

# Thermografische Rissdetektion auf glühendem Draht während des Walzprozesses mit Hinblick auf Ausschussreduzierung

B. Oswald-Tranta

Berichte aus Energie- und Umweltforschung

4/2012

## **Impressum:**

Eigentümer, Herausgeber und Medieninhaber:  
Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie  
Radetzkystraße 2, 1030 Wien

Verantwortung und Koordination:  
Abteilung für Energie- und Umwelttechnologien  
Leiter: DI Michael Paula

Liste sowie Downloadmöglichkeit aller Berichte dieser Reihe unter  
<http://www.nachhaltigwirtschaften.at>

# Thermografische Rissdetektion auf glühendem Draht während des Walzprozesses mit Hinblick auf Ausschussreduzierung

Dr. Oswald-Tranta Beata, Prof. O'Leary Paul, Brebric  
Carmen, DI Wally Gernot, Sorger Mario, Pura Andre  
Lehrstuhl für Automation, Montanuniversität Leoben

Dr. Schützenhöfer Wolfgang, Dr. Zleppnig Walter  
Boehler Edelstahl GmbH & Co KG

Dr. Ofner Ronald  
Hot Vision Research GmbH

Dr. Reisinger Johann, Dr. Tratnig Mark  
vatron gmbh

Leoben, Juli 2010

**Ein Projektbericht im Rahmen der Programmlinie**



Impulsprogramm Nachhaltig Wirtschaften

Im Auftrag des Bundesministeriums für Verkehr, Innovation und Technologie



## Vorwort

Der vorliegende Bericht dokumentiert die Ergebnisse eines Projekts aus der Programmlinie FABRIK DER ZUKUNFT. Sie wurde im Jahr 2000 vom Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie im Rahmen des Impulsprogramms Nachhaltig Wirtschaften als mehrjährige Forschungs- und Technologieinitiative gestartet. Mit der Programmlinie FABRIK DER ZUKUNFT sollen durch Forschung und Technologieentwicklung innovative Technologiesprünge mit hohem Marktpotential initiiert und realisiert werden.

Dank des überdurchschnittlichen Engagements und der großen Kooperationsbereitschaft der beteiligten Forschungseinrichtungen und Betriebe konnten bereits richtungsweisende und auch international anerkannte Ergebnisse erzielt werden. Die Qualität der erarbeiteten Ergebnisse liegt über den hohen Erwartungen und ist eine gute Grundlage für erfolgreiche Umsetzungsstrategien. Anfragen bezüglich internationaler Kooperationen bestätigen die in FABRIK DER ZUKUNFT verfolgte Strategie.

Ein wichtiges Anliegen des Programms ist es, die Projektergebnisse – seien es Grundlagenarbeiten, Konzepte oder Technologieentwicklungen – erfolgreich umzusetzen und zu verbreiten. Dies soll nach Möglichkeit durch konkrete Demonstrationsprojekte unterstützt werden. Deshalb ist es auch ein spezielles Anliegen die aktuellen Ergebnisse der interessierten Fachöffentlichkeit zugänglich zu machen, was durch die Homepage [www.FABRIKderZukunft.at](http://www.FABRIKderZukunft.at) und die Schriftenreihe gewährleistet wird.

Dipl. Ing. Michael Paula  
Leiter der Abt. Energie- und Umwelttechnologien  
Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie



## Inhaltsverzeichnis

1.	Kurzfassung.....	5
2.	Abstract.....	6
3.	Einleitung.....	7
3.1.	Motivation des Projektes.....	8
3.2.	Zielsetzungen des Projektes.....	9
3.3.	Aufbau des Endberichts.....	9
4.	Hintergrundinformation zum Projektinhalt.....	9
4.1.	Stand der Technik.....	9
4.2.	Innovationsinhalt.....	10
5.	Ergebnisse des Projektes.....	12
5.1.1.	Modellrechnungen und Finite Element Simulationen (AP1).....	12
5.1.2.	Berechnungen der optimalen Kameraeigenschaften (AP2).....	19
5.1.3.	Thermografische Laboruntersuchungen (AP3).....	26
5.1.4.	Bildverarbeitung (AP4).....	30
5.1.5.	Testmessungen in Industrieumgebung (AP5).....	32
6.	Detailangaben in Bezug auf die Ziele der Programmlinie.....	36
7.	Schlussfolgerungen zu den Projektergebnissen.....	38
8.	Ausblick und Empfehlungen.....	40
9.	Literaturverzeichnis.....	41
10.	Abbildungsverzeichnis.....	42
11.	Tabellenverzeichnis.....	44



# 1. Kurzfassung

Während des Walzprozesses können Überwalzungen entstehen, die eine Art von Oberflächenrissen sind. Wenn die Tiefe des Risses einen vorgeschriebenen Grenzwert überschreitet, führt es zum Ausschuss der gesamten gewalzten Drahtrolle. Dies bedeutet sehr hohe Produktionsverluste von Materialien und von Energie. Überwalzungen entstehen durch falsche Einstellungen der Walzrollen und können durch Korrekturen vermieden werden. Um die Ursachen des Fehlers möglichst schnell beheben zu können, müssen die Risse möglichst früh während der Produktion, noch in der Walzstrasse am glühenden Draht, detektiert werden. Dies verlangt eine zerstörungsfreie, voll automatisierbare Inline Prüfung bei einer Temperatur von 800-1100°C und bei Durchlaufgeschwindigkeiten von 30-40 m/s. Im Rahmen dieses Projektes wurde eine thermografische Prüfmethode untersucht, wobei zunächst eine zusätzliche Erwärmung bzw. Abkühlung in den Walzdraht eingebracht wurde. Um einen Riss herum entsteht eine inhomogene Temperaturverteilung, die mit Hilfe einer Infrarotkamera aufgenommen wurde. Die Erwärmung wird durch eine induktive Heizung erreicht, wobei der Draht durch die Induktionsspule geführt wird. Im ersten Teil des Projektes wurden Messungen im Laboratorium durchgeführt. Bei diesen Messungen wurde der Draht zuerst auf eine Temperatur von 800-1100°C aufgewärmt und die zusätzliche Erwärmung bzw. Luftabkühlung angewandt. Es wurden verschiedene Materialien (Stahlsorten, Titanlegierungen, usw.) untersucht und ihre Aufwärm- und Abkühlverhalten verglichen. Analytische Modellrechnungen und Finite Elemente Simulationen wurden durchgeführt, um einerseits die Temperaturverteilung für verschiedene Materialparameter, Rissformen und -tiefen zu berechnen, andererseits um das Verhalten des Drahtes bei hohen Materialdurchlaufgeschwindigkeiten zu modellieren. Nach erfolgreichem Abschluss der Laboruntersuchungen und der Simulationen wurden Messungen an der Walzstrasse bei einem der Projektpartner durchgeführt. Bei glühender Drahtoberfläche reicht die Intensität der abgestrahlten Energie aus, um Kameras im sichtbaren Bereich einzusetzen. Solche Kameras sind viel günstiger als Infrarotkameras. Im Rahmen des Projektes wurde untersucht, ob für diese Anwendung eine genügend genaue und reproduzierbare Temperaturkalibration für eine Kamera im sichtbaren Bereich durchführbar ist. Die Bildverarbeitung ist ein wesentlicher Teil einer automatisierten optischen Prüfung. Der Computer muss die aufgenommenen Bilder analysieren, eventuelle Fehler finden und automatisch eine Entscheidung treffen. Diese Auswertung in Echtzeit durchzuführen, stellt eine zusätzliche Herausforderung dar. Wegen der hohen Durchlaufgeschwindigkeit des Materials sind eine sehr hohe Aufnahme Frequenz und eine sehr schnelle Bildverarbeitung notwendig. Im Rahmen des Projektes wurde der Einsatz von einer CUDA-fähigen Graphikkarte für die Bildverarbeitung getestet.

Die Ergebnisse haben gezeigt, dass die Detektion der Überwalzungen unter Laborumständen auch bei Temperaturen um 1000°C möglich ist, eine industrielle Umsetzung wegen der hohen Durchlaufgeschwindigkeiten und wegen der Zunderbildung an der Drahtoberfläche jedoch schwierig ist.

## 2. Abstract

During the rolling process laps can occur, which are a sort of surface crack. If the depth of the crack exceeds a prescribed limit, the whole rolled wire coil is rejected. This means very high production loss of materials and energy. Laps result from wrong settings and can be avoided by the correction of the roll passes. In order to eliminate the cause of this failure as early as possible, the crack has to be found already at the glowing wire during its production in the rolling mills. This requires a non-destructive, fully automated, inline testing at temperature values of 800-1100°C and at a speed of 30-40m/s. Within the scope of this project a thermographical test method has been investigated, by applying first either an additional heating or a short cooling to the rolled wire. Around a surface crack an inhomogeneous temperature distribution occurs, which can be recorded by an infrared camera. The heating is done inductively, where the wire is moved through an induction coil. In the first part of the project measurements in the laboratory were accomplished. For these measurements the wire was heated first to a temperature value of 800-1100°C and an additional short heating or cooling was applied. Different materials (steel grades, titan alloys, and so on) have been tested and compared for their heating and cooling behavior. Model calculations and finite element simulations were carried out, in order to evaluate the temperature distribution for different material parameters, crack forms and for different crack depth values. Additionally, the behavior of the wire moving with high speed has been also simulated. After successful completion of the laboratory measurements and the simulations, measurements were executed directly at the rolling mill of one of the project partners. In the case of a glowing metallic surface the intensity of the emitted energy is sufficient to use cameras for the visible range. Such cameras are much cheaper than infrared cameras. In the scope of the project the possibility to create a temperature calibration for a camera in the visible range has been investigated, which is reproducible and accurate enough to use for such an application. The image processing is an important part of an automated optical inspection. The computer analyzes the recorded images, identifies the eventual defects and makes a fully automatic decision. An additional challenge is to make this analysis in real-time. Because of the high speed of the material a very high recording frequency and very quick image processing is required. In the scope of the project the usage of a graphic board with CUDA capability has been tested for the acceleration of the image processing.

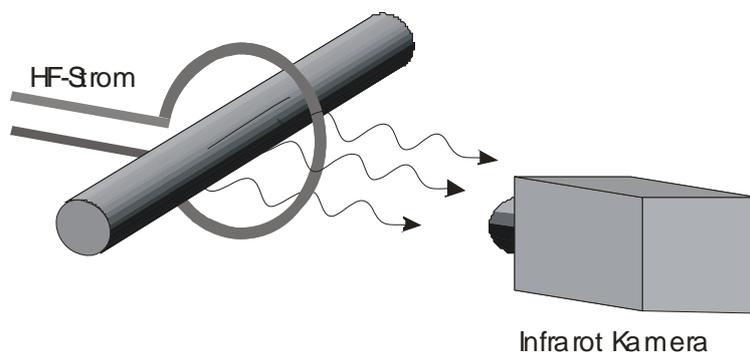
The results showed that detection of the laps and surface cracks under labor circumstances at 1000°C is well possible, but the industrial realization of this technique because of the very high material speed and because of the oxide scale at the surface of the rolled wire is difficult.

### 3. Einleitung

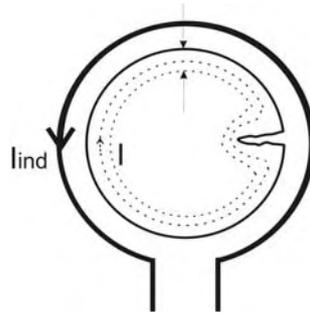
Bei aktiver thermografischer Prüfung wird zuerst Wärme (oder Kälte) kontrolliert ins Material eingebracht und mit einer Infrarotkamera die Temperaturverteilung an der Oberfläche aufgenommen. Oberflächenfehler verursachen eine Störung in der Ausbreitung der Wärme. Durch diese inhomogene Temperaturverteilung können die Fehler im Infrarotbild sichtbar gemacht werden.

Im Rahmen dieses Projektes ist untersucht worden, ob es möglich ist, eine zusätzliche Erwärmung oder Abkühlung in den Walzdraht einzubringen, welche eine genügend inhomogene Temperaturverteilung um einen Riss herum bewirkt, sodass dieser mit Hilfe einer Infrarotkamera Inline detektiert werden kann. Zwei Möglichkeiten sind verglichen worden, ob eher eine kurze induktive Erwärmung oder eine kurze Abkühlung durch Lufteinblasen zielführend ist.

Die Erwärmung wird durch eine induktive Heizung erreicht, wobei der Draht durch die Induktionsspule geführt wird, siehe Abbildung 1. In der Induktionsspule des Generators fließt ein starker hochfrequenter Strom, welcher ein Magnetfeld induziert. Das sich ändernde Magnetfeld induziert im Werkstück einen Wirbelstrom. Durch den ohmschen Verlust dieses Stromes erwärmt sich die Oberfläche. Es ist bekannt, dass der Wirbelstrom nur in eine dünne Oberflächenschicht eindringt (Skin-Effekt), deren Tiefe, die sogenannte Eindringtiefe von Materialparametern und von der Erregungsfrequenz abhängt. Im Falle einer großen Metallfläche laufen die Wirbelstromlinien parallel zu Oberfläche. Wird dieser Verlauf durch einen Riss gestört, werden die Stromlinien ins Materialinnere gedrängt, siehe Abbildung 2. Dadurch entsteht eine inhomogene Temperaturverteilung, die mit Hilfe einer Infrarotkamera detektiert werden kann und der Riss wird im Infrarotbild sichtbar. Für nicht-magnetische Materialien beträgt die Eindringtiefe des Wirbelstromes etwa 0.5-1mm, für magnetische Materialien ist diese deutlich geringer, etwa 0.04mm. Im Rahmen des Projektes sind einige ausgewählte Materialien wie Titan-, Nickelbasislegierungen, Stähle und Kupfer untersucht worden. Nachdem die Untersuchungen oberhalb der Curie-Temperatur von ferritischen Stählen stattgefunden haben, haben auch diese Materialien ihre ferromagnetischen Eigenschaften verloren.



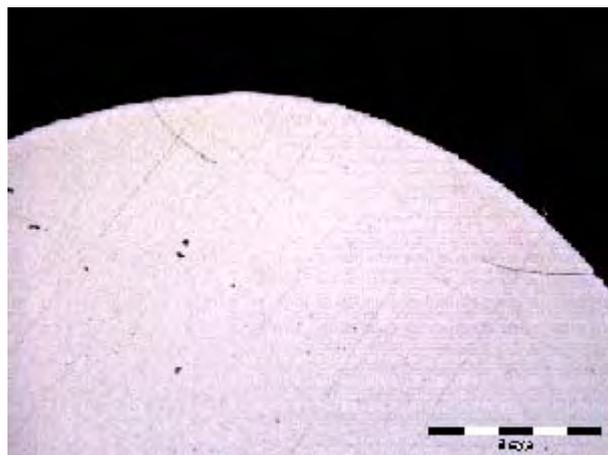
**Abbildung 1: Prinzip des thermo-induktiven Prüfverfahrens**



**Abbildung 2: Wirbelstromverteilung um einen Riss herum**

### 3.1. Motivation des Projektes

Während des Walzprozesses können Überwalzungen (1) entstehen, die eine Art von Oberflächenrissen sind. Diese Werkstofftrennung startet an der Oberfläche und dringt mehr oder weniger schräg ins Material ein. Überwalzungen treten, aufgrund ihrer Entstehung, oft doppelt auf, d.h. zwei Risse, die zueinander laufen (siehe Abbildung 3). Die Fehler verlaufen in Längsrichtung des Walzdrahtes und üblicherweise haben sie eine Länge von mehreren Metern. Wenn die Tiefe des Risses einen vorgeschriebenen Grenzwert überschreitet, führt diese Art von Fehler zum Ausschuss. Dieser Grenzwert für die Risstiefe beträgt beispielsweise 0,2mm bei einem Drahtdurchmesser von 15mm. Überwalzungen entstehen durch falsche Walzkalibergrossen oder –formen, oder zu groß gewählte Stichabnahmen (1) und können durch Korrektur der Einstellungen behoben werden. Im Falle eines Fehlers ist ein Grossteil der gewalzten Drahtrolle mit einer Länge von bis zu 3.5km betroffen, der bei dementsprechenden Materialpreisen für ausgewählte Werkstoffe, wie Titan- oder Nickelbasislegierungen sehr hohe Verluste bedeutet. Um die Ursachen des Fehlers schnell beheben zu können, müssen die Risse möglichst früh während der Produktion, noch in der Walzstrasse detektiert werden. Dies verlangt eine zerstörungsfreie, Inline Prüfung bei einer Temperatur von 800-1100°C und bei Durchlaufgeschwindigkeiten von 30-40 m/s.



**Abbildung 3: Mikroskopische Aufnahme von einem Querschliff einer Überwalzung mit 2 Rissen, Risstiefe: 0.4mm, Drahtdurchmesser: 5.5mm**

### **3.2. Zielsetzungen des Projektes**

Im Rahmen dieses Projektes sind die Möglichkeiten eines thermografischen zerstörungsfreien Prüfverfahrens für eine Inline Rissdetektion am Ende der Walzstrasse untersucht worden. Das Ziel dieses Projektes ist es gewesen, ein Prüfprinzip zu entwickeln, womit unter diesen extremen Temperatur- und Geschwindigkeitsumständen Überwalzungen detektiert werden können. Die Auswertung der Ergebnisse muss in Echtzeit erfolgen können, um die Fehlerursache möglichst schnell beheben zu können.

Weiters sind Untersuchungen im Rahmen des Projektes durchgeführt worden, bei denen statt einer kurzen induktiven Erwärmung eine kurze Abkühlung angewendet worden ist. Die Kühlung ist durch Einblasen von kalter Luft erzeugt worden. Eine Abkühlung, ähnlich der induktiven Erwärmung, bewirkt eine inhomogene Temperaturverteilung um einen Riss herum, die mit einer Infrarotkamera detektierbar ist.

### **3.3. Aufbau des Endberichts**

Dieser Endbericht präsentiert die durchgeführten Forschungstätigkeiten, die Ergebnisse und die daraus resultierenden Schlussfolgerungen. Im Kapitel 4 sind grundlegende Informationen zum Projektinhalt, wie der derzeitige Stand der Technik, die Beschreibung der Neuerungen sowie der Innovationsgehalt beschrieben. Im Kapitel 5 sind die Ergebnisse der durchgeführten Tätigkeiten in den verschiedenen Arbeitspaketen dargestellt. Kapitel 6 beinhaltet eine Beschreibung, wie der Projektinhalt in die Zielsetzung der Programmlinie passt. Kapitel 7 fasst die Schlussfolgerungen der Ergebnisse zusammen und Kapitel 8 gibt einen Ausblick für weitere mögliche Anwendungen.

## **4. Hintergrundinformation zum Projektinhalt**

### **4.1. Stand der Technik**

Heutzutage werden Walzdrähte auf Überwalzungen stichprobenartig kontrolliert, entweder mit mikroskopischen Schliffproben oder mit der so genannten Stauchprobe. Beide Methoden finden offline statt und sind zerstörend. Schliffproben werden an ausgewählten Proben gefertigt und können einige Stunden dauern. Bei der Stauchprobe wird am Ende der gewalzten Rolle ein Stück abgeschnitten, erwärmt und an einer Stelle gestaucht. Weist der Walzdraht Risse auf, öffnen sich diese und können somit makroskopisch sichtbar gemacht werden. In Abbildung 4 sieht man ein gestauchtes Drahtstück mit aufgeplatzten Rissen. Diese Prüfung kann nur im Anschluss an das Walzen durchgeführt werden. Dadurch detektiert man den Fehler zu spät. Außerdem können so Fehler, die nicht über die gesamte Länge der Drahtrolle auftreten, übersehen werden. Des Weiteren ist die Methode nicht automatisierbar und hängt von menschlichen Entscheidungen ab.



**Abbildung 4: Gestauchtes Drahtstück mit aufgeplatzten Rissen**

Einige Forschungsarbeiten konzentrieren sich darauf, bekannte zerstörungsfreie Prüfmethode für die Inline Rissdetektion an heißem Draht zu adaptieren. Bei der Wirbelstromprüfung wird mit Hilfe einer Spule Wirbelstrom im Material erzeugt. Die Änderung des Wirbelstromverlaufes um einen Riss herum wird mit einer sekundären Spule detektiert (2), (3). Die Wirbelstromprüfung wird entweder mit einer Durchlaufspule oder mit rotierenden Sonden durchgeführt. In beiden Fällen muss die Testspule sehr nah (bis etwa 0.1mm) an der Oberfläche anliegen. Nachdem der Durchmesser eines gewalzten Drahtes sich über die gesamte Rolle geringfügig ändern kann und wegen der Wärmestrahlung bei hohen Temperaturen verringert sich die Lebensdauer der Testspule sehr stark. Außerdem ist die Wirbelstromprüfung für die Detektion von kurzen Längsrissen oder von Querrissen geeignet. Lange Längsrisse, wie Überwalzungen, werden mit der Methode nicht zuverlässig gefunden.

Andere Forschungen beschäftigen sich mit der Adaptation von Ultraschallprüfung für hohe Temperaturen. Die traditionelle Ultraschallprüfung erzeugt die Schallwellen mittels piezoelektrischen Kristallen und benötigt ein Koppelmedium um den Ultraschall ins Material einzubringen. Dafür wird üblicherweise Wasser verwendet. Diese Art von Prüfung ist für hohe Temperaturen nicht geeignet. Deswegen werden die Einsatzmöglichkeiten von elektromagnetisch erzeugtem Ultraschall (EMAT) untersucht. Es wurden schon interessante Ergebnisse in diese Richtung erzielt(4) und auch Fehler bei hohen Werkstofftemperaturen gefunden. Die Methode liefert aber kein zuverlässiges Ergebnis bei hohen Temperaturen, wo die Gitterstruktur noch nicht vollkommen entstanden ist, was eine Voraussetzung für die Ausbreitung des Ultraschalls ist. Außerdem ist die Ultraschallprüfung eher geeignet um innere Fehler zu finden, als Risse an der Oberfläche zu detektieren.

#### **4.2. Innovationsinhalt**

Derzeit wird im Walzwerk der Draht auf Fehler stichprobenartig mit der so genannten Stauchprobe kontrolliert. Auftretende Überwalzungen können nur nach dem Walzen der Drahtrolle detektiert werden. Ein Fehler am Ende der Rolle führt zum Ausschuss und die gesamte Rolle wird als Schrott eingeschmolzen. Fehler, die nicht über die gesamte Länge auftreten, können unbemerkt bleiben und auch zu Kunden ausgeliefert werden. Außerdem ist die Prüfung mit menschlicher Entscheidung behaftet.

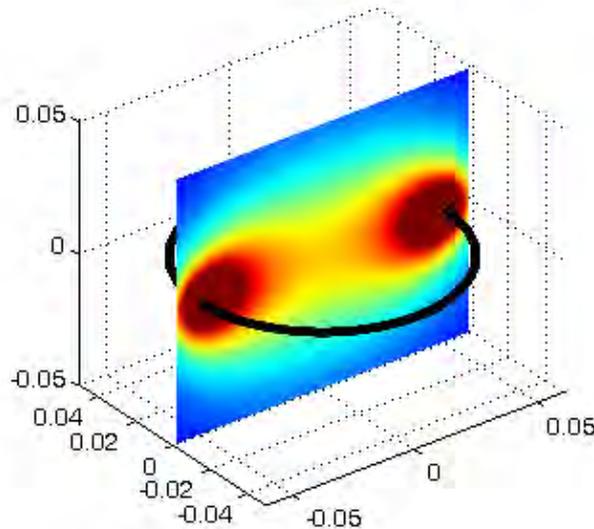
Das Ziel des Projektes ist es gewesen, die Grundlagen einer zerstörungsfreien und voll automatisierbaren Prüfung zu legen, die geeignet ist, direkt in der Produktionslinie der Walzstrasse die gesamte Länge des Drahtes auf Oberflächenfehler zu prüfen. Diese Prüfung trägt einerseits zur Qualitätssicherung bei und vermeidet kostenintensive Weiterverarbeitung von Ausschussmaterialien. Andererseits führt die Prüfung zu Optimierung des Produktionsprozesses und durch frühzeitige Erkennung von Fehlern können die Ursachen behoben werden und damit unnötiger Ausschuss vermieden werden.

## 5. Ergebnisse des Projektes

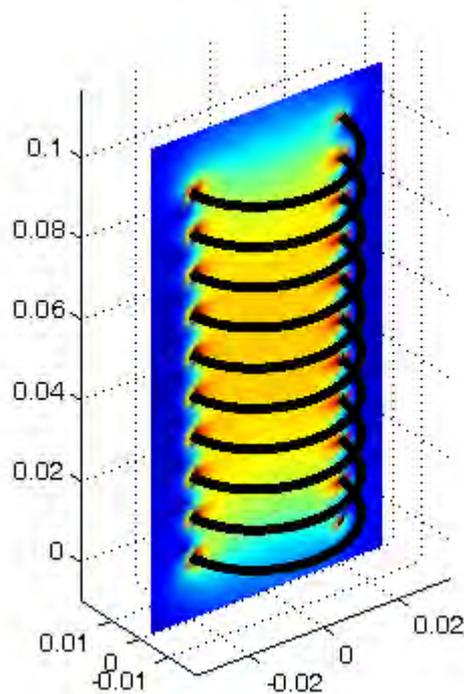
Im Rahmen des Projektes wurden Messungen im Laboratorium an Drahtproben aus verschiedenen Materialien durchgeführt. Die Proben wurden sowohl bei Raumtemperatur als auch bei Temperaturen um 1000°C gemessen. Um den Messaufbau zu planen und die erwarteten Ergebnisse abzuschätzen, wurden zuerst analytische Modellrechnungen und Finite Element Simulationen durchgeführt. Nachdem die theoretischen Ergebnisse und die Labormessungen die Realisierbarkeit des Vorhabens gezeigt haben, wurden weitere Messungen im Walzwerk gemacht.

### 5.1.1. Modellrechnungen und Finite Element Simulationen (AP1)

Um die induktive Erwärmung zu berechnen, wurde im ersten Schritt die Magnetfeldverteilung innerhalb der Spule berechnet. Analytische und numerische Rechnungen wurden durchgeführt, um die Magnetfeldverteilung einer Induktionsspule zu berechnen. Zwei einfache Beispiele sind in Abbildung 5 und in Abbildung 6 gezeigt, für eine einfache kreisförmige Spule bzw. für eine zylinderförmige Spule mit mehreren Windungen. Die Berechnungen haben gezeigt und es ist auch aus den Abbildungen ersichtlich, dass das Magnetfeld in der Nähe der Spule sehr stark ansteigt und in der Mitte in erster Näherung homogen ist.



**Abbildung 5: Magnetfeldverteilung in der Ebene durch den Mittelpunkt der kreisförmigen Spule**



**Abbildung 6: Magnetfeldverteilung einer zylinderförmigen Spule mit 10 Windungen**

So wie der Strom in der Spule sich sinusförmig ändert, ändert sich mit gleicher Frequenz auch das Magnetfeld. Wenn ein metallisches Werkstück in die Spule gelegt wird, induziert die Magnetfeldänderung eine Spannung bzw. einen Wirbelstrom in der Probe, welcher durch den ohmschen Verlust zu einer lokalen, sogenannten Joule'schen Erwärmung führt. Die Verteilung des Wirbelstromes und der Erwärmung wurde im Rahmen des Projektes mit Hilfe der Maxwell'schen Gleichungen (5) für Werkstücke mit einfacher Geometrie auch analytisch berechnet. Der Wirbelstrom klingt unter der Oberfläche des Materials exponentiell ab und dringt dadurch nur in eine bestimmte Tiefe ein. Die Eindringtiefe des Wirbelstromes hängt einerseits von Materialparametern, wie magnetischer Permeabilität und elektrischer Leitfähigkeit ab, andererseits verändert sie sich mit der Anregungsfrequenz. Tabelle 1 fasst für einige Metalle die Eindringtiefe bei einer Anregungsfrequenz von 150kHz zusammen:

Material	Eindringtiefe $\delta$ [mm]
Kupfer	0.174
Nickel	1.48
Titan	0.968
Stahl magnetisch	0.039
Stahl unmagnetisch	0.955

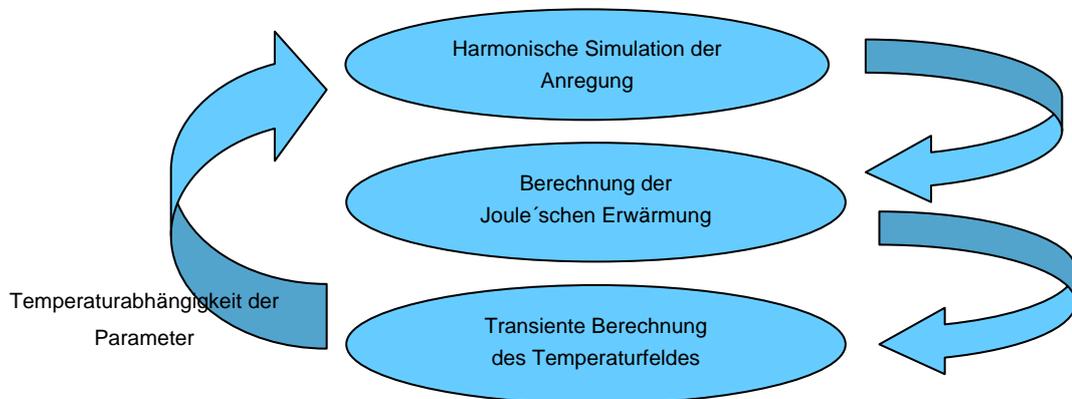
**Tabelle 1: Eindringtiefe des Wirbelstromes für einige ausgewählte Metalle**

Der Wirbelstrom erzeugt durch den ohmschen Verlust eine Wärme im Material. Um die Temperaturverteilung im Material zu berechnen muss neben der Wärmegenerierung zusätzlich auch noch die Diffusion der Wärme (6) berücksichtigt werden. Verschiedene analytische Modelle wurden entwickelt um die Temperaturverteilung an der Oberfläche eines Drahtes nach kurzer induktiver Erwärmung zu berechnen. Diese Modelle berücksichtigen die unterschiedlichen Materialparameter der untersuchten Werkstoffe:

magnetischen bzw. nicht-magnetischen Materialien, sowie Materialien mit sehr guten Wärme- und elektrisch leitenden Eigenschaften bis hin zu sehr schlechten. Die Ergebnisse dieser Berechnungen wurden mit Finite Element Simulationen verglichen, siehe Abbildung 9. Es ergab sich eine ausgezeichnete Übereinstimmung.

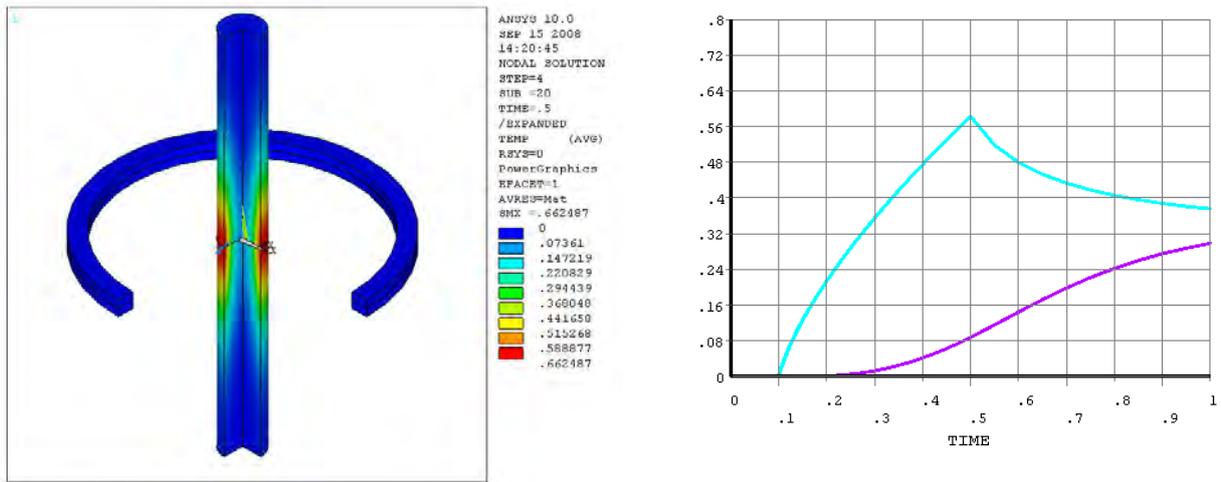
### **Finite Element Simulationen**

Um Problemstellungen mit komplexer Geometrie zu berechnen, wie z.B. Draht mit verschiedenen Oberflächenrissen, wurde ein Finite Elemente Simulationsprogramm verwendet. Um die induktive Erwärmung zu modellieren, wurde im ersten Schritt die Verteilung der Wirbelstromlinien und die daraus resultierende Joule-Erwärmung berechnet. Im zweiten Schritt wurde der Wärmetransport modelliert. Für diese Rechnungen wurde das ANSYS Multiphysik FEM-Simulationspaket (7) ausgewählt, nachdem dies die elektromagnetischen und die thermischen Vorgänge gekoppelt simulieren kann, siehe Abbildung 7. Nach der Berechnung der Wirbelstromlinien wurden die Joule'sche Wärme und die davon durch Wärmetransport entstehende Temperaturverteilung kalkuliert.



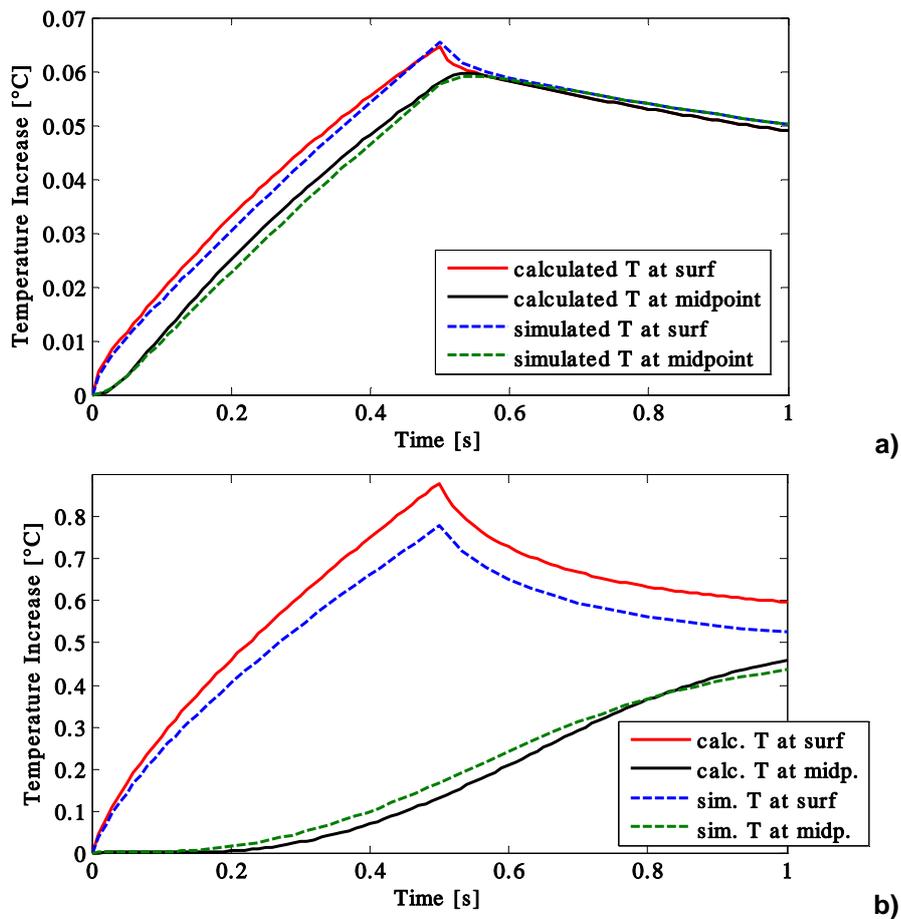
**Abbildung 7: Ablauf einer Simulation, wobei elektromagnetische Induktion und Wärmetransport gekoppelt gelöst werden.**

Im ersten Schritt wurden einfache Modelle aufgesetzt, um die, aufgrund der induktiven Erwärmung erreichbaren Temperaturerhöhungen in verschiedenen Materialien zu berechnen und zu vergleichen. Abbildung 8 zeigt ein derartiges Modell, wobei der Strom in der Spule vorgegeben und die Temperaturverteilung an der Drahtoberfläche und im Inneren abhängig von der Zeit berechnet wurde.



**Abbildung 8:** Links: 3d Modell des Drahtes mit der Spule zeigt die Temperaturverteilung nach kurzer induktiven Erwärmung; rechts: Temperaturerwärmung an der Oberfläche (blaue Linie) und im Inneren des Drahtes aus Titan.

In Abbildung 9 sind die Ergebnisse der analytischen Rechnungen mit den Simulationen für Kupfer und für Titan verglichen. Die Ergebnisse zeigen ausgezeichnete Übereinstimmung für Kupfer und eine gute Korrelation für Titan.



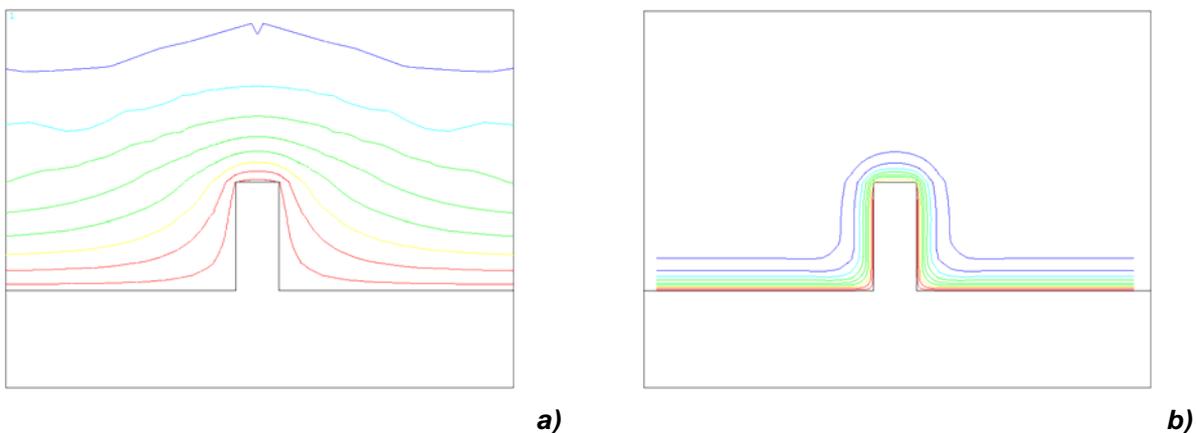
**Abbildung 9:** Vergleich der analytisch berechneten und der simulierten Temperatur an der Oberfläche und im Mittelpunkt eines Drahtes aus Kupfer (a) und aus Titan (b)

Tabelle 2 fasst die Temperaturerwärmung an der Oberfläche eines Drahtes aus den fünf ausgewählten Materialien nach 0.5 s induktiver Erwärmung zusammen. Diese Ergebnisse korrelieren sehr gut mit den praktischen Erfahrungen: Kupfer lässt sich wegen der hohen Wärme- und elektrischen Leitfähigkeit sehr schlecht induktiv erwärmen. In magnetische Materialien kann ausgezeichnet Wärme induktiv zugeführt werden. Dabei muss aber erwähnt werden, dass die Industriemessungen in diesem Projekt bei etwa 1000°C durchgeführt worden sind, womit man über der Curie-Temperatur von Stahl liegt und dieser dadurch seine magnetische Eigenschaft verliert.

Material	Erwärmung [°C] analytische Rechnung	Erwärmung [°C] FEM Simulation
Kupfer	0.065	0.065
Nickel	0.948	0.8
Titan	0.882	0.778
Stahl magnetisch	15.4	9.66
Stahl nicht-magnetisch	0.23	0.21

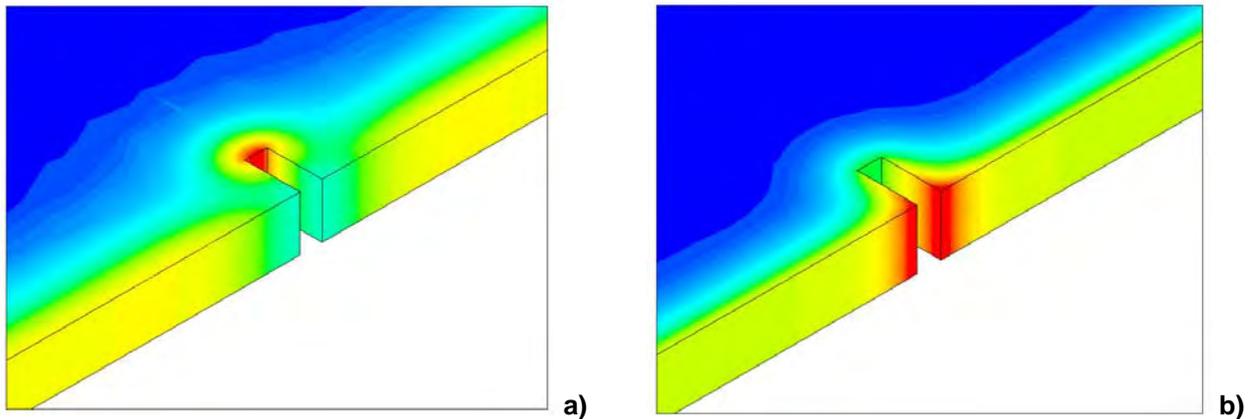
**Tabelle 2: Vergleich von berechneten und simulierten Temperaturerhöhungen nach 0,5 s induktiver Erwärmung (Drahtdurchmesser =10mm)**

Weiters wurden Finite Element Modelle aufgesetzt, um die Temperaturverteilung für komplexere Geometrien und verschiedene Rissformen zu simulieren.



**Abbildung 10: Wirbelstromverteilung für ein nicht-magnetisches (a) und für ein magnetisches (b) Material**

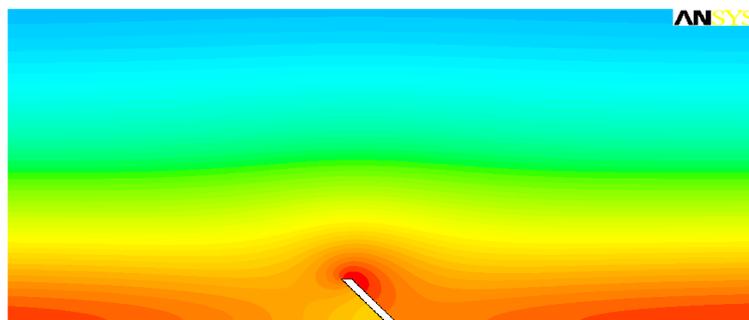
Abbildung 10 vergleicht die berechnete Wirbelstromverteilung für ferromagnetisches und für nicht-magnetisches Material (8). Nachdem die Wirbelstromeindringtiefe in magnetischen Materialien wesentlich kleiner als die modellierte Risstiefe mit 1mm ist, folgen die Wirbelstromlinien der Kontur des Fehlers (siehe Abbildung 10b). Demgegenüber ist in einem nicht-magnetischen Material die Eindringtiefe des induzierten Stromes vergleichbar mit der Tiefe des Risses, wodurch die Linien abgelenkt werden (siehe Abbildung 10a). Dadurch entsteht bei magnetischen Materialien ein Wärmestau an den Kanten eines Risses und bei nicht-magnetischen Materialien wird der Riss durch kältere Stellen im Wärmebild detektierbar, siehe Abbildung 11.



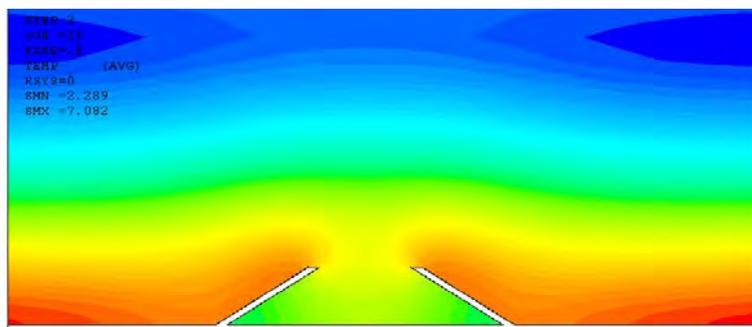
**Abbildung 11: Temperaturverteilung nach kurzer induktiver Erwärmung für ein nicht-magnetisches (a) und für ein magnetisches (b) Material**

Es wurden Simulationen durchgeführt, um den Einfluss der Risttiefe auf die Temperaturverteilung zu untersuchen. Die Ergebnisse zeigen, dass der hervorgerufene Temperaturunterschied mit zunehmender Tiefe des Risses ansteigt.

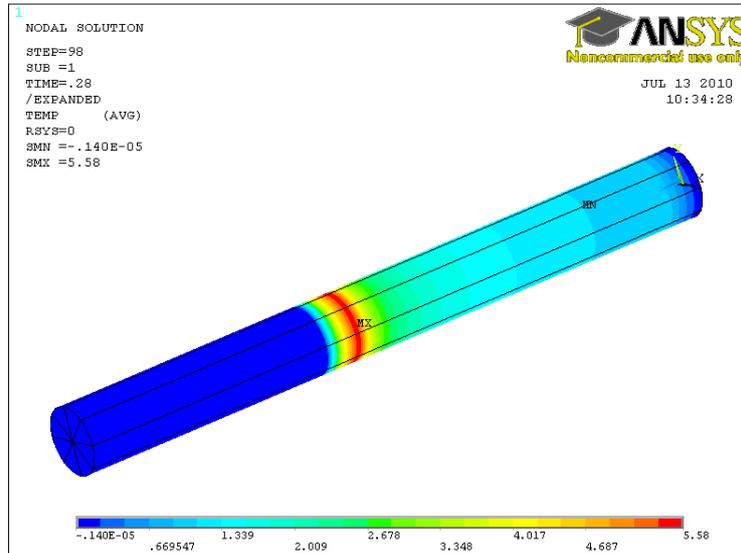
Die im Rahmen dieses Projektes zu detektierenden Risse und Überwälzungen verlaufen zum größten Teil schräg zur Oberfläche. Die Simulationsmodelle zeigen, siehe Abbildung 12, dass bei derartig schrägen Rissen der Wirbelstrom sich im spitz zusammenlaufenden Bereich unter dem Riss deutlich schwächer ausbildet und damit eine sehr starke Temperaturinhomogenität hervorgerufen wird. Die Überwälzungen treten sehr oft doppelt auf, siehe auch Abbildung 3. Nachdem die schräg zusammenlaufenden Risse die Ausbildung des Wirbelstroms ebenfalls wieder hemmen, ist in diesem Bereich eine deutlich kühlere Stelle zu beobachten, siehe Abbildung 13.



**Abbildung 12: Temperaturverteilung um einen schrägen Riss (nicht-magnetisches Material)**



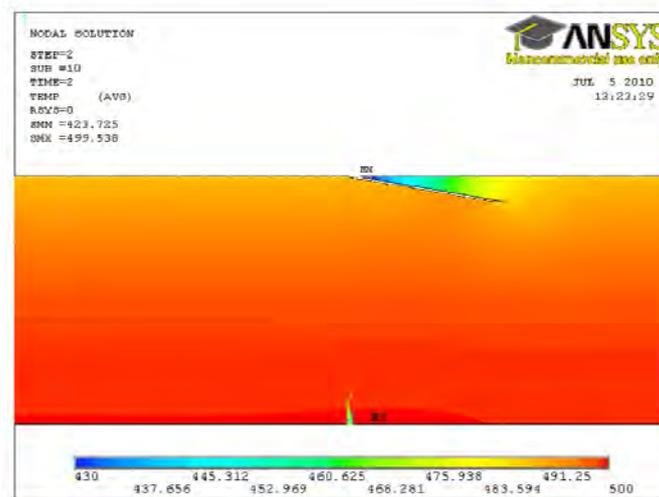
Zusätzlich zu den statischen Simulationen wurden auch dynamische Modelle aufgesetzt, wobei der Draht sich durch die Induktionsspule bewegt, siehe Abbildung 14. Diese Simulationen haben die Schlussfolgerungen, die bereits aus den statischen Berechnungen abgeleitet werden konnten, im Wesentlichen bestätigt.



**Abbildung 14: Temperaturverlauf an einem Draht nach Durchlaufen einer Induktionsspule, Bewegungsrichtung von rechts nach links**

### Luftabkühlung

Eine der Zielsetzungen des Projektes war, zu überprüfen, ob durch Luftabkühlung Oberflächenrisse detektiert werden können. Simulationsmodelle wurden aufgesetzt, um zu berechnen, wie sich die Temperaturverteilung nach einer Luftabkühlung ausbildet. Abbildung 15 zeigt das Ergebnis für eine Abkühlung mit einer Dauer von einer Sekunde für einen Riss mit einem Winkel von 10° zu Oberfläche.



**Abbildung 15: Temperaturverteilung an einem schräg verlaufenden Riss nach Abkühlung an der Oberfläche**

Die Simulationsergebnisse wurden mit den Messungen verglichen und zeigten eine sehr gute Übereinstimmung.

### 5.1.2. Berechnungen der optimalen Kameraeigenschaften (AP2)

Nach dem Planck'schen Strahlungsgesetz emittiert jeder Körper eine Wärmestrahlung, die wellenlängen- und temperaturabhängig ist. Ein Körper mit der Temperatur 800-1100°C strahlt am intensivsten im Wellenlängenbereich zwischen 2.5-3µm, welcher dem mittleren Infrarotbereich (MIR) entspricht. Die Strahlungsintensität reicht jedoch auch aus, um im Nahinfrarot (NIR) oder sogar im sichtbaren Bereich detektiert zu werden.

Da Kameras im sichtbaren Bereich gegenüber Infrarot-Kameras wesentlich preisgünstiger sind, hat man Untersuchungen durchgeführt, ob es durch den Einsatz derartiger Kameras möglich ist, eine Prüfanlage zu realisieren. Es sind Rechnungen und Vergleiche durchgeführt worden, welcher Wellenlängenbereich (mittleres Infrarot, nahes Infrarot oder sichtbarer Bereich) in Bezug auf die Empfindlichkeit optimal für die Untersuchungen ist. Um eine optimale örtliche Auflösung aber auch genügend Tiefenschärfe zu erreichen, sind die optische und die zeitliche Auflösung der möglichen Kameras verglichen worden. Dabei ist untersucht worden, wie genau und reproduzierbar eine Temperaturkalibration im Hochtemperaturbereich für Kameras im sichtbaren Bereich ist. Einen weiteren entscheidenden Punkt stellt die Geschwindigkeit der Kameras dar, und zwar was einerseits die Aufnahmefrequenz, sowie andererseits die Belichtungszeit (bei Infrarot-Kameras als Integrationszeit bezeichnet) betrifft.

Folgende Kameras sind verglichen worden:

- JAI CV-A33
- JAI PULNIX TM-6CN
- PHOTONFOCUS MV1D1312I40GB (Nahinfrarot-Kamera)
- FLIR JADE MWIR 4P (Infrarot-Kamera)
- FLIR TITANIUM SC 7500 (Infrarot-Kamera)

Tabelle 3 zeigt den Vergleich dieser Kameras hinsichtlich ihrer örtlichen, zeitlichen sowie Temperaturlösung.

	Wellenlängenbereich	Örtliche Auflösung [Pixel]	Bilder/ Sekunde	Temperaturlösung °C / Digital Level
JAI CV-A33	0,4 µm bis 0,9 µm	659x493	120 *	1
JAI PULNIX TM-6CN	0,4 µm bis 1µm	752x582	50	3
PHOTONFOCUS	0,35 µm bis 1,1µm	1312 x 1082	27*	2
FLIR JADE	3 µm bis 5 µm	320x240	150*	0,08
FLIR TITANIUM	3 µm bis 5,1 µm	320x256	383*	0,025

\*) durch Ändern der Bildgröße lassen sich die maximal möglichen Bilder pro Sekunde erhöhen.

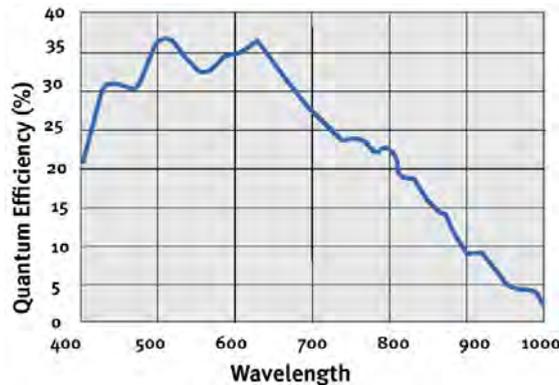
**Tabelle 3: Zusammenfassung der wichtigsten Daten der verglichenen Kameras**

### Kameras für den sichtbaren Bereich:

Kameras im sichtbaren Bereich beinhalten Silizium-Detektoren, die je nach Modell bis zu einer Wellenlänge von etwa  $1.1\mu\text{m}$  empfindlich sein können, wobei sie jedoch nicht für Temperaturmessungen kalibriert sind. Darüber hinaus kann sich die detektierte Strahlungsintensität mit der Erwärmung des Detektors ändern.

### JAI CV-A33:

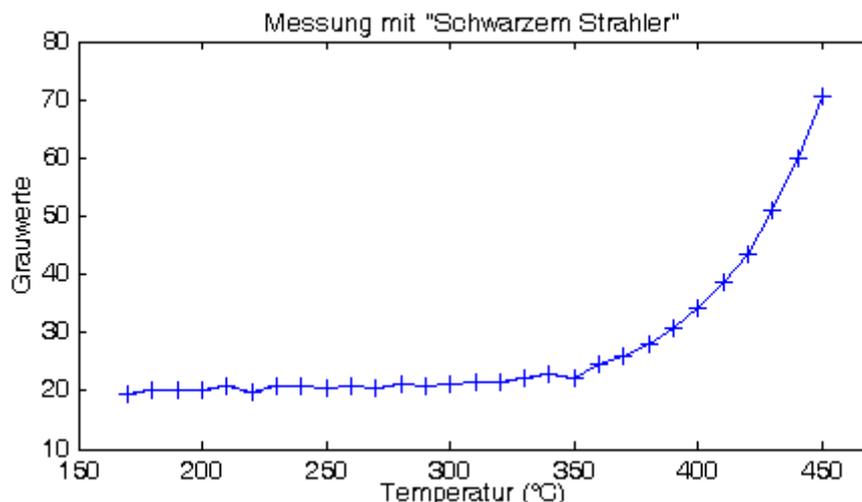
Diese Kamera ist für einen Wellenlängenbereich von 400 nm bis 900 nm ausgelegt (Abbildung 16). Von den drei Kameras im sichtbaren Bereich, verfügt diese über die beste Temporauflösung.



**Abbildung 16: Spektrale Empfindlichkeit der JAI CV-A33 Kamera (12)**

### Schwarzer Strahler:

Mit einem schwarzen Strahler sind Temperaturen bis  $450^\circ\text{C}$  erzeugt worden, mit denen die Temperaturempfindlichkeit der Kamera im sichtbaren Bereich getestet worden ist (Abbildung 17). Die Messungen sind nicht für noch höhere Temperaturen durchführbar gewesen, da mit dem zur Verfügung stehenden schwarzen Strahler keine Temperaturen über  $450^\circ\text{C}$  generiert werden können.

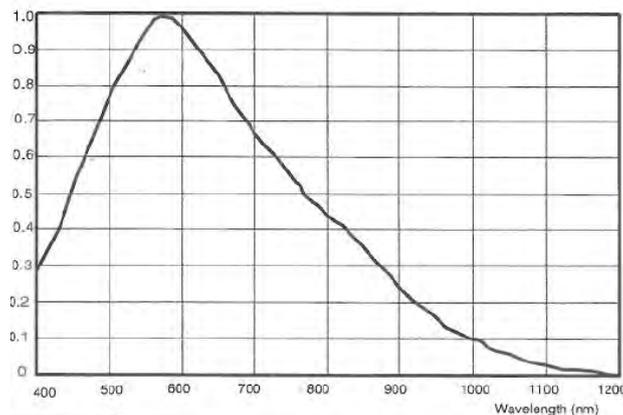


**Abbildung 17: Grauwerte für die jeweilige Temperatur zwischen  $170^\circ\text{C}$  und  $450^\circ\text{C}$  für die JAI CV-A33 Kamera**

Bei dieser Kamera ist trotz Verwendung unterschiedlicher Objektive stets eine starke Dispersion festgestellt worden (Dispersion bezeichnet die Abhängigkeit der Brechzahl von der Wellenlänge). Dieser Umstand hat dieses Kameramodell für weitere Vergleiche ausgeschlossen.

**PULNIX TM-6CN:**

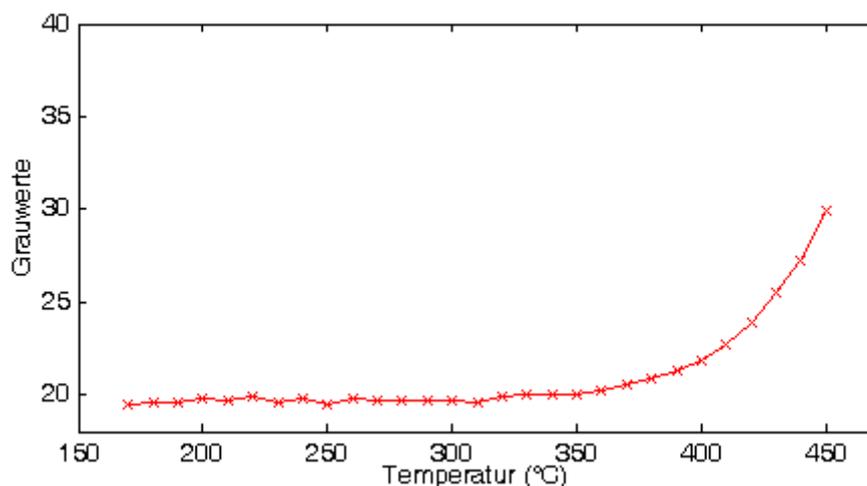
Diese Kamera ist für Aufnahmen im Wellenlängenbereich von 400nm bis 1000nm vorgesehen (Abbildung 18).



**Abbildung 18: Spektrale Empfindlichkeit der JAI Pulnix TM-6CN Kamera(13)**

**Schwarzer Strahler:**

Die Versuche mit dem schwarzen Strahler mit Temperaturen bis 450°C haben bei diesem Kameramodell zu einer Temperaturauflösung geführt, wie sie in Abbildung 19 dargestellt ist.

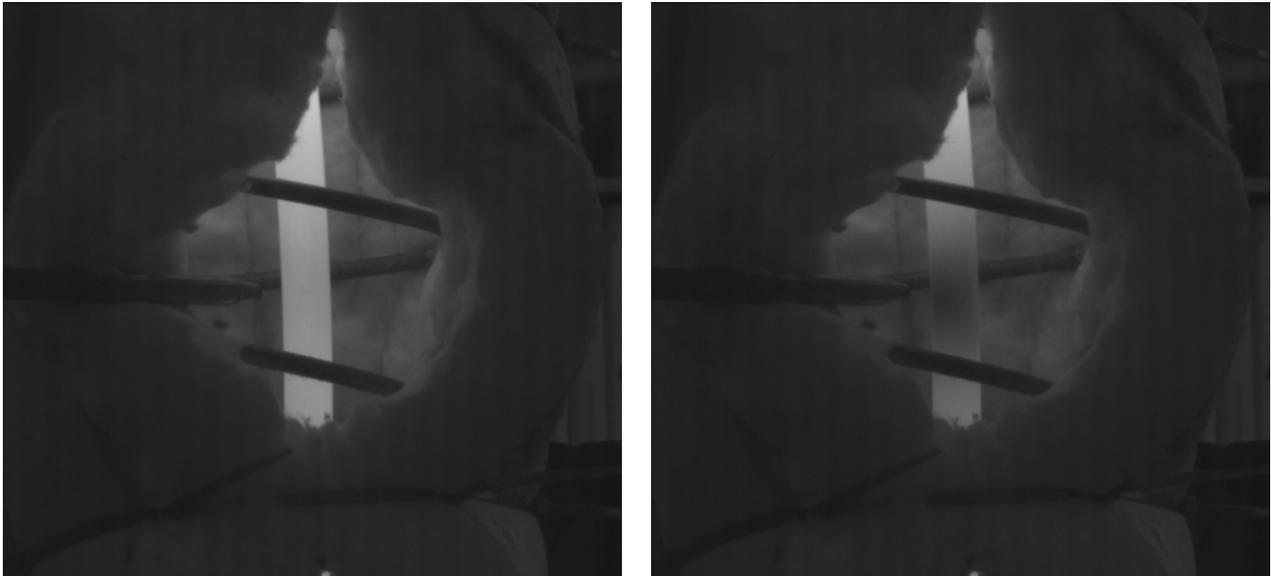


**Abbildung 19: Grauwerte für die jeweilige Temperatur zwischen 170°C und 450°C für die JAI PULNIX TM-6CN Kamera**

**Hochtemperaturmessung:**

Mit der Pulnix TM-6CN sind Messungen im Bereich von 600°C bis 650°C durchgeführt worden, um die Empfindlichkeit bzw. die Temperaturauflösung dieser Kamera zu testen. Abbildung 20 zeigt eine Aufnahme einer Drahtprobe bei 620°C, sowie die Abkühlung mit einem Luftpuls von einer Sekunde Länge, wobei im Wirkungsbereich der Luftlanze die Temperatur um etwa 85°C gesunken ist. Derartig große Änderungen der

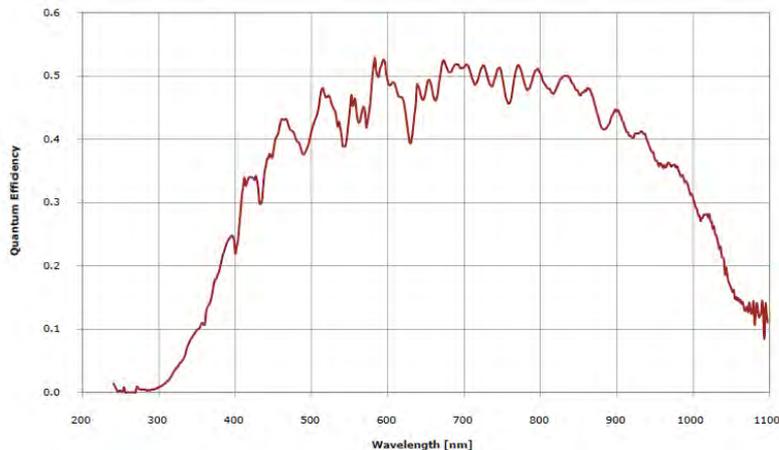
Temperatur sind mit dieser Kamera zwar erkennbar, für die reproduzierbare Auflösung kleinerer Temperaturunterschiede (wie sie bei thermografischen Messungen vorkommen) reicht die Temporaturauflösung dieses Modells nicht aus.



**Abbildung 20: Abkühlversuch mit punktuell aufgebrachtem Luftpuls bei einer Oberflächentemperatur von 620 °C. Aufnahme vor dem Abkühlen (links), sowie nach dem Abkühlen (rechts)**

#### **Photonfocus:**

Diese Kamera ist speziell für Bildaufnahmen im Nahen Infrarot bis 1100 nm ausgelegt (Abbildung 21). Die Testmessungen sind gemeinsam mit einem der Projektpartner, der Firma vatron, die auch die Kamera zur Verfügung gestellt hat, durchgeführt worden.

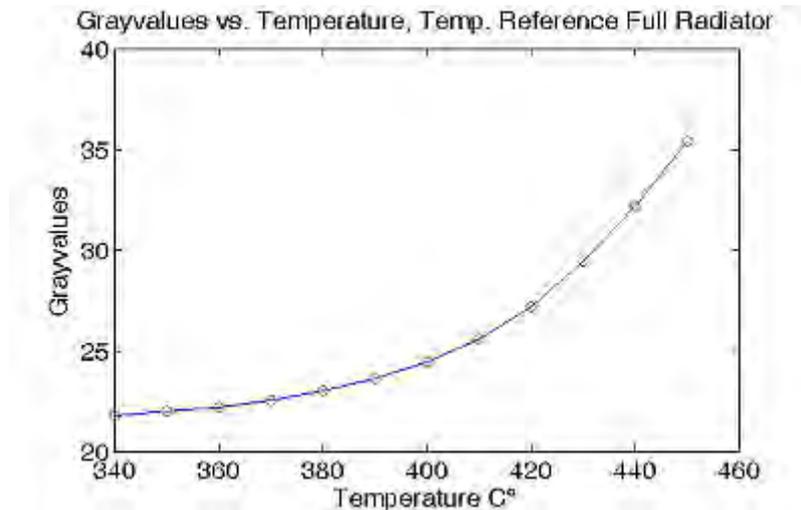


**Abbildung 21: Spektrale Empfindlichkeit der Photonfocus Kamera (14)**

#### **Schwarzer Strahler:**

Wie bei den vorherigen Kameramodellen sind auch für diese Kamera mit dem schwarzen Strahler Temperaturen bis 450°C erzeugt worden, um wiederum die Temperaturempfindlichkeit der Kamera zu testen. Bei den Versuchen mit dem Schwarzen Strahler ist für das Objektiv ein Sperrlichtfilter verwendet

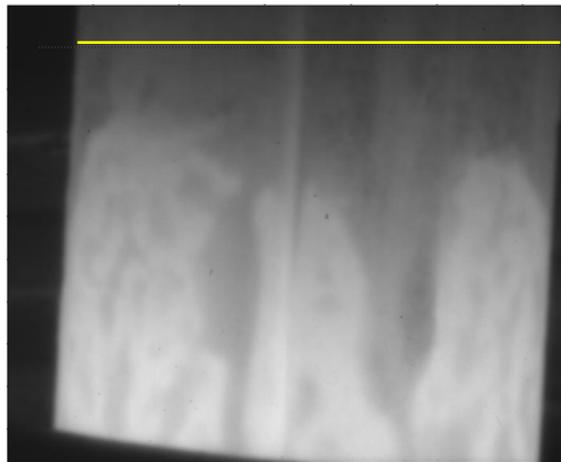
worden, um störende Lichteinflüsse beseitigen zu können. Abbildung 22 zeigt die Grauwerte über die Temperatur für den Bereich von 340°C bis 450°C aufgetragen.



**Abbildung 22: Grauwerte für die jeweilige Temperatur zwischen 340°C und 450°C für die PHOTONFOCUS Kamera**

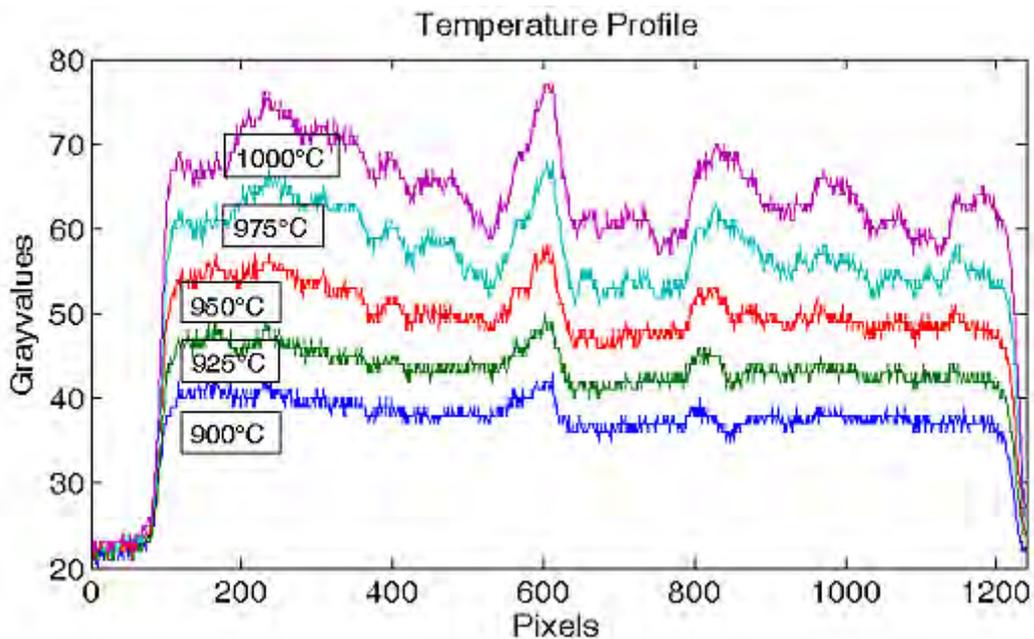
**Hochtemperaturmessungen:**

Mit der Photonfocus-Kamera sind Messungen im Bereich 900°C bis 1000°C durchgeführt worden, um die Empfindlichkeit bzw. die Temperaturauflösung dieser Kamera zu testen. Abbildung 23 zeigt eine derartige Aufnahme.



**Abbildung 23: Aufnahme mit der Photonfocus-Kamera bei 950°C, sowie die eingezeichnete Linie, die in Abbildung 24 als Temperaturprofil dargestellt ist**

In Abbildung 24 sind die Temperaturprofile in Schritten von 25°C für diese Kamera aufgetragen. Bei x=580 Pixel ist die Überwälzung im Draht zu erkennen.



**Abbildung 24: Temperaturprofil entlang der Linie bei der Probe aus Abbildung 23 von 900°C bis 1000°C, jeweils in Schritten von 25°C**

Mit der Photonfocus-Kamera ist es zwar möglich gewesen, eine relative Temperaturänderung ab etwa 10°C an der Drahtoberfläche anhand der unterschiedlichen Grauwerte festzustellen, als möglicher Ersatz für eine Infrarot-Kamera bei thermografischen Untersuchungen kann die Photonfocus-Kamera jedoch nicht verwendet werden. Bei Versuchen mit Pulsen von einer Sekunde ist der thermoinduktive Effekt, wie er mit einer Infrarot-Kamera detektiert werden kann, mit der Photonfocus-Kamera nicht feststellbar gewesen.

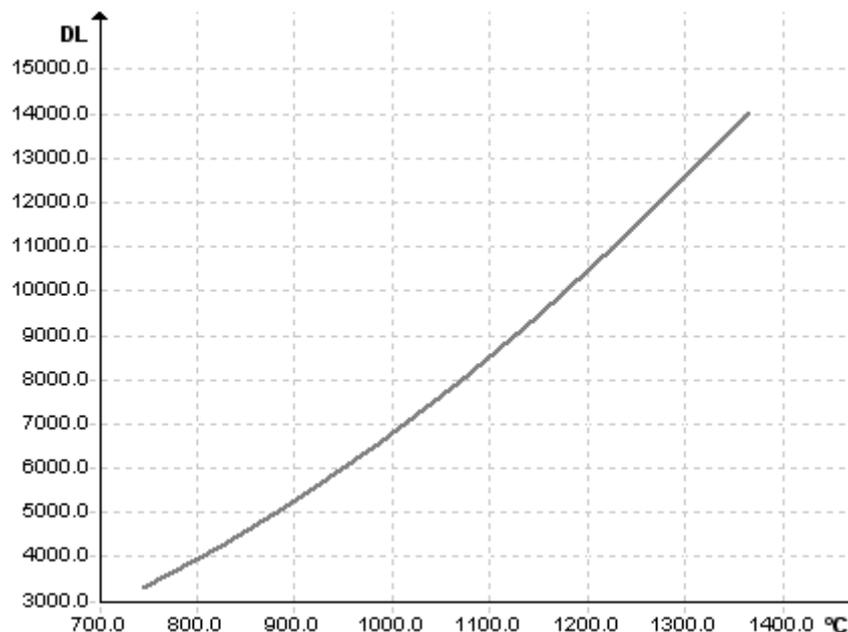
#### **Infrarot-Kameras:**

Infrarotkameras mit Halbleiterdetektoren bieten heutzutage die Möglichkeit, die Integrationszeit (bei hoher Strahlungsleistung, d.h. bei hohen Temperaturen bis zu 10-35µs), sowie die Bildgröße (man kann z.B. 320x240 Pixel auf 320x4 Pixel reduzieren) frei zu wählen. Diese zwei Faktoren führen zu einer Erhöhung der Aufnahme Frequenz, die im Wesentlichen durch die Integrationszeit und durch die Anzahl der Pixel bestimmt ist und ermöglichen so den Einsatz von Infrarot-Kameras für eine Vielzahl unterschiedlichster Anwendungen.

#### **JADE MWIR 4P:**

Die Kamera JADE (11) ist empfindlich für das mittlere Infrarot im Bereich von 3-5µm. Bei voller Bildgröße von 320x240 Pixel ist bei Raumtemperatur eine maximale Aufnahme Frequenz von 150 Bildern pro Sekunde möglich. Das Auslesen der Kameradaten erfolgt nach der Integration-then-read Methode. Dabei wird ein Bild aufgenommen und danach werden die Bilddaten ausgelesen. Erst nach dem Auslesen der Bilddaten ist die nächste Bildaufnahme möglich. Das detektierbare Signal wird pro Pixel auf 14 bit digitalisiert. Dementsprechend steht ein Digital-Level-Bereich von 0 bis 16383 zur Verfügung. Damit man diese Kamera für einen Temperaturbereich von 5°C bis 1800°C verwenden kann, muss bei zu messenden Temperaturen von 175°C bis 900°C bzw. 600°C bis 1800°C jeweils einer der beiden in der Kamera integrierten Filter

verwendet werden. Die Kamera kann somit immer nur in einem bestimmten Temperaturbereich, der sich durch die jeweilige Integrationszeit noch zusätzlich verringert, arbeiten, und muss für Temperaturen außerhalb dieses Bereiches neu kalibriert werden. Abbildung 25 zeigt die Kalibrationskurve für die Infrarot-Kamera JADE MWIR 4P, die speziell für die Messungen im Mehrlinienwalzwerk angefertigt worden ist. Die Integrationszeit beträgt hierbei 13µs und es wird ein Temperaturbereich von 740°C bis 1365°C abgedeckt.



**Abbildung 25: Kalibrationskurve für die Infrarot-Kamera Jade MWIR 4P**

### **Titanium 7500SC:**

Der Detektor der Kamera Titanium (11), die das Nachfolgemodell der zuvor beschriebenen Infrarot-Kamera JADE MWIR 4P darstellt, ist ebenfalls für das mittlere Infrarot im Bereich von 3-5µm ausgelegt. Durch die Integration-while-read Methode, bei der die Bilddaten bereits während der Aufnahme ausgelesen werden, sind mit dieser Kamera bei Raumtemperatur bis zu 383 Aufnahmen pro Sekunde möglich. Die örtliche Auflösung dieses Modells beträgt 320x256 Pixel. Da diese Kamera für Hochtemperaturmessungen nur mehr einen Filter benötigt, reduziert sich dementsprechend auch das Wechseln der Filter, wenn andere Temperaturbereiche zu messen sind. Außerdem erfolgt die Übertragung der Bilddaten bei der TITANIUM 7500SC über eine Gigabit-Ethernet Schnittstelle, die bei heutigen PC's standardmäßig eingebaut ist (die JADE MWIR 4P arbeitet mit einer von der Herstellerfirma selbst entwickelten Schnittstelle, was im Computer den Einbau einer ganz speziellen, kostenintensiven Framegrabber-Karte verlangt). Darüber hinaus verfügt diese Kamera über die sogenannten HYPERCAL® (11) und CNUC® (11) Funktionen, welche die Kalibrierung der Kamera für den vom Benutzer eingestellten Temperaturbereich selbstständig durchführen, wodurch die Anfertigung von Kalibrierkurven, sowie die zugehörige Kalibration, wie für die JADE MWIR 4P, somit nicht mehr nötig ist. Ebenso erfolgt die Wahl der jeweils benötigten Integrationszeit automatisch von der Kamera. Während das Vorgängermodell JADE lediglich vier vordefinierte Fenstergrößen zur Verfügung stellt (durch einen kleineren Bildbereich ist eine Erhöhung der Aufnahmegeschwindigkeit möglich), ist beim

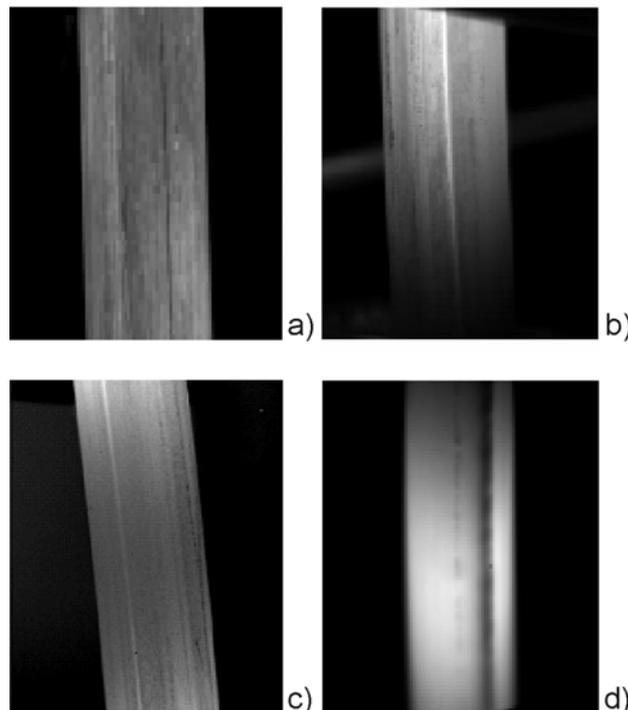
Modell TITANIUM die Fenstergröße zur Gänze frei wählbar, was beim Anpassen der Kamera auf die jeweiligen Aufnahmebedingungen einen deutlichen Vorteil darstellt.

### 5.1.3. Thermografische Laboruntersuchungen (AP3)

Für die verschiedenen in diesem Projekt angedachten Versuche, sind seitens der BEG, einem der Projektpartner, 80 Proben unterschiedlicher Materialien zur Verfügung gestellt worden, von denen etwa 40% einen Fehler aufgewiesen haben.

#### **Raumtemperaturmessungen:**

Die erwähnten Proben sind als erster Schritt bei Raumtemperatur mit induktiver Thermografie untersucht worden. Die Raumtemperaturmessungen haben gezeigt, dass mit dieser Prüfmethode eine Detektion von Überwalzungen, wie sie beim Walzen des Drahtes im Mehrlinienwalzwerk der BEG entstehen, möglich ist. In Abbildung 26 sind vier thermografisch untersuchte Drahtproben zu sehen, die typische Überwalzungen aufweisen.

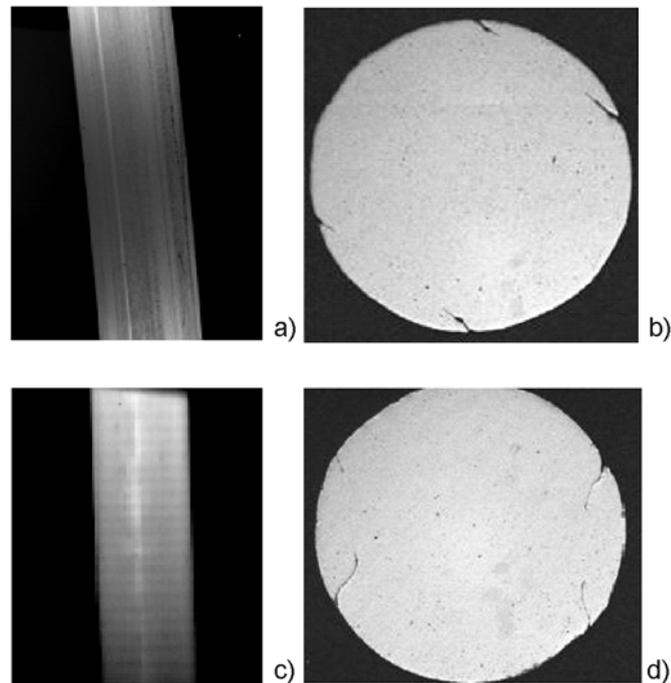


**Abbildung 26: Vier induktiv erwärmte Proben: (a) Austenitischer Stahl, (b) NiFe51, (c) Schnellarbeitsstahl, (d) Titan Grade2**

#### **Vergleich Infrarot-Thermografie mit metallurgischen Untersuchungen auf mikroskopischer Ebene:**

Um die Ergebnisse, welche die Infrarot-Thermografie an den verschiedenen Drahtproben geliefert hat, zu verifizieren, sind drei ausgewählte Proben zuerst thermografisch untersucht worden. Im Anschluss sind von diesen drei Proben bei BEG metallurgische Untersuchungen (mit dementsprechenden Schlibfbildern) durchgeführt worden. Beim Vergleich der Ergebnisse hat sich gezeigt, dass für alle drei Proben eine

komplette Übereinstimmung vorhanden gewesen ist. Abbildung 27 zeigt jene zwei Proben, die jeweils zwei Doppelüberwalzungen (vier Oberflächenfehler) aufweisen (die dritte Probe ist fehlerfrei gewesen).



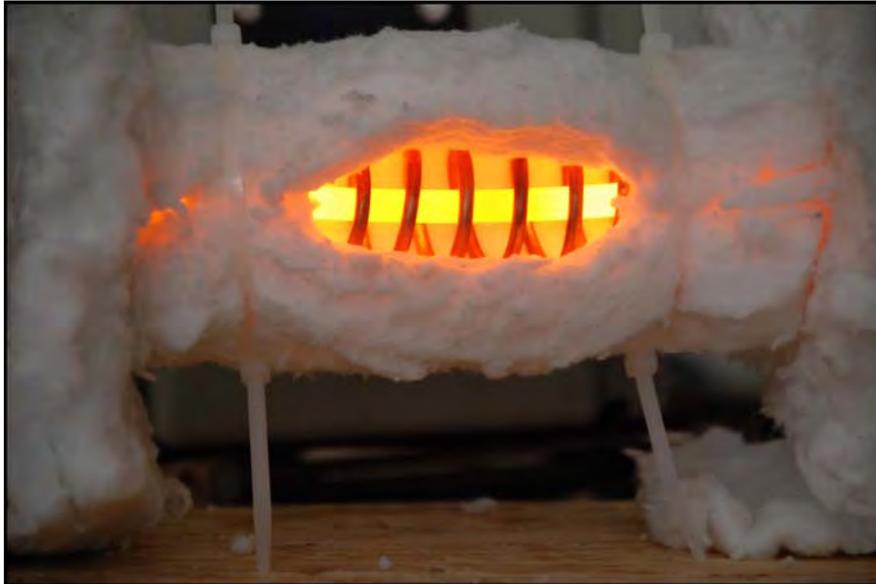
**Abbildung 27: Infrarot-Aufnahme (a) und Schliffbild (b) einer Probe aus Schnellarbeitsstahl S705; Infrarot-Aufnahme (c) und Schliffbild (d) einer Probe aus NiFe45**

#### **Hochtemperaturmessungen, Nachbildung des Vorwärmeofens:**

Da das Walzen der Drähte abhängig vom jeweiligen Material, bei 800°C bis 1100°C erfolgt, muss die jeweilige Probe im Labor zuerst auf dieser Temperatur vorgewärmt werden.

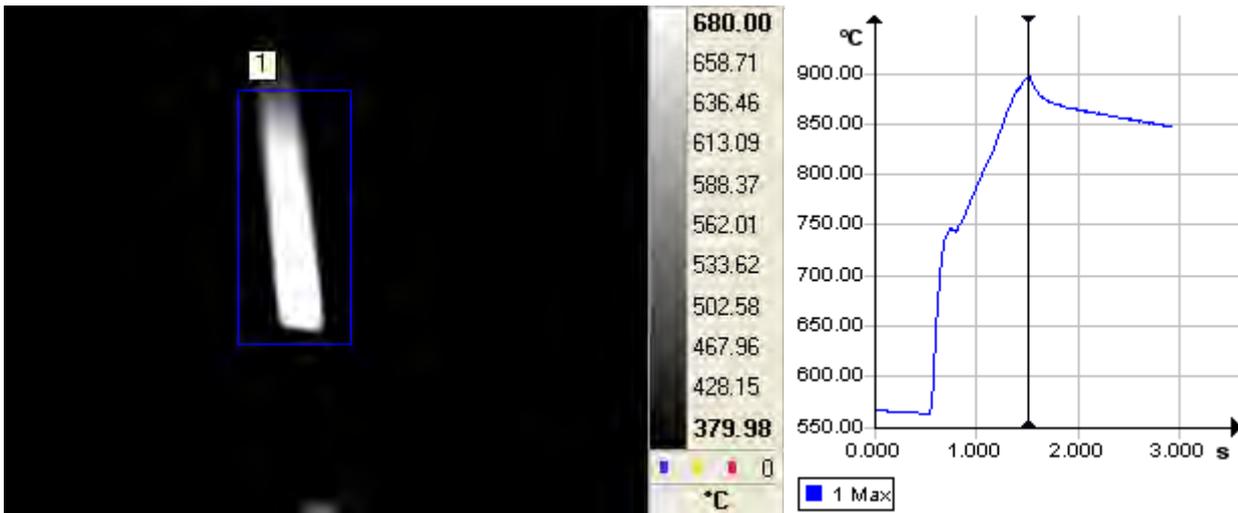
Um diese Gegebenheiten im Labor bestmöglich nachzustellen, sind Spulen mit einer Länge von 20 bzw. 24 cm hergestellt worden, die den Draht über diesen Bereich gleichmäßig erwärmt haben, damit dieser die oben angegebenen Temperaturen erreicht und man dann bei fehlerbehafteten Proben die thermoinduktive Methode bei dementsprechenden Bedingungen testen konnte.

Um die Strahlungsverluste der über 1000°C heiße Probe zu unterbinden, ist die Spule mit einer bis 1200°C hitzebeständigen Wärmeisoliermatte ummantelt worden. Es sind damit wesentlich homogenere Messbedingungen im Hochtemperaturbereich geschaffen worden. Die Isoliermatte ist an einer Stelle mit einer Öffnung versehen worden, dass als Einblick für die Kamera gedient hat (Abbildung 28 zeigt die mit einer Isoliermatte ummantelte Spule mit einer Probe, die auf etwa 1000°C erwärmt worden ist).



**Abbildung 28: Ummantelte Induktionsspule mit Kameraöffnung und einer auf 1000°C erwärmten Probe**

In diesem Zusammenhang ist der physikalische Effekt der so genannten Curie-Temperatur anzuführen, der bei magnetischen Materialien auftritt. Beim Erreichen der Curie-Temperatur verliert der jeweilige Werkstoff seine ferromagnetischen Eigenschaften und das Material wird paramagnetisch. Wenn man einen magnetischen Werkstoff, wie beispielsweise eine Probe aus Schnellarbeitsstahl S500 erwärmt, sind 10% der Generatorleistung von 10kW ausreichend, um die Probe innerhalb von 5 Sekunden auf 750°C zu erwärmen. Bei etwa 750 °C erfolgt keine weitere Erwärmung, sondern die Temperatur der Probe bleibt in diesem Bereich (der Curie-Temperatur) stehen. Erst wenn die Leistung des Induktionsgenerators deutlich erhöht wird, beginnt die Temperatur über diesen Bereich weiter zu steigen. Abbildung 29 zeigt das „Halten“ im Temperaturverlauf beim Erwärmen einer ferromagnetischen Drahtprobe mit dem 30kW Induktionsgenerator mit 100% Leistung, wobei hierfür lediglich 0,8 s benötigt worden sind, um den Draht auf 750°C zu erwärmen.



**Abbildung 29: Im Bereich der Curie-Temperatur (für diese Probe bei etwa 750°C) bildet sich ein Plateau im Temperaturverlauf aus. Die Erwärmung der Drahtprobe erfolgt nach Überschreiten der Curie-Temperatur deutlich langsamer.**

### Dynamische Versuche:

Die Zeit, in welcher der Draht sich bei einer Durchlaufgeschwindigkeit von bis zu 40m/s im Einwirkungsbereich der Induktionsspule befindet, beträgt lediglich 1-2 ms. Aufgrund der Trägheit des Induktionsgenerators sind derartig kurze induktive Pulse jedoch nicht möglich, um daraus die Erwärmung des Drahtes mit statischen Versuchen ableiten zu können. Daher ist auch für das Labor ein Aufbau konzipiert und angefertigt worden, mit dem es möglich gewesen ist, dynamische Messungen mit einer Geschwindigkeit von bis zu 20m/s durchzuführen. Aus Sicherheitsgründen sind für diese dynamischen Versuche im Labor ausschließlich Proben mit Raumtemperatur zur Verwendung gekommen.

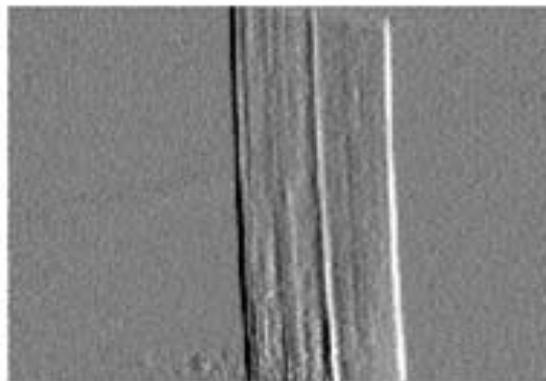
Neben den dynamischen Versuchen im Labor des Lehrstuhles für Automation, sind derartige dynamische Versuche auch im Technikum der Firma vatron, einem der Projektpartner, durchgeführt worden, um dadurch Aufschluss über die Zweckmäßigkeit eines Industrieinsatzes mit dem dort vorhandenen 30kW Induktionsgenerator zu erhalten. Die Erwärmung, die dabei abhängig vom jeweiligen Material erreicht worden ist, beträgt zwischen 2°C und 10°C für nicht magnetische Materialien und bis zu 45 °C für jene Proben, die bei Raumtemperatur magnetisch sind.

### Luftabkühlung:

Da der „umgekehrte“ Weg, anstatt den Draht für die Prüfung induktiv zu erwärmen, diesen mit einem Luftpuls abzukühlen wesentlich eine einfachere Konzeption des Prüfaufbaues zur Folge hat, und zusätzlich kostengünstiger wäre, sind sowohl für die Labormessungen, als auch für die Industriemessungen zahlreiche Versuche mit Luftabkühlung des Drahtes durchgeführt worden. Um einen möglichst homogenen Luftpuls aufbringen zu können, sind mehrere unterschiedliche Luftdüsen konzipiert und getestet worden: Lanzenförmige, um den Luftpuls sehr gezielt auf einen kleinen Bereich lenken zu können; Ringförmige um

den Draht über seinen gesamten Umfang gleichmäßig abkühlen zu können, sowie Flachdüsen mit verschiedenen Breiten.

Wenn eine Überwalzung beim mehrere hundert Grad heißen Draht mit einem Luftpuls beaufschlagt wird, kühlt sich diese Überwalzung, die durch einen schmalen Luftspalt vom Draht getrennt ist, wesentlich schneller ab, als der Rest der Drahtoberfläche. Ebenso dauert der Temperatenausgleich zwischen Überwalzung und der Wärme, aus dem Inneren des Drahtes länger, als der Temperatenausgleich an der restlichen Drahtoberfläche. Diesen Effekt kann man mit einer Infrarot-Kamera sichtbar machen. In Abbildung 30 ist die mit dem Luftpuls abgekühlte Einwalzung am heißen Draht deutlich zu erkennen.



**Abbildung 30: Ausgewertetes Infrarot-Bild einer Drahtprobe aus Schnellarbeitsstahl mit Luftabkühlung. Der Fehler ist deutlich zu erkennen**

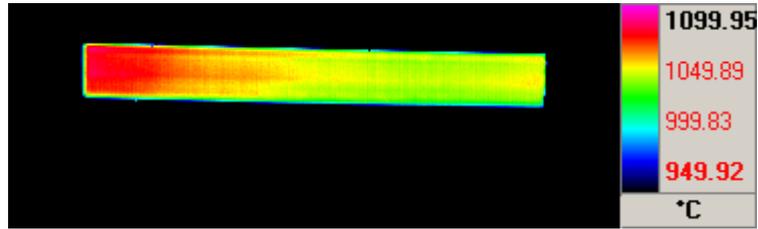
Im Zuge der Versuche hat sich gezeigt, dass nicht alle Überwalzungen ein detektierbares Fehlersignal geliefert haben. Die Ursache hierfür ist bei der Methode mit der Luftabkühlung eine starke Winkelabhängigkeit des Rissverlaufes gewesen.

#### **5.1.4. Bildverarbeitung (AP4)**

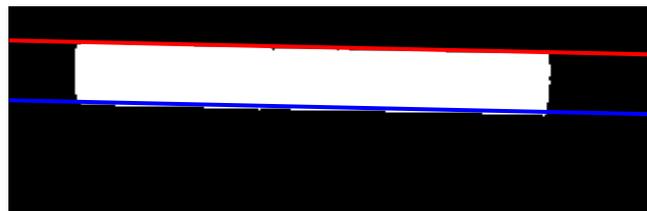
Das Ziel dieses Arbeitspakets war, geeignete Bildverarbeitungsalgorithmen zu entwickeln, damit die aufgenommenen Infrarotbilder automatisch ausgewertet und mögliche Risse gefunden werden können. Die Algorithmen wurden mit Hilfe der Software Matlab (9), sowie mit der zugehörigen Image Processing Toolbox ausgearbeitet. Die Methoden wurden an Daten, die bei den Industriemessungen im Walzwerk aufgenommen wurden, getestet. Es wurden weitere Tests durchgeführt, wie die Auswertungen soweit beschleunigt werden können, dass sie in Echtzeit ausgeführt werden können.

Nach der Analyse der im Walzwerk aufgenommenen Infrarotbilder, wurde an der Drahtoberfläche ein lokaler Temperaturgradient bemerkt, siehe Abbildung 31, welcher durch die Abkühlung der glühenden Oberfläche am Luftspalt zwischen den zwei Führungen hervorgerufen wird. Außerdem bewegt sich der Draht innerhalb des Sichtfeldes der Kamera einige Millimeter rauf und runter, wobei sich auch seine Winkellage ändert. Um den Temperaturverlauf über die gesamte Länge des Drahtes verfolgen zu können, wurden Bildverarbeitungsroutinen entwickelt, die aus den Einzelbildern ein Panoramabild des Drahtes erzeugen.

Im ersten Schritt wird im Infrarotbild das Drahtstück lokalisiert und in ein Binärbild umgewandelt, wobei jenen Pixel, die zum Objekt gehören der Wert '1', und den Pixel des Hintergrundes der Wert '0' zugewiesen wird. Zur oberen und unteren Kante des Drahtstückes werden parallele Linien gefittet, siehe Abbildung 32.



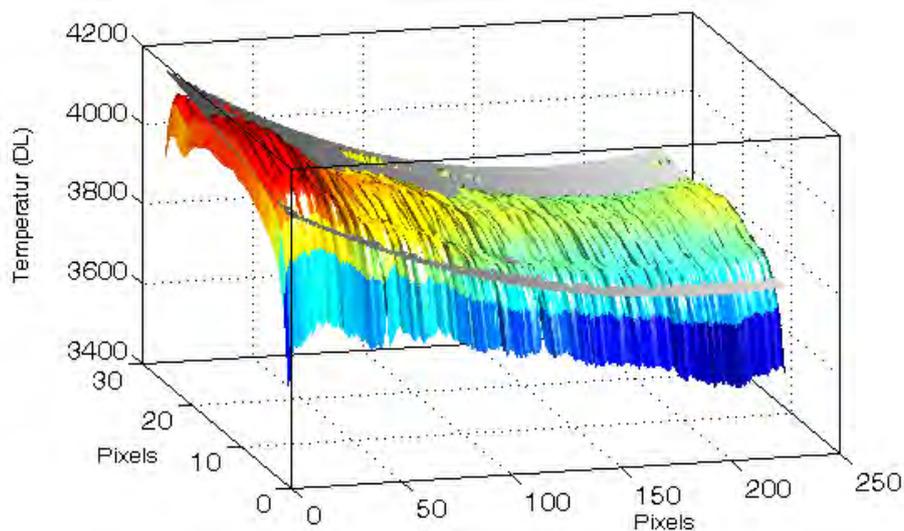
**Abbildung 31: Infrarotbild eines sich bewegenden Drahtes**



**Abbildung 32: Parallele Linien gefittet zu den Kanten des Drahtes**

Durch diese Linien ist die Lage des Drahtes bestimmt und das Bild wird dementsprechend gedreht, damit das Drahtstück horizontal im Bild liegt.

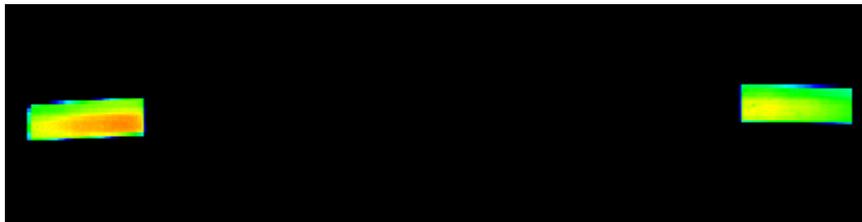
Abbildung 33 zeigt den Temperaturverlauf am Draht mit einer farbigen Fläche, wobei erkennbar ist, dass die linke Seite wärmer als die rechte Seite ist. Die Temperaturwerte der z-Achse sind nicht in °C sondern in den internen Einheiten der Infrarotkamera in ‚Digital Levels‘ aufgetragen, der Temperaturunterschied zwischen den beiden Seiten entspricht etwa 30°C. Um diesen Temperaturgradient zu eliminieren, wird ein 2d Polynom zur Temperaturverteilung des Drahtes gefittet (als graue Fläche in Abbildung 33 dargestellt).



**Abbildung 33: Temperatur des Drahtes als Oberfläche (farbig) und das gefittete 2d-Polynom (grau)**

Der Unterschied zwischen diesen zwei Flächen ergibt die lokale Erwärmung des Drahtes, die von den einzelnen Bildern zusammengefügt werden kann, und damit ein gesamtes Erwärmungsprofil über die Drahtlänge darstellt.

Als für die Industriemessungen ein neuer Führungsblock mit zwei Einblicköffnungen hergestellt wurde, ist die Auswerterroutine dementsprechend erweitert worden. Eine Infrarotaufnahme vom glühenden Draht mit diesem Führungsblock zeigt Abbildung 34. In der Mitte zwischen den zwei Einblicköffnungen ist die Induktionsspule platziert. Wie in diesem Bild sichtbar ist, bewegt sich der Draht stark innerhalb des Blockes. Besonders starke Bewegungen sind festzustellen, wenn der Draht zu Beginn des Walzens eingeführt wird bzw. wenn er am Ende ausläuft. Dementsprechend wird die oben beschriebene Bildverarbeitung zweimal, für die linke und rechte Seite getrennt, angewandt und danach die Differenz zwischen den beiden Seiten gebildet. Auf dieser Weise wird die Erwärmung des Drahtes durch die Induktionsspule sichtbar gemacht.



**Abbildung 34: Infrarotaufnahme vom Draht durch den Führungsblock mit zwei Einblicköffnungen**

Eine weitere Herausforderung hat die Auswertung der Daten in Echtzeit dargestellt. Aufgrund der hohen Durchlaufgeschwindigkeit des Materials ist eine sehr hohe Aufnahmefrequenz notwendig, was dazu führt, dass bis zu 1500 Bilder in einer Sekunde verarbeitet werden müssen. Nachdem selbst mit einem sehr leistungsfähigen Computer diese Menge von Daten nicht bewältigt werden kann, wurde im Rahmen des Projektes untersucht, welche Möglichkeiten bestehen, um beispielsweise mit Hilfe von hardwaremäßigen Beschleunigungsmaßnahmen die Bildverarbeitung in Echtzeit zu realisieren. Aufgrund der raschen Leistungssteigerung von Grafikprozessoren und einer ausgeprägten Forschungstätigkeit für die Verwendung von Grafikkarten zum Lösen von parallelisierbaren Berechnungen, ist die Entscheidung für die weiteren Untersuchungen auf die Benutzung einer dementsprechenden GPU gefallen.

Die vielen Prozessoren einer GPU können parallel zur CPU die rechenintensiven Aufgaben wesentlich schneller ausführen, als es mit der CPU alleine möglich ist. Zusätzlicher Vorteil dieser Grafikkarten, bei denen spezielle Grafikchips der Firma NVidia (10) verwendet werden, ist, dass die Firma NVidia eine Programmierschnittstelle veröffentlicht hat, die so genannte CUDA, welche für technische und wissenschaftliche Applikationen die Rechenleistung der Karten zur Verfügung stellt. Testergebnisse haben gezeigt, dass für große Datenmengen mit mehreren Operationen die Graphikkarte einen bedeutenden Rechenzeitgewinn erzielen kann.

#### **5.1.5. Testmessungen in Industrieumgebung (AP5)**

Es ist ein wesentliches Ziel des Projektes gewesen, eine Aussage über die Realisierbarkeit einer derartigen Prüfanlage für die industrielle Anwendung zu treffen. Daher sind neben den Labormessungen im zweiten

Teil des Projektes auch Messungen im Mehrlinienwalzwerk der BEG durchgeführt worden, um die Industrietauglichkeit der einzelnen Komponenten, die für eine derartige Messanlage benötigt werden, zu testen, aber auch um über jene Aspekte Aufschluss zu erhalten, die mit Labormessungen nicht nachgestellt werden konnten.

### **Infrarot-Kamera**

Die ersten vier von fünf Industriemessungen sind mit der am Lehrstuhl für Automation vorhandenen Infrarotkamera Jade III der Firma FLIR (vormals CEDIP) durchgeführt worden (Abbildung 35 zeigt die Position der Kamera, die Aufnahmen sind zwischen zwei Führungsblöcken der Trägerleitung erfolgt).



**Abbildung 35: Position der Infrarot-Kamera**

Um zu gewährleisten, dass der mit bis zu 40m/s vorbeigeführte Draht zur Gänze aufgezeichnet werden kann, sind zuerst die Aufnahmeparameter der Infrarot-Kamera bestmöglich angepasst worden. Bei dieser Infrarot-Kamera stehen 4 vordefinierte Bildgrößen zur Auswahl. Bei voller Bildgröße mit einer Auflösung von 320 x 240 Pixel hat man eine maximale Frequenz von 190 Aufnahmen pro Sekunde. Zwischen den beiden Führungsblöcken ist ein Abstand von 73mm. Die Kamera ist so aufgebaut worden, dass diese 73mm im Bild zu sehen gewesen sind. Da sich der Draht während einer Aufnahme jedoch um 168 mm weiterbewegt hat, ist mit diesen Einstellungen eine lückenlose Erfassung des gesamten Drahtes nicht möglich gewesen. Durch die Wahl einer kleineren Bildgröße lässt sich die Aufnahmefrequenz deutlich erhöhen. Bei einer Bildgröße von 64 x 120 Pixel ist eine maximale Frequenz von 1500 Aufnahmen pro Sekunde zu erreichen. Bei dieser Bildgröße können 21mm Draht abgebildet werden. Zwischen zwei Aufnahmen hat sich der Draht ebenfalls um 21mm weiterbewegt, sodass mit diesen Einstellungen die gesamte Drahtlänge lückenlos aufgezeichnet werden konnte. Da sich der Drahtanfang bis zum Erreichen der Wickelmaschine in den Führungsblöcken der Trägerleitung oft stark auf- und abbewegt hat, ist es immer wieder vorgekommen, dass sich der Draht während dieser Zeit aus dem Bildbereich rausbewegt hat.

Wie im Projektplan vorgesehen, ist bei der fünften Industriemessung das Nachfolgemodell der bis dato verwendeten Infrarot-Kamera getestet worden. Dabei handelt es sich um das Modell Titanium der Firma FLIR. Diese Infrarot-Kamera stellt mit all ihren Funktionen den derzeitigen Stand der Technik in diesem Bereich dar. Mit dieser Infrarot-Kamera ist es möglich, die Bildgröße zur Gänze frei zu wählen, ebenso hat sich die Aufnahmefrequenz gegenüber dem Vorgängermodell um etwa den Faktor 2,5 erhöht (Diese Infrarot-Kamera arbeitet nach dem sogenannten Integration-while-read Verfahren, das heißt, während die Kamera ein Bild aufnimmt, werden gleichzeitig die Bilddaten ausgelesen. Die Vorgängermodelle dieser Kamera haben nach dem Integration-then-read Verfahren gearbeitet, dabei sind nach der Bildaufnahme die Bilddaten ausgelesen worden, und erst danach ist die nächste Bildaufnahme gemacht worden). Diese Aspekte, sowie die Tatsache, dass bei der letzten Industriemessung ein Führungsblock mit wesentlich geringerem Querschnitt zum Einsatz gekommen ist (dadurch hat sich der Draht nicht mehr so weit auf- und abbewegen können), haben dazu geführt, dass auch diese schlagartigen Bewegungen des Drahtes am Anfang der Walzung lückenlos aufgezeichnet werden konnten.

Um die oben erwähnten 21mm Drahtlänge pro Bild aufnehmen zu können, hat sich bei einem Öffnungswinkel des Objektivs von  $8,24^\circ$  ein Abstand der Infrarot-Kamera von 30cm ergeben.

Während der fünf durchgeführten Industriemessungen hat sich, abgesehen von einer leichten Staubschicht, keine nennenswerte Beeinträchtigung der Infrarot-Kamera ergeben, sodass die Infrarot-Kamera, mit einem industrietauglichen Schutzgehäuse versehen, dauerhaft in dieser Entfernung eingesetzt werden kann. Mit diesem Abstand von 30cm zwischen Kamera und Drahtoberfläche hat dies zu einer örtlichen Auflösung von 0,2mm pro Pixel geführt.

### **Luftabkühlung:**

Ein ganz wesentlicher Punkt, der im Zuge dieses Projektes zu klären gewesen ist, war die Frage, ob anstelle der induktiv angeregten Thermografie eine Luftabkühlung der heißen Drahtoberfläche zur Detektion von etwaigen Walzfehlern geeignet ist. Der Vorteil der Luftabkühlung wäre eine einfachere Konzeption der Anlage, geringere Anschaffungskosten, da der Kauf eines Induktionsgenerators wegfallen würde, sowie geringere Energiekosten während des Betriebes.

Bei der ersten Industriemessung ist mit einer Druckluftpistole in einem Abstand von etwa 10cm zyklisch Druckluft aus dem werkseigenen Industrieluftnetz aufgeblasen worden. In einem Temperaturprofil der gemessenen Drahtoberfläche kann man die Bereiche, bei denen Luft auf den Draht geblasen wird, deutlich mit einem Temperaturunterschied von etwa  $20^\circ\text{C}$  detektieren.

Für die zweite Industriemessung ist eine spezielle Luftdüse gebaut worden, welche die Druckluft, im Gegensatz zur eher punktförmig aufgebrachtten Abkühlung mit der Druckluftpistole, gleichmäßig über den gesamten Drahtquerschnitt aufgebracht hat. Bei diesen Messungen sind die Bereiche der Abkühlung im Temperaturbereich kaum, bis gar nicht, festzustellen, was auf das Materialverhalten zurückzuführen ist, da an diesem Tag, nicht wie bei der ersten Industriemessung S600 (Schnellarbeitsstahl), sondern Draht aus einer Ni-Basis Legierung gewalzt worden ist.

Zusätzliche Versuche im Labor, bezüglich des Winkels der Einwalzung, haben untermauert, dass die Methode der Luftabkühlung der Drahtoberfläche zur Detektion von Walzfehlern nicht geeignet ist.

### **Induktive Erwärmung:**

Ebenso wie für die Messungen im Labor, ist bei der dritten Industriemessung ein 10kW Induktionsgenerator zum Erwärmen des Drahtes verwendet worden. Ziel ist es gewesen, zu überprüfen, ob mit dem Einsatz dieses Induktionsgenerators eine detektierbare Erwärmung des Drahtes erreicht werden kann. Die Induktionsspule wird dabei zwischen zwei Führungsblöcken der Trägerleitung angebracht und einen Führungsblock danach mit der Infrarot-Kamera die Drahtoberfläche aufgezeichnet.

Da der Draht selbst „einfädelt“, dürfen die Abstände zwischen den Führungsblöcken nicht größer als etwa 7cm sein, um sicherstellen zu können, dass der Draht unter keinen Umständen die Trägerleitung verlassen kann. Aufgrund dieses geringen Abstandes werden durch das vom Induktionsgenerator erzeugte Magnetfeld die benachbarten Führungsblöcke, die aus Gusseisen hergestellt sind, so stark erwärmt, dass diese nach kurzer Zeit zu glühen beginnen. Auf der anderen Seite ist dadurch eine ausreichende Erwärmung des Drahtes aufgrund des fehlenden Magnetfeldes nicht mehr gegeben, sodass im Infrarotbild des Drahtes kaum Erwärmung feststellbar gewesen ist.

Um dieses Problem zu lösen, ist für die vierte Industriemessung ein Führungsblock aus Gusseisen aus der Trägerleitung entnommen, und an dessen Stelle ein speziell angefertigter Führungsblock verwendet worden. Bei der Konzeption dieses Führungsblockes ist es wichtig, dass keine induktiv erwärmbaren Materialien verwendet werden, dass der Werkstoff genug Festigkeit aufweist, um die, durch die schlagenden Bewegungen des Drahtes, entstehenden Kräfte aufnehmen zu können, sowie gegen die hohen Temperaturen während des Walzprozesses beständig ist.

Der speziell angefertigte Führungsblock hat sich im Laufe des vierten Messtages im Mehrlinienwalzwerk bestens bewährt. Die im Vorfeld erwartete Erwärmung des Drahtes hat man während dieser Versuche allerdings nicht erreichen können, sodass als Fazit dieser Messungen gesagt werden kann, dass ein 10 kW Induktionsgenerator mit einer derartigen Induktionsspule nicht genügend Leistung zur Verfügung stellt. Dementsprechend wurde in den nächsten Messungen ein leistungsstärkerer Generator getestet. Einer der Projektpartner, die Firma vatron, verfügt in ihrem Technikum über einen 30kW Induktionsgenerator, der in der Folge für eine dementsprechende Anwendung getestet und angepasst worden ist.

Beim Einsatz dieses Generators während der fünften Industriemessung hat sich gezeigt, dass bei einigen Materialien eine erkennbare Erwärmung des Materials stattgefunden hat. Bei einem Teil der gewalzten Materialien ist jedoch selbst eine Leistungseinbringung mit dem 30kW Generator zu gering gewesen, um eine detektierbare Erwärmung zu erreichen.

## 6. Detailangaben in Bezug auf die Ziele der Programmlinie

Die inline Qualitätsprüfung während des Walzprozesses ist noch ein ungelöstes Problem, woran einige Forschungsgruppen arbeiten, aber noch keine zufrieden stellende Lösung aufgezeigt werden konnte. Die neue Generation der Infrarotkameras ermöglicht bei der thermografischen Untersuchung neue und innovative Ansätze. Neben dem Innovationsinhalt des Vorhabens ist auch die Ressourceneffizienz und die Ausschussreduzierung ein wichtiges Merkmal des Projektes. Nach der Zielsetzung des Projektes ist es in die Themenstellung „Technologien und Innovation bei Produktionsprozessen“ einzuordnen.

Ein wichtiger Punkt zum nachhaltigen Wirtschaften ist, dass die Produktion energie- und ressourceneffizient und mit möglichst wenig Ausschuss durchgeführt wird. Um Ausschuss zu vermeiden, muss das hergestellte Produkt möglichst schnell, schon während des Produktionsprozesses auf mögliche Fehler untersucht werden. Mit einer Qualitätsprüfung schon während der Produktion kann man schnell reagieren, die Fehlerursachen unmittelbar beheben und damit die Produktion fehlerfrei und ressourceneffizient fortsetzen. Wenn der Fehler nicht entdeckt wird, wird das Halbprodukt sogar weiterverarbeitet, was weitere Energie- und Produktionskosten verursacht, bevor der Mangel entdeckt wird und zum Ausschuss führt.

Als konkretes Beispiel das Vorhaben dieses Projektes: für das Walzen wird das Vormaterial in Form von Stäben (etwa 5m lang, 130mmx130mm Querschnitt, Gewicht 350-600kg) auf die Walztemperatur (850-1300°C) vorgewärmt. Der Materialpreis von ausgewählten Legierungen ist sehr hoch (30-300€/kg, damit etwa 10.000-100.000€ pro Stab) und das Erwärmen bis zu 1300°C ist sehr energieintensiv. Das Material wird in mehreren Schritten auf den gewünschten Drahtdurchmesser mit einer Rollenlänge bis zu 3,5km gewalzt, was ebenfalls ein sehr energieintensiver Prozess ist. Der gewalzte Draht wird danach weiterverarbeitet. Wenn ein Fehler erst nach dem Walzen oder sogar erst bei der Weiterverarbeitung entdeckt wird, führt er zum Ausschuss der gesamten Rolle, damit wird es als Schrott wieder eingeschmolzen. Dies bedeutet sehr hohe Verluste an Material und energieintensiver Arbeit.

Eine derartige Anlage erfüllt hinsichtlich der sieben Leitprinzipien nachhaltiger Technologieentwicklung jedenfalls das Effizienzprinzip, da es durch den Einsatz einer derartigen Anlage zu einer Reduktion von Ausschussmaterial kommt, was zur Folge hat, dass weniger Material, und damit einhergehend weniger Energie, verbraucht wird. Dies schlägt sich in weiterer Folge auch in einer dementsprechenden Kosteneffizienz nieder. Diese Effizienzsteigerung im Kostenbereich trägt in weiterer Folge zu einer Standortsicherung und zum Erhalt von Beschäftigung bei und erfüllt damit das Leitprinzip der Sicherung von Arbeit, Einkommen und Lebensqualität.

Das Projektteam ist so zusammengestellt gewesen, dass neben dem Forschungsteam sowohl der zukünftige Nutzer der Ergebnisse als auch die Betreiber involviert gewesen sind (Projektpartner 1 ist interessiert eine derartige Prüfanlage im Produktionsprozess einzubauen. Die Projektpartner 2 und 3 haben Erfahrungen in Bau optischer Prüfanlagen für die Stahlindustrie).

Das Forschungsteam hat das bereits vorhandene Wissen im Bereich der zerstörungsfreien Prüfung von Materialien erweitert. Dabei sind neue theoretische Ansätze erarbeitet bzw. weiterentwickelt und in experimentellen Versuch geprüft worden. Das erarbeitete Know-how bringt dem Forschungspartner einen wissenschaftlichen Vorsprung im Bereich der zerstörungsfreien Heißprüfung und verstärkt somit seine fachliche Kompetenz. Die Versuche im Labor haben gezeigt, dass die Methode der thermoinduktiven Rissprüfung zur Detektion der Überwalzungen und Fehler an gewalzten Drahtproben sowohl bei Raumtemperatur als auch bei Temperaturen um 1000°C bestens geeignet ist. Aus dem Projekt kann abgeleitet werden, dass eine zerstörungsfreie Online-Inspektion für heiß gewalzte Drähte bis zu einer Walzgeschwindigkeit von 10m/s realisierbar ist. Darüber hinaus bieten sich unter Umständen Einsatzmöglichkeiten, bei ähnlich gelagerten Problemstellungen. (Prüfung von Brammen, etc.).

Bei der Realisierung eines Demonstrationsprojektes ist die extrem hohe Walzgeschwindigkeit des Drahtes von bis zu 40 m/s als Problem aufzuführen, da selbst ein 30kW Generator nicht genügend Leistung zur Verfügung stellt, um sicherzustellen, dass sämtliche Drähte in dieser kurzen Einwirkzeit der Induktionsspule ausreichend erwärmt werden. Wie schon weiter oben erwähnt, scheint eine Realisierung bei Walzgeschwindigkeiten bis zu 10m/s möglich.

## 7. Schlussfolgerungen zu den Projektergebnissen

Mit den, im Rahmen des Projektes, durchgeführten Tätigkeiten, sind viele Erkenntnisse bezüglich induktiver Erwärmung unterschiedlicher metallischer Werkstoffe, Auslegung von Induktionsspulen, Feldkonzentratoren und dem Einsatz von Kameras im sichtbaren Bereich zur Temperaturmessung gewonnen worden.

Bei den Versuchen im Labor hat sich gezeigt, dass Überwalzungen an den Drahtproben mit der therminduktiven Methode auch bei Temperaturen von 1000°C zu gut detektierbaren Ergebnissen geführt hat. Die Ergebnisse der Laborversuche stimmen mit den analytischen Modellen, sowie mit den Simulationen ausgezeichnet überein. Metallurgische Untersuchungen (Schliffbilder) an drei Proben haben dies noch zusätzlich bestätigt. Die hohe Walzgeschwindigkeit hat neben der Tatsache, dass die gewalzten Werkstoffe stark divergierende Materialparameter aufweisen, zu Problemen bei der industriellen Umsetzung der im Labor gewonnenen Erkenntnisse geführt.

Die getestete Infrarot-Kamera FLIR Titanium SC7500 erfüllt aufgrund ihrer örtlichen, sowie Temperaturlösung und ihrer Aufnahmegeschwindigkeit alle in diesem Projekt geforderten Voraussetzungen, um in einem derartigen Projekt verwendet werden zu können. Die drei Kameras im sichtbaren Bereich (JAI CV-A33, JAI Pulnix TM-6CN und Photonfocus) sind aufgrund ihrer zu schwachen Temperaturlösung hingegen für einen derartigen Einsatz ungeeignet. Für Anwendungen, wo man Temperaturunterschiede von 20°C und mehr zu detektieren hat, können die getesteten Kameras im sichtbaren Bereich jedoch eine preisgünstige Alternative zu Infrarot-Kameras darstellen.

Die zahlreichen Versuche mit den unterschiedlichen Materialien haben zu Erkenntnissen bezüglich deren effizienter Erwärmung, und damit verbunden über den Einfluss der Induktorgeometrie bei der induktiven Erwärmung geführt.

Die Temperaturerhöhung durch die induktive Erwärmung ist stark materialabhängig, wobei im Labor bei statischen Untersuchungen sämtliche Drahtproben mit dem 10kW Generator in kurzer Zeit auf die gewünschte Temperatur erhitzt werden konnten. Um die Materialien auch bei dynamischen Versuchen erwärmen zu können, ist ein 30kW Generator benötigt worden. Um sicherzustellen, dass alle gewalzten Materialien für eine thermografische Untersuchung bei Walzgeschwindigkeiten von bis zu 40m/s ausreichend erwärmt werden können, würde man einen Induktionsgenerator mit mehr als 30kW Leistung benötigen.

Durch den Einsatz eines 30kW Induktionsgenerators hat sich gezeigt, dass die Induktionsspulen, wie sie für den 10kW Generator verwendet werden, nicht ausreichend dimensioniert sind. Für eine dauerhafte Verwendung eines derartigen leistungsstarken Generators bedarf es einer deutlich verbesserten Kühlung. Außerdem kommt es aufgrund des starken Magnetfeldes, das der Induktionsgenerator erzeugt, zu starken Vibrationen der Spule, die für einen dauerhaften Einsatz unterbunden werden müssen.

Versuche bezüglich der Fehlerdetektion mit Luftabkühlung der gewalzten Drähte haben gezeigt, dass aufgrund der Abhängigkeit der Fehlersignalstärke vom Überwälzungswinkel diese Methode für eine Nutzung in industrieller Umgebung als nicht zuverlässig erscheint.

Für das Walzen von Draht, bei denen die Walzgeschwindigkeit 10m/s nicht übersteigt, stellt die thermoinduktive Methode eine gute Möglichkeit dar, um Risse und Überwälzungen zu detektieren.

## 8. Ausblick und Empfehlungen

Für Walzvorgänge bei denen die Walzgeschwindigkeit 10m/s nicht übersteigt, scheint eine Fortsetzung der Forschungs- und Entwicklungsarbeit empfehlenswert, da die dynamischen Versuche im Labor bei derartigen Walzgeschwindigkeiten dementsprechend gute Ergebnisse geliefert haben. Es soll hier nochmals darauf hingewiesen werden, dass diese Prüfmethode nicht nur für das Walzen von Drähten verwendet werden kann, sondern für die Inline Qualitätsüberwachung bei einer Vielzahl von heiß gewalzten Produkten eingesetzt werden könnte.

Die Versuche im Labor haben gezeigt, dass die Methode der thermoinduktiven Rissprüfung zur Detektion der Überwalzungen und Fehler an gewalzten Drahtproben sowohl bei Raumtemperatur als auch bei Temperaturen um 1000°C bestens geeignet ist.

Bei den Versuchsmessungen in industrieller Umgebung hat sich herausgestellt, dass die Leistung, die durch einen 30kW Generator in den Walzdraht eingebracht werden kann, abhängig vom jeweiligen Material, oftmals zu gering ist, um eine eindeutig feststellbare Erwärmung zu erreichen. Einer Verbesserung des Wärmeeintrages durch den Einsatz eines leistungsstärkeren Generators steht die Tatsache gegenüber, dass derartige Geräte wiederum mit deutlich niedrigeren Frequenzen arbeiten, als der 30kW Generator, was wiederum Auswirkungen auf die Eindringtiefe der Wirbelströme und somit die Erwärmung zur Folge hat.

Möglichkeiten für weiterführende Forschungs- und Entwicklungsarbeiten werden demnächst in Gesprächen mit den Projektpartnern geklärt.

## 9. Literaturverzeichnis

- (1) Walzdrahtfehler, Hrsg.: Verein Deutscher Eisenhüttenleute, Verl. Stahleisen, 1973.
- (2) Nondestructive Testing Handbook, Vol.4, Electromagnetic Testing, ASNT 1986
- (3) Institut Dr. Förster, <http://www.foerstergroup.de>
- (4) G.Coen, U. Bialke, Automatische berührungslose Ultraschallprüfung von Drähten, MEFORM, 2007, Freiberg
- (5) K.Simonyi, Theoretische Elektrotechnik, Barth Verlagsgesellschaft mbH, 1993.
- (6) H.S.Carslaw and J.C.Jaeger, Conduction of Heat in Solids, Oxford University Press, Oxford, 1959.
- (7) ANSYS, Inc., <http://www.ansys.com/>
- (8) B. Oswald-Tranta, G. Wally: "Thermo-inductive surface crack detection in metallic materials", *9th European Conference on NDT*, Berlin, 2006.
- (9) MathWorks Inc., <http://www.mathworks.com>
- (10) NVidia Corporation, <http://www.nvidia.com>
- (11) FLIR Systems, Inc., <http://www.flir.com>
- (12) JAI A/S, JAI CV-A33 Operation Manual, <http://www.jai.com>
- (13) JAI A/S, Pulnix TM-6CN Datenblatt, <http://www.jai.com>
- (14) Photonfocus AG, Produktdatenblatt Photonfocus MV1-D1312I, <http://www.photonfocus.com>

## 10. Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Prinzip des thermo-induktiven Prüfverfahrens .....	7
Abbildung 2: Wirbelstromverteilung um einen Riss herum.....	8
Abbildung 3: Mikroskopische Aufnahme von einem Querschliff einer Überwalzung mit 2 Rissen, Risstiefe: 0.4mm, Drahtdurchmesser: 5.5mm.....	8
Abbildung 4: Gestauchtes Drahtstück mit aufgeplatzten Rissen .....	10
Abbildung 5: Magnetfeldverteilung in der Ebene durch den Mittelpunkt der kreisförmigen Spule.....	12
Abbildung 6: Magnetfeldverteilung einer zylinderförmigen Spule mit 10 Windungen .....	13
Abbildung 7: Ablauf einer Simulation, wobei elektromagnetische Induktion und Wärmetransport gekoppelt gelöst werden. ....	14
Abbildung 8: Links: 3d Modell des Drahtes mit der Spule zeigt die Temperaturverteilung nach kurzer induktiven Erwärmung; rechts: Temperaturerwärmung an der Oberfläche (blaue Linie) und im Inneren des Drahtes aus Titan. ....	15
Abbildung 9: Vergleich der analytisch berechneten und der simulierten Temperatur an der Oberfläche und im Mittelpunkt eines Drahtes aus Kupfer (a) und aus Titan (b) .....	15
Abbildung 10: Wirbelstromverteilung für ein nicht-magnetisches (a) und für ein magnetisches (b) Material .	16
Abbildung 11: Temperaturverteilung nach kurzer induktiver Erwärmung für ein nicht-magnetisches (a) und für ein magnetisches (b) Material .....	17
Abbildung 12: Temperaturverteilung um einen schrägen Riss (nicht-magnetisches Material) .....	17
Abbildung 13: Temperaturverteilung um eine Doppelüberwalzung (nicht-magnetisches Material).....	17
Abbildung 14: Temperaturverlauf an einem Draht nach Durchlaufen einer Induktionsspule, Bewegungsrichtung von rechts nach links .....	18
Abbildung 15: Temperaturverteilung an einem schräg verlaufenden Riss nach Abkühlung an der Oberfläche .....	18
Abbildung 16: Spektrale Empfindlichkeit der JAI CV-A33 Kamera (12).....	20
Abbildung 17: Grauwerte für die jeweilige Temperatur zwischen 170°C und 450°C für die JAI CV-A33 Kamera .....	20
Abbildung 18: Spektrale Empfindlichkeit der JAI Pulnix TM-6CN Kamera(13) .....	21
Abbildung 19: Grauwerte für die jeweilige Temperatur zwischen 170°C und 450°C für die JAI PULNIX TM-6CN Kamera.....	21
Abbildung 20: Abkühlversuch mit punktuell aufgebrachtem Luftpuls bei einer Oberflächentemperatur von 620 °C. Aufnahme vor dem Abkühlen (links), sowie nach dem Abkühlen (rechts).....	22
Abbildung 21: Spektrale Empfindlichkeit der Photonfocus Kamera (14).....	22
Abbildung 22: Grauwerte für die jeweilige Temperatur zwischen 340°C und 450°C für die PHOTONFOCUS Kamera .....	23
Abbildung 23: Aufnahme mit der Photonfocus-Kamera bei 950°C, sowie die eingezeichnete Linie, die in Abbildung 24 als Temperaturprofil dargestellt ist.....	23

Abbildung 24: Temperaturprofil entlang der Linie bei der Probe aus Abbildung 23 von 900°C bis 1000°C, jeweils in Schritten von 25°C.....	24
Abbildung 25: Kalibrationskurve für die Infrarot-Kamera Jade MWIR 4P .....	25
Abbildung 26: Vier induktiv erwärmte Proben: (a) Austenitischer Stahl, (b) NiFe51, (c) Schnellarbeitsstahl, (d) Titan Grade2.....	26
Abbildung 27: Infrarot-Aufnahme (a) und Schlibbild (b) einer Probe aus Schnellarbeitsstahl S705; Infrarot-Aufnahme (c) und Schlibbild (d) einer Probe aus NiFe45.....	27
Abbildung 28: Ummantelte Induktionsspule mit Kameraöffnung und einer auf 1000°C erwärmten Probe ....	28
Abbildung 29: Im Bereich der Curie-Temperatur (für diese Probe bei etwa 750°C) bildet sich ein Plateau im Temperaturverlauf aus. Die Erwärmung der Drahtprobe erfolgt nach Überschreiten der Curie-Temperatur deutlich langsamer.....	29
Abbildung 30: Ausgewertetes Infrarot-Bild einer Drahtprobe aus Schnellarbeitsstahl mit Luftabkühlung. Der Fehler ist deutlich zu erkennen .....	30
Abbildung 31: Infrarotbild eines sich bewegenden Drahtes .....	31
Abbildung 32: Parallele Linien gefittet zu den Kanten des Drahtes .....	31
Abbildung 33: Temperatur des Drahtes als Oberfläche (farbig) und das gefittete 2d-Polynom (grau).....	31
Abbildung 34: Infrarotaufnahme vom Draht durch den Führungsblock mit zwei Einblicköffnungen.....	32
Abbildung 35: Position der Infrarot-Kamera .....	33

## 11. Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Eindringtiefe des Wirbelstromes für einige ausgewählte Metalle .....	13
Tabelle 2: Vergleich von berechneten und simulierten Temperaturerhöhungen nach 0,5 s induktiver Erwärmung (Drahtdurchmesser =10mm).....	16
Tabelle 3: Zusammenfassung der wichtigsten Daten der verglichenen Kameras .....	19