicht möglich, das Prüfsystem mit dem vorhandenen Laborrechner in Verbindung mit dem Microsoft Windows XP Betriebssystem stabil zu betreiben. Anstatt eines Arrays der Größe 320*240, liefert der „getImg“ Funktionsblock in unabhängigen Zeitabständen nur einen undefinierten Wert „#0“.

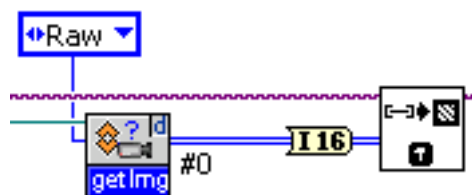


Abbildung 5.12: Windowsfehler in LabVIEW

Ein von der Firma Flir zur Verfügung gestelltes Update kann das Problem nicht lösen. Bis zum Abgabetag dieser Arbeit konnte nicht geklärt werden, ob diese Beeinträchtigung auf ein Software- oder ein Hardwareproblem zurückzuführen ist.

5.8 Übersicht

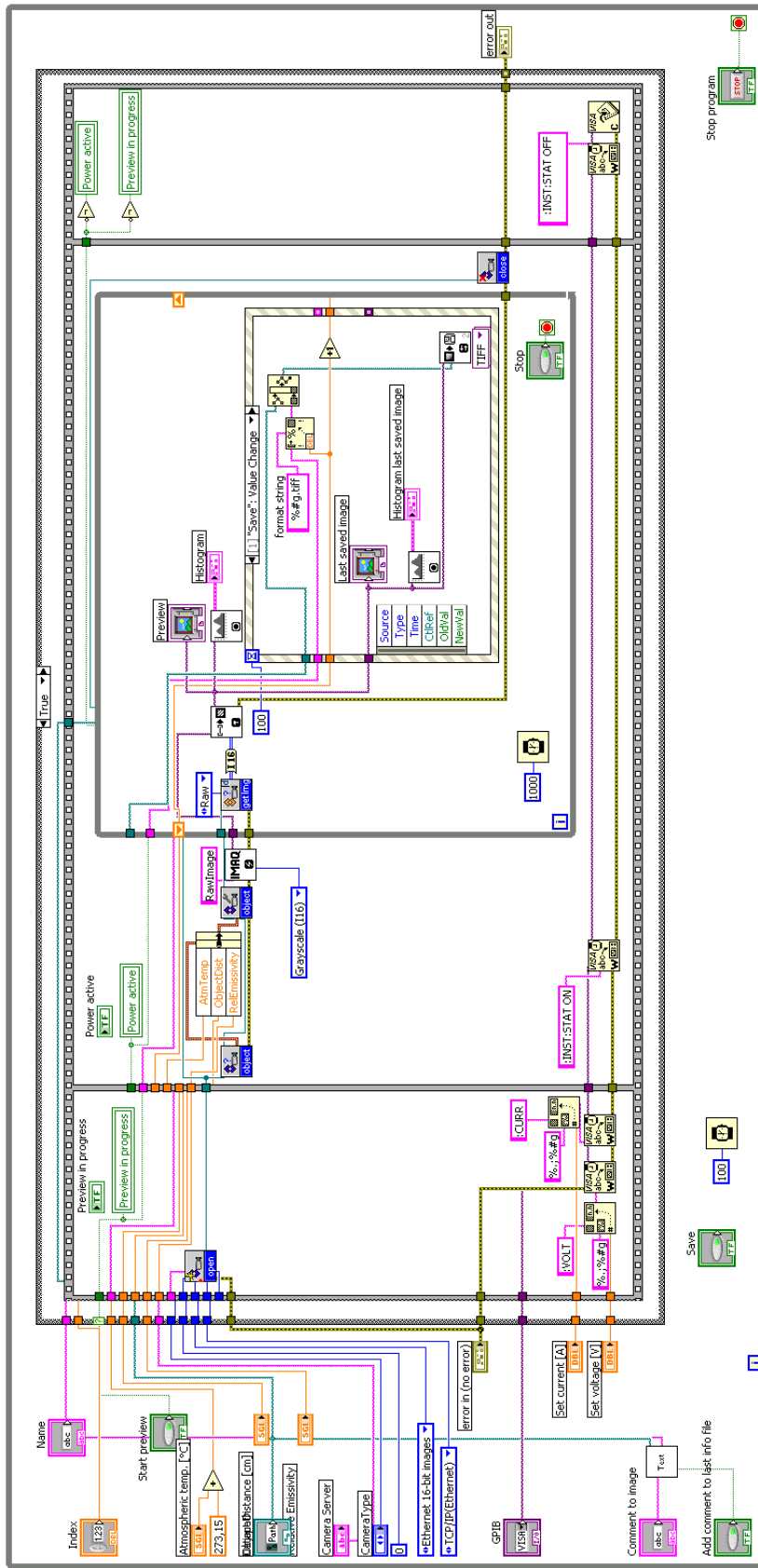


Abbildung 5.13: Blockdiagramm statische Thermographie

In Abbildung 5.13 ist das Blockdiagramm für das Prüfsystem der statischen Thermographie dargestellt. Nachdem die nötigen Einstellungen für die Messung und die Kamera auf dem Frontpanel eingegeben sind, wird das Programm gestartet. Hierbei wird eine While-Schleife durchlaufen, bis der „Start preview“ Button auf dem Frontpanel aktiviert wird. In diesem Fall wird in das entsprechende Ereignis der Case-Struktur gesprungen und eine Sequenz ausgeführt. Die Sequenz teilt sich in drei Bereiche auf. Im ersten Abschnitt wird das Netzteil mit den Strom- und Spannungswerten initialisiert. Die Kameraverbindung wird geöffnet und die Kameraeinstellungen vorgenommen. Des Weiteren ist eine LED auf dem Frontpanel positioniert, die mit der Überschrift „Preview in progress“ dem Benutzer anzeigt, dass der Messvorgang läuft.

Sind alle Funktionsblöcke durchlaufen, wird der nächste Abschnitt ausgeführt. In diesem wird der Standby Mode des Netzteils beendet und die Solarzelle mit einem Strom beaufschlagt. Parallel dazu wird eine LED auf dem Frontpanel mit der Überschrift „Power active“ aktiviert. In diesem Teil der Sequenz wird die Bilderfassung mittels einer While-Schleife vorgenommen. Mit dem „Save“ Button kann der Anwender Bilder jederzeit speichern. Beendet der Anwender die Bilderfassung mit dem „Stop“ Button, wird dieser Teil der Sequenz beendet und der letzte begonnen. In diesem wird das Netzteil wieder in den Standby Mode versetzt und die LEDs werden ausgeschaltet.

Die Zeitverzögerung der While-Schleife ist auf 100 ms eingestellt. Es wäre auch möglich, diesen Wert auf 0 ms einzustellen, dies würde aber die Rechenleistung der CPU verstärkt belasten.

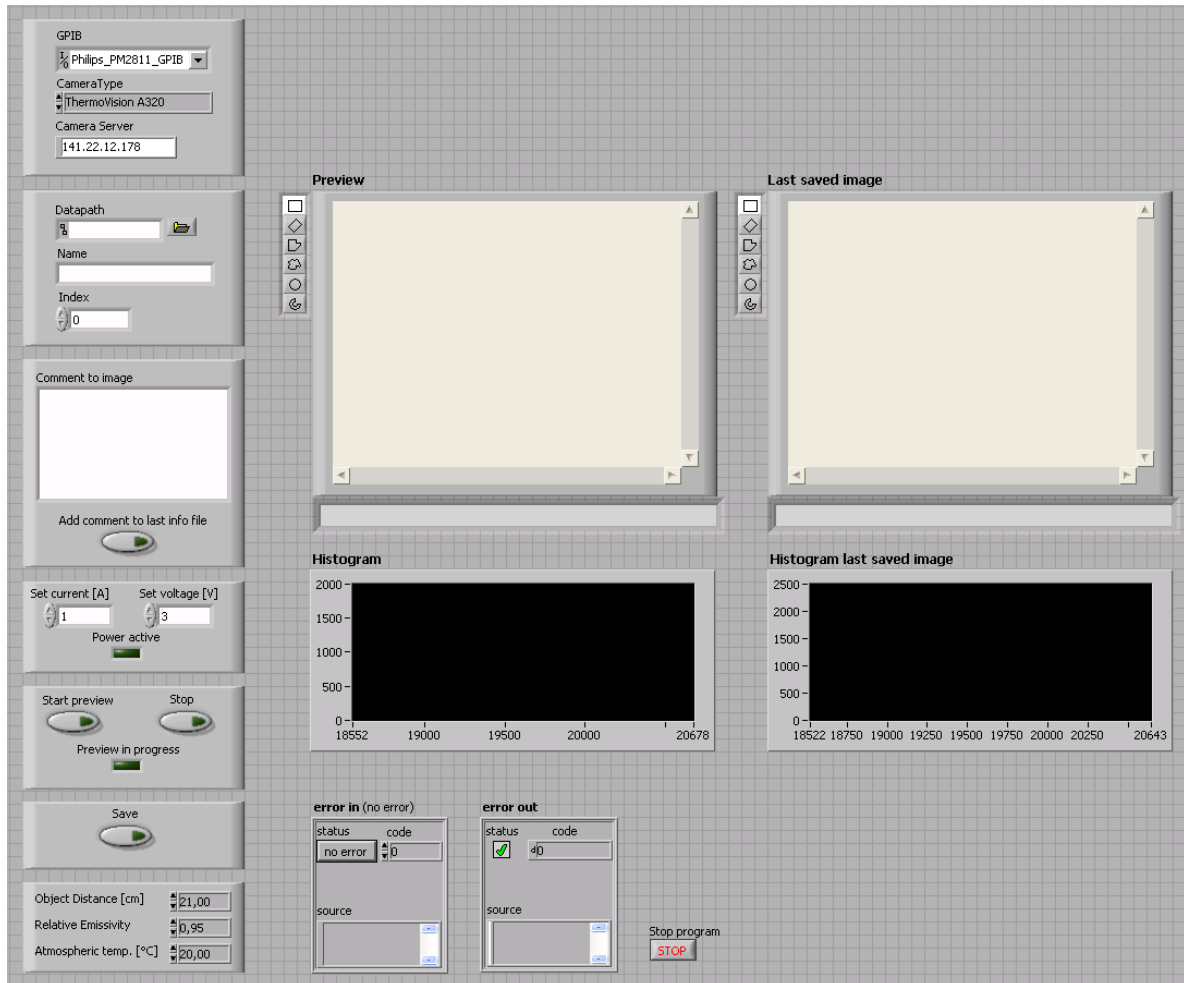


Abbildung 5.14: Frontpanel LabVIEW

Abbildung 5.14 zeigt das Frontpanel beim Programmstart. Da die meisten Werte standardmäßig bereits vorinitialisiert sind, ist nur noch die Eingabe eines Datenpfades und ein Namen für die Messung nötig, um eine Messung durchzuführen. Dies erleichtert den Einstieg und wahrt trotzdem den Anspruch alle Werte variabel zu halten. Die beiden Bildschirme für die Momentaufnahme und die Anzeige des zuletzt gespeicherten Bildes sind zentral auf dem Frontpanel angebracht. Die dazugehörigen Histogramme liegen direkt unter den Anzeigen, was einen guten Überblick gewährleistet.

Kapitel 6

Entwicklung des Lock-in Messplatzes

In diesem Kapitel wird die Umsetzung eines Messplatzes für die Lock-in Thermographie erläutert. Hierbei handelt es sich um eine Modifikation des in Kapitel 5 vorgestellten Messplatzes für die statische Thermographie. Aus diesem Grund werden nur die Veränderungen im Detail erläutert. Des Weiteren wird eine Analyse der Verarbeitungszeiten vorgenommen, um die Leistungsfähigkeit des Systems zu ermitteln. Den Abschluss bildet eine Übersicht über das entwickelte Programm.

6.1 Ansteuerung der Kamera

Aufgrund der komplexeren Ansteuerung der Kamera für die Lock-in Thermographie, ist das „getImg“ VI nicht mehr in der Lage, die Bilder von der Kamera einzulesen. Hier kommt ein alternatives Verfahren für die Bildgewinnung zum Einsatz, das eigentlich für die Aufnahmen von Videos prädestiniert ist. Durch einige Modifikationen ist das Einlesen von Einzelbildern möglich.

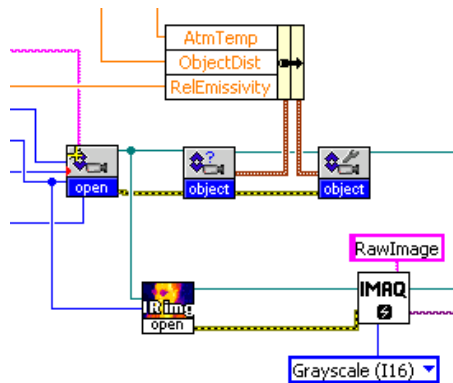


Abbildung 6.1: Blockdiagramm für die Initialisierung der Kamera

In Abbildung 6.1 ist das Blockdiagramm der nötigen Programmschritte vor dem Einlesen eines Bildes dargestellt. Das Öffnen der Kameraverbindung und die Kalibrierung geschieht wie bei der statischen Thermographie. Ergänzend wird eine zweite Referenz benötigt, die die im folgenden Abschnitt beschriebene Datenerfassung ermöglicht. Der Funktionsblock „IR img open“ stellt diese Referenz zur Verfügung.

6.2 Bilderfassung

Der zweite Teil der Sequenz realisiert die Messwerterfassung für die Lock-in Methode. Um die Fehleranfälligkeit dieser Methode zu verringern, ist ein Messzyklus über mehrere Perioden sinnvoll, da so mit Hilfe einer Mittelwertbildung Messfehler kompensiert werden.

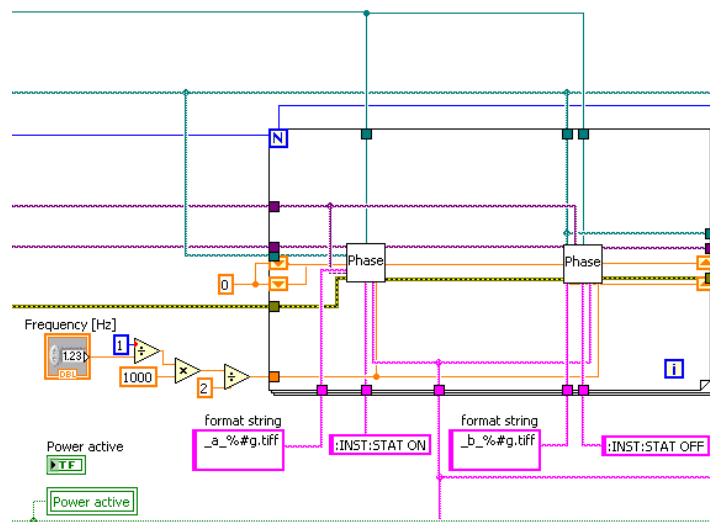


Abbildung 6.2: Blockdiagramm der Datenerfassung

Dies geschieht mit einer in Abbildung 6.2 dargestellten For-Schleife. Die Anzahl der Durchläufe wird von dem Benutzer auf dem Frontpanel festgelegt. Die äquidistante Verteilung der Messpunkte nach dem in Abbildung 2.19 vorgestellten Prinzip wird in dieser Schleife realisiert. Hierfür sind eine Reihe von Übergabeparametern nötig. Der blaue Leiter ist ein Integerwert, der die Schleifendurchläufe festlegt. Der dünne grüne Leiter ist die Referenz für die Bilderfassung. Der Datenpfad für die Messung wird über den dicken grünen Leiter übergeben. Die obere lila Leiter ist der Übergabeparameter für den Bildtyp. Der Untere ist die Verbindung zum GPIB Bus.

Um eine spätere Programmerweiterung zu erleichtern und Redundanzen im

Code zu vermeiden, wird für die Bilderfassung nur ein Sub-VI für beide Periodenhälften genutzt. Dies erfordert weitere Übergabeparameter. Der String, der für das An- und Abschalten des Netzteils erforderlich ist, wird für den entsprechenden Periodenteil übergeben.

Ebenso zwei Konstanten für die Benennung der Bilddaten. Der Buchstabe „a“ kennzeichnet die erste Periodenhälfte, „b“ die Zweite.

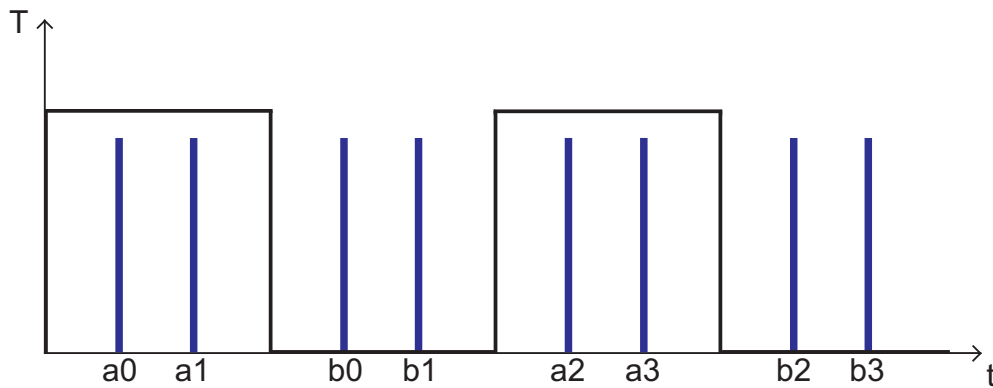


Abbildung 6.3: Benennung der Messpunkte

Die Benennung der Messpunkte für zwei Perioden ist in Abbildung 6.3 dargestellt.

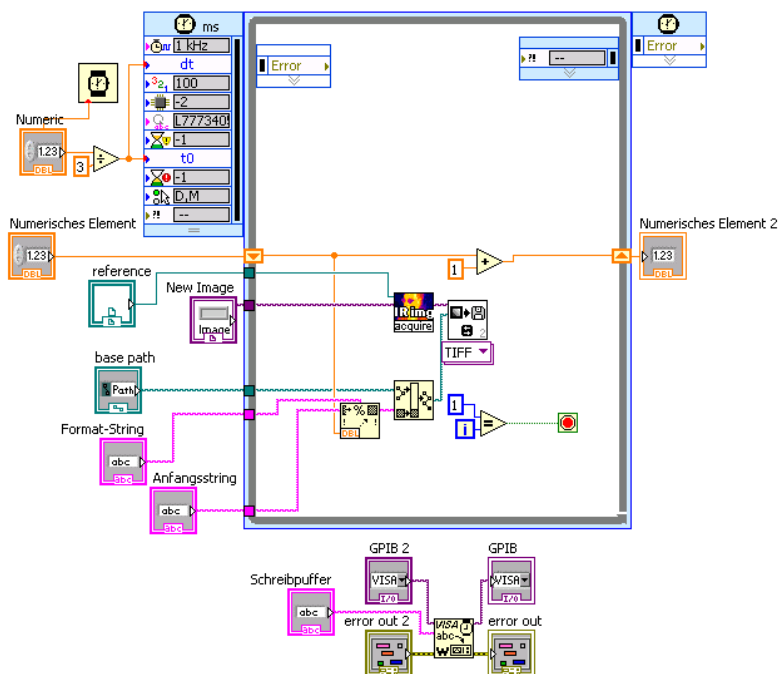


Abbildung 6.4: Blockdiagramm des Sub-VIs für die Datenerfassung

In Abbildung 6.4 ist die Datenerfassung der jeweiligen Periodenhälfte zu sehen. Hierfür wird zuerst das Netzteil mit den eingestellten Strom- und Spannungswerten in der ersten Periodenhälfte aktiv bzw. in der zweiten Periodenhälfte passiv geschaltet.

Im nächsten Schritt kommt eine „TimedLoop“ zum Einsatz. Diese Struktur ermöglicht einen auf die Millisekunde genauen Durchlauf der Schleife. Die Schleife wird mit einem Offset und einer Periode versehen, um die äquidistante Verteilung der Messpunkte zu garantieren. Die Werte hierfür sind von der Frequenz der Messung abhängig und werden mit der Formel

$$t = \left(\frac{1}{f_{lock-in}} \cdot 1000 \right) / 6 \quad (6.1)$$

berechnet. $f_{lock-in}$ ist hierbei die Anregungsfrequenz für die Messung in Hertz. Von dieser Frequenz wird der Kehrwert gebildet und mit 1000 multipliziert, um die Zeit in Millisekunden zu erhalten. Da sich die Zeit auf die gesamte Periode bezieht, wird dieser Wert, wie in Abbildung 6.2 dargestellt, durch zwei dividiert. So wird die Dauer für eine Periodenhälfte ermittelt. Da ein Offset und zwei Messpunkte berücksichtigt werden müssen, wird die Zeit für eine Periodenhälfte durch drei dividiert.

Die Bilderfassung innerhalb der „TimedLoop“ geschieht mit Hilfe des Funktionsblocks „IR img acquire“. Dieser nutzt die Referenz des Funktionsblocks „IR img open“ und liest ein Bild der Kamera ein. Die Ausgangsdaten des Funktionsblocks liegen nicht in Form eines Arrays, sondern als Bilddaten vor. Daher können die Bilddaten direkt abgespeichert werden. Die Datenspeicherung geschieht wie in Abschnitt 5.5 erläutert.

Um eine korrekte Indizierung der Messpunkte zu garantieren, verfügt das Programm über zwei Shift-Register. Für jede Hälfte einer Periode zählt ein Register den Index. Am Anfang jeder Messung werden die Register wieder auf Null gesetzt.

Die Bilddaten erhalten bei der Datensicherung Namen, der sich aus der Variable auf dem Frontpanel für die Messung und der Konstanten „_a_#g.tiff“ für die erste, bzw. „_b_#g.tiff“ für die zweite Periodenhälfte zusammensetzt.

Nachdem alle Perioden durchlaufen sind, wird im nächsten Abschnitt der Sequenz die Verbindung zur Kamera und zum Netzteil beendet.

6.3 Mittelwert und Algorithmus

Um eine Messung über mehrere Perioden zu realisieren, ist eine Mittelwertbildung unerlässlich. Das Visio Tool stellt einen eigenen Funktionsblock für die Mittelwertbildung von Bildern zur Verfügung. Dieser ist jedoch nur in der Lage, Werte bis 65536 zu verarbeiten. Ein 8 Bit Bild kann $2^8=256$ verschiedene Grauwerte annehmen. Ein 16 Bit Bild verfügt bereits über $2^{16}=65536$ verschiedene Grauwerte. Dies hat zur Folge, dass eine zuverlässige Mittelwertbildung von zwei 16 Bit Bildern ausgeschlossen ist, da die Werte beim Addieren leicht den Wert 65536 übersteigen.

Dieser Umstand macht eine eigene Programmierung notwendig.

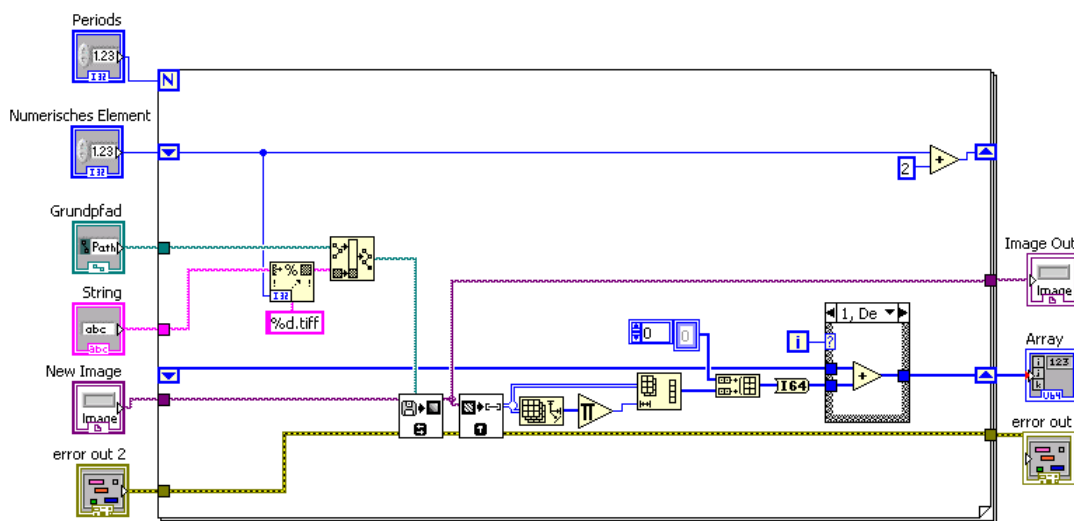


Abbildung 6.5: Mittelwertbildung

In Abbildung 6.5 ist der erste Abschnitt der Mittelwertbildung dargestellt. Das vorhandene 2D Array eines Bildes wird in ein 1D Array konvertiert. Mit Hilfe der mathematischen Funktionsblöcke für Addition und Division kann dann der Mittelwert berechnet werden. Basis hierfür ist eine For-Schleife, in der die Konvertierung in ein 1D Array stattfindet. Als erstes wird ein Bild von der Festplatte eingelesen und in eine 2D Matrix umgesetzt. Die nötigen Parameter für den Dateinamen und -speicherort werden wie in Abbildung 6.5 dargestellt übergeben. Da jedes Bild der Flir A320 Bilder der Dimension 320×240 liefert, ist ein 1D Array der Länge 76800 nötig. Dieser Wert wird von den Funktionsblöcken „ArraySize“ und „MultiplyArrayElements“ automatisch errechnet. Die VIs „ReshapeArray“ und „BuildArray“ setzen das nötige 1D Array zusammen. Letzteres ist hierbei mit Null vorinitialisiert. Nachdem das 1D Array vorliegt, werden die einzelnen Elemente des Arrays auf einen 64

Bit Integerwert konvertiert. Dies ist nötig, um einen Überlauf der Arraywerte beim Addieren zu verhindern. Durch diese Operation ist es möglich, einen Mittelwert für bis zu 2^{48} Perioden zu errechnen. Mit Hilfe einer Case-Struktur wird garantiert, dass das erste Array nicht addiert wird.

Der Parameter für die Anzahl der Perioden pro Messung dient als Abbruchbedingung für die For-Schleife.

Diese Form der Mittelwertbildung wird in dem Programm für insgesamt vier Bildstapel durchgeführt, da vier Messpunkte für die Berechnung der Amplituden- und Phasenbilder nötig sind. Um Redundanzen im Code zu vermeiden, wird ein Sub-VI der Mittelwertberechnung erstellt. Dies erleichtert eine spätere Erweiterung des Programms. Das Sub-VI kommt für jeden der vier Messpunkte einmal vor.

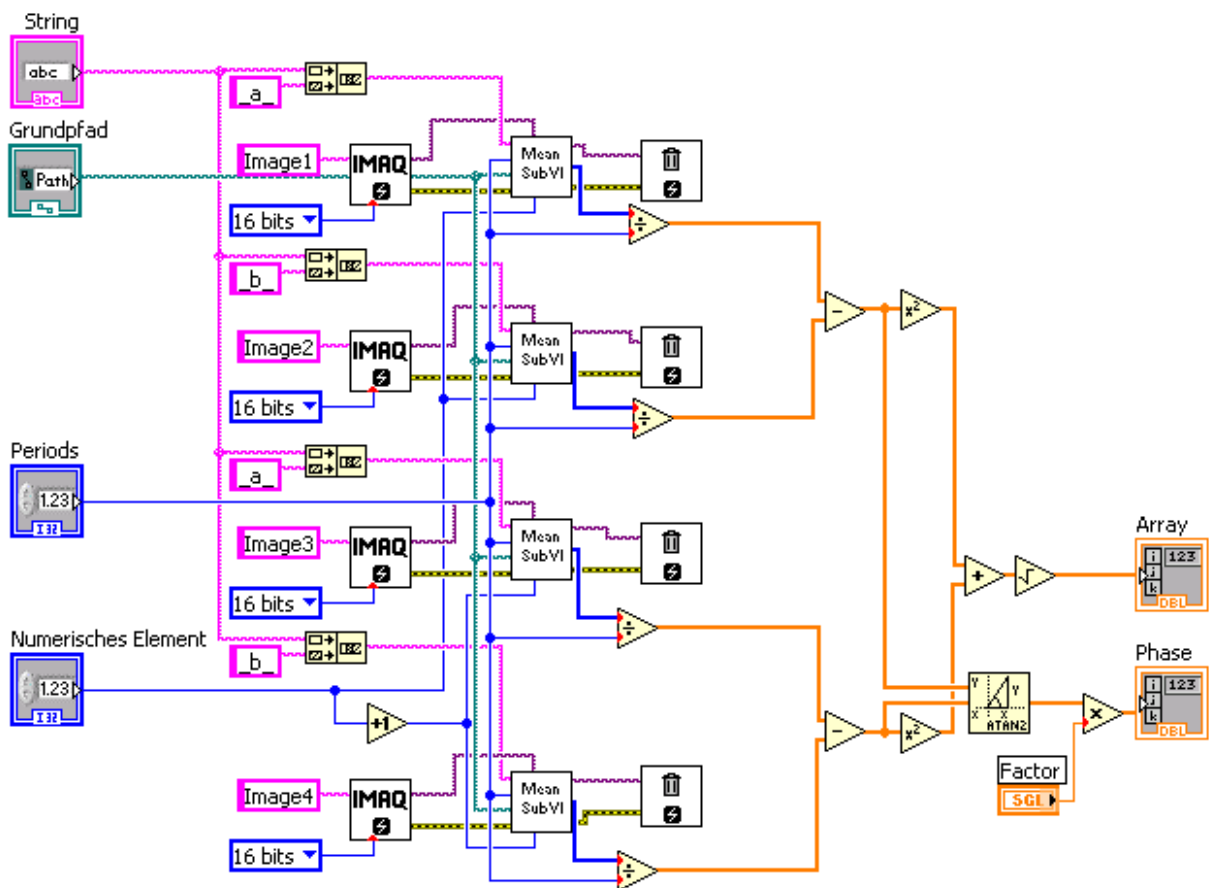


Abbildung 6.6: Berechnung des Amplituden- und Phasenbildes

Die Berechnung des Amplituden- und Phasenbildes ist in Abbildung 6.6 dargestellt. Die Parameter für den Namen und Speicherort für jeden Messpunkt werden eingelesen. Das oben beschriebene Sub-VI für die Mittelwertbildung wird durchlaufen und das Ergebnis übergeben. Für eine vollständige Mittel-

wertbildung wird das Ergebnis durch die Anzahl der Perioden dividiert. Im Anschluss daran wird mit Hilfe der Formel 2.13 und 2.14 die Berechnung der Amplitude und Phase für jeden einzelnen Pixel des Arrays durchgeführt. Das Ergebnis wird an das Hauptprogramm übergeben.

Für die Berechnung der Phase wird die Arkustangensfunktion eingesetzt. Hier tritt eine Besonderheit auf.

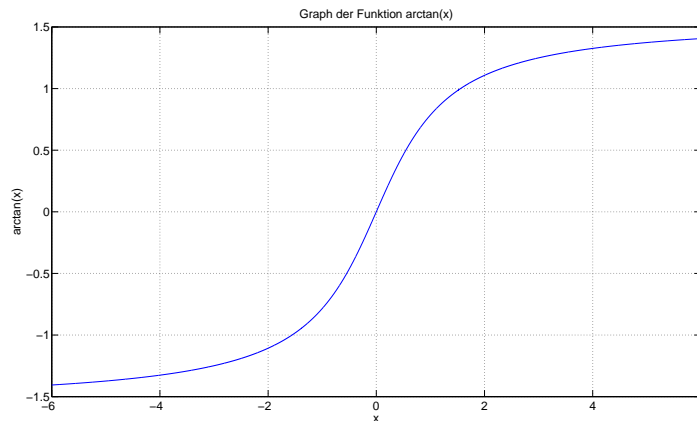


Abbildung 6.7: Graph der Funktion $\arctan(x)$

Abbildung 6.7 zeigt die grafische Darstellung der Arkustangensfunktion. Diese ist nicht in der Lage, den Winkel im korrekten Quadranten zu ermitteln. Außerdem ist die Tangensfunktion für einen Funktionswert von $\pm \frac{\pi}{2}$ nicht umkehrbar.

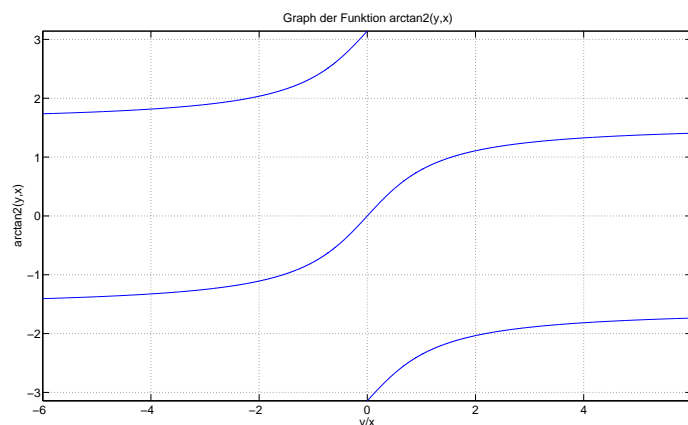


Abbildung 6.8: Graph der Funktion $\arctan2(y,x)$

Abhilfe schafft hier die in Abbildung 6.8 dargestellte Arkustangensfunktion mit zwei Argumenten. Mit deren Hilfe ist eine genaue Berechnung der Phase möglich.

Da diese Funktion nur Werte zwischen $-\pi$ bis π annimmt und ein 16 Bit Bild 65536 Grauwerte annehmen kann, ist ein Korrekturfaktor nötig. Dieser kann auf dem Frontpanel eingegeben werden und ist standardmäßig auf 10000 eingestellt.

6.4 Datensicherung

Bevor die Daten in Form von Bildern gespeichert werden können, muss das 1D Array wieder in eine Matrix der Breite 320 und Höhe 240 konvertiert werden. Im Anschluss daran wird ein Phasen- und ein Amplitudenbild in dem gleichen Dateiformat wie die Messdaten gespeichert und auf dem Frontpanel ausgegeben.

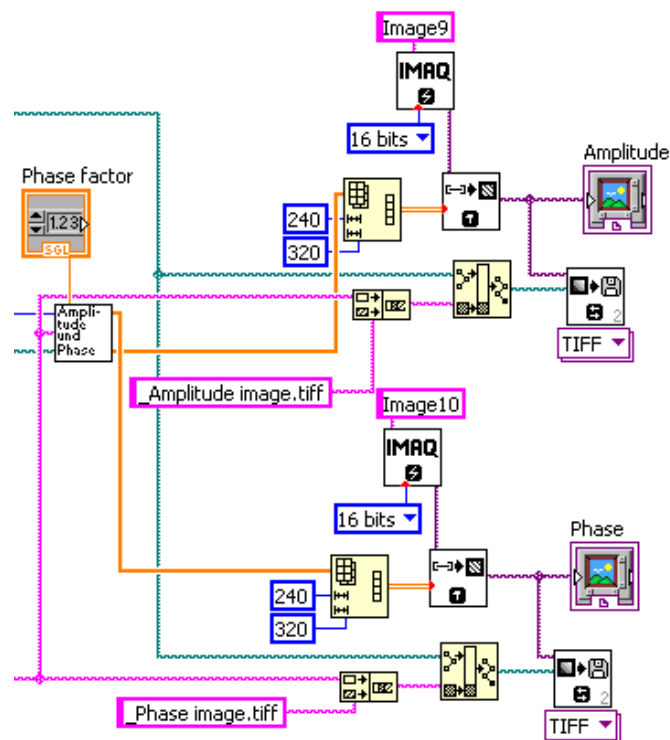


Abbildung 6.9: Blockdiagramm der Datenspeicherung

Dieser Vorgang ist in Abbildung 6.9 dargestellt.

Der String für die Benennung der Ergebnisse setzt sich aus den Konstanten „_Phase image.tiff“ bzw. „_Amplitude image.tiff“ und dem Namen der Messung zusammen.

6.5 Verarbeitungszeiten

Um die Grenzen dieses Prüfsystems zu analysieren, wird die maximale Bildfrequenz in LabVIEW ermittelt. Aus diesem Grund wird die Zeit gemessen, die für die Aufnahme und Abspeicherung eines Bildes notwendig ist.

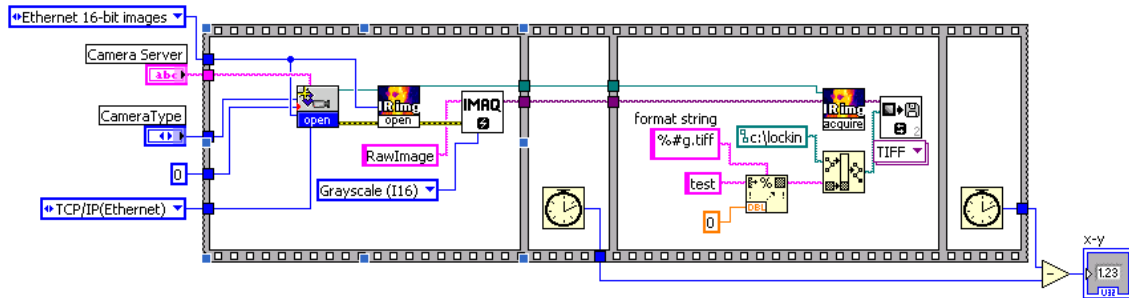


Abbildung 6.10: Messprogramm für das Einlesen eines Bildes

Abbildung 6.10 zeigt das Blockdiagramm des Messprogramms. Die Messung ergibt, dass die Verarbeitungszeiten bei verschiedenen Durchläufen eine große Varianz aufweist.

Versuch	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Verarbeitungszeit[ms]	106	614	395	28	342	515	421	504	447	31	765

Tabelle 6.1: Verarbeitungszeiten bei der Lock-in Thermographie

Die obige Tabelle zeigt, dass die Messung einen Wertebereich von 28 bis 765 ms umfasst. Daher wird empfohlen, dass eine maximale Anregungsfrequenz von 0,4 Hz nicht überschritten werden sollte. In diesem Frequenzbereich bleibt die Anregungsfrequenz stabil. Grund für die Varianz ist das Windows Betriebssystem und die Verbindung von Kamera und Laborrechner über das Ethernet. Diese beiden Kriterien garantieren keine Echtzeitverarbeitung. Eine Untersuchung der Verarbeitungszeit für das Abspeichern eines Bildes ergibt, dass diese im Bereich von 1 bis 2 ms liegen und damit vernachlässigbar klein sind.

In dieser Arbeit findet die Auswertung offline statt. Das bedeutet, dass sämtliche Messwerte auf der Festplatte gespeichert werden und im Anschluss an die Messung daraus die Amplituden- und Phasenbilder errechnet werden. Dies hat den Vorteil, dass alle Messdaten auch nach der Messung vorliegen und so die komplette Informationsfülle einer Messung zur Verfügung steht. Außerdem ist der Speicherbedarf für ein Bild mit 151 kb relativ gering, was die Systemressourcen nur minimal belastet.

Periodenanzahl	1	2	3	4	5	6	7	8	12
Verarbeitungszeit[ms]	13	18	22	25	29	33	37	39	56

Tabelle 6.2: Ermittlung der offline-Verarbeitungszeit

Die Verarbeitungszeiten der offline-Auswertung sind in der Tabelle 6.2 dargestellt. Diese Zeiten beinhalten die Mittelwertberechnung, die Ausgabe der Bilder auf dem Frontpanel und die Datensicherung. Die Verarbeitungszeiten sind vernachlässigbar klein gegenüber den in diesem System realisierbaren Anregungsfrequenzen. Die in dieser Arbeit ermittelten Verarbeitungszeiten wurden mit dem in Kapitel 2 beschriebenen Laborrechner bestimmt. Eine höhere Rechenleistung kann diese Zeiten noch verkürzen.

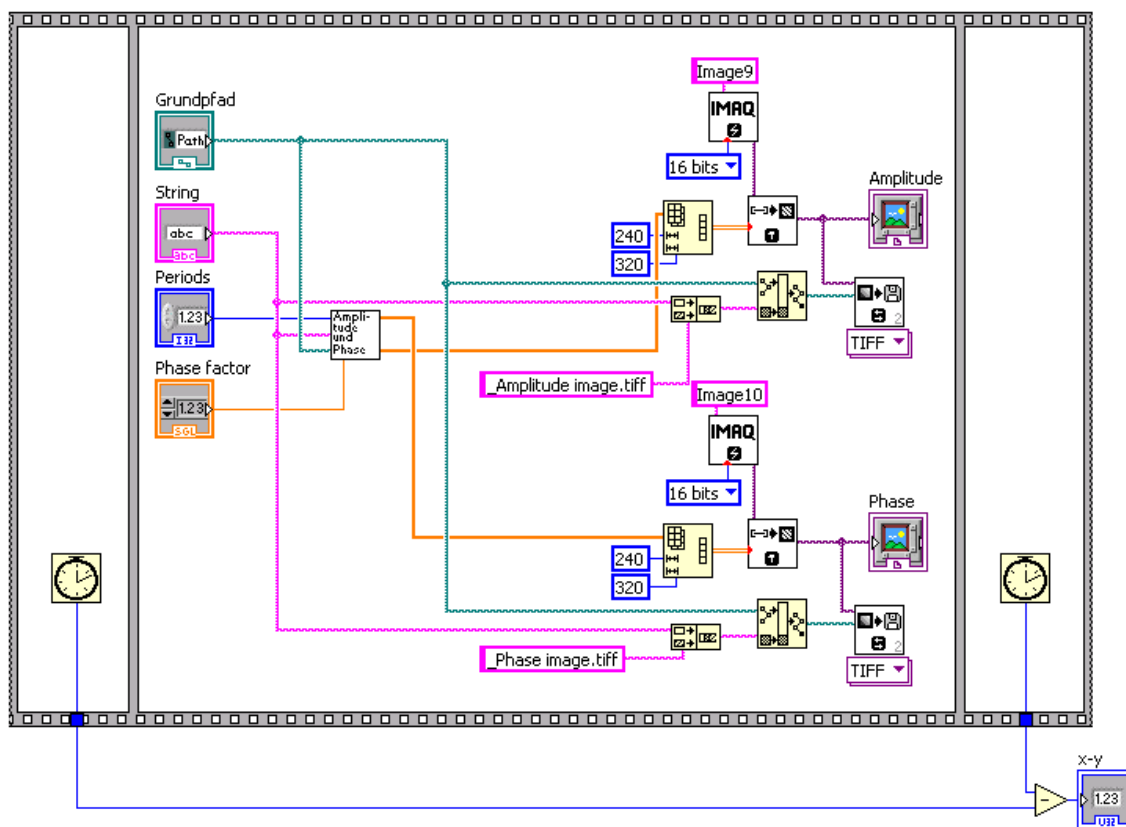


Abbildung 6.11: Messprogramm für die Verarbeitungszeiten

In Abbildung 6.11 ist das Blockdiagramm für die Ermittlung der offline-Verarbeitungszeit dargestellt.

6.6 Übersicht

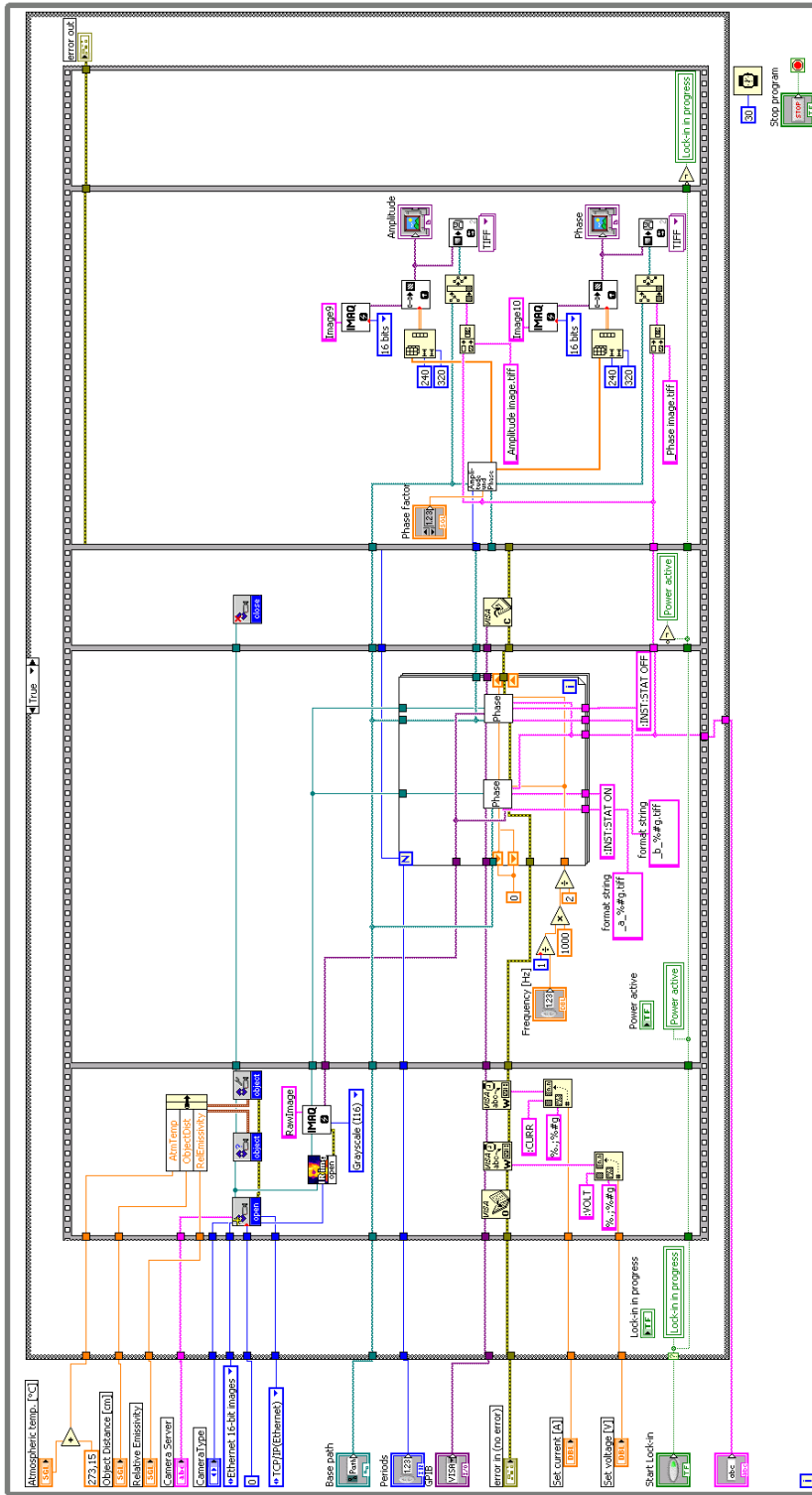


Abbildung 6.12: Blockdiagramm des Lock-in Thermographie Messplatzes

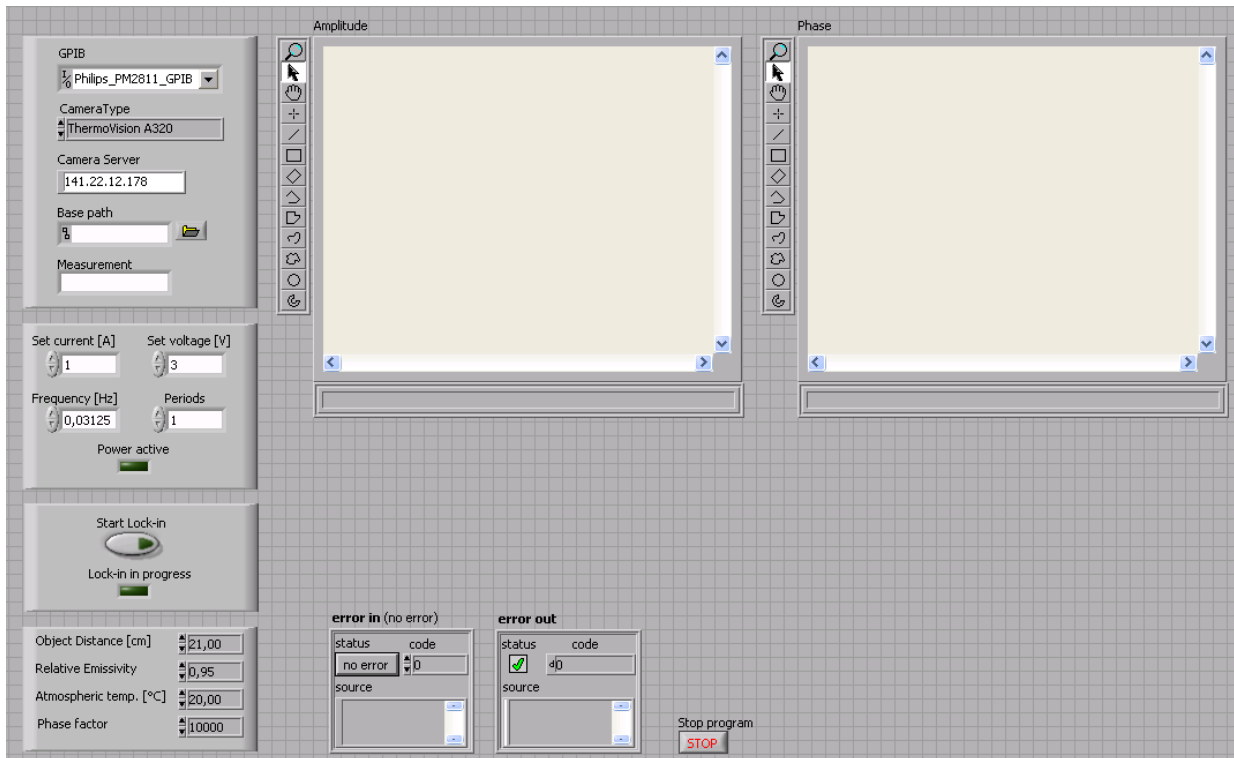


Abbildung 6.13: Frontpanel des Lock-in Thermographie Messplatzes

Abbildung 6.13 zeigt das Frontpanel des Lock-in Thermographie Messplatzes beim Programmstart. In dem linken Programmteil können vom Anwender sämtliche Parameter für eine Messung eingestellt werden. Auf den beiden Bildschirmen werden die Amplituden- und Phasenbilder angezeigt. In Abbildung 6.12 ist das zugehörige Blockdiagramm dargestellt.

Kapitel 7

Realisierung

In diesem Kapitel werden die Messergebnisse der statischen- und der Lock-in Thermographie analysiert. Im Anschluss daran wird ein Vergleich mit der in Abschnitt 3.2 vorgestellten Elektrolumineszenzmessung durchgeführt.

7.1 Messplatz

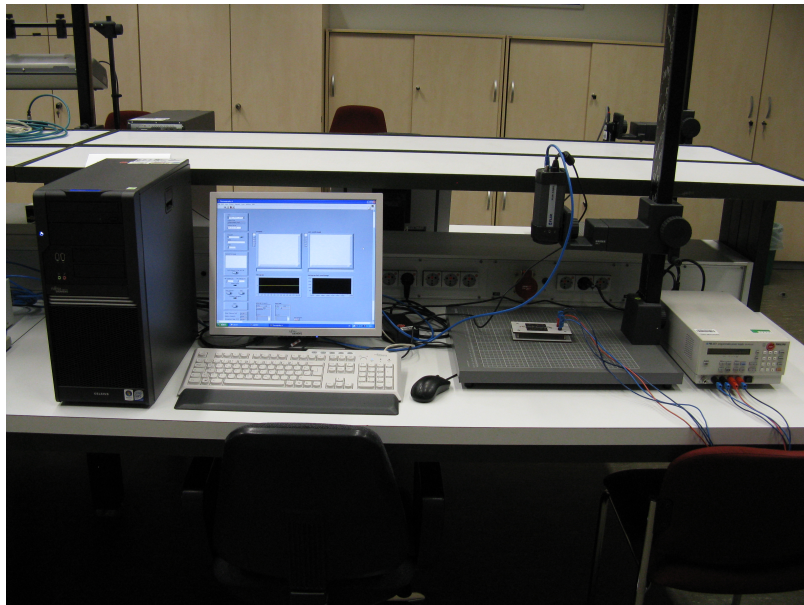


Abbildung 7.1: Messplatz

In Abbildung 7.1 ist der entwickelte Messplatz für alle folgenden Messungen dargestellt. Rechts im Bild ist das Philips PM2811 Netzteil angeordnet. Links daneben befindet sich das Stativ mit der Thermographiekamera und dem Prüfobjekt. Der Laborrechner ist in der linken Bildhälfte dargestellt.

7.2 Statische Thermographie

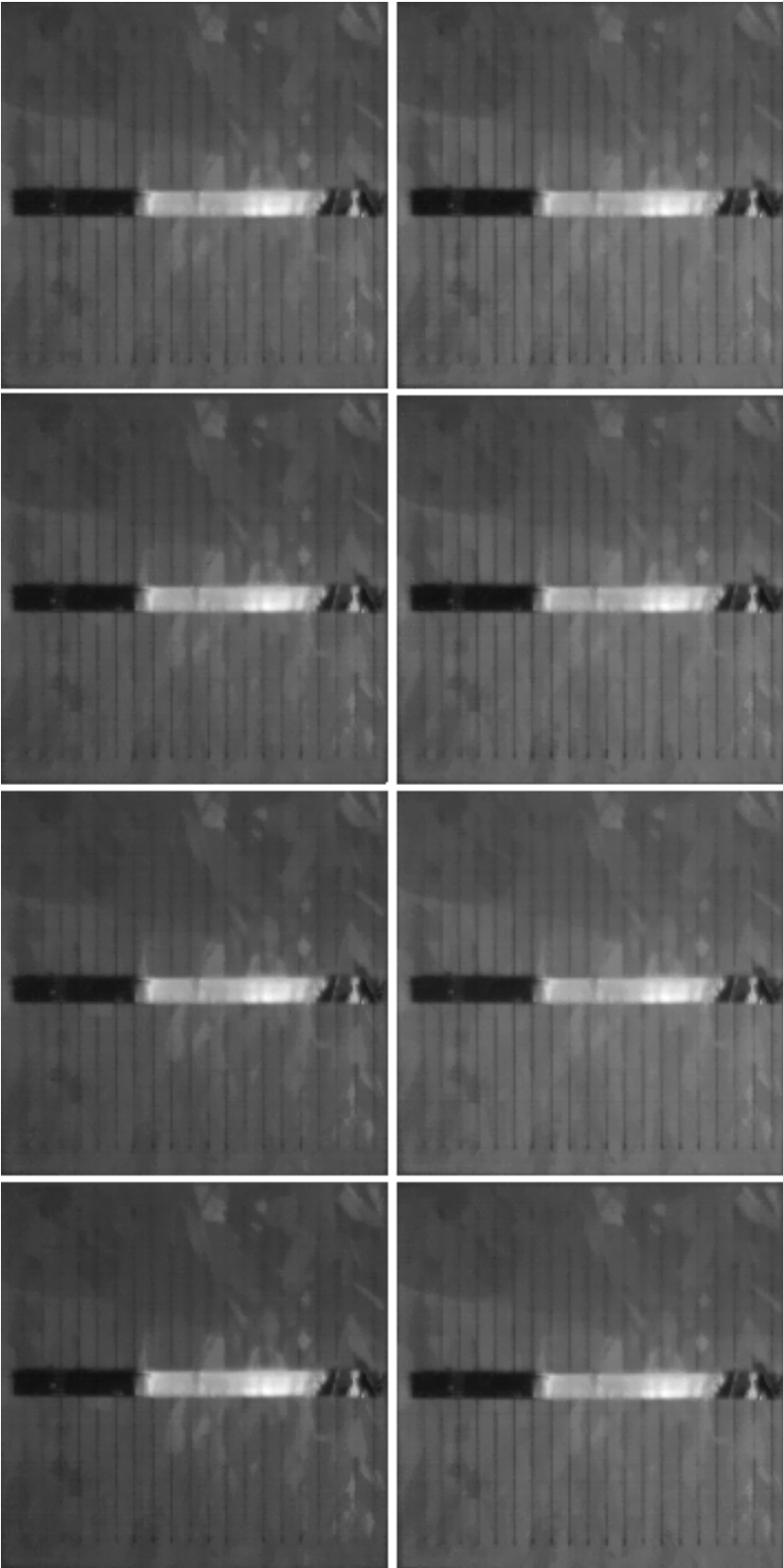


Abbildung 7.2: Messung der statischen Thermographie bei 1 Ampere Stromstärke

Abbildung 7.2 zeigt die thermische Veränderung einer Solarzelle. Die Messzeit beträgt 8 Sekunden bei einer Stromstärke von 1 Ampere. Der Zeitverlauf ist aufsteigend von oben links nach unten rechts.

Durch die thermische Anregung steigt die Temperatur in der Zelle mit der Zeit an. Die hier getestete Solarzelle weist einen Riss in der rechten Hälfte auf. Durch diesen Defekt kann sich die thermische Welle nicht frei ausbreiten. Defekte Bereiche werden durch den geringeren Amplitudenhub dunkler dargestellt. Die polykristalline Struktur der Solarzelle tritt deutlich hervor. Um einen detaillierten Überblick über die Leistungsfähigkeit der statischen Thermographie zu erhalten, wird eine Analyse der Bilddaten durchgeführt.

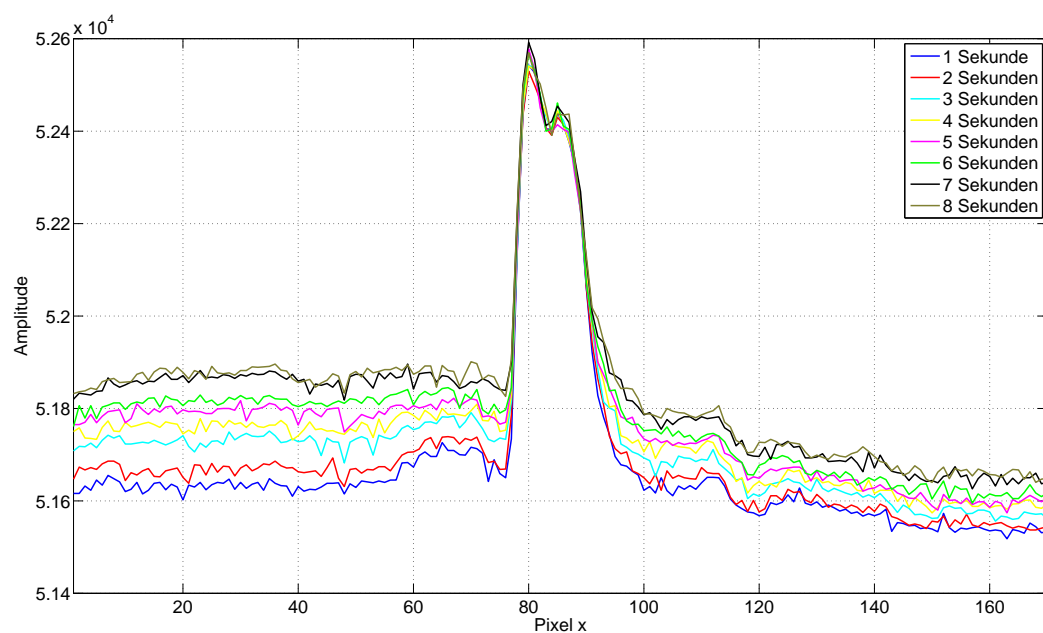


Abbildung 7.3: Amplitudenverlauf der 130. Zeile bei 1 Ampere Stromstärke

Abbildung 7.3 zeigt den Amplitudenverlauf am Beispiel der 130. Zeile. Hierbei sind die Kurvenverläufe der acht in Abbildung 7.2 zu sehenden Bilder dargestellt. Zwischen den Pixeln 75 und 90 befindet sich der Kontaktierungsstreifen der Solarzelle. Der Grund für die hohen Amplitudenwerte in diesem Bereich sind Reflexionen der von der Thermographiekamera selbst ausgestrahlten Wärme. Die Amplituden der Pixel 90 bis 170 sind quantitativ kleiner, da die Solarzelle einen Defekt aufweist. Mit zunehmenden Zeitverlauf steigt die Temperatur in der Solarzelle durch die thermische Anregung an und die Amplitudenverläufe weisen einen höheren Wertebereich auf. Um den Einfluss der Stromstärke auf die Messung zu untersuchen, wird eine weitere Messreihe mit 2 Ampere Stromstärke über 8 Sekunden aufgenommen.

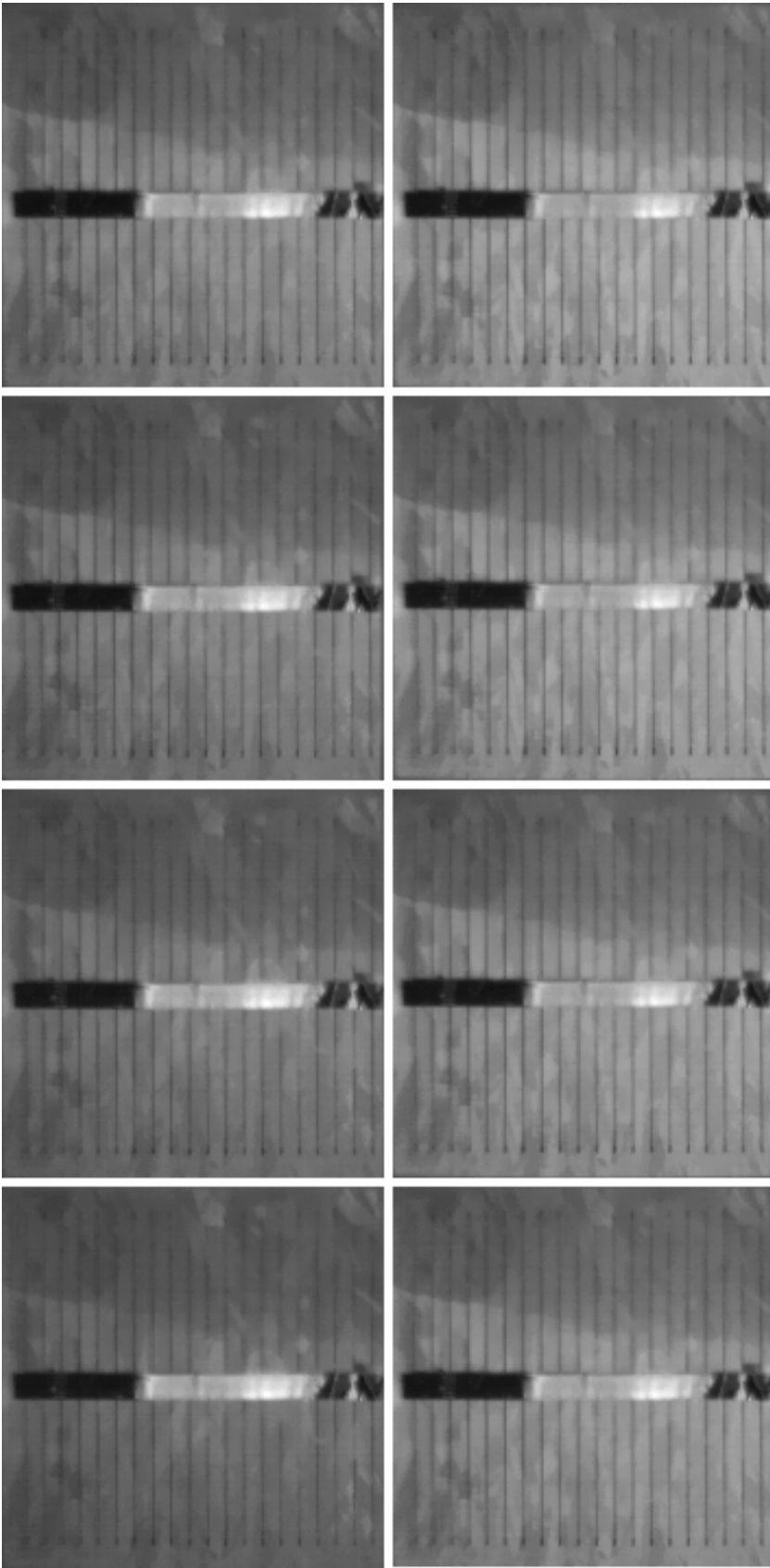


Abbildung 7.4: Messung der statischen Thermographie bei 2 Ampere Stromstärke

In Abbildung 7.4 wird das Ergebnis dieser Messung dargestellt. Aufgrund der höheren Stromstärke wird eine verstärkte thermische Veränderung in der Solarzelle sichtbar.

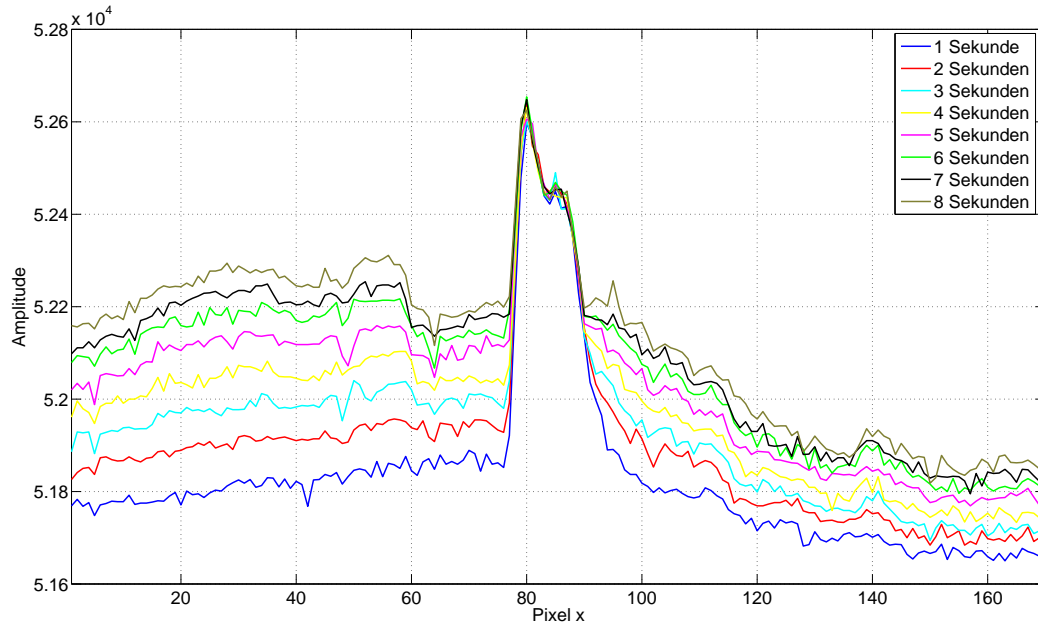


Abbildung 7.5: Amplitudenverlauf der 130. Zeile bei 2 Ampere Stromstärke

Die Kurvenverläufe in Abbildung 7.5 beziehen sich auf die 130. Zeile der Bilder. Durch die höhere Stromstärke wird die Solarzelle stärker thermisch angeregt. Dies hat zur Folge, dass der Amplitudenhub über dem der 1 Ampere Messung liegt. Die Differenz der Amplitudenwerte von dem intakten Teil der Zelle, zu der Fehlstelle im rechten Teil, ist deutlicher erkennbar.

Auch kleinere Defekte lassen sich durch die detaillierte Auswertung bestimmen. Zwischen dem 60. und dem 75. Pixel ist ein Defekt vorhanden, der erst nach etwa drei Sekunden nachweisbar ist. Nach acht Sekunden tritt dieser Defekt noch deutlicher hervor. In Abbildung 7.3 ist dieser Defekt durch die geringere thermische Anregung nicht detektierbar.

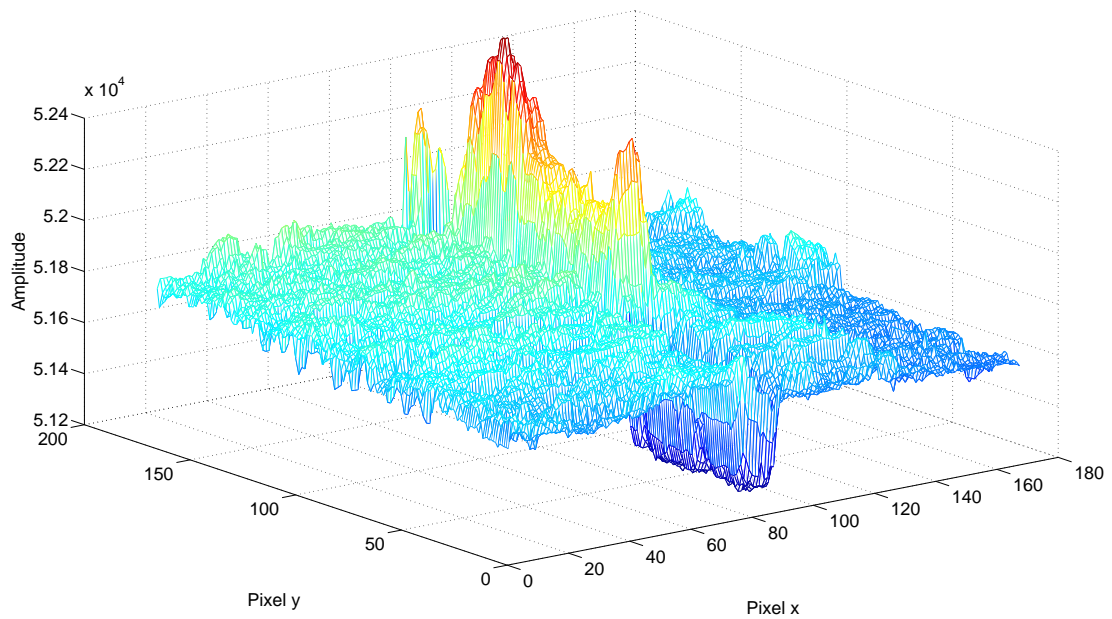


Abbildung 7.6: Amplitudenverlauf bei 2 Ampere Stromstärke

Das dreidimensionale Amplitudenbild der statischen Thermographie nach acht Sekunden ist in Abbildung 7.6 dargestellt. Auffällig hierbei ist die Kontaktierungsschiene auf der Solarzelle. Die Wärme der Kamera wird nicht gleichmäßig reflektiert. Grund hierfür sind kleine Winkelunterschiede innerhalb des Metalls.

Der Riss in der Solarzelle hebt sich von dem intakten Teil der Zelle durch Amplitudendifferenzen ab und kann so detektiert werden.

7.3 Lock-in Thermographie

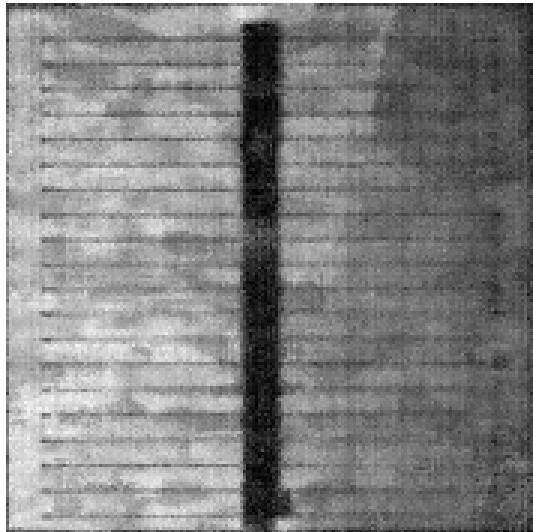


Abbildung 7.7: Amplitudenbild

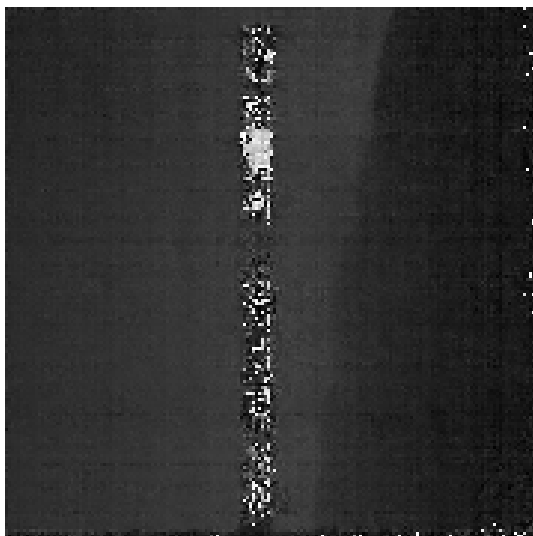


Abbildung 7.8: Phasenbild

In Abbildung 7.7 und 7.8 ist das Amplituden- und das Phasenbild einer Lock-in Messung zu sehen. Die Anregungsfrequenz beträgt 0,1 Hz und die Stromstärke 1 Ampere. Die Messzeit beträgt 40 Sekunden. Die Störungen auf der Kontaktierungsschiene im Amplitudenbild sind stark kompensiert worden. Die örtliche Auflösung wurde im Vergleich zur statischen Thermographie verbessert. Die polykristallinen Strukturen in der Solarzelle sind nicht sichtbar.

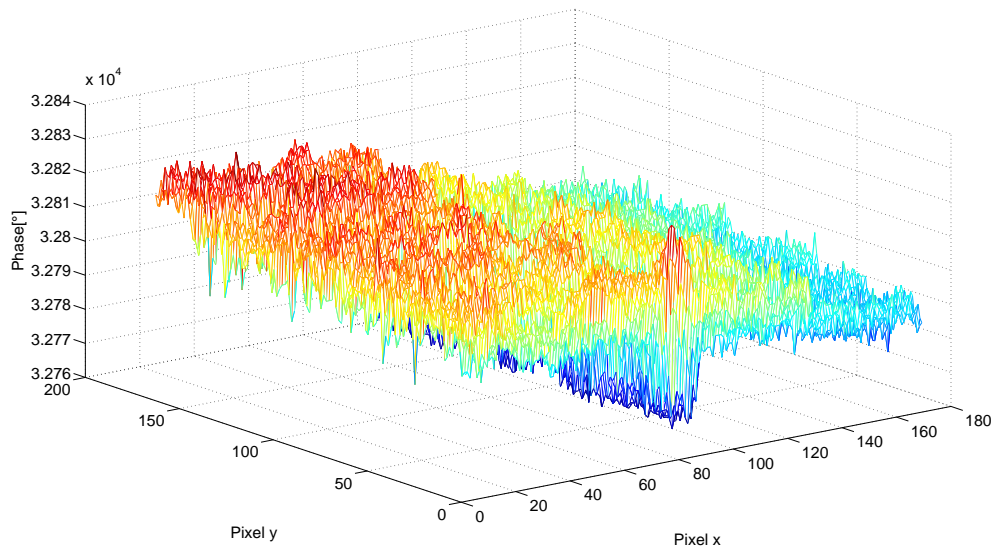


Abbildung 7.9: Amplitudenverlauf bei 01 Hz Anregungsfrequenz

In Abbildung 7.9 ist die dreidimensionale Darstellung des Amplitudenbildes zu sehen. Bei einem Vergleich mit der Darstellung 7.6 wird besonders deutlich, dass die Störgrößenunterdrückung zu einer deutlichen Verbesserung der Messergebnisse führt. Die Differenz zwischen den Amplitudenwerten im intakten Bereich der Zelle und denen im defekten Bereich ist angestiegen, obwohl der elektrische Strom für die thermische Anregung bei der Lock-in Messung nur halb so groß ist. Kleine Defekte können so leichter detektiert werden.

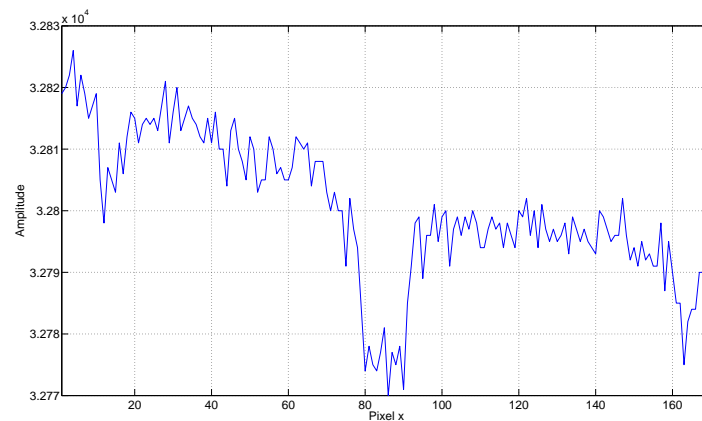


Abbildung 7.10: Amplitudenverlauf der 130. Zeile

In Abbildung 7.10 ist die 130. Zeile des Amplitudenbildes dargestellt. Neben dem Defekt bei Pixel 95 und 65, ist auch ein Defekt beim 10. Pixel in x-Richtung zu erkennen. Dieser ist bei einem Vergleich mit der statischen

Thermographie in Abbildung 7.5 nicht detektierbar. Das Phasenbild zeigt die Risskante innerhalb der Zelle noch deutlicher. Die Bilddaten auf der Kontaktierungsschiene sind auch hier für eine Interpretation ungeeignet, da nur ein Rauschen präsent ist.

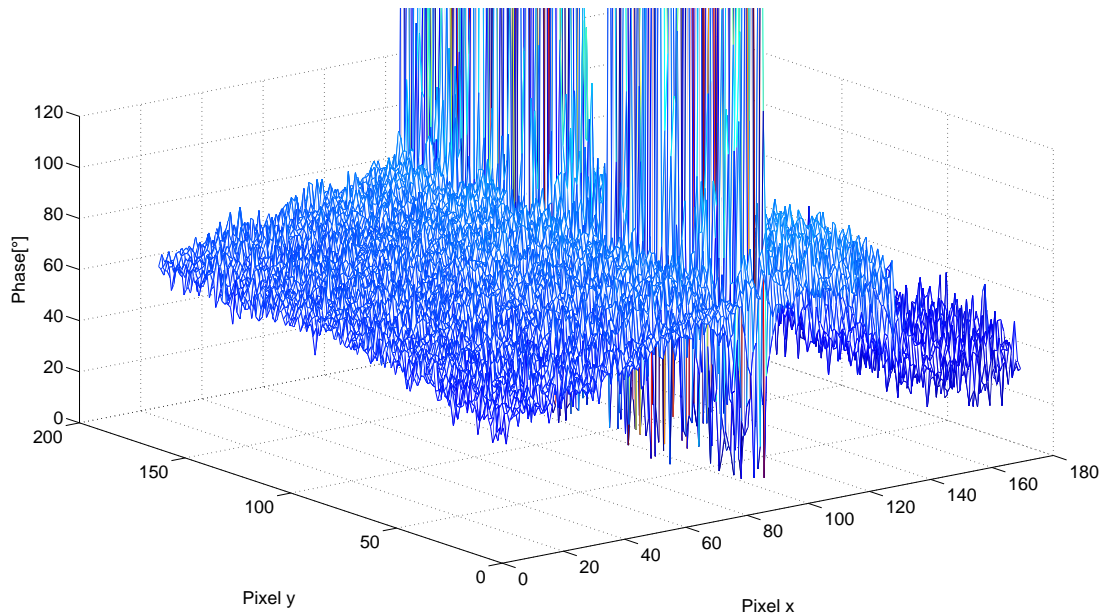


Abbildung 7.11: Phasenverlauf bei 01 Hz Anregungsfrequenz

In Abbildung 7.11 ist der dreidimensionale Phasenwinkelverlauf des Phasenbildes dargestellt.

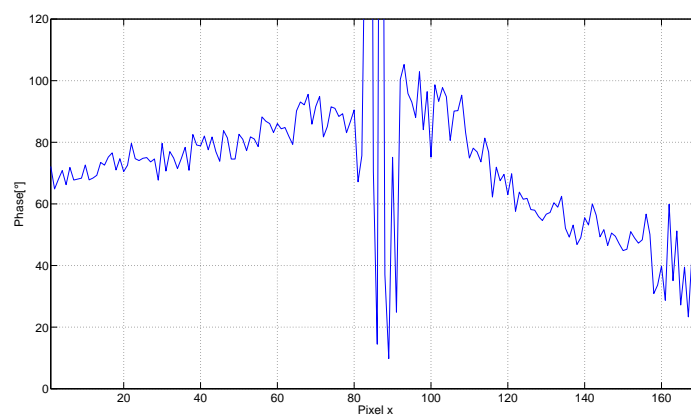


Abbildung 7.12: Phasenverlauf der 130. Zeile

Abbildung 7.12 zeigt den Phasenverlauf der 130. Zeile. Die Phase steigt in x-Richtung kontinuierlich von 60° bis 100° bis zu der Risskante am 95. Pixel an.

Hier findet eine Phasendrehung statt und die Phase sinkt auf 40° am Bildrand ab.

Um die Bildqualität in Abhängigkeit der Periodendurchläufe zu untersuchen, wird eine Messung bei 0,3 Hz Anregungsfrequenz und 1 Ampere Stromstärke aufgenommen. Die Messung wird über vier und zwölf Perioden durchgeführt.

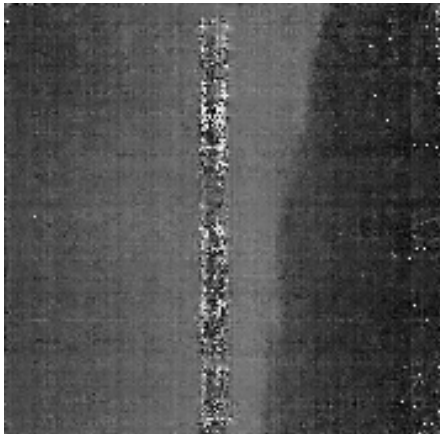


Abbildung 7.13: Phasenbild über 4 Perioden

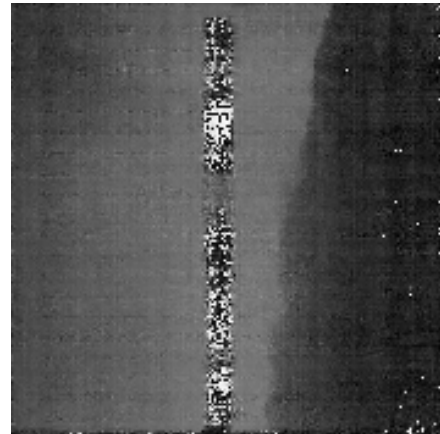


Abbildung 7.14: Phasenbild über 12 Perioden

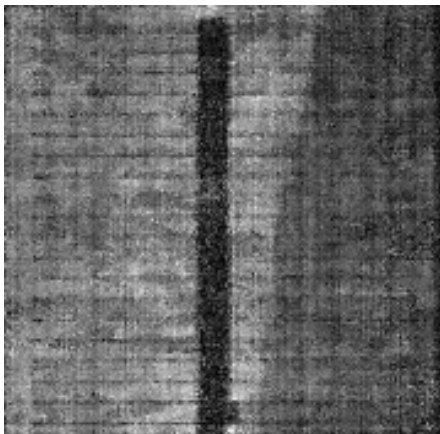


Abbildung 7.15: Amplitudenbild über 4 Perioden

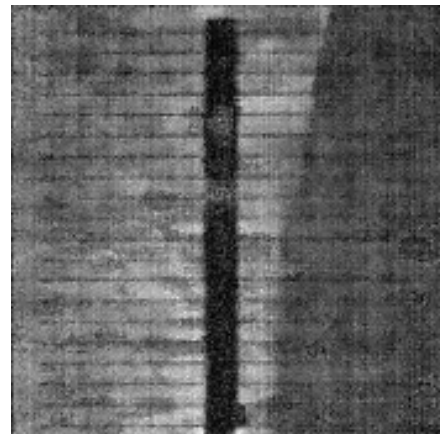


Abbildung 7.16: Amplitudenbild über 12 Perioden

Das Ergebnis ist in den Abbildung 7.13 bis 7.16 dargestellt. Die Ortsauflösung wird durch die längere Messzeit verbessert. Kleine Störungen, die nach vier Perioden noch vorhanden sind, werden nach zwölf Perioden teilweise kompensiert. Der Rauschanteil sinkt bei steigender Messzeit. Nachteil der höheren Periodendurchläufe ist die ansteigende Messzeit.

Die Quantität der thermischen Anregung ist von entscheidender Bedeutung. Aus diesem Grund wird eine Messung bei 0,1 Hz Anregungsfrequenz und über vier Perioden aufgenommen. Die Messung wird bei 1 und 2 Ampere Stromstärke durchgeführt.

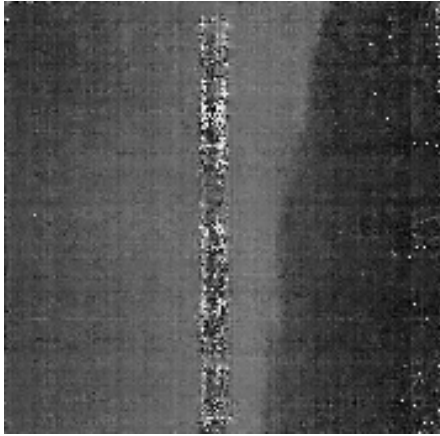


Abbildung 7.17: Phasenbild bei 1 Ampere Stromstärke

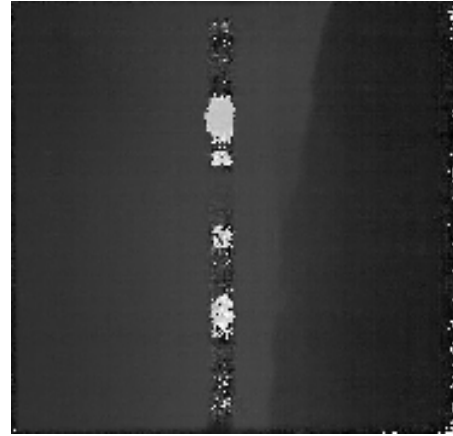


Abbildung 7.18: Phasenbild bei 2 Ampere Stromstärke

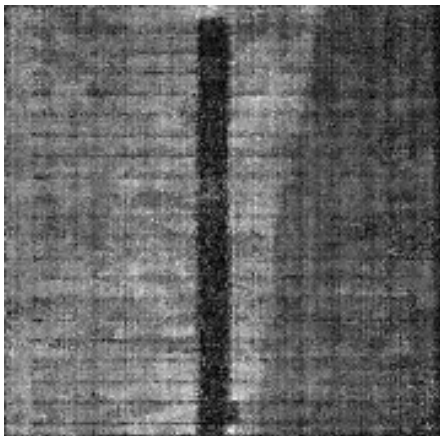


Abbildung 7.19: Amplitudenbild bei 1 Ampere Stromstärke

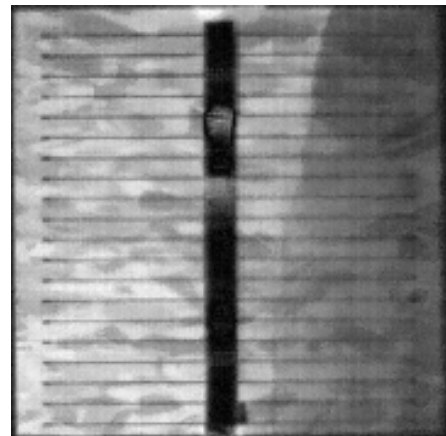


Abbildung 7.20: Amplitudenbild bei 2 Ampere Stromstärke

Das Ergebnis der beiden Messungen ist in den Abbildung 7.17 bis 7.20 zu sehen. Die Qualität der Messergebnisse wird mit einer höheren Bestromung gesteigert. Die Bilder sind insgesamt weniger verrauscht und weisen einen höheren Kontrast auf. Die Kristallstruktur der polykristallinen Solarzelle treten bei einer höheren Bestromung deutlich hervor. Dies hat den Nachteil, dass kleinere Fehlstellen schwieriger zu detektieren sind. Die verstärkte thermische Anregung führt auch zu einer größeren thermischen Belastung für das Prüfobjekt.

7.4 Vergleich mit dem Elektrolumineszenzverfahren

Für einen Vergleich der Elektrolumineszenzmessung mit den beiden Thermographie Methoden werden drei Messungen durchgeführt.

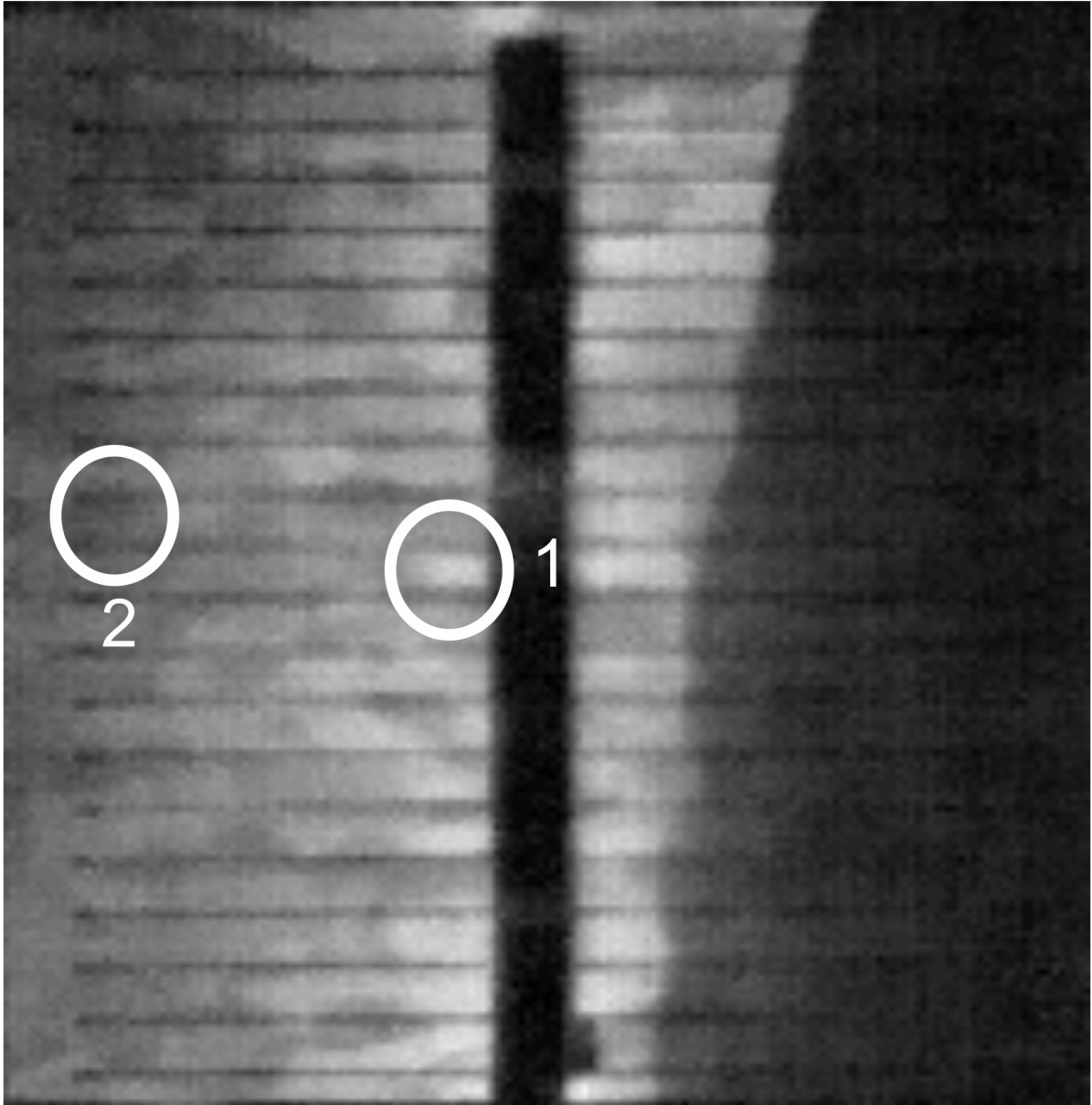


Abbildung 7.21: Amplitudenbild der Lock-in Thermographie

In Abbildung 7.21 ist das Amplitudenbild der Lock-in Methode dargestellt. Die Anregungsfrequenz beträgt 0,3 Hz. Die Stromstärke wird auf 1 Ampere festgelegt und die Messzeit beträgt 160 Sekunden. Hierbei sind zwei Fehlstellen in weiß gekennzeichnet. Bei Nummer eins handelt es sich um einen Kontaktierungsfehler und bei Nummer zwei um einen Haarriss.

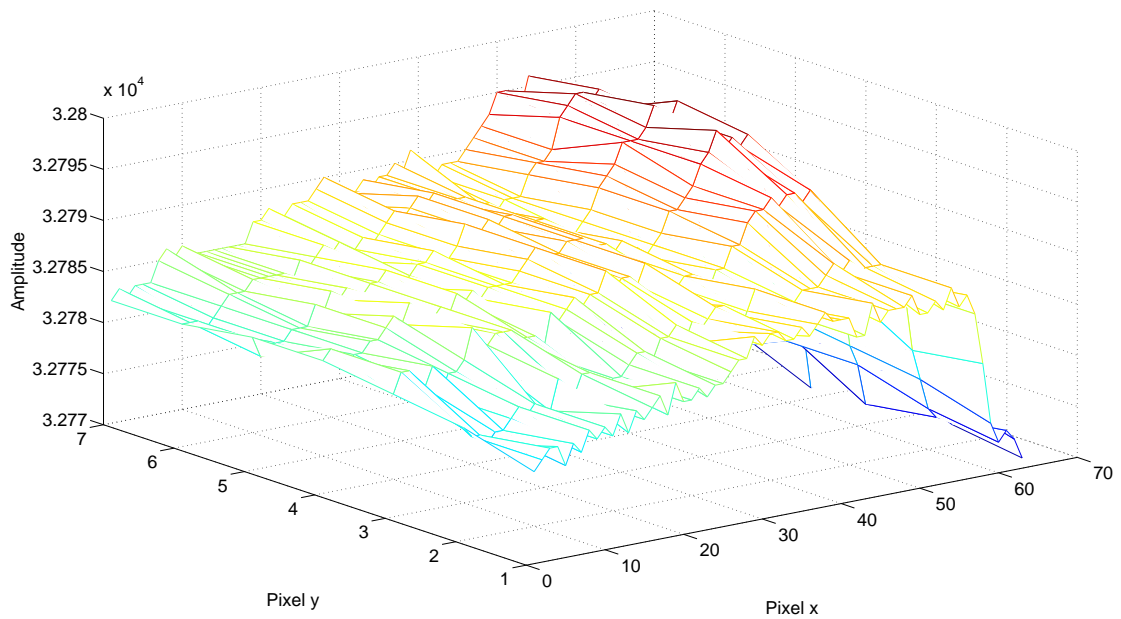


Abbildung 7.22: Amplitudenverlauf der Lock-in Thermographie-Messung

Die dreidimensionale Darstellung des Amplitudenverlaufs im Bereich des Kontaktierungsfehlers ist in Abbildung 7.22 dargestellt. Aufgrund der fehlerhaften Kontaktierung kann sich die thermische Welle an dieser Stelle nicht ungehindert ausbreiten. Dies führt zu einem Anstieg der Temperatur in diesem Bereich. Der Amplitudenhub im fehlerhaften Bereich zeichnet sich deutlich von seiner Umgebung ab.

Für die statische Thermographie wird die Stromstärke auf 1 Ampere eingestellt. Die Bildaufnahme erfolgt vier Sekunden nach Beginn der thermischen Anregung.

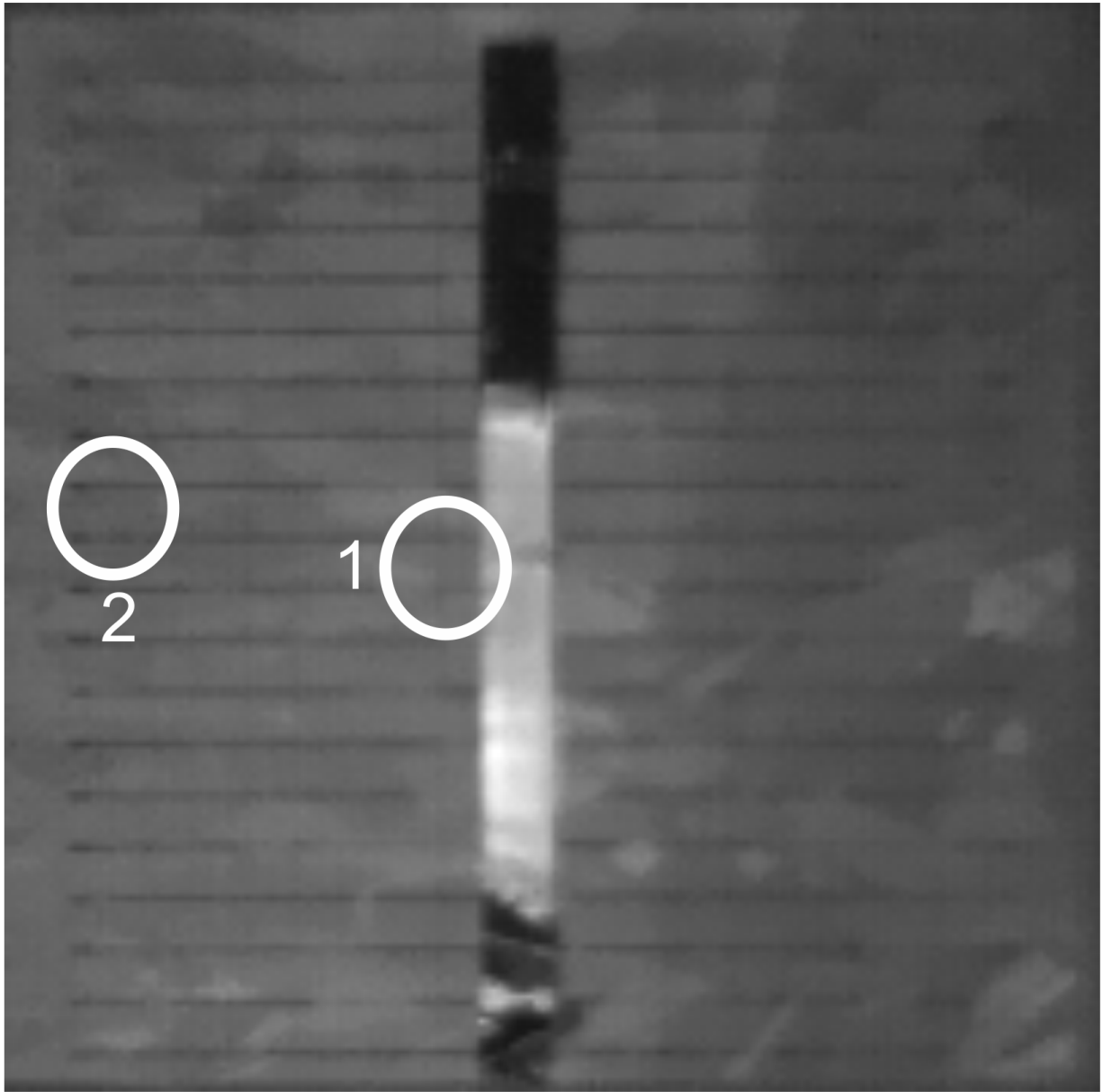


Abbildung 7.23: Statische Thermographie

Das Ergebnis dieser Messung ist in Abbildung 7.23 dargestellt. Die bei der Lock-in Messung detektierten Fehlstellen sind in dem Bild weiß markiert. Die Messergebnisse lassen an den markierten Stellen weder auf einen Kontaktierungsfehler, noch auf einen Haarriss schließen.

Für eine Messung mit dem Elektrolumineszenzverfahren wird das Prüfobjekt mit einem Strom von 1 Ampere beaufschlagt. Die Integrationszeit der Kamera beträgt 4 Sekunden.

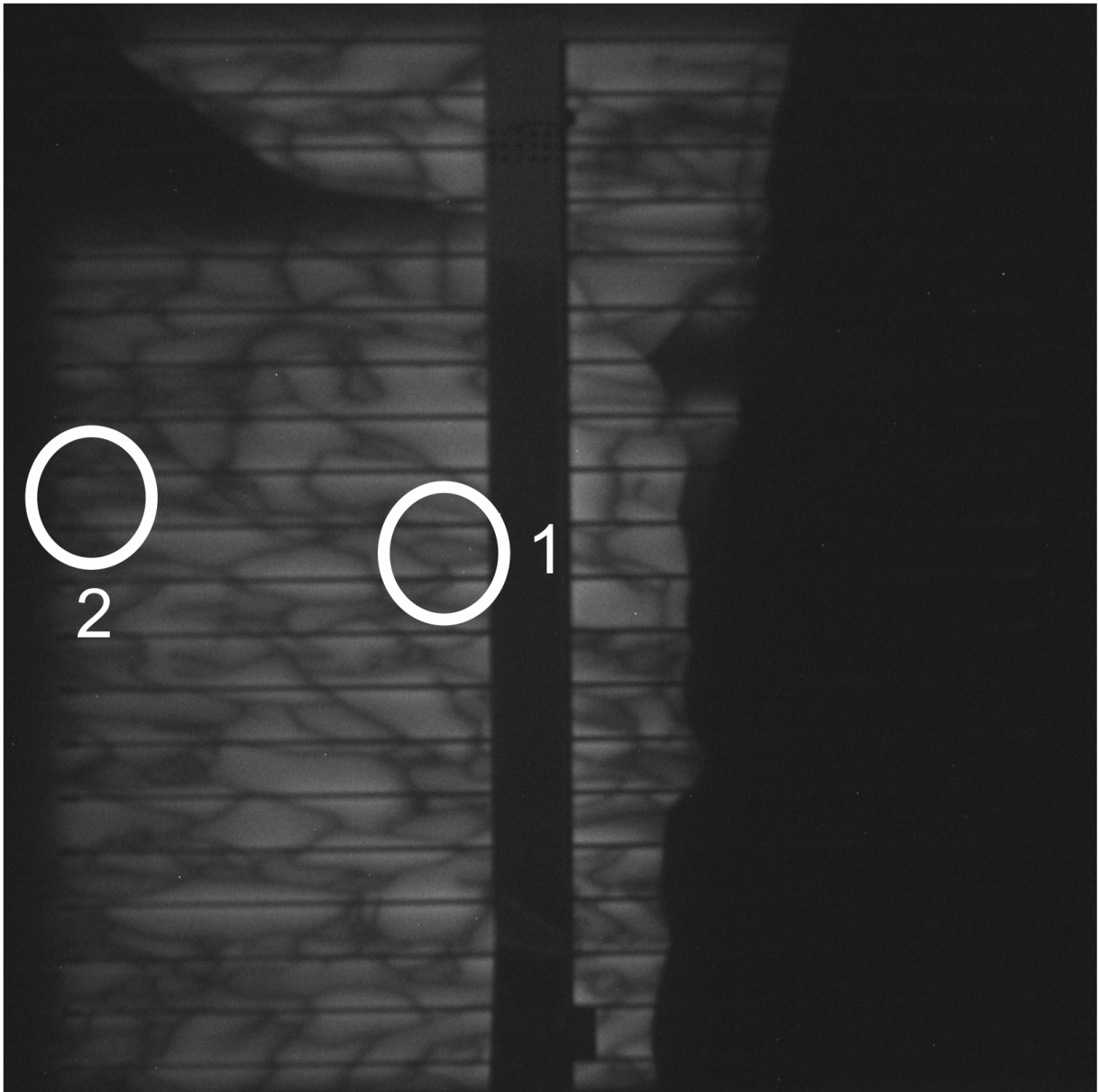


Abbildung 7.24: Elektrolumineszenzmessung

Abbildung 7.24 zeigt das Messergebnis der Elektrolumineszenzmessung. Die Kristallstrukturen der polykristallinen Solarzelle treten bei der Aufnahme deutlich hervor. Der Kontrast im Bild ist sehr hoch. Der große Riss in der rechten Bildhälfte ist klar zu erkennen. Ebenfalls ein Fehler in der oberen linken Bildhälfte. Die beiden gekennzeichneten Fehler lassen sich nicht von den Kristallstrukturen unterscheiden.

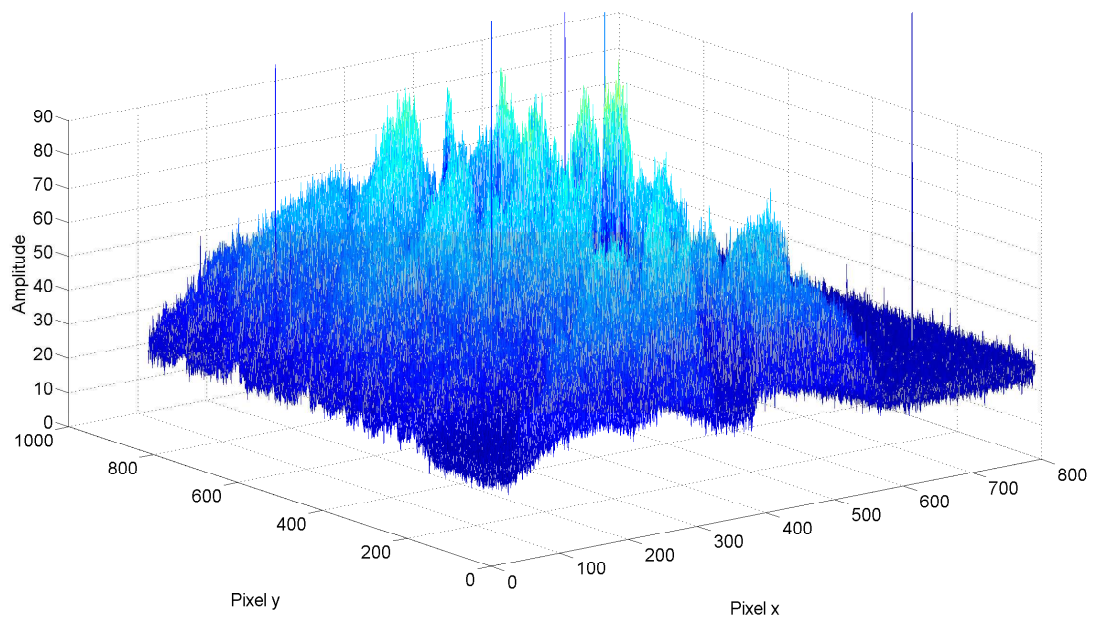


Abbildung 7.25: Amplitudenverlauf der Elektrolumineszenzmessung

Um diesen Effekt bei der Elektrolumineszenzmessung noch zu verdeutlichen, ist in Abbildung 7.25 die dreidimensionale Darstellung der Messung abgebildet. Da die für die Elektrolumineszenzmessung verwendete Kamera 8 Bit Bilder liefert, liegt der Wertebereich für die Bilddaten bei 256 Grauwerten. Die Kristallstrukturen des Siliziums treten durch ellipsenförmigen Erhöhungen deutlich hervor, was die Detektion von kleinen Fehlstellen an den Rändern erschwert.

Die statische Thermographie erlaubt bei einem geringen Anspruch an das Testsystem größere Fehlstellen zu detektieren. Aufgrund der begrenzten örtlichen Auflösung sind kleine Defekte, wie Haarrisse und Kontaktierungsfehler nicht zu erkennen. Die Elektrolumineszenzmessung liefert sehr kontrastreiche Bilder bei einer vergleichsweise kurzen Messzeit. Die deutlich erkennbaren Kristallstrukturen verhindern die Detektion von kleinen Fehlern.

Mit der Lock-in Thermographie ist es möglich, auch kleine Fehlstellen zuverlässig zu detektieren. Grund hierfür ist die verbesserte örtliche Auflösung. Nachteil gegenüber dem Elektrolumineszenzverfahren ist die lange Messzeit.

Kapitel 8

Zusammenfassung

Aufgabe der Bachelorthesis war die Entwicklung einer automatisierten Solarzellenprüfung unter Einsatz einer Thermographiekamera. Hierfür wurden zunächst die zur Verfügung stehenden Mittel im Detail erläutert. Auf Basis dieser Daten wurde eine Analyse der Anforderungen an das System durchgeführt. Bei der Konzeption des Messplatzes wurden die drei Alternativen statische Thermographie, Lock-in Thermographie und induktiv angeregte Thermographie detailliert vorgestellt. Da ein Messplatz für die induktiv angeregte Thermographie mit den zur Verfügung stehenden Mitteln nicht zu realisieren war, wurden die beiden anderen Methoden für die Entwicklung ausgewählt. Die Entwicklung der beiden Prüfmethode in LabVIEW für einen automatischen Prüfprozess wurden detailliert erläutert.

Im Anschluss daran wurde eine Reihe von Messungen durchgeführt und die Ergebnisse analysiert.

Die Messungen ergeben, dass die statische Thermographie primär für großflächige und oberflächliche Defekte einsetzbar ist. Aufgrund der nicht variablen Tiefenreichweite der thermischen Anregung und der mangelnden Störgrößenunterdrückung sind dem System eindeutige Grenzen gesetzt.

Die Lock-in Thermographie kompensiert diese Schwächen und ermöglicht eine deutlich verbesserte Ortsauflösung. Als Nachteil dieses Prüfsystems ist die relativ lange Messzeit zu nennen. Dies hat den Grund, dass die maximale Anregungsfrequenz von 0,4 Hz keine Messzeiten unter einer Sekunde ermöglicht. Außerdem ist eine Messung über mehrere Perioden sinnvoll, um so Störungen zu minimieren, was die Messzeit verlängert.

Bei einem Vergleich mit der Elektrolumineszenzmessung wird besonders deutlich, dass die Lock-in Thermographie durch die variable Tiefenreichweite und der verbesserten Ortsauflösung einen Vorteil bietet.

Für eine Weiterentwicklung dieses Prüfsystems sollte primär das Problem der unkonstanten Verarbeitungszeit bei der Bilderfassung gelöst werden. Diese verhindert es, höhere Anregungsfrequenzen zu realisieren. Eine Lösung dieses Problems würde die Messzeit verkürzen. Der Zugriffsfehler, der in unabhängigen Zeitabständen auftritt, stellt ebenfalls ein ungelöstes Problem dar. Eine Erweiterung des Messplatzes, die eine konstante Umgebungs- und Objekttemperatur garantiert, würde die Fehleranfälligkeit der Messung minimieren.

Literaturverzeichnis

- [1] <http://www.teamworkphoto.com/images/misc/kaiserrrs1.jpg>
- [2] AIA: *GigE Vision - True Plug and Play Connectivity*. Machine Vision Line, Stand 15.05.2010
- [3] ARNDT, Ralf: *Rechteckimpuls-Thermografie im Frequenzbereich*. TU Berlin, 2007
- [4] BAUER, Norbert: *Handbuch der Industriellen Bildverarbeitung*. Fraunhofer IRB Verlag, Stuttgart, 2008
- [5] BREITENSTEIN: *Infrarotmesstechniken für Solarzellen und Solarmaterialien*
- [6] BREITENSTEIN, O.: *Lock-in Thermography*. Springer Verlag, 2003
- [7] BSW: *Statistische Zahlen der deutschen Solarstrombranche (Photovoltaik), 2009*
- [8] BSW: *Statistische Zahlen der deutschen Solarstrombranche (Photovoltaik), Stand August 2008*
- [9] CARL, V.: *Automatische Rissprüfung mit induktiv angeregter Thermografie*. DGZfP-Berichtsband 94-CD, 2005
- [10] FLIR: *Users Manual Flir A320*. Flir, 2008
- [11] FLUKE: *Users Manual PM2811*. Fluke, 1997
- [12] G. BUSSE, D. W.: *Lockin-Thermographie in der zerstörungsfreien Werkstoffprüfung*. Universität Stuttgart, 2008
- [13] GEORGI, Wolfgang: *Einführung in Labview*. HANSER, 2009
- [14] GLINZ, Prof. Dr. M.: *Funktionsmodellierung II: Datenflussmodelle*. Universität Zürich, Stand 15.05.2010

- [15] KÄS, Martin: *Thermographiemessungen an Solarzellen*. Universität Konstanz, 2003
- [16] NI: *GPIB Controller for Hi-Speed USB, Stand 15.05.2010*
- [17] RIEGERT, Gernot: *Induktions-Lockin-Thermografie - ein neues Verfahren zur zerstörungsfreien Prüfung*. Universität Stuttgart, 2007

Anhang

Anhang A1: LabVIEW Programm der statischen Thermographie

Anhang A2: LabVIEW Programm der Lock-in Thermographie

Anhang A3: LabVIEW Programme für die Verarbeitungszeiten

Anhang A4: LabVIEW Beispielprogramm

Anhang A5: LabVIEW Beispielprogramm VISA

Alle Anhänge befinden sich auf der beigelegten CD unter CD:/Anhang.

Versicherung über die Selbständigkeit

Hiermit versichere ich, dass ich die vorliegende Arbeit im Sinne der Prüfungsordnung nach §16(5) ohne fremde Hilfe selbständig verfasst und nur die angegebenen Hilfsmittel benutzt habe. Wörtlich oder dem Sinn nach aus anderen Werken entnommene Stellen habe ich unter Angabe der Quellen kenntlich gemacht.

Ort, Datum

Unterschrift

