



Lock-in Thermographie an elektrokeramischen Vielschichtbauteilen

Diplomarbeit am
Institut für Struktur und Funktionskeramik
der Montanuniversität Leoben

EIDESTATTLICHE ERKLÄRUNG

Ich erkläre an Eides statt, dass ich diese Arbeit selbstständig verfasst, andere als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel nicht benutzt habe und mich auch sonst keiner unerlaubten Hilfsmittel bedient habe.

Datum

Unterschrift

Danksagung

Bedanken möchte ich mich bei Herrn O. Univ. Prof. Robert Danzer Vorstand des Institutes für Struktur- und Funktionskeramik für die Ermöglichung der Diplomarbeit und seine Unterstützung während meines Studiums.

Bei Herrn Ao. Univ. Prof. Peter Supancic für die Bereuung meiner Diplomarbeit und seine Hilfe bei der Lösung aufgetretener Schwierigkeiten.

Bei Herrn Dr. Alexander Platzer für die Idee des Diplomarbeitsthemas der Hilfe bei den Grundlagen der Thermographie.

Sowie bei allen Mitarbeitern des Institutes für Struktur und Funktionskeramik für die gute Zusammenarbeit und das tolle Arbeitsklima.

Der Firma EPCOS für die Bereitstellung der Proben und Hilfe in technischen Angelegenheiten.

Mein größter Dank gebührt meinen Eltern für die Ermöglichung meines Studiums und die Geduld die sie für mich aufgebracht haben. Sowie meiner Freundin Michaele für ihren Ansporn und ihr Verständnis dass sie mir für mein Studium entgegengebracht hat.

Kurzfassung

In dieser Arbeit wird ein thermographisches Verfahren entwickelt, das es erlaubt, Wärmequellen in elektrokeramischen Vielschichtbauteilen aufgrund ihres Temperaturverhaltens zu lokalisieren. Da sich damit grundsätzlich nur Oberflächentemperaturen erfassen lassen, erhält man nur entsprechende Abbilder von den meist im Inneren von Bauteilen befindlichen Wärmequellen.

Um auch eine Information über die Lage der Wärmequellen in der Tiefe zu gewinnen, wird die sogenannte Lock-in Thermographie verwendet: Dazu wird das Bauteil elektrisch mit einem periodischen Signal angeregt, und die thermische Antwort an der Oberfläche detektiert. Aus der Phasenverschiebung zwischen Anregung und Antwort lassen sich die thermischen Wegstrecken und somit die Tiefe unter der Oberfläche abschätzen.

Die experimentelle Herausforderung liegt bei den miniaturisierten Bauteilgeometrien (ca. 1 mm), in der Präparationsgenauigkeit sowie die Mikromesstechnik mit relativ raschen Signalzeiten. Für die thermographischen Aufnahmen musste ein Mikroskopaufsatz verwendet werden, sodass schließlich eine örtliche Auflösung von ca. 15 μm erreicht wurde.

Damit wurde es möglich, spezielle Bereiche gezielt zu lokalisieren und für weitere Analysen durch Abschleifen frei zu legen.

Abstract

In this Thesis, a thermo-graphical method which will allow the localisation of a heat source in electro ceramic multilayer components (due to their thermal behaviour) will be developed. Since only surface temperatures can be detected, one can only get images of the heat sources which are often located inside the specimens.

To get also information about the depth of the heat source one has to use lock-in thermography. For this purpose a specimen is electrically stimulated with a periodic signal and the thermal response on the surface is detected. From the phase shift of stimulation and response, the depth under the surface can be estimated.

The experimental challenge is in the miniaturised size of the specimens (approx. 1 mm), in the accuracy of the preparation and in the micro measurement with relatively fast signal times. For the thermo-graphical shots a microscope lens has to be used, so that a local resolution of approx. 15 μm can be achieved. With this method it is possible to localise areas of interest that can subsequently be subjected to other analyses.

Inhalt:

1	Einleitung	1
2	Grundlagen	5
2.1	Herstellung der Vielschichtvaristoren	5
2.2	Elektrische Eigenschaften	8
2.3	Thermographie	9
2.4	Wärmeleitung	12
2.5	Materialeigenschaften und Verifizierung	14
2.6	Vorversuche Lock-in Technik	17
3	Messung	20
3.1	Vorversuche und Messaufbau	20
3.2	Probenvorbereitung	23
3.3	Messungen an MLVs vom Typ 0603:	25
3.3.1	Untersuchung der Probe 06 der Klasse 1	31
3.3.2	Untersuchung der Probe 01 der Klasse 2	33
3.3.3	Untersuchung der Probe 30 der Klasse 3	35
3.4	Experimentelle Limitierungen und Auswege	37
4	Zusammenfassung	40
4.1	Ausblick	41
5	Anhang	42
5.1	Verwendete Geräte und Programme:	42
6	Literatur	43

1 Einleitung

Ein Varistor ist ein elektrisches Bauteil, dessen Leitfähigkeit von der elektrischen Feldstärke abhängt (Anm.: das Kunstwort Varistor leitet sich ab von „variable resistor“) [Mou03]. Unterhalb einer bestimmten Stärke des elektrischen Feldes verhält sich ein Varistor wie ein ohmscher Leiter mit einem relativ hohen Widerstandswert. Wird ein Schwellwert überschritten, fällt der Widerstand des Varistors stark ab (i.e. Durchbruchbereich, siehe **Abb. 1**). Die Stromdichte j steigt in diesem Bereich gemäß eines Potenzgesetzes proportional zu E^α an (E : elektrische Feldstärke, α : Varistorexponent mit typischen Werten zwischen 20 und 100; Materialkonstante). Im Hochstrombereich tritt wieder ohmsches Verhalten auf, jedoch mit um viele Größenordnungen geringeren Widerstandswerten, verglichen mit dem Leckstrombereich. Dieses Verhalten wird für den Schutz von elektronischen Komponenten gegen Überspannung genutzt.

Dazu wird ein Varistor parallel zum Verbraucher geschaltet. Im Normalbetrieb soll der Varistor einen wesentlich höheren Widerstand als der Verbraucher aufweisen (Schaltspannung ist größer als normale Betriebsspannung). Daher fließt zunächst ein Großteil des Stromes über den Verbraucher. Beim Überschreiten des Schwellwertes sinkt der Widerstand des Varistors um viele Größenordnungen und der Strom fließt größtenteils durch den Varistor. Die im Varistor umgesetzte Leistung wird als Wärme abgeführt. Dieser Vorgang ist reversibel, so dass bei Unterschreitung der Schaltfeldstärke wieder ein ohmsches Verhalten vorliegt [Gup90].

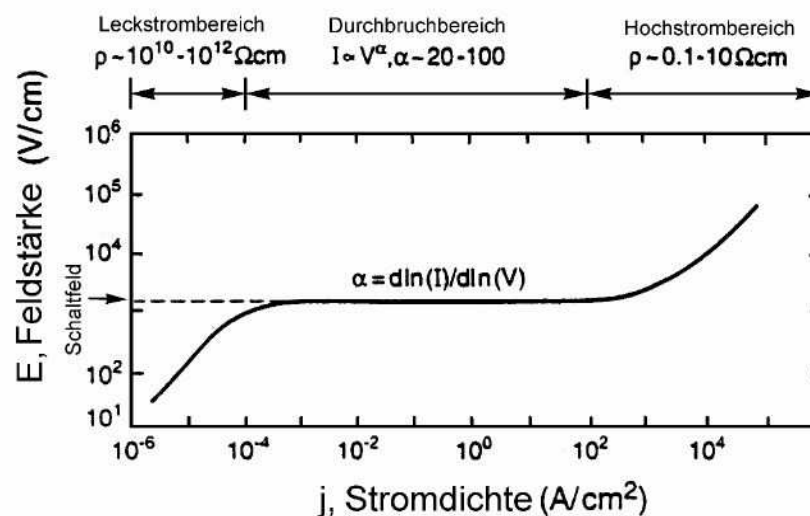


Abb. 1: Typische Varistorkennlinie, die Stromdichte j in Abhängigkeit von der Feldstärke E [Cla99].

Als Basismaterial für Varistoren kommt heutzutage vorrangig Zinkoxid (ZnO) zum Einsatz. Möglich ist allerdings auch die Verwendung anderer Materialien wie Siliziumcarbid (SiC), jedoch mit deutlich geringerem Varistorexponenten. Das ZnO wird in der Regel zusammen mit weiteren Metalloxiden, wie Wismutoxid (Bi_2O_3) und Antimonoxid, gesintert. An den Korngrenzen bilden sich Flächenladungen mit Akzeptoren. Dies führt zu geladenen Raumladungszonen an beiden Seiten der Grenzfläche (Doppel-Schottky Barriere), die eine Sperrschicht für die Elektronen bildet (Potentialbarriere) [Ols85, Tan99, Wak91]. Pro Korngrenze entspricht das einer Potentialhöhe von ca. 3,5 V (im Fall von Bi_2O_3 dotierten ZnO-Keramiken) [Rod99]. Das Korninnere des ZnO-Korns weist im Verhältnis dazu eine sehr gute Leitfähigkeit auf. Die Varistorkeramik entspricht somit einem 3D-Netzwerk von Einzelwiderständen, welche durch die Korngrenzen gebildet werden.

Die Schaltspannung kann primär über die Zahl der Korngrenzen zwischen den Deckflächen des Bauteiles eingestellt werden, siehe **Abb. 2**. Um eine Schaltspannung von beispielsweise 350 V zu erreichen, müssen die Elektronen 100 Korngrenzen (Doppel-Schottky Barrieren) in Serie überwinden. Bei einem mittleren Korndurchmesser von beispielsweise 10 μm ergibt das eine Bauteilhöhe von 1 mm.

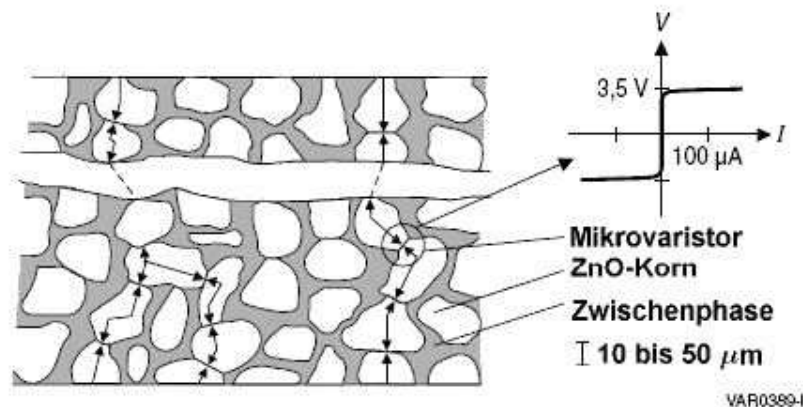


Abb. 2: Schematisch Darstellung des Leitungsmechanismus eines ZnO Varistors. [Epc02]

Für die Anwendung im Automobilbau (12 V Autobatterie) werden Varistoren mit einer Schaltspannung von etwa 25-30 V verwendet, so dass sich bei Normalbetrieb die Bauteile im Leckstrommodus befinden. Für diesen Spannungsbereich benötigt man nur etwa sieben bis acht aktive Korngrenzen in Serie. Daher ist der Elektrodenabstand gering (im obigen Beispiel wären das 70-80 μm). Da aber trotz der geringen Schaltspannung hohe Ströme

fließen und daher viel Energie in Wärme umgesetzt wird, müssen die Varistoren mit einem entsprechenden Volumen konstruiert werden, um die entstehende Energie (Wärme) aufnehmen zu können. Dies erfordert wegen der geringen Schichtdicken große Querschnittsflächen, die günstigerweise in Vielschichtbauweise (MLV: multi layer varistor) in Analogie zu Kondensatoren angeordnet werden (**Abb. 3**).

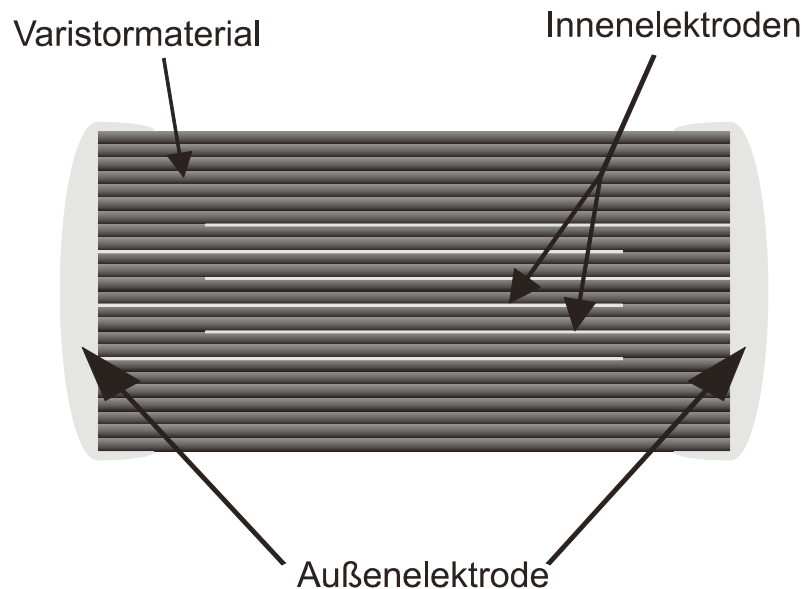


Abb. 3: Schema eines MLVs in SMD – Bauweise (SMD: semi-mounted device)

Bei Varistoren kann es vorkommen, dass einzelne Korngrenzen oder ganze Kornbereiche eine andere Leitfähigkeit als die anderen Bereiche besitzen. Zum Beispiel wenn eines der 7-8 Korngrenzen, die zwischen den Elektroden eines 12 V Bauteiles in Reihe liegen, einen sehr viel niedrigeren Widerstand besitzt als die anderen, so steigt die elektrische Feldstärke der anderen 6-7 Körner um etwa 15 %. Als Folge treten bei normaler Betriebsspannung erhöhte Leckströme auf. Bei Überspannung kann dies zu einem lokalen Durchbruch führen, was zur Zerstörung des Bauteiles führen kann. Bei Varistoren für Hochspannungsanwendungen weisen die Bauteile ein großes Volumen auf, und können einzelne Fehlstellen kompensieren. Bei Varistoren für Niederspannungsanwendungen sind allerdings so wenige Körner an dem Schaltvorgang beteiligt, dass einzelne Fehler bereits zum totalen Versagen führen können. Auch erhöhte Leckströme allein sind ein Problem, da sie den Stromverbrauch erhöhen. [Wan07, Zho03, Che02, Yen94, Bai95].

Defekte Bauteile sind daran zu erkennen, dass die Strom-Spannungs-Kennlinie des Varistors im Durchbruchsbereich signifikant steiler als bei einem voll funktionstüchtigen Bauteil verläuft. Der Widerstand ist im gesamten Leckstrom- sowie Durchbruchsbereich

drastisch reduziert. In **Abb. 4** sind die Varistorkennlinien eines Gutteils (grüne Linie) und eines Teiles außerhalb der Spezifikationen (rote Linie) dargestellt. Eine Betriebsspannung von 12 V würde bei einem Schlechteil Stromstärken induzieren, die 4 Größenordnungen über jenen eines Gutteils liegen.

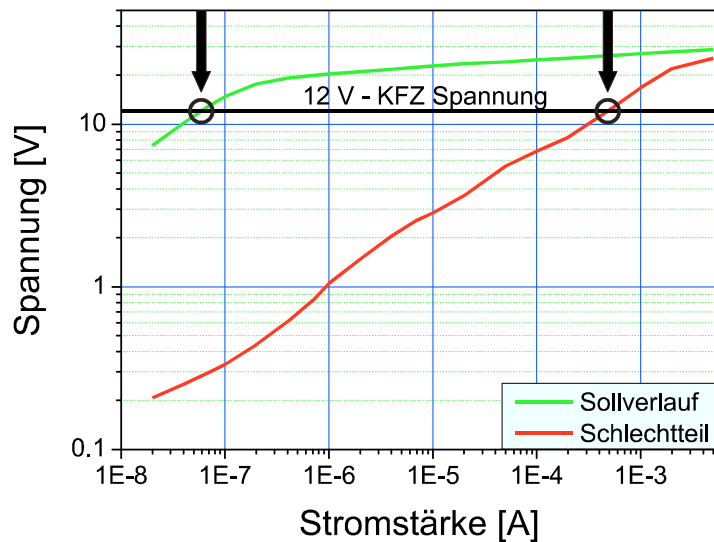


Abb. 4: Varistorkennlinien untersuchter Bauteile:
5 Größenordnungen Unterschied bei 12 V.

Es ist zu vermuten, dass dieses veränderte globale Verhalten der Varistorteile auf mikroskopische Defekte mit veränderten Eigenschaften zurückzuführen ist.

Um die Natur und im Weiteren die Ursachen solcher Defekte zu untersuchen, ist es zunächst nötig, die Defekte zu detektieren und freizulegen.

In Voruntersuchungen ist es nicht gelungen, solche Defekte durch keramographische Schliffe aufzuspüren, vermutlich da sie sehr klein und selten sind, und sich ihre optischen Eigenschaften nicht von den anderen Bereichen unterscheiden. Daher wird nun nach alternativen Verfahren gesucht, um die Schadensursache (i.e. der Defekte) in den Bauteilen zu finden und zu identifizieren.

In dieser Arbeit wird folgende Idee verfolgt: Beim Schalten entsteht im Bereich der Defekte (viel) mehr Wärme als in den anderen Bereichen des Varistors. Diese Wärme breitet sich aus und wird zu „Hot Spots“ an der Bauteiloberfläche führen. Diese sollen mittels einer Thermokamera lokalisiert werden. Aus der Laufzeit der Wärmewelle vom Defekt an die Oberfläche kann auf die Distanz des Defektes geschlossen werden. Anschließend sollten die Defekte durch schleifen frei gelegt und identifiziert werden.

2 Grundlagen

2.1 Herstellung der Vielschichtvaristoren

Der meistverwendete Werkstoff für keramische Varistoren ist Zinkoxid, das zur Erlangung der varistorspezifischen Eigenschaften legiert wird. Die verwendeten Additive sind in der Regel Bi-, Sb-, Mn-, Co-, Si-, oder Al-Oxide [Hoh91, Ott01, Cla99, Chi97, Kim86]. Diese Additive beeinflussen auch die Sintereigenschaften.

Die in dieser Arbeit untersuchten Varistoren (**Abb. 5**) werden aufgrund ihrer geringen Abmessungen (Bauform 0603, d.h.: 0,06 x 0,03 Zoll), und um einen homogenen Aufbau zu ermöglichen, im Foliengießverfahren hergestellt. Durch ihren schichtweisen Aufbau werden sie Vielschicht - Varistoren (engl.: Multilayervaristor – kurz MLV) genannt.

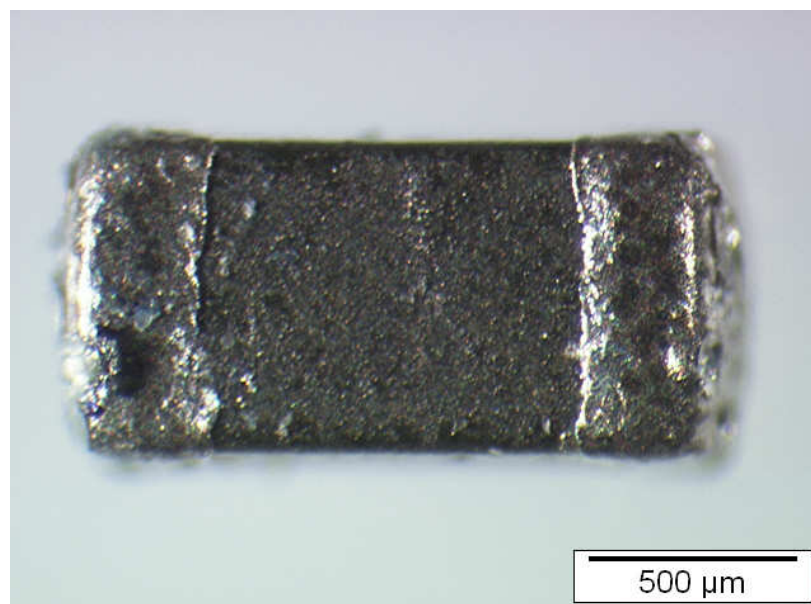


Abb. 5: Fertiges SMD MLV Bauteil 0603, Abmessungen: 1,5 x 0,8 x 0,8 mm, die kappenförmigen Außenelektroden werden galvanisch aufgetragen.

Bei der Herstellung wird zunächst die Pulvermischung als Keramikschlicker aufbereitet. Üblicherweise besteht ein Schlicker aus Keramikpulver, Dispergatoren, Binder, Weichmacher und Lösungsmittel. Bei der Aufbereitung muss darauf geachtet werden, dass sich keine Binder- oder Keramikagglomerate bilden. Dies verhindern die Dispergatoren, die im Schlicker enthalten sind und ein Absinken der Keramikteilchen verhindern sollen. Die

Mischung wird auf ein kontinuierliches Band gegossen und mit Hilfe einer Kante (Doctor Blade) auf eine exakte Dicke gestrichen (**Abb. 6**) [Epc05].

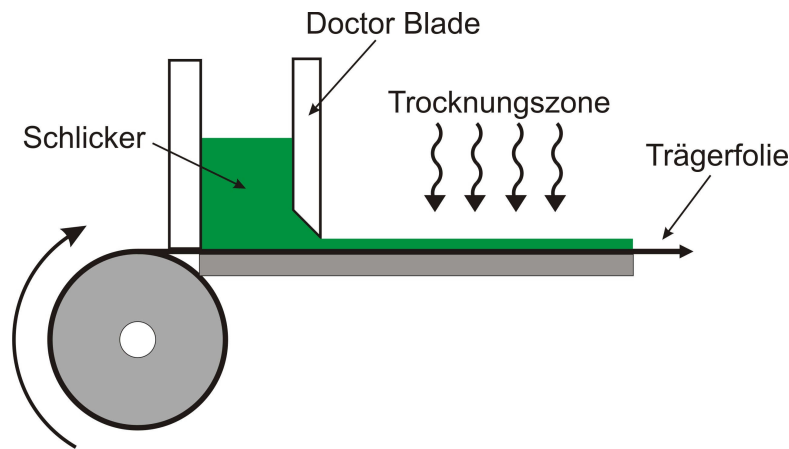


Abb. 6: Schematische Darstellung des Schlickergießens.

Auf der Trägerfolie wird der Schlicker getrocknet und als papierartiger Grünkörper (das ist noch nicht gesinterte Keramik) am Ende des Bandes aufgerollt. Das Aufrollen ist durch die beigefügten Weichmacher möglich, welche dem Grünkörper eine gewisse Flexibilität gestatten. Der Grünkörper wird in Platten geschnitten und die Elektroden im Siebdruckverfahren aufgedruckt. Als Elektrodenmaterial wird eine Silber Palladium Legierung verwendet, die eine zu der Sintertemperatur passende Schmelztemperatur besitzt und in der Ofenatmosphäre nicht oxidiert. Die einzelnen Platten werden je nach Bedarf gestapelt, der Stapel wird gepresst und zu den einzelnen Varistorgrünkörpern geschnitten. Bei der Verarbeitung ist darauf zu achten, dass es zu keinen Verunreinigungen kommt, da Fremdatome die elektrischen Eigenschaften der Bauteile verändern würden. Danach wird zunächst der Binder ausgebrannt und die Bauteile dann fertig gesintert. Nach dem Sintern werden noch galvanisch Außenelektroden aufgebracht.

Die in dieser Diplomarbeit untersuchten MLVs bestehen aus je sieben der Lagen Folie in der Deckschicht und je zwei Lagen der Folie zwischen den Elektroden (**Abb. 7**).

Diese Schichtung der einzelnen Keramikfolien kann man gut unter dem Lichtmikroskop (LiMi) unter Verwendung von polarisiertem Licht erkennen, der Aufbau ist analog zu Vielschichtkondensatoren [Kah88].

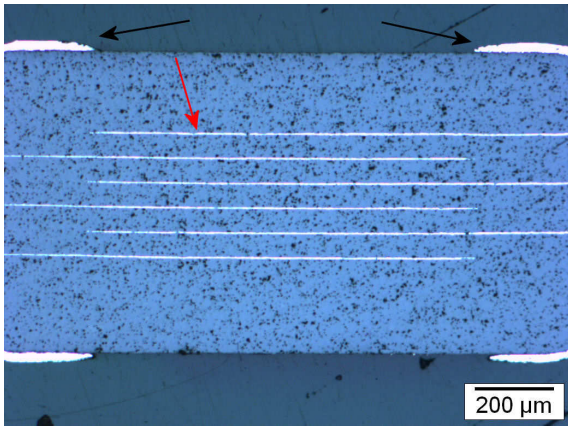


Abb. 7.a: Polierte Oberfläche eines angeschliffenen MLVs unter LiMi. Dabei sind die einzelnen Elektroden deutlich zu sehen (roter Pfeil). An den Ecken sind die Außenelektroden erkennbar (schwarzer Pfeil).

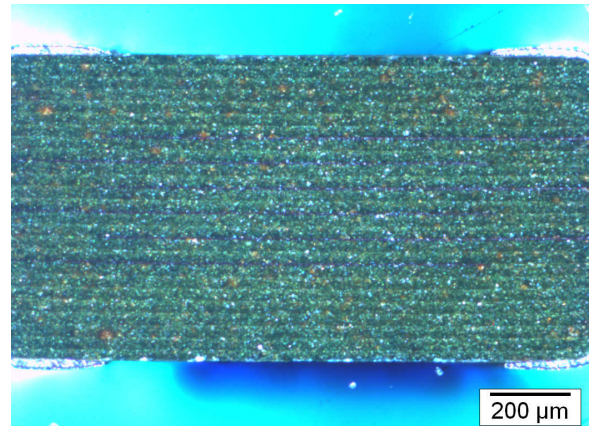


Abb. 7.b: Die selbe Probe wie in Abb. 7.a aber unter polarisiertem Licht. Dabei sind deutlich die einzelnen Keramiklagen zu erkennen. Die Innenelektroden sind hier nicht zu sehen.

In einem um wenige Grad verkippten Querschliff erkennt man, dass die Elektroden nur im mittleren Drittel des Varistors liegen. Dieses Design soll äußere Einflüsse wie Eindiffundieren von Fremdeatomen und Kurzschlüsse über die Oberfläche zu verhindern (**Abb. 8**).

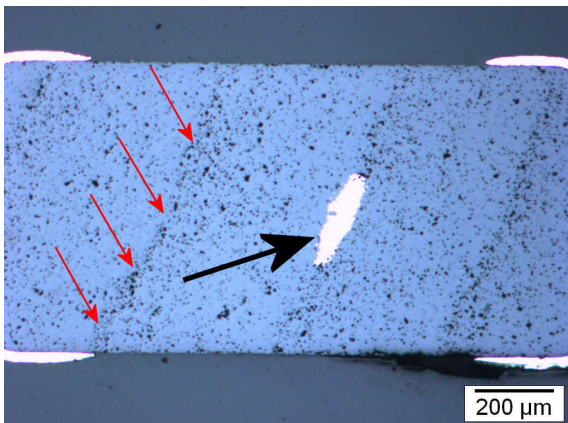


Abb. 8.a: Polierte Oberfläche eines angeschliffenen MLVs unter LiMi. (90° entlang der Längsachse zu Abb. 7.a gedreht). Dabei wurde die Probe leicht schräg angeschliffen und poliert. Die Innenelektrode ist mit einem schwarzen Pfeil gekennzeichnet, der Porensaum mit roten Pfeilen.

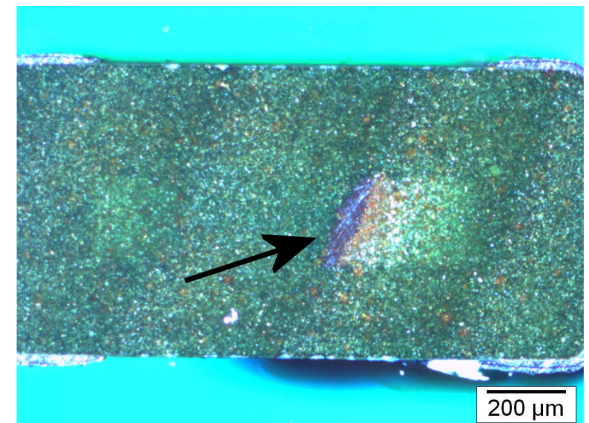


Abb. 8.b: Die selbe Probe wie in Abb. 8.a aber unter polarisiertem Licht. Die Porensäume sind als dunklere Streifen sichtbar. Eine Elektrode ist als „Schatten“ durch die Keramik sichtbar.

Des Weiteren kann man in **Abb. 8** Porensäume zwischen den einzelnen Keramiklagen erkennen. Diese entstehen da die Oberfläche der Keramikfolien eine natürliche Rauigkeit besitzt.

2.2 Elektrische Eigenschaften

In dieser Arbeit werden Vielschichtvaristoren des Typs 0603, Klasse 1 untersucht. Eine typische Varistorkennlinie eines solchen Bauteiles ist in **Abb. 9** dargestellt. Man erkennt, dass sich die Spannung in einem Bereich von 0 bis 27 V bewegt. Im rechten Teil des Diagramms erkennt man, dass die Stromstärke stark nichtlinear mit der Spannung ansteigt. Auf der linken Seite steigt die Stromstärke linear mit dem Varistorkoeffizienten $\alpha = 1$ an.

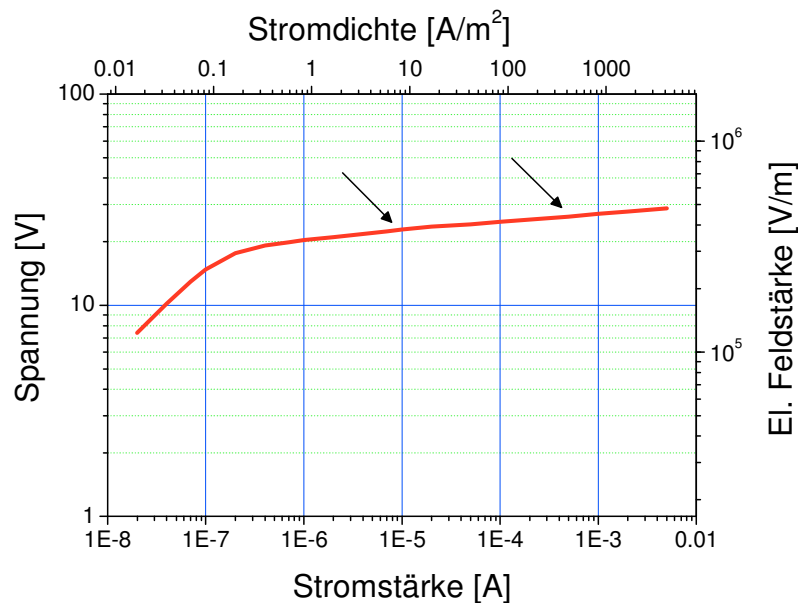


Abb. 9: Varistorkennlinie eines Bauteils Klasse 1.
Links und Unten sind die gemessenen Werte aufgetragen.
Rechts und oben die größenunabhängigen Werte.
Der mit den Pfeilen markierte Strombereich ist in Abb. 10 als Strompeak sichtbar.

Für die thermographischen Untersuchungen wird der Varistor mit einem Vorwiderstand in Serie und mit einem Funktionsgenerator mit einer sinusförmigen Spannung (mit der Schwingbreite von 27V) und mit der Frequenz von 10 Hz beaufschlagt, siehe **Abb. 10**. Der Spannungsabfall am Vorwiderstand (1000Ω) ist ebenfalls eingezeichnet (siehe rechte Achse), aus dem sich nach Umrechnung die Stromstärke in mA ergibt.

Erst bei Überschreitung einer Spannung von 25 V (ausgegeben vom Frequenzgenerator) ist der Spannungsabfall am Varistor so groß, dass die Schaltspannung überschritten wird. Mit zunehmender Belastung kommt es so zu einem erheblichen Stromfluss in der Schaltung, was sich als Anstieg im Spannungsabfall am Vorwiderstand manifestiert.

In Summe führt dies zu Spannungspulsen am Vorwiderstand, welche etwa eine hundertstel Sekunde dauern. In dieser Zeit kommt es wie gesagt auch zu einem Stromfluss im Varistor, was zu einer Erwärmung führt (Joulesche Wärme) Diese Wärmepulse werden in Folge für die thermographische Untersuchung verwendet.

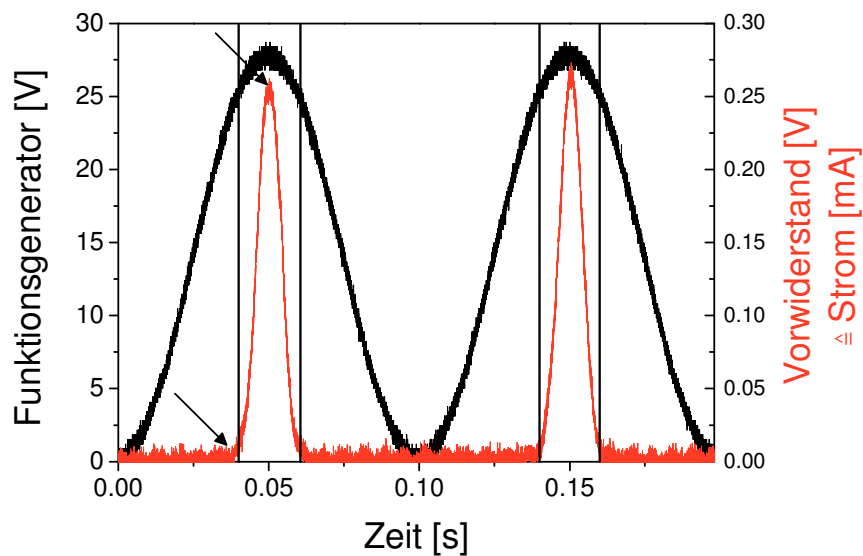


Abb. 10: Beispiel für das Schaltverhalten eines Varistors.
Schwarz: angelegte Sinusspannung (mit Bias),
Rot: Strom durch Varistor

Für das Beschalten der Bauteile wurde zwischen 0 und 27 V schwellender Gleichstrom verwendet. Bei Erreichen der Spannung von 25 V begann sich der Varistor zu „öffnen“ und es konnte ein Spannungsanstieg am Vorwiderstand gemessen werden (Pfeile: **Abb. 10**). Dieser Schaltbereich entspricht dem Durchbruchbereich in **Abb. 9** zwischen den Pfeilen.

2.3 Thermographie

Grundlage für thermographische Untersuchungen der Varistoren ist die Aussendung von Wärmestrahlung. Diese wird von jeder Materie bei $T > 0$ K emittiert. Das gilt somit auch für jeden Festkörper. Diese Wärmestrahlung ist eine elektromagnetische Strahlung, sie liegt je nach Temperaturzustand des Körpers im elektromagnetischen Spektrum typischer Weise im Bereich zwischen Mikrowelle und UV (**Abb. 11**). Das Maximum der abgestrahlten

Wellenlänge ergibt sich aus dem Wienschen Verschiebungsgesetz: $\lambda_{\max} = \frac{2898[\mu m K]}{T}$.

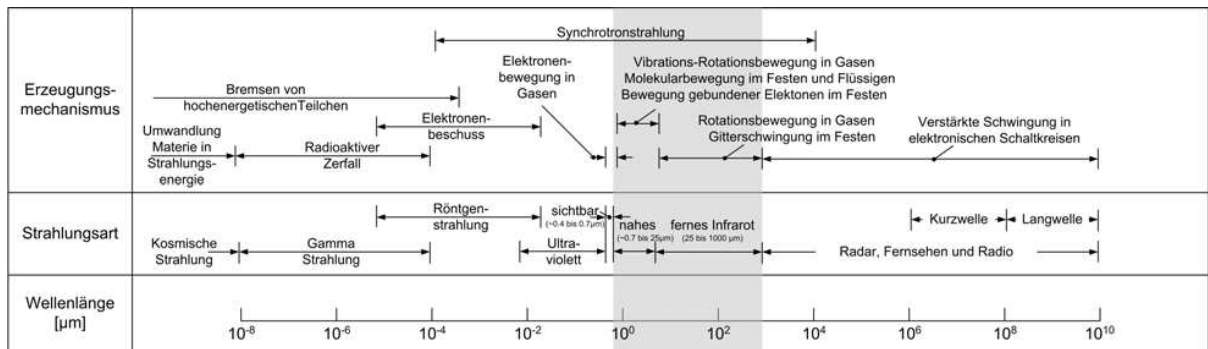


Abb. 11: Elektromagnetisches Spektrum, Bezeichnung der Strahlungsart und Erzeugungsmechanismus [Sie02].

Die Intensität der von einem sich im thermischen Gleichgewicht befindlichen Festkörper abgegebenen Wärmestrahlung ist von der Temperatur, der Wellenlänge und dem Emissionsgrad des Festkörpers abhängig. Der Emissionsgrad eines Körpers gibt an, wie viel Strahlung er im Vergleich zu einem idealen Wärmestrahler (einem schwarzen Strahler) abgibt.

Der Emissionsgrad ist ein dimensionsloser Kennwert, der zwischen null und eins (schwarzer Strahler) liegt. Der Emissionsgrad ist keine Stoffkonstante, sondern hängt von Faktoren wie Körpertemperatur, Wellenlänge, Oberflächenbeschaffenheit und Abstrahlwinkel ab. Umgekehrt wird das Vermögen eines Körpers, Wärmestrahlung aufzunehmen, Absorptionsgrad genannt. Nach dem Kirchhoffschen Gesetz ist der Absorptionsgrad eines Körpers gleich dem Emissionsgrad.

Weitere Wechselwirkungen zwischen Wärmestrahlung und Körpern sind Reflexion und Transmission. Dies ist äquivalent zu den bekannten Effekten im sichtbaren Spektrum.

Für thermographische Untersuchungen wird meistens der Bereich von 3 bis 5 µm verwendet, da sich in diesem Wellenlängen Bereich ein so genanntes atmosphärisches Fenster (das heißt, dass in diesem Bereich die Transmission in der Atmosphäre hoch ist) befindet (**Abb. 12**). Außerdem entspricht dies grob dem Temperaturbereich um die Normalbedingungen (i.e. 25 °C).

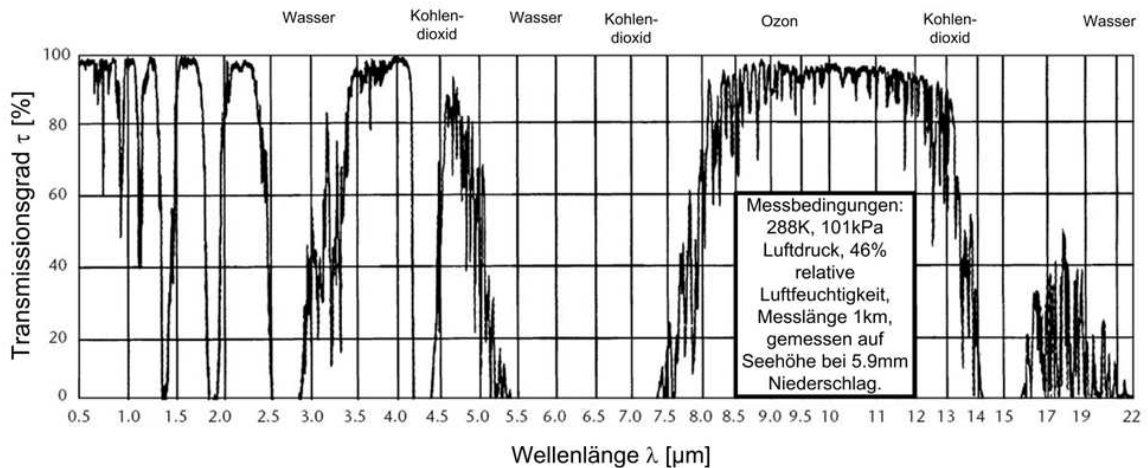


Abb. 12: Durchlässigkeit der Atmosphäre mit gekennzeichneten die Absorptionsbanden [Mal01a].

Für die Detektion von Wärmestrahlung werden verschiedene Arten von Detektoren verwendet. Es gibt thermische und photonische Infrarotdetektoren [Mal92, Mal01a, Mal01b, Osw05].

Thermische Detektoren sind Pyrometer, Bolometer, und Thermopiles (zusammen geschaltete Thermoelemente). Bei diesen Detektoren macht man sich die Veränderung einer Materialkonstante zu nutze. Dies sind zum Beispiel Veränderung der Polarisation oder die Erzeugung einer Potentialdifferenz. Vorteile dieser Detektoren sind: Sie benötigen keine Kühlung und haben keine Wellenlängenabhängigkeit. Außerdem sind sie in der Fertigung kostengünstig. Von Nachteil ist ihr großes Signalrauschen, das heißt, ihr Auflösungsvermögen ist beschränkt.

Photonische Detektoren hingegen basieren auf Halbleitern und werden noch in photoleitende und photovoltaische Detektoren unterteilt. Allgemein basiert die Signalerzeugung auf der Erzeugung von Ladungsträgern. Durch die auf den Detektor auftreffenden Photonen wird ein Elektron vom Valenzband in das Leitungsband gehoben. Die Breite der Verbotenen Zone zwischen Valenz- und Leitungsband kann über das Dotieren der Halbleiter genau eingestellt werden, wodurch in sehr genau definierbaren Wellenlängenbereichen gemessen werden kann. Die Empfindlichkeit solcher Detektoren ist sehr hoch, jedoch müssen sie für ein einwandfreies Funktionieren gekühlt werden (mit flüssigem Stickstoff oder z.B. einem Sterlingkühler). Dadurch sind solche Systeme sowohl in der Anschaffung teurer bzw. im Betrieb aufwendiger als thermische Detektoren.

Bei Halbleiterdetektoren erfolgt die Bilderzeugung über zwei unterschiedliche Prinzipien. Einerseits als scannendes System, bei dem mittels rotierende Prismen oder oszillierende Spiegel der Gegenstand „abgerastert“ wird. Die Scannerbewegung wird mit dem Detektor-

signal in Korrelation gebracht. Daraus kann ein Bild zusammengesetzt werden. Die andere Möglichkeit zur Bilderzeugung ist einen Array aus vielen einzelnen Detektoren zu fertigen, die gemeinsam ein Bild erzeugen. Die typischen Größen solcher Arrays sind Formate von 320x240 und 640x480 Bildpunkte (Pixel). Der Vorteil solcher Systeme ist der Wegfall der mechanischen Komponenten der scannenden Systeme. Allerdings müssen solche Arrays vor jeder Messung aufeinander abgestimmt werden, da sie von Natur aus ein unterschiedliches Ansprechverhalten haben. Außerdem wird auf Grund der Fokussierereinheit nicht die ganze Fläche gleichmäßig angestrahlt, was aber durch das Kalibrieren des Systems ausgeglichen werden kann. Dies geschieht durch die so genannte „Non Uniformity Correction“ [Mal92, Mal01a, Mal01b, Osw05, Ced03, Ced04a, Ced04b].

2.4 Wärmeleitung

Für das Auffinden der Defekte in MLVs wird Wärmeleitung genutzt. Im Leckstrompfad wird mehr Wärme erzeugt, als im restlichen Bauteil. Durch den dadurch entstehenden Temperaturunterschied beginnt die im Bereich des Leckstrompfades entstandene Wärme in die anderen Bereiche des MLVs zu fließen (vgl. [Wan98]).

Die Wärme fließt durch den MLV, gelangt an dessen Oberfläche und wird von dieser abgestrahlt. Die abgestrahlte Wärmemenge wird von der Thermokamera aufgefangen. Während die Wärmeabstrahlung sehr schnell von statten geht (mit Lichtgeschwindigkeit), benötigt die Ausbreitung der Wärme im inneren des MLV deutlich länger. Von der Erwärmung des Leckstrompfades bis zum Zeitpunkt, zu dem diese dieser Wärme durch Wärmeleitung an der Oberfläche ankommt (abhängig von der zurückgelegten Weglänge), vergeht eine für den Werkstoff charakteristische Zeitspanne. Aus dieser Zeitspanne kann die Tiefenlage des Defektes errechnet werden (**Abb. 13**).

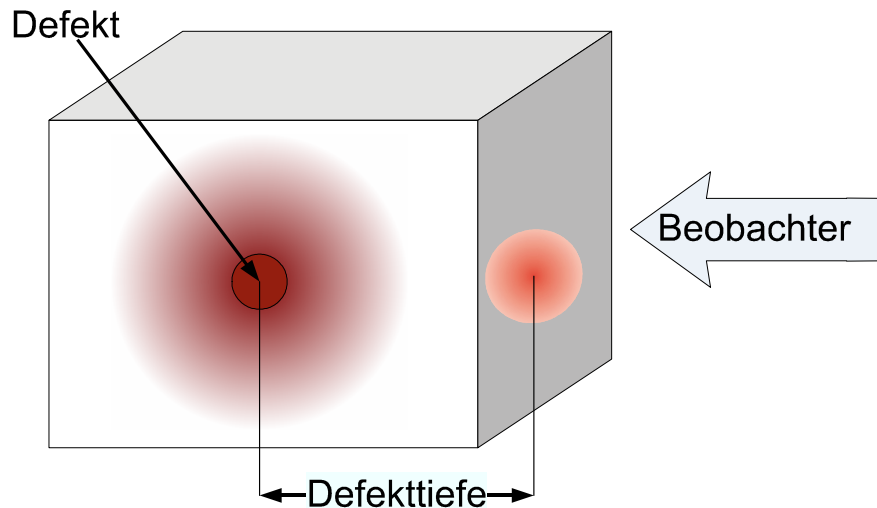


Abb. 13: Wärmeausbreitung um einen Defekt (Wärmequelle). Der Beobachter (Thermokamera) detektiert nur den Temperaturanstieg an der Probenoberfläche.

Der Wärmetransport in einem Festkörper wird durch die Wärmeleitungsgleichung beschrieben. Diese lautet für den eindimensionalen, Fall [Bej93]:

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} = \frac{1}{a} \cdot \frac{\partial T}{\partial t} \quad (2.1)$$

Hierbei ist T die Temperatur, x die Ortsvariable, t die Zeit, ρ die Dichte, c_p die Wärmekapazität und λ die Wärmeleitfähigkeit. Die Temperaturleitfähigkeit a ergibt sich wie folgt [Bej93]:

$$a = \frac{\lambda}{\rho \cdot c_p} \quad (2.2)$$

Um eine Differentialgleichung zu lösen, müssen Randbedingungen und Anfangsbedingungen bekannt sein. Diese Randbedingungen können feste Temperaturen oder Wärmeströme an der Oberfläche sein. Konvektion oder Strahlung verursachen beispielsweise Wärmeströme.

Abhängig von Geometrie und Materialparametern kann die thermische Diffusionslänge x_E berechnet werden [Mal01a]. Diese gibt an, welche Distanz die sich ausbreitende Wärme in der Zeit t zurücklegen kann.

$$x_E = g \cdot \sqrt{a \cdot t} \quad (2.3)$$

Hierbei ist g ein dimensionsloser Geometriefaktor der Größenordnung 1.

Übertragen auf die Aufgabenstellung bedeutet das folgendes: die messbare Laufzeit (Differenz der Zeitpunkte, an dem der Varistor unter entsprechender Spannung Wärme freisetzt, sowie an dem die Wärme die Oberfläche erreicht) kann direkt in eine Tiefe x_E umgerechnet werden, sofern der Geometriefaktor g und der Materialparameter a bekannt sind. Somit kann die Lage des Leckstrompfades in der Tiefe bestimmt werden. Dazu müssen die thermischen Materialkennwerte, c_p und λ , sowie die Dichte der Varistorkeramik und der Geometriefaktor bekannt sein.

2.5 Materialeigenschaften und Verifizierung

In der dieser Arbeit wurde der in der Folge dargestellte Versuchsaufbau zur Überprüfung der Funktionsweise der Thermokamera anhand bekannter Materialkennwerte entwickelt. Diese Versuche wurden auch mit einem Finite-Elemente-Modell (FE-Modell) simuliert. Die Eichmessungen waren notwendig, da es sich bei der Thermographie um eine verhältnismäßig junge Messmethode handelt, bei der noch zu geringe Erfahrungen in der quantitativen Messung vorliegen. Anhand der Untersuchung von Proben mit bekannter Geometrie und bekannten Materialkennwerten kann überprüft werden ob die thermographischen Messungen korrekte (konsistente) Ergebnisse liefern.

Die grundsätzliche Idee besteht darin, dass man ein Platte aus Varistorkeramik einseitig mit Wärme beaufschlagt und die Reaktion (Erwärmung) an der Gegenseite beobachtet. Wichtig hierbei ist, dass die Platte eine große Länge und Breite in Vergleich zu ihrer Dicke aufweist (Mindestunterschied von einer Größenordnung). Dadurch kann man für die Mitte der Platte von einer nahezu eindimensionalen Wärmeleitung ausgehen. Um die Güte des FE-Modells zu überprüfen, wurde es mit einer analytisch lösbaren Aufgabenstellung der Wärmeleitung verglichen.

Bei diesen Vorversuchen wurde somit überprüft, ob mit der Messtechnik Thermographie dieselben Materialkennwerte (**Tab. 1**) wie etablierte Methoden liefert [Sup07].

Tab. 1: Materialeigenschaften einer Varistorkeramik bei Raumtemperatur. Die Keramik ist ähnlich wie die thermographisch untersuchte Varistorkeramik.		
Eigenschaft	Kennwert:	Messmethode:
Dichte	$\rho = 5647 \pm 5 \text{ kg/m}^3$	Dichtemessung nach Archimedes
Temperaturleitfähigkeit	$a = 9,09 \pm 0,45 \text{ mm}^2/\text{s}$	Laserflash
Wärmekapazität	$c_p = 490 \pm 10 \text{ J/kgK}$	DSC

Für die Vorversuche wurden planparallele Platten verschiedener Dicke (0,5 mm, 1 mm und 2 mm) aus derselben Keramik (allerdings ohne Elektroden) wie sie später in den MLVs untersucht wird verwendet. Für die Auswertung wurde als Vereinfachung ein 1D FE-Modell herangezogen.

Der Versuchsaufbau ist in (Abb. 14) darstellt. Die Vorderseite der Platte wird dabei mit einem Blitzlicht bestrahlt. Die von der Blitzlampe abgegebene Wärme wird an der Oberfläche der Platte absorbiert und durch Wärmeleitung auf die Rückseite transportiert. Dadurch steigt die Temperatur an der Rückseite an.

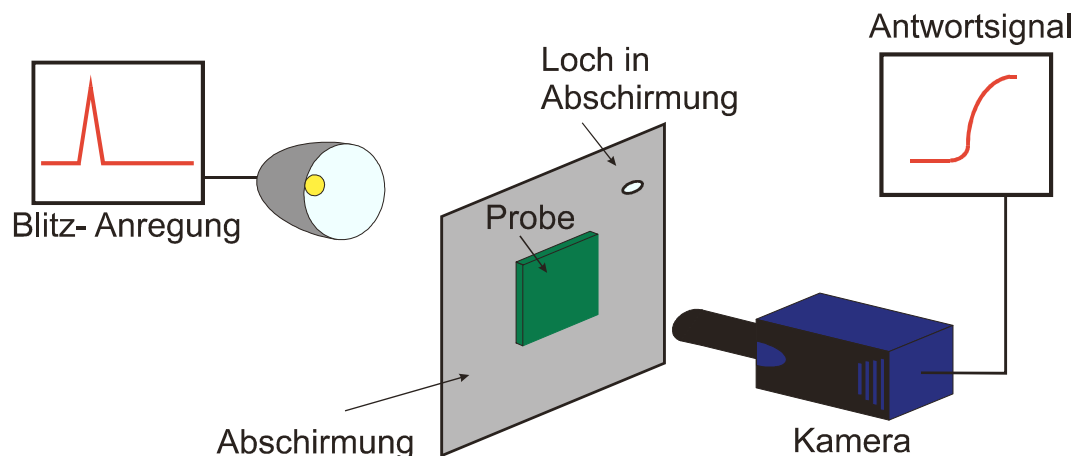


Abb. 14: Versuchsaufbau Blitzlampe.

Bei der Messung wurden Platten bekannter Dicke aus Varistorkeramik mit einer Blitzlampe mit einer Blitzenergie von 6000 J für eine Dauer von 1 ms angestrahlt und die Rückseite mit der Thermokamera gefilmt. Die Umgebung der Proben war dabei durch einen Karton vor dem Lichtblitz abgedeckt, um nur die Erwärmung der Proben ohne Störquellen aufzunehmen. Um den Beginn des Lichtblitzes genau zu bestimmen zu können, wurde in den

Karton ein kleines Loch gemacht, das die Messung nicht beeinflusst, dass aber ein genaues Triggern des Auslösens des Lichtblitzes ermöglicht. Dieser Versuch wurde an einer Platte mit einer Kantenlänge von 20x20 mm und einer mittleren Dicke von 1,95 mm durchgeführt. In **Abb. 15** sind die Temperaturverläufe einer Aufnahme eines solchen Versuches mit Blitzlampe zu sehen. Auf der rechten Seite ist die Intensität aufgenommene Blitzlampe dimensionslos aufgetragen während auf der linken Seite die Temperatur der Plattenmitte in °C aufgetragen ist. Dabei ist eine Verzögerung zwischen Anstieg der Intensität der Blitzlampe und dem Erwärmen der Platte zu sehen.

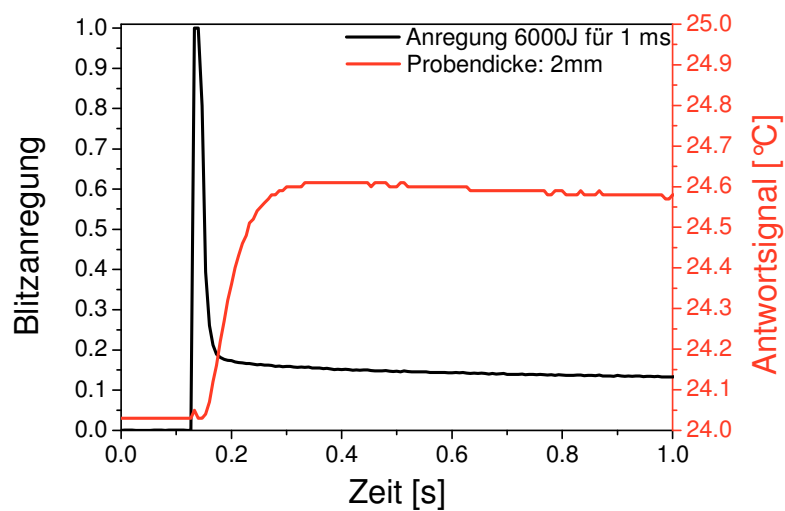


Abb. 15: Blitzlampen Temp-Kurve.

Zur Erklärung der Versuchsergebnisse wurde der Wärmefluss analytisch und numerisch anhand der Wärmeleitungsgleichung (2.1) berechnet. Die Geometrie wurde durch eine unendliche (d.h. die Breite und Höhe sehr viel größer als die Dicke) Platte mit beiderseitiger Kühlung modelliert. Dadurch ergaben sich als Randbedingungen die konvektive Kühlung an der Oberfläche, und die Symmetrieebene ohne Wärmefluss in der Mitte der Platte. Durch bilden einer in Zeit- und Ortsvariablen getrennten Ansatzfunktion, und einsetzen in die Wärmeleitungsgleichung kann man die Variablen separieren und jede Seite der Gleichung für sich lösen (siehe Anhang). Diese Lösungen werden in die Ansatzfunktion eingesetzt und ergeben so eine Lösungsfunktion. Setzt man nun die Randbedingungen ein erhält man eine Gleichung mit unendlich vielen Lösungen. Die Summe über alle möglichen Lösungen zusammen mit den Anfangsbedingungen ergibt die Lösung der Wärmeleitungsgleichung. Damit kann der Temperaturverlauf analytisch gerechnet werden. Für die numerische Lösung

wurde ein einfaches Plattenmodell herangezogen. Die numerischen Ergebnisse stimmen mit den analytischen Ergebnissen überein (Unterschied $< 0,8\%$).

Die Ergebnisse der Messung und der Simulation stimmen ebenfalls überein, wenn anstelle der Werte aus **Tab.1** (welche an einer geringfügig anderen Keramik ermittelt wurden) um etwa 2% erhöhte Werte für die spezifische Wärme verwendet werden: Somit ergibt sich für die Wärmekapazität der Wert 480 J/kgK, für die Wärmeleitfähigkeit der Wert 25 W/mK, was gut mit der Literatur übereinstimmt [Bar04].

Damit ist die Anwendbarkeit der Thermographie für die Varistorkeramik nachgewiesen.

2.6 Vorversuche Lock-in Technik

Während im vorhergehenden Versuch nur der einfache Aufnahmemodus der Thermokamera verwendet wurde, wird im Folgenden nun die Lock-in Technik getestet. Die wesentliche Erweiterung ist hier die Einbindung des periodischen Anregungssignals in die Auswertung.

Nun wurde allerdings ein zyklisches Anregungssignal gewählt und die Plattendicken wurden variiert. Bei diesen Wärmeleitungsmessungen wurde wiederum dieselbe Platte wie früher von hinten erwärmt und das Antwortsignal an der gegenüberliegenden Seite aufgezeichnet (**Abb. 16**). Gleichzeitig wird die thermographische Messung durch das Lock-in Verfahren ergänzt. Die Lock-in Technik wird sowohl benötigt um das zyklische Anregungssignal zusammen mit dem Antwortsignal (Erwärmung der Rückseite) aufzuzeichnen, als auch um die beiden Signale in Relation zu setzen. Daraus lässt sich einerseits eine Phasenverschiebung zwischen dem Anregungs- und dem Antwortsignal bestimmen, als auch die Eignung des Lock-in Verfahrens für die Messungen zu verifizieren.

Diese Phasenverschiebung entspricht der Laufzeit der Wärmewelle durch das Volumen der Platte und ist von den Dicken der Platten abhängig. Somit lässt sich eine „Kalibrationskurve“ bestimmen, die einen Zusammenhang zwischen der Phasenverschiebung und der Plattendicke festlegt. Dabei ist ein parabolischer Zusammenhang zwischen Dicke und Phasenverschiebung (entspricht der Laufzeit) zu erwarten (vgl. Formel zur thermischen Diffusionslänge).

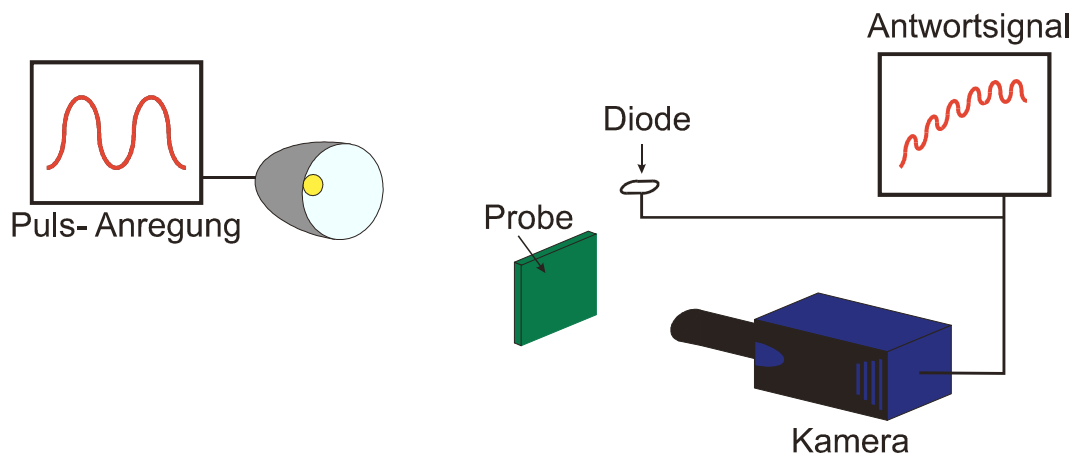


Abb. 16: Versuchsaufbau Halogenlampen, die hier zusätzlich im Einsatz stehende Diode zeichnet das Anregungssignal auf.

Wie im vorne Beschriebenen Kalibrierungsversuch wurden die Proben von hinten bestrahlt. Es wurden aber Halogenlampen (anstelle der Blitzlampe) schwellend mit zwei unterschiedlichen Frequenzen (0,5 und 1 Hz) geschaltet.

Im Zuge der Messungen wurde erkannt, dass es zwischen dem elektrischen Anregungssignal der Halogenlampen und deren Aufleuchten bzw. Abdunkeln zu einer beträchtlichen Zeitverschiebung kommt. Es musste daher von der Verwendung der Anregungsspannung als Eingangssignal Abstand genommen werden. Anstelle dessen wurde knapp neben der Probe eine Photodiode montiert, die das photonische Anregungssignal aufzeichnete und als Trigger für die Lock-in Box weitergab.

Die Messkurven für eine Plattendicke sind in (**Abb. 17**) dargestellt. Fasst man die Phasenverschiebung für mehrere Dicken zusammen, so erhält man den oben beschriebenen und erwarteten parabolischen Verlauf. Dieser ist in (**Abb. 18**) dargestellt.

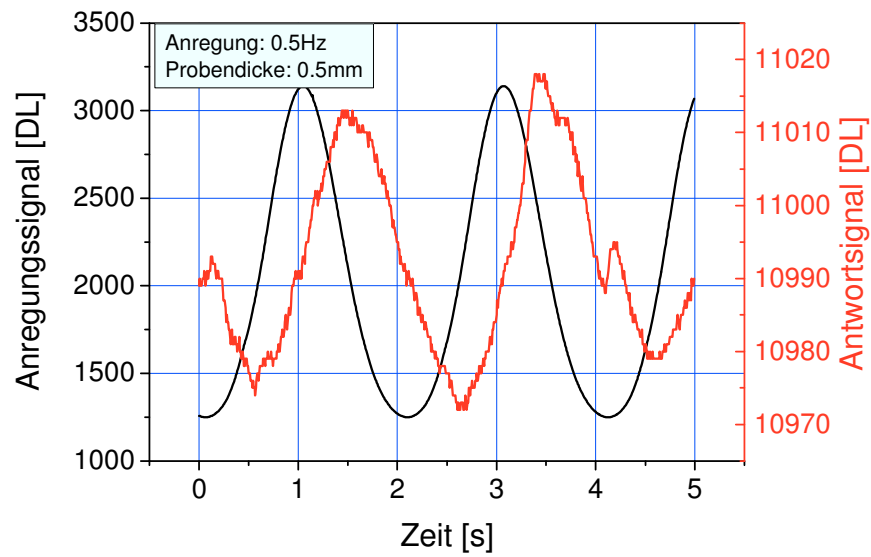


Abb. 17: Darstellung der Anregung und thermisches Antwortsignal auf das Rückseite. Dadurch ist die Phasenverschiebung zu sehen.

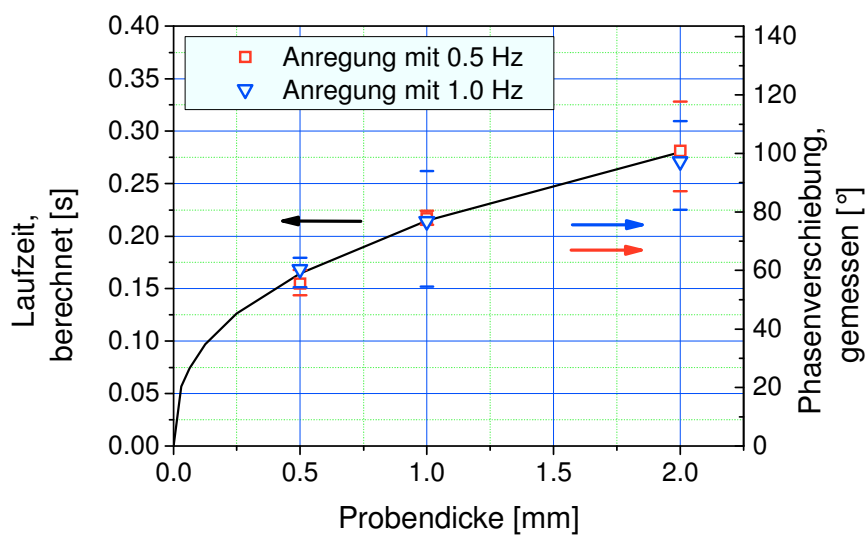


Abb. 18: Phasenverschiebung für mehrere Plattendicken.

Durch die in **Abb. 18** dargestellte Kalibrationskurve kann nun jeder mit der Thermokamera gemessenen Phasenverschiebung eine Plattendicke zugewiesen werden.

3 Messung

3.1 Vorversuche und Messaufbau

Vor Beginn der thermographischen Messungen wurden die losen Bauteile in eine Klemmhalterung eingespannt und beschalten.

In die Schaltung (**Abb. 19**) wurde noch ein $1000\ \Omega$ Vorwiderstand eingefügt, um einerseits den leckstrombehafteten MLV vor Überströmen im Kurzschlussfall zu schützen und andererseits um die Stromstärke zu messen („Mess-shunt“).

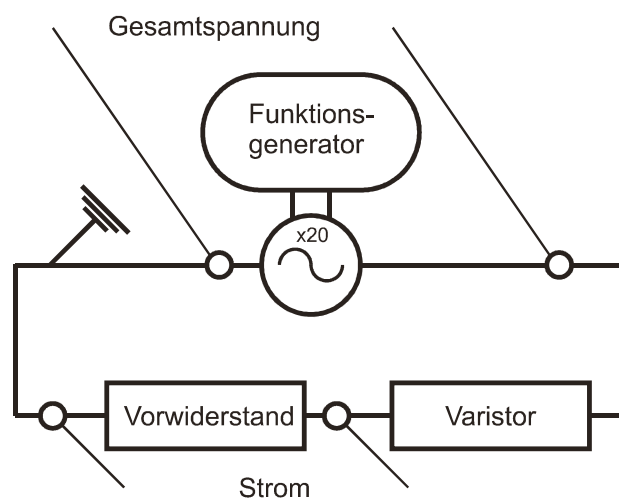


Abb. 19: Schaltplan.

Die Thermokamera wurde auf einer optischen Bank zusammen mit einem Positioniertisch für die Probenhalterung montiert (**Abb. 20**). Durch den elektronisch ansteuerbaren Positioniertisch ist es möglich, die einzelnen Proben reproduzierbar vor der Thermokamera zu positionieren. Zusätzlich kann die Kamera auch einfach fokussiert werden.

Die Kamera wurde mit einer Mikroskoplinse bestückt, die Strukturen bis zu einer Größe von rund $20\ \mu\text{m}$ auflösen kann. Durch die Verwendung von „Auszugsringen“, die den Fokusbereich verschieben, kann die Auflösung noch weiter erhöht werden (auf rund $6\ \mu\text{m}$ pro Pixel). Bei dieser Vergrößerung ist das Bild im Randbereich aber bereits stark verzerrt (vignettiert). Diese Vignettierung kann aber rechnerisch beseitigt werden [Mal01a]. Da die Defekte im Zentrum der Aufnahmen liegen, wo der Effekt nicht auftritt, wurde aber darauf verzichtet.

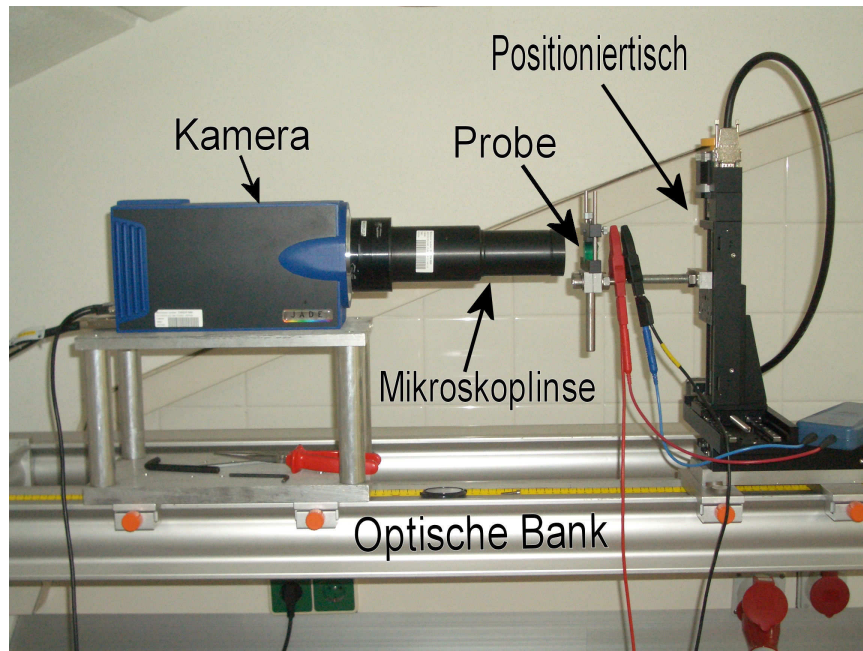


Abb. 20: Optische Bank mit Thermokamera und Probenhalter.

Als Signalquelle diente ein Funktionsgenerator des Typs Tektronix AFG3102. Dieser lieferte sowohl das Messsignal, als auch das Triggersignal. Da das gelieferte Signal für die Messung zu schwach war, musste es von einem Signalverstärker des Typs NF4052 verstärkt werden. Mit einem Oszilloskop wurden die Spannungen an der Probe, dem Vorwiderstand, dem Funktionsgenerator und zur Überprüfung auch am Monitorausgang des Verstärkers gemessen. Für die Auswertung wurden die Spannungsabfälle am Funktionsgenerator und am Vorwiderstand herangezogen (siehe **Abb. 19**).

Durch diese Messungen konnten die Proben vorab thermographisch untersucht und später mögliche Veränderungen durch das anschließende Löten erkannt werden. Zusätzlich konnte noch die entstehende Wärmemenge abgeschätzt werden, um Proben für die weiteren Untersuchungen auszuwählen. Natürlich kann so auch die Lage der Defekte grob erkannt werden. Dazu wird in der zu der Thermokamera gehörenden Software Altair eine Messlinie über das Thermographiebild gelegt. Dadurch bekommt man ein Intensitätsprofil, das Aufschluss über die Erwärmung entlang dieser Linie gibt (**Abb. 21**).

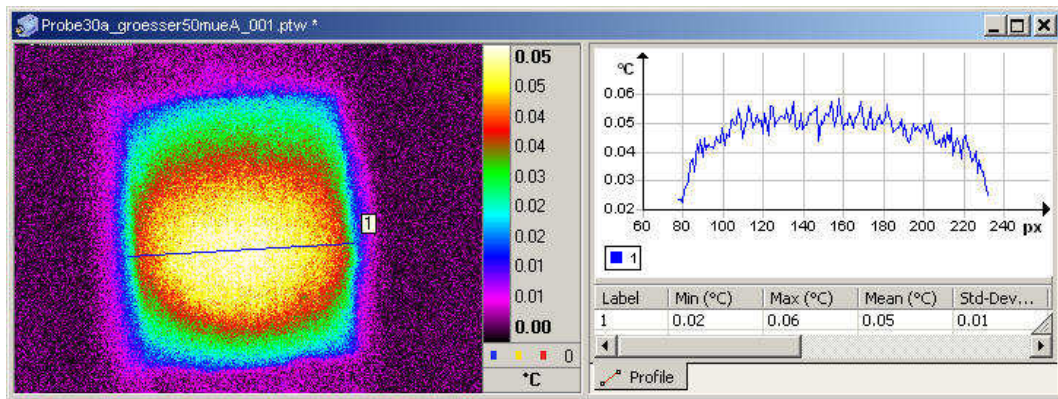


Abb. 21: Probe30, KL 3.

Zusätzlich wurden die Proben noch um 90° gedreht (Abb. 22), so dass auch Thermo-graphische Aufnahmen normal zur Elektrodenrichtung gemacht werden konnten.

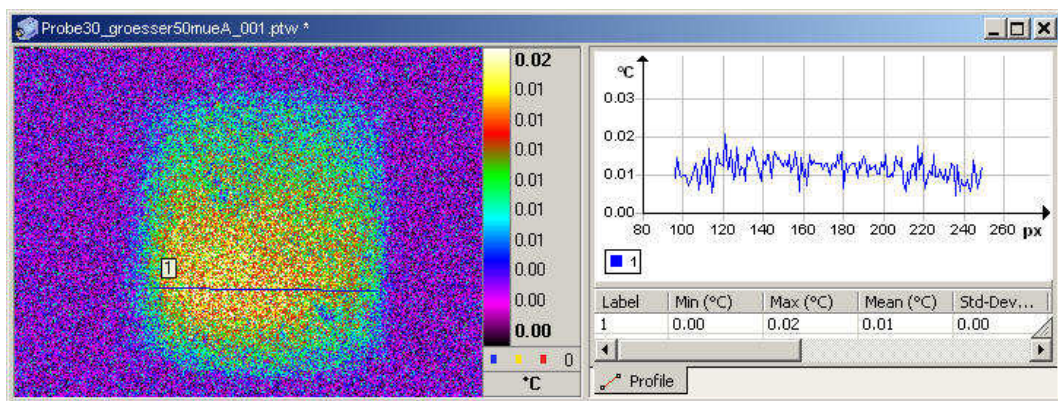


Abb. 22: Probe30, KI 3 (90° gedreht).

Man könnte vermuten, dass durch „auskreuzen“ der beiden Maxima auch auf diese Weise den Defekt zu lokalisieren ist.

Wie man allerdings im obigen Beispiel sieht ist fast immer nur auf einer Seite der Probe ein deutliches Maximum zu sehen, wodurch der Defekt nur entlang einer Linie zu lokalisieren wäre. Aber selbst bei zwei ausgeprägten Maxima wäre der Defekt nur ungefähr zu bestimmen (Abb. 23).

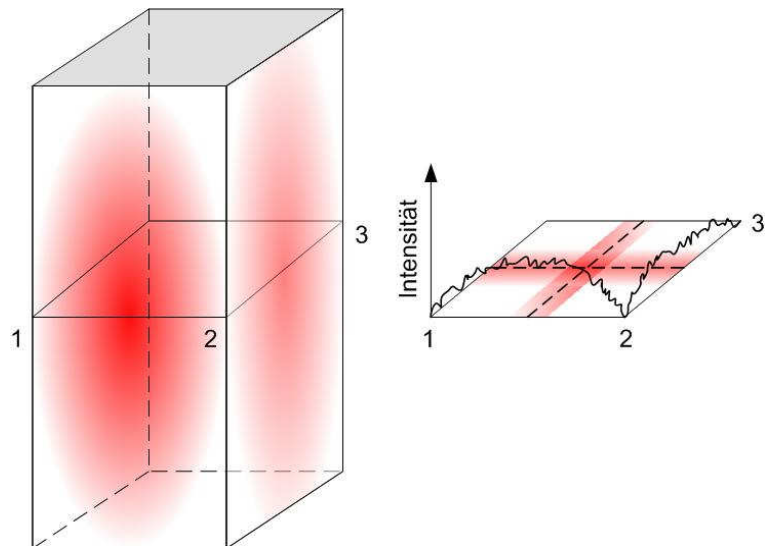


Abb. 23: Links: Defektlokalisierung über die Oberfläche.
Rechts: Profil der Intensität der Erwärmung an den Messlinien.

Daher ist diese Art der Untersuchung zu grob, um alleine für eine genaue Positionierung des Defektes zu dienen.

Dies ist der Fall, da die Wärmeleitung innerhalb der Elektroden größer ist als in der umgebenden Keramik. Daher verteilen die Elektroden die Wärme relativ rasch (im Vergleich zur Keramik) in der Elektrodenschicht. Beobachtet man die Ausbreitung der „Wärmewelle“ normal zur Elektrodenebene, so wird die Lokalisierung des Defektes verhindert.

Daher wurde in Folge die Ausbreitung der Wärme parallel zur Elektrodenebene studiert.

3.2 Probenvorbereitung

Um die verhältnismäßig kleinen Bauteile gut handhaben und sie in späterer Folge abschleifen zu können müssen die Proben eingebettet werden. Das Ausbrechen aus der Einbettmasse wurde verhindert, indem die Bauteile auf Platinen gelötet wurden. An diese Platinen wurden wiederum Drähte zum Beschalten gelötet (**Abb. 24**).

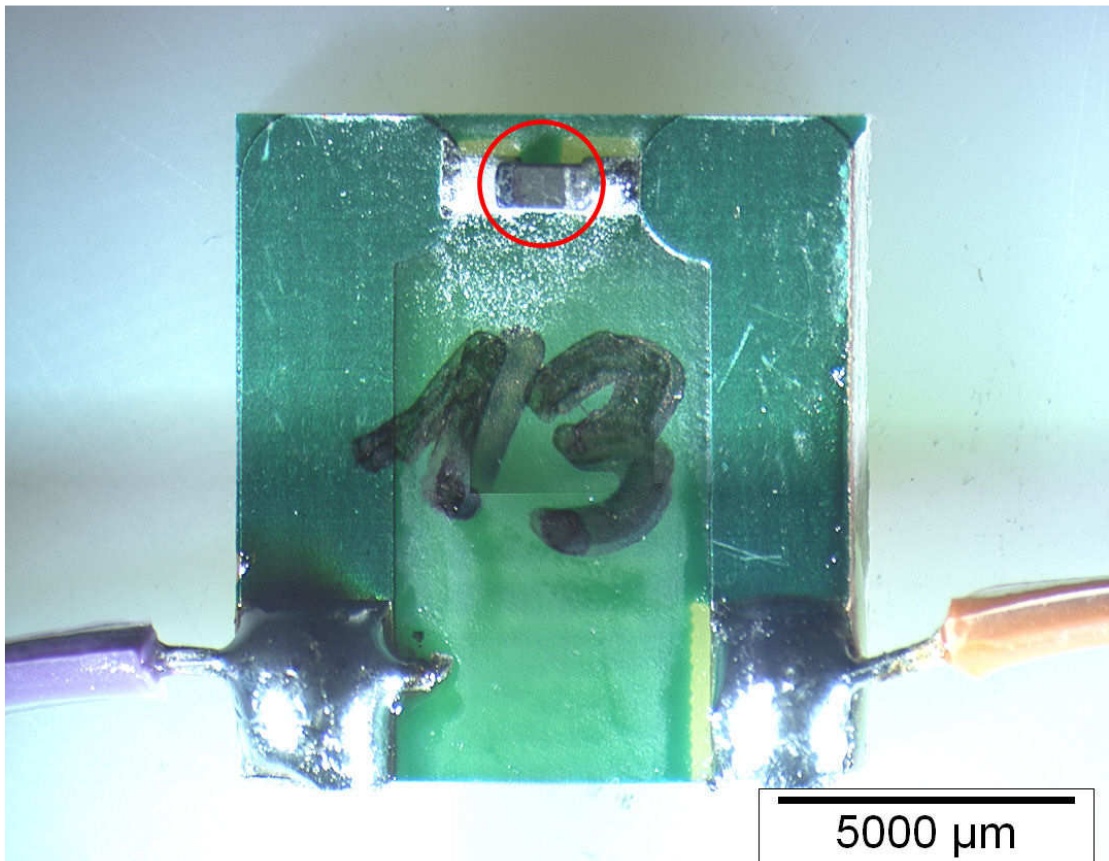


Abb. 24: Auf eine Platine aufgelöteter MLV (Kreis) mit Bedrahtung.

Da die Leckstrompfade mit hoher Wahrscheinlichkeit zwischen den Innenelektroden liegen, war es wichtig, die Lage der Innenelektroden vor dem Auflöten auf die Platinen zu kennen.

Vor dem Auflöten der Proben auf die Platine wurde daher die Orientierung der Elektroden im LiMi festgestellt. Da die Metallelektroden aber nicht bis an die Bauteiloberfläche reichen (da sie sich zum Schutz gegen Spannungsüberschlägen in der Mitte des Bauteiles befinden und an den Stirnseiten eine Metallisierung besitzen, siehe **Abb. 5**) wurde zur Definition der Lage der Elektroden die Orientierung der Keramikfolien herangezogen, die im polarisiertem Licht gut erkennbar sind (**Abb. 25**)

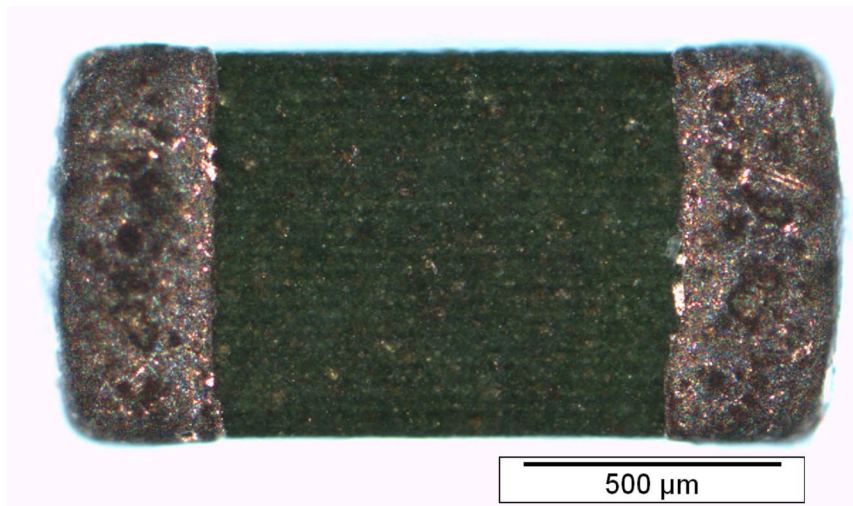


Abb. 25: MLV unter polarisiertem Licht

Die Orientierung der gelöteten MLVs kann vor den Untersuchungen noch am Lichtmikroskop mittels der Polfilter überprüft werden.

3.3 Messungen an MLVs vom Typ 0603:

Es wurden Proben mit unterschiedlichen Leckstromverhalten verwendet (Klassen 1 bis 3):

Proben mit einem Leckstrom kleiner als $1 \mu\text{A}$ (Kl 1)

Proben mit einem Leckstrom von 1 bis $10 \mu\text{A}$ (Kl 2)

Proben mit einem Leckstrom größer als $50 \mu\text{A}$ (Kl 3)

Wie bereits erwähnt wurden die Varistoren zum Kontaktieren auf Platinen aufgelötet und bedrahtet (durchgeführt bei der Firma EPCOS) und zur besseren Handhabung in Kunstharz des Typs SCANDIPLAST der Firma SCAN-DIA eingebettet. Dies ist notwendig um die Proben leichter handhaben zu können. Es wurde Kalteinbettmittel verwendet, da die Proben bzw. das Lot negativ auf die Erwärmung bei Heißeinbetten reagieren könnten. Außerdem ist bei einer Heißeinbettmaschine nicht möglich die Drähte zum beschalten an der Platine zu lassen.

Nach dem Einbetten in Kunstharz waren die Proben auch an der zu untersuchenden Oberseite mit Kunstharz überzogen. Deshalb wurden die Proben kurz angeschliffen, um die Oberfläche der Varistoren wieder frei zu legen. Da die Dicke der Einbettmasse auf den Proben immer unterschiedlich war, wurde dieser angeschliffene Zustand als Nullhöhe angenommen.

Um so möglichst nahe an die Defekte zu gelangen, wurde schrittweise Material der Proben abgeschliffen. Die Tiefe der Defekte kann mittels der in den Vorversuchen erstellten Kurve abgeschätzt werden. Da die Proben aber sehr klein sind (1,2 x 0,8 x 0,8 mm), wurde versucht, sie in möglichst kleinen Schritten abzuschleifen (50 bis 100 μm). Dazu wurde ein Schleifautomat der Firma Struers (RotoPol – 25) und ein SiC Schleifpapier mit einer 1000er Körnung verwendet.

Die Restdicke der Probe und damit die Abtragtiefe wurde nach jedem Polierschritt mit einer Messuhr kontrolliert. Außerdem wurde nach jedem Polierschritt ein thermographisches Bild der Oberfläche angefertigt.

Für die weiteren Untersuchungen wurden zunächst einige Proben anhand ihrer Strom-einzelmesswerte ausgewählt. Dann wurden sie beschalten und von der Thermokamera aufgenommen. Gleichzeitig wurden die Spannungswerte von einem Oszilloskop aufgezeichnet. Dazu wurden der Ausgangsstrom des Funktionsgenerators und der Strom am Vorwiderstand aufgezeichnet. Dabei kann man den Anstieg des Stromflusses am Vorwiderstand bei Erreichen der Durchbruchspannung erkennen. Man erkennt deutlich, dass sich die Stromkurven bei den drei unterschiedlichen Leckstromstärken stark unterscheiden. Bei den Proben Der Kl 1 (**Abb. 26**) steigt der Strom beim Erreichen einer bestimmten Spannung stark an, bei den Proben mit einem Leckstrom der Kl 2 (**Abb. 27**) steigt der Strom schon deutlich früher an und bei den Proben der Kl 3 (**Abb. 28**) fließt der Strom fast sofort.

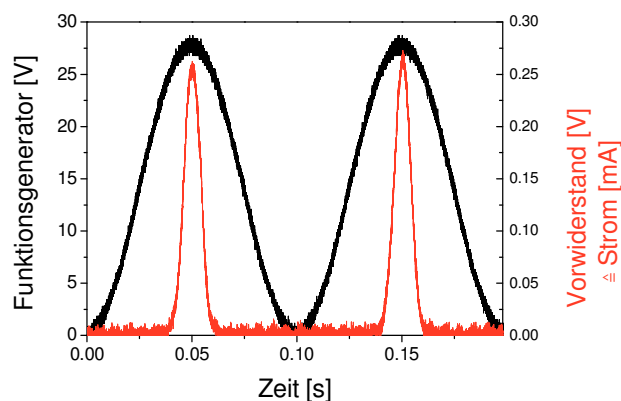


Abb. 26: Spannungsverlauf Probe20 Kl 1.

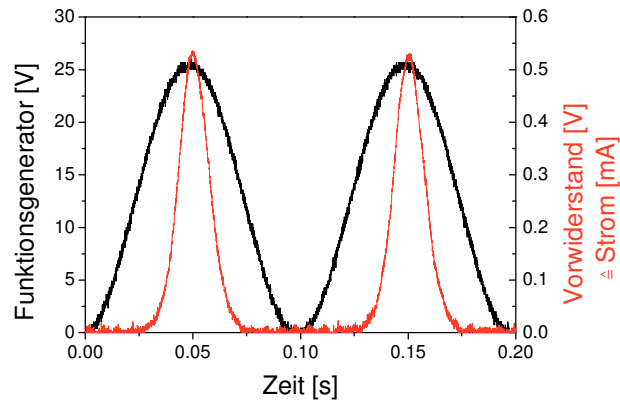


Abb. 27: Spannungsverlauf Probe24 KI 2.

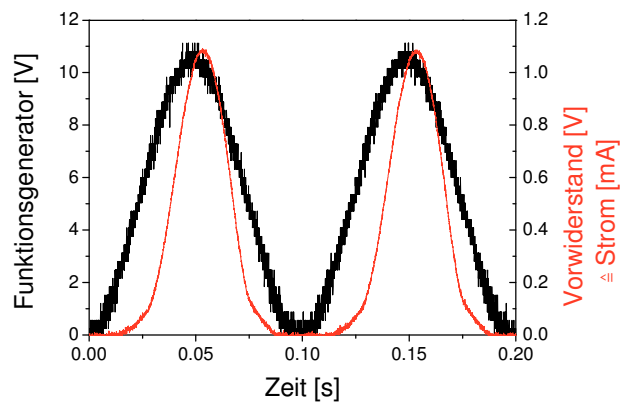


Abb. 28: Spannungsverlauf Probe30 KI 3.

Außerdem ist zu erkennen, dass die Stromkurve bei Bauteilen der KI 3 eine deutliche Phasenverschiebung der Maxima besitzt und eine deutlich geringere Spannung als bei KL1 ausreicht, damit der Leckstrompfad den Strom leitet.

Bei den weiteren Messungen wurden die Proben nach jedem Messvorgang um weitere 50 bis. 100 μm abgeschliffen, um den Defekt zu erreichen. Wie schon gesagt, wurden die Proben eingebettet, um ein zu starkes Verkappen der Proben beim Schleifen zu vermeiden und um eine gute Randstabilität zu gewährleisten.

In (Abb. 29) ist ein Phasenbild von Probe 30 der KI 3 zu sehen. In (Abb. 30) wurden bereits 318 μm abgetragen. Dabei ist deutlich zu erkennen, dass der Phasenunterschied an der Stelle des Leckstrompfades geringer geworden ist.

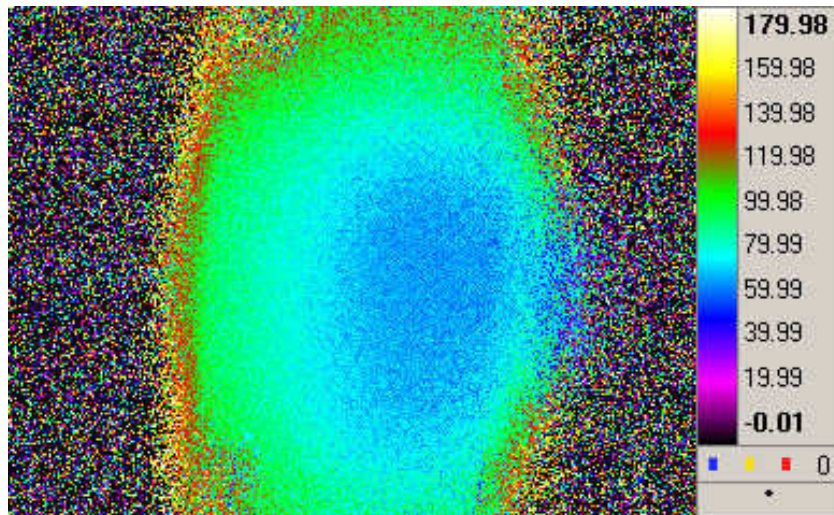


Abb. 29: Probe30 KI 3 wenige μm abgeschliffen.

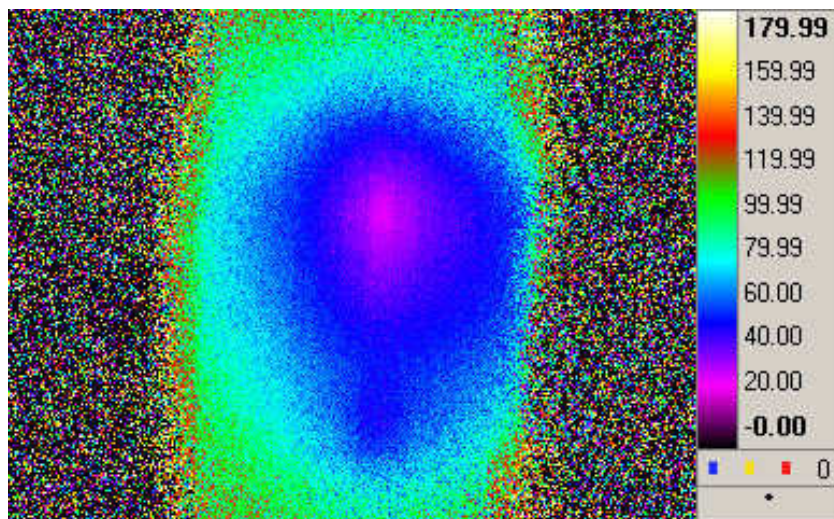


Abb. 30: Probe30 KI 3 318 μm abgetragen.

Bei diesen Bildern sieht man bereits deutlich, wie einerseits die Position des Defektes an der Oberfläche besser lokalisiert werden kann und andererseits auch die Tiefenlage des Defektes geringer wird.

Die Defekte befinden sich überwiegend an den Rändern der Elektroden und gehäuft an den Spitzen der kammförmig angeordneten Elektroden

In den folgenden Bildern wird eine Auswahl der Untersuchten Proben gezeigt. Links ist immer das Amplitudenbild (Abb. 32a bis Abb. 39a) zu sehen und rechts das zugehörige Phasenbild (Abb. 32b bis Abb. 39b). Anhand der Amplitudenbilder kann die Erwärmung (Lokale Temperaturerhöhung) durch den Leckstrompfad erkannt werden, während im

Phasenbild die Phasenverschiebung zwischen Anregungssignal und aufgenommenen Signal dargestellt wird. Die abgebildeten Proben sind bereits bis zum Defekt abgeschliffen.

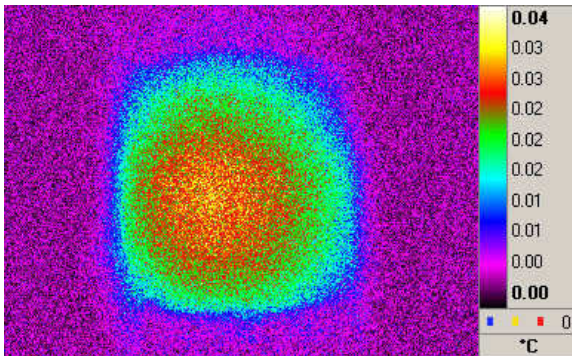


Abb. 31.a: Probe 01 Kl 2 - Amplitudenbild.

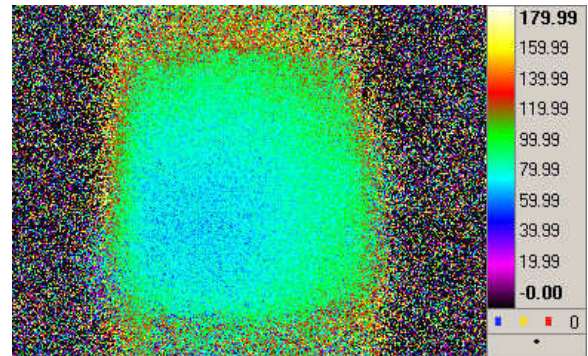


Abb. 31.b: Probe 01 Kl 2 - Phasenbild.

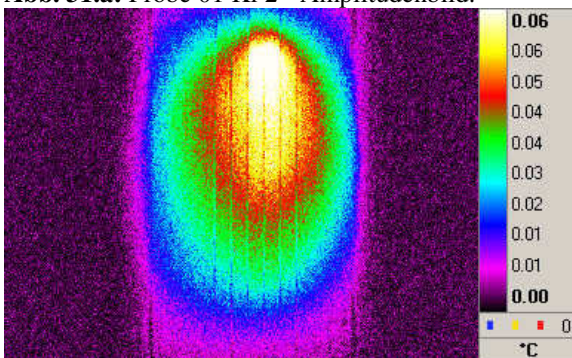


Abb. 32.a: Probe 01 Kl 2 - Amplitudenbild.

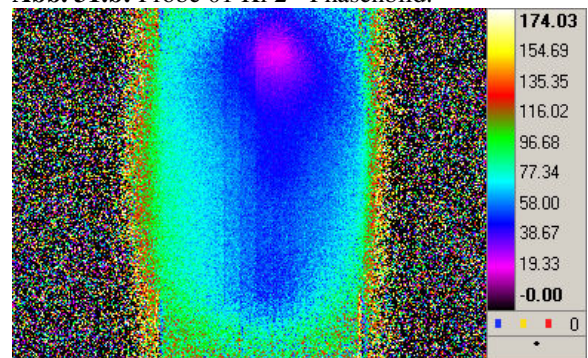


Abb. 32.b: Probe 01 Kl 2 - Phasenbild.

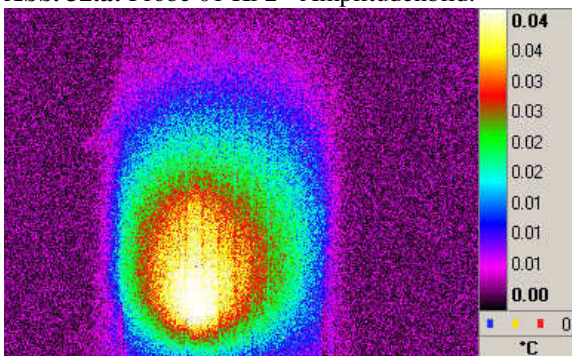


Abb. 33.a: Probe 17 Kl 2 - Amplitudenbild.

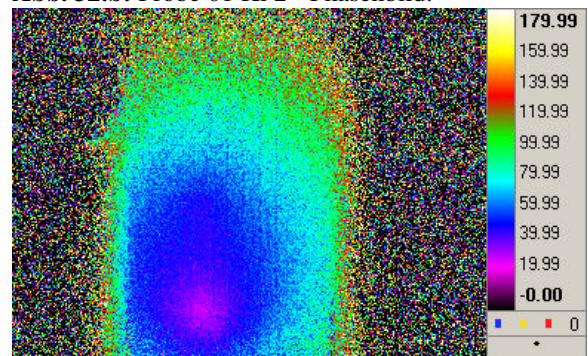


Abb. 33.b: Probe 17 Kl 2 - Phasenbild.

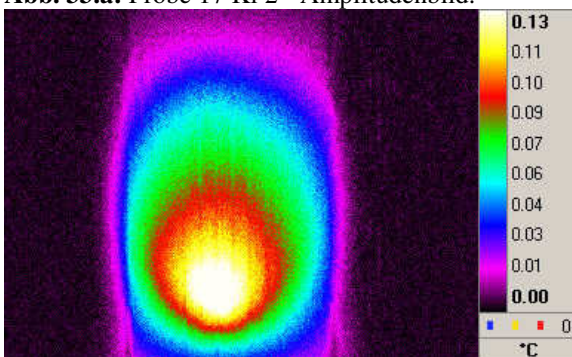


Abb. 34.a: Probe 28 Kl 2 - Amplitudenbild.

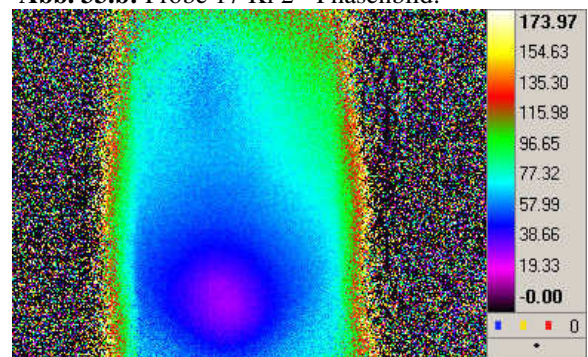


Abb. 34.b: Probe 28 Kl 2 - Phasenbild.

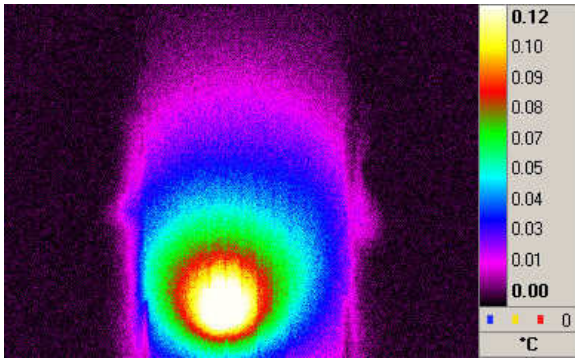


Abb. 35.a: Probe 05 Kl 3 - Amplitudenbild.

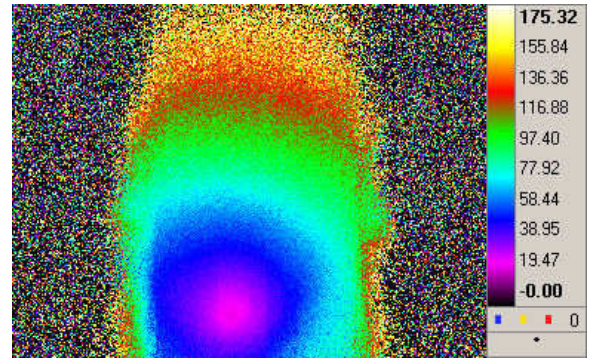


Abb. 35.b: Probe 05 Kl 3 - Phasenbild.

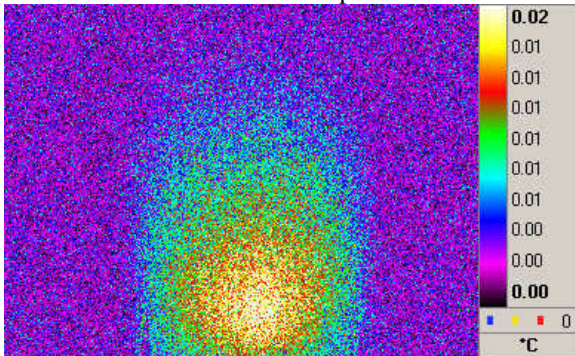


Abb. 36.a: Probe 13 Kl 3 - Amplitudenbild.

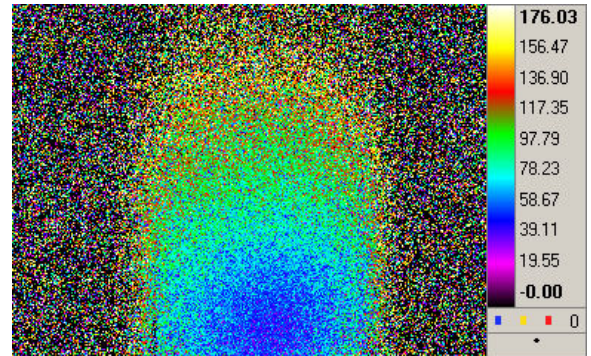


Abb. 36.b: Probe 13 Kl 3 - Phasenbild.

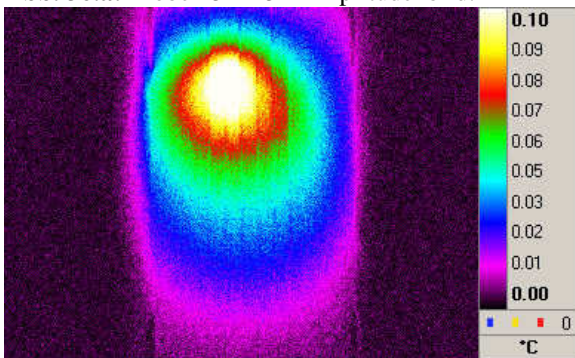


Abb. 37.a: Probe 18 Kl 3 - Amplitudenbild.

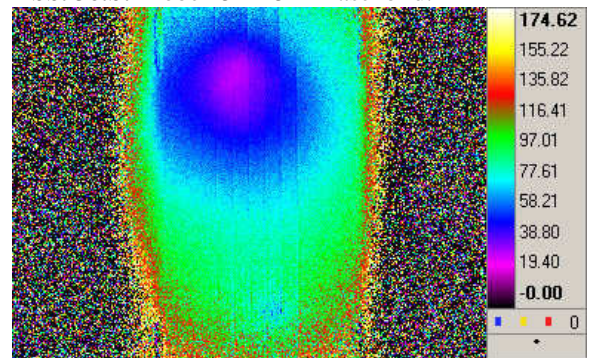


Abb. 37.b: Probe 18 Kl 3 - Phasenbild.

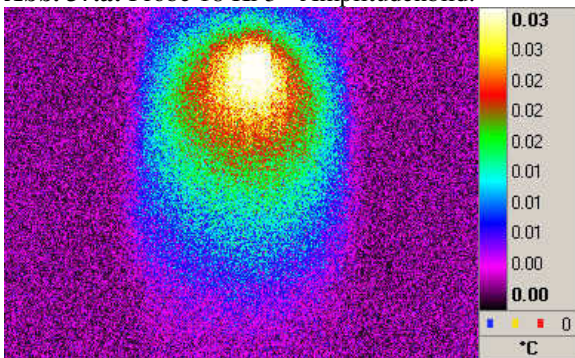


Abb. 38.a: Probe 22 Kl 3 - Amplitudenbild.

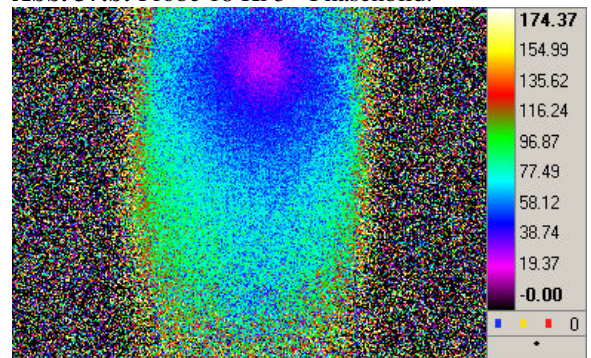


Abb. 38.b: Probe 22 Kl 3 - Phasenbild.

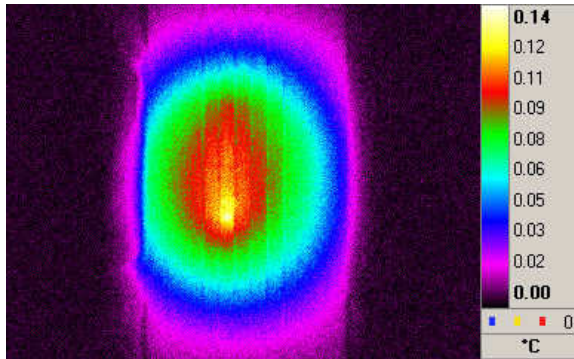


Abb. 39.a: Probe 30 KI 3 - Amplitudenbild.

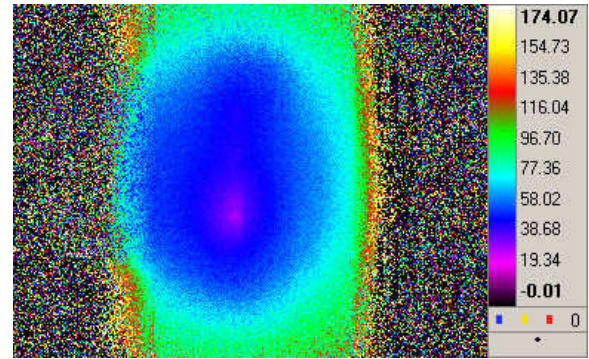
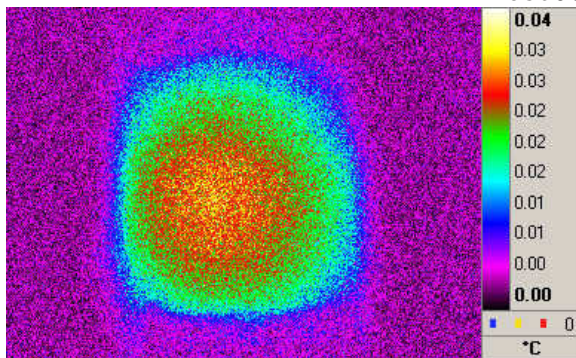


Abb. 39.b: Probe 30 KI 3 - Phasenbild.

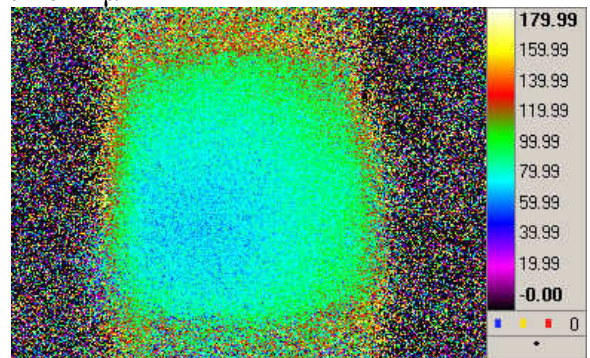
3.3.1 Untersuchung der Probe 06 der Klasse 1

Bei der Untersuchung der Bauteile der Klasse 1 (exemplarisch in **Abb. 40** dargestellt) ist nur eine geringe lokale Erwärmung der Proben zu erkennen, auch nimmt die Amplitude der Erwärmung kaum zu. Auch im Phasenbild ist kaum eine Abweichung zu erkennen. Die Abtragsstufen betragen 50 bis 100 μm , die allerdings nicht weiter aufgezeichnet wurden da sie nur als Referenz für die mit Leckströmen behafteten Bauteile galten.

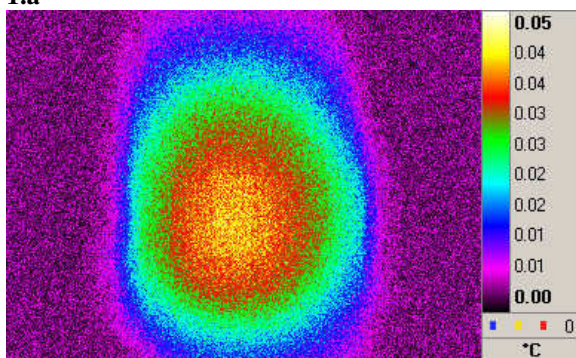
Probe06 - kleiner 1 μA



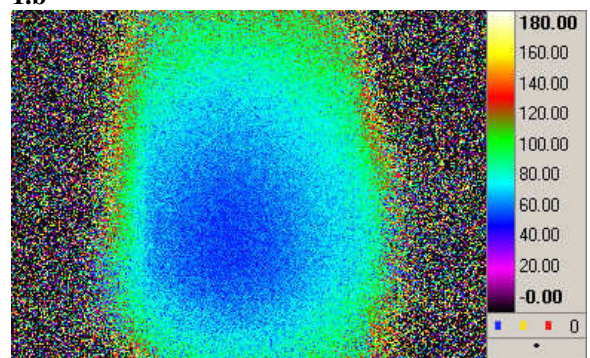
1.a



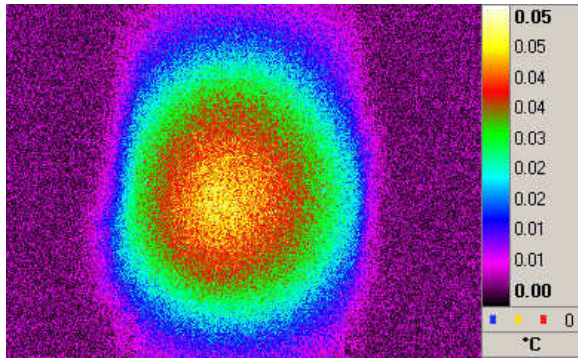
1.b



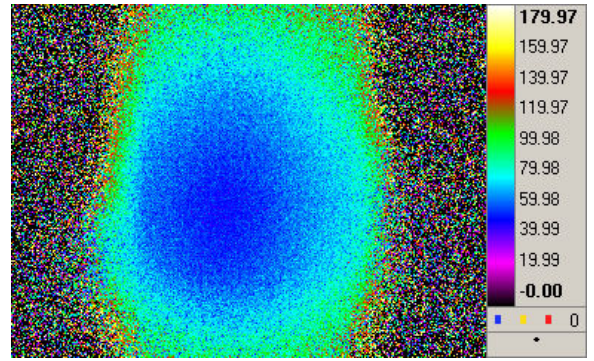
2.a



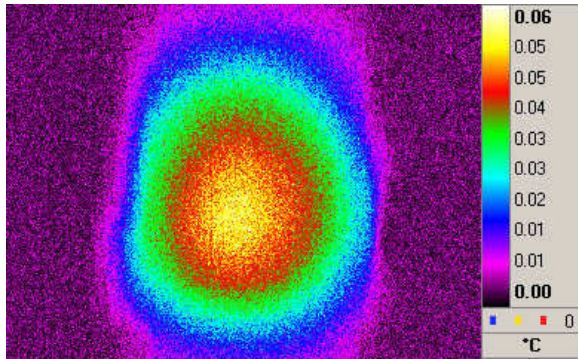
2.b



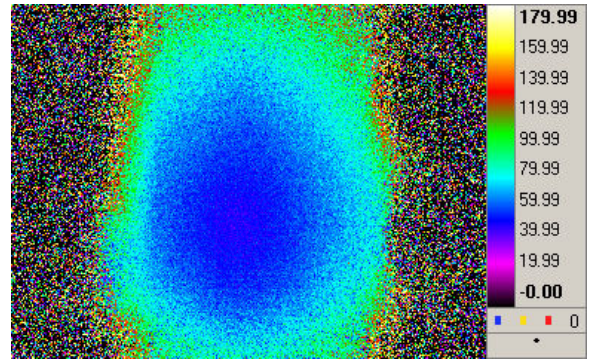
3.a



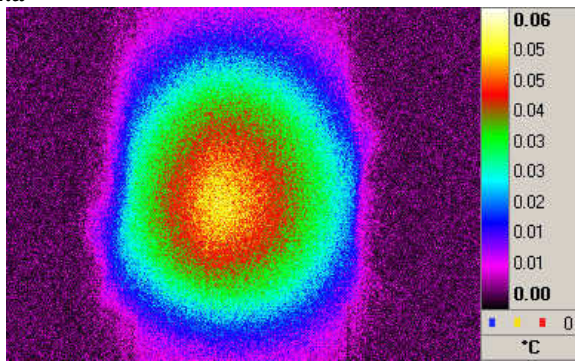
3.b



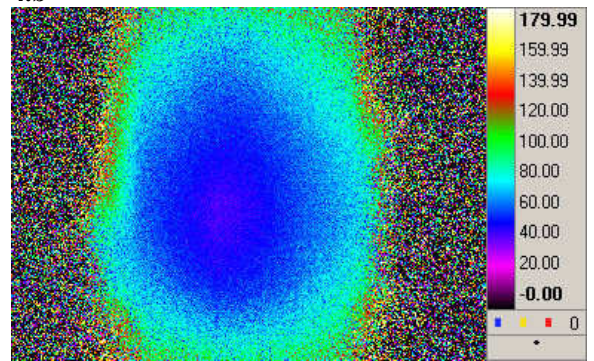
4.a



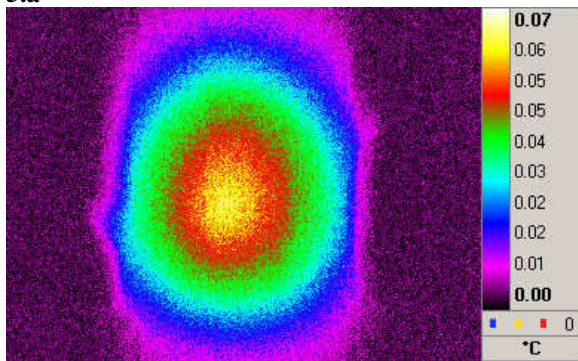
4.b



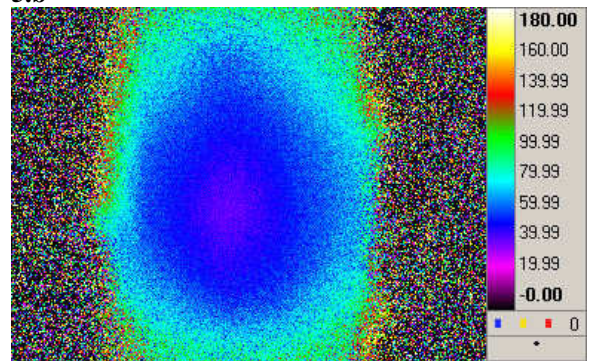
5.a



5.b



6.a



6.b

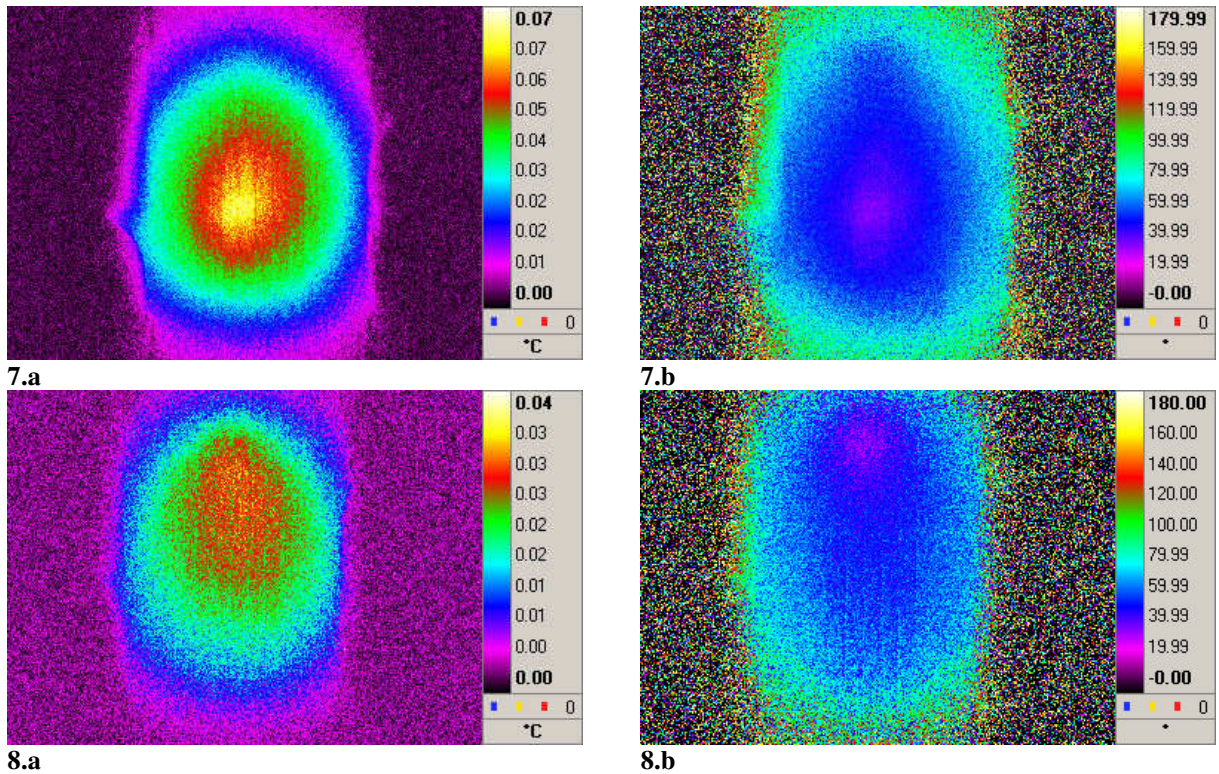


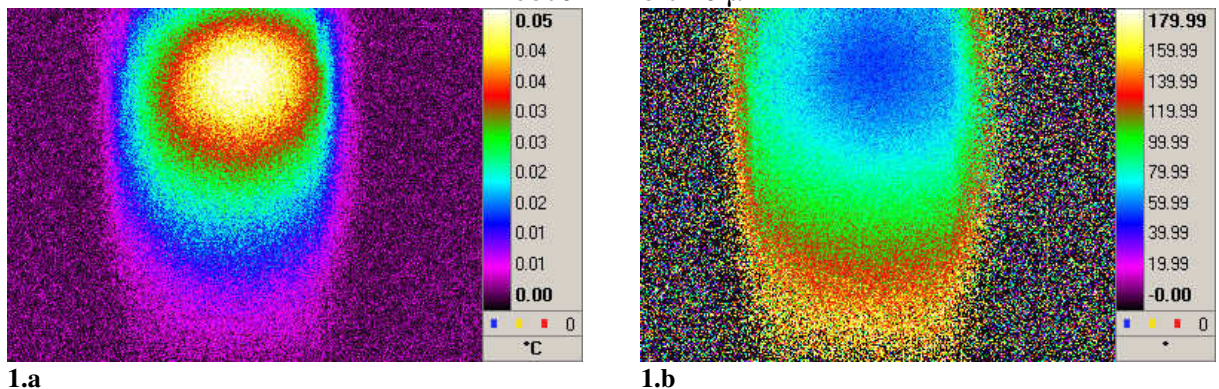
Abb. 40: Abbildung der ungefähren Einzelschritte beim Auffinden der Defekte:

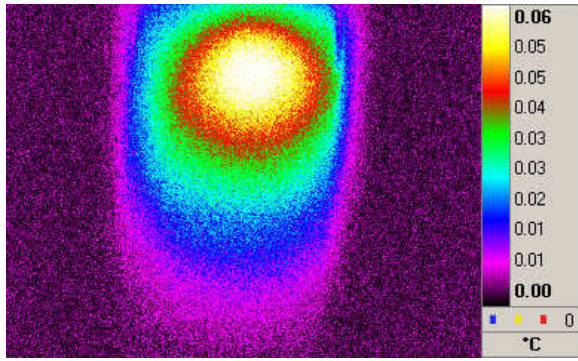
- 1a, b: Oberfläche der Probe
- 2a, b: ca.: 0,100 mm abgetragen
- 3a, b: ca.: 0,150 mm abgetragen
- 4a, b: ca.: 0,200 mm abgetragen
- 5a, b: ca.: 0,250 mm abgetragen
- 6a, b: ca.: 0,300 mm abgetragen
- 7a, b: ca.: 0,350 mm abgetragen
- 8a, b: ca.: 0,400 mm abgetragen.

3.3.2 Untersuchung der Probe 01 der Klasse 2

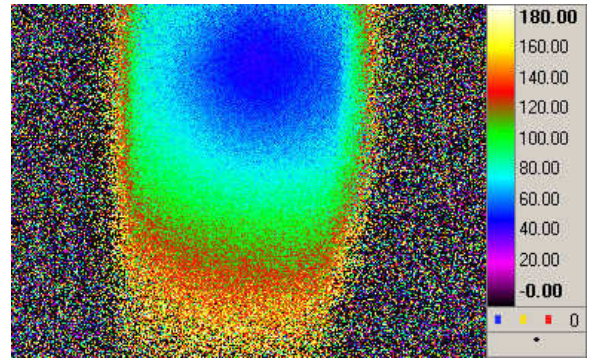
In **Abb. 41** ist ein Vertreter der Klasse 2 gezeigt, bei dem die Lokalisierung der Wärmequelle bereits deutlich zu Tage tritt. Es ist eine Intensivierung der Amplitude und eine Lokalisierung der Phasenverschiebung bei fortschreitendem Abtragen zu erkennen. Auch hier wurde wieder in Abtragschritten von 50 bis 100 μm gearbeitet.

Probe01 - 1 bis 10 μA

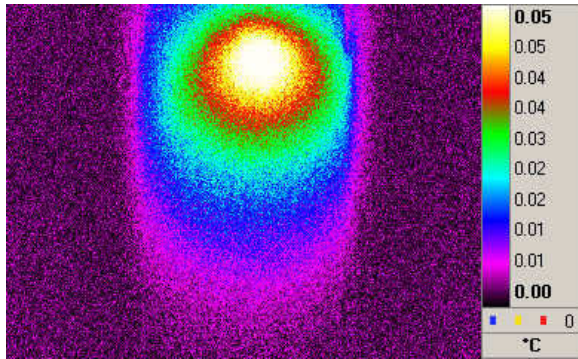




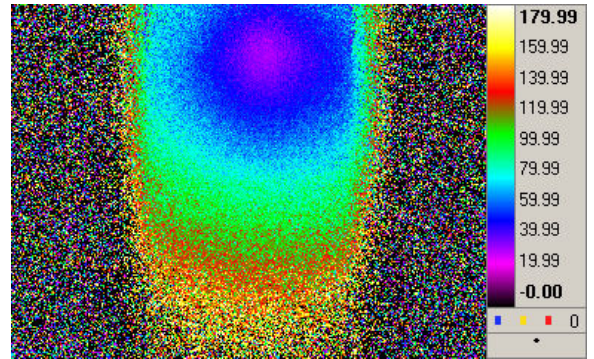
2.a



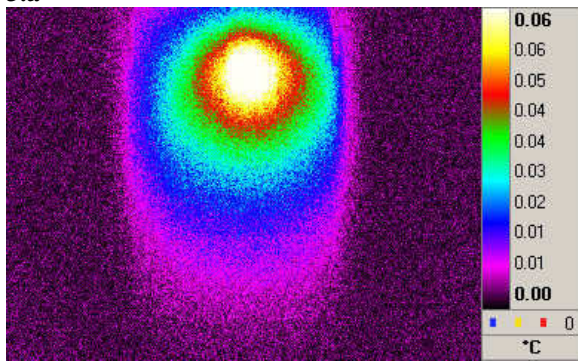
2.b



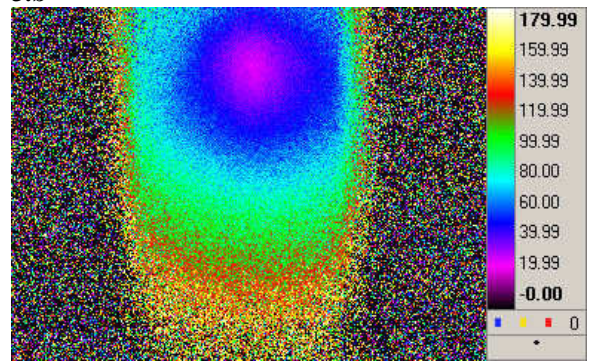
3.a



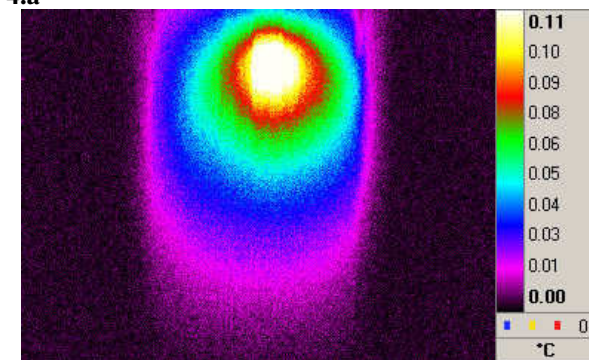
3.b



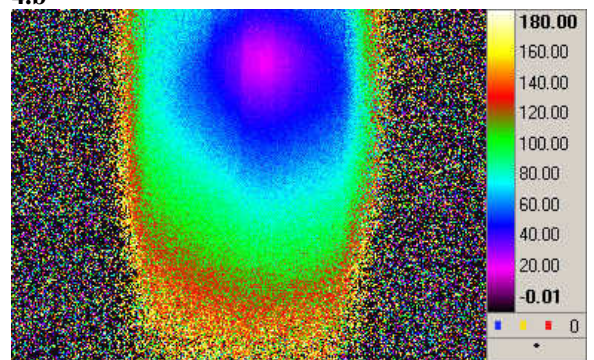
4.a



4.b



5.a



5.b

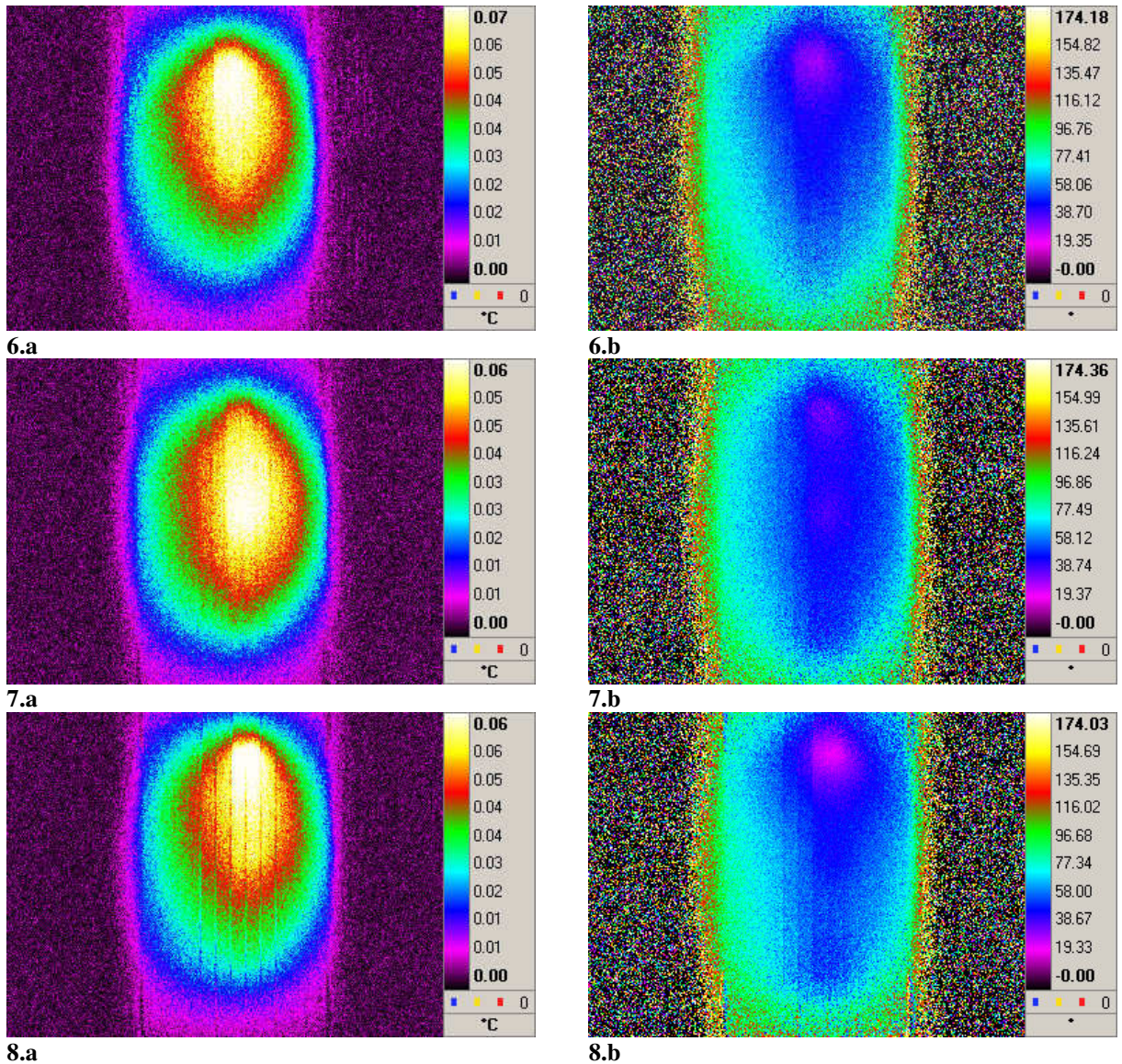


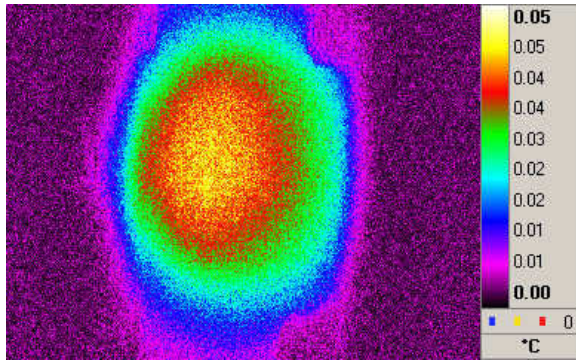
Abb. 41: Abbildung der Einzelschritte beim Auffinden der Defekte:

- 1a, b: Oberfläche der Probe
- 2a, b: 0,089 mm abgetragen
- 3a, b: 0,159 mm abgetragen
- 4a, b: 0,198 mm abgetragen
- 5a, b: 0,238 mm abgetragen
- 6a, b: 0,277 mm abgetragen
- 7a, b: 0,299 mm abgetragen
- 8a, b: 0,334 mm abgetragen.

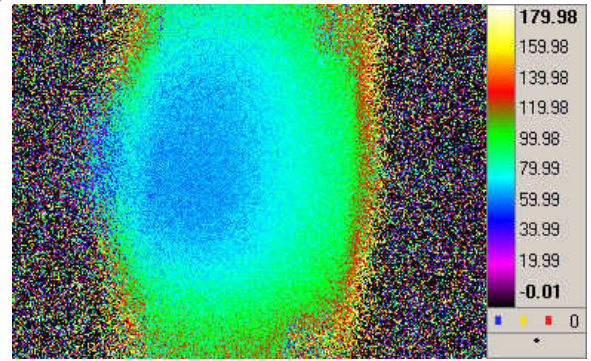
3.3.3 Untersuchung der Probe 30 der Klasse 3

Bei den Vertretern der Klasse 3 (**Abb. 42**) handelt es sich um die Bauteile mit den höchsten Leckströmen (über 50 μA). Diese machen sich durch eine starke Lokalisierung eine sehr deutliche Erwärmung bemerkbar. Die Amplitude der Erwärmung und die Lokalisierung der Phase sind von allen drei untersuchten Klassen am größten.

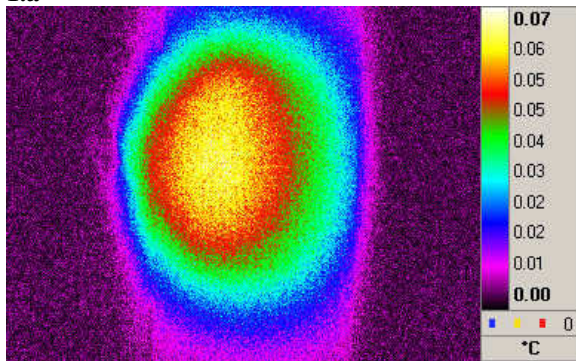
Probe30 - größer50 μ A



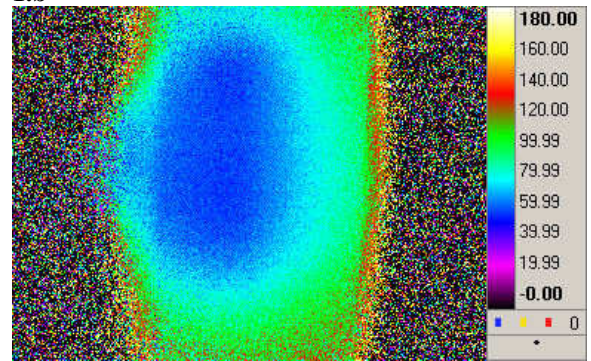
1.a



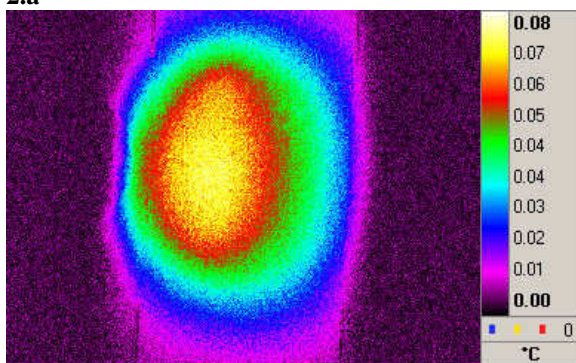
1.b



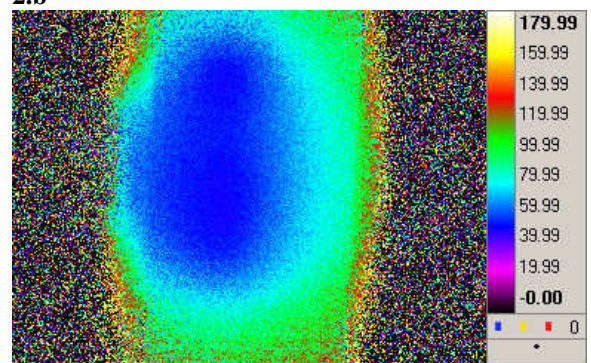
2.a



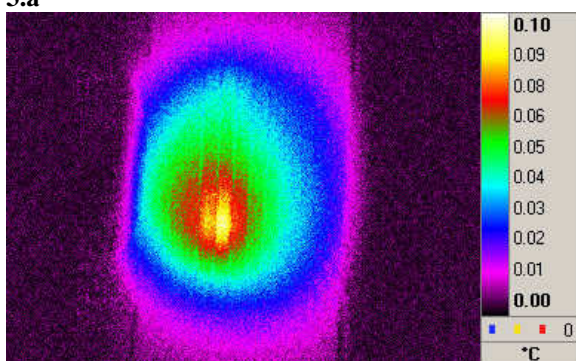
2.b



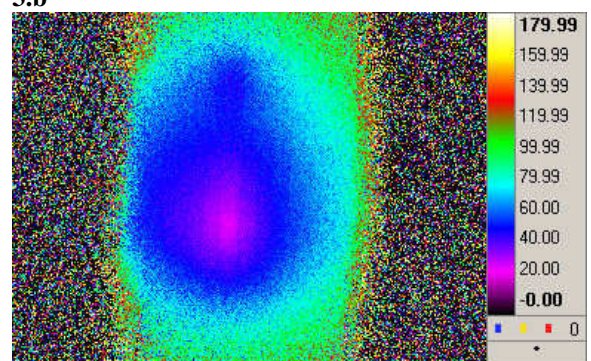
3.a



3.b



4.a



4.b

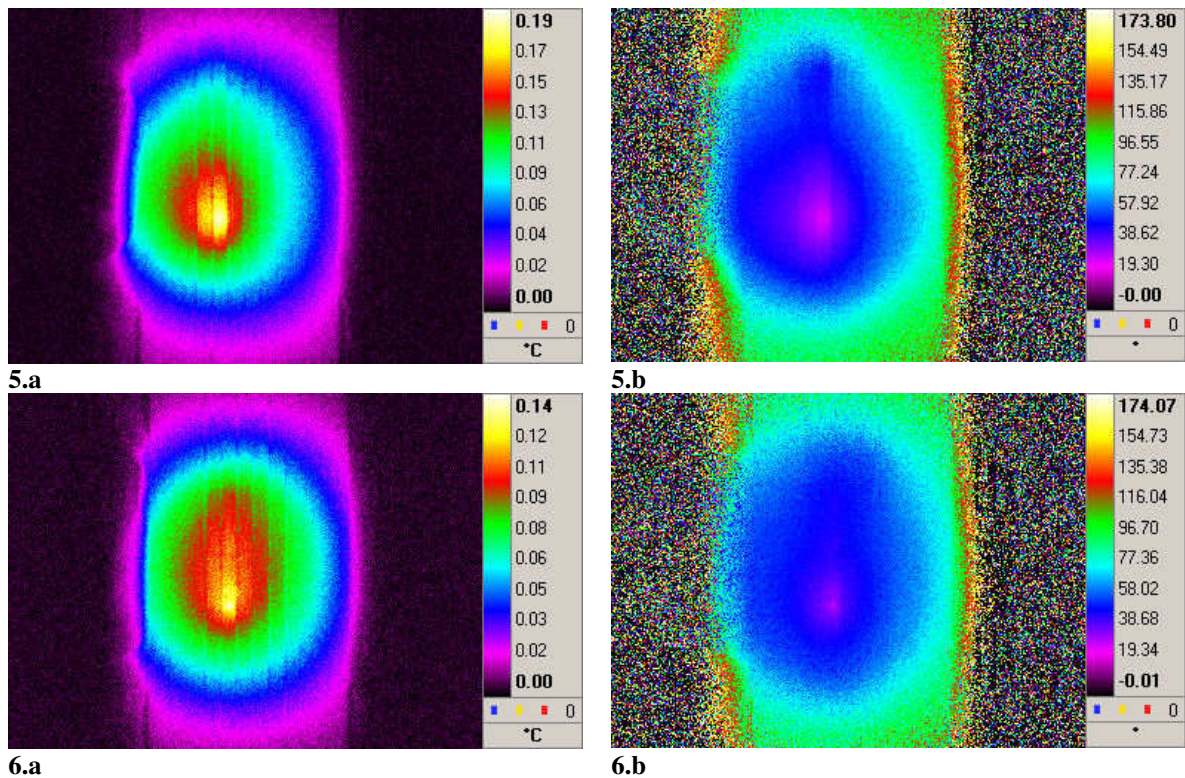


Abb. 42: Abbildung der Einzelschritte beim Auffinden der Defekte:

- 1a, b: Oberfläche der Probe
- 2a, b: 0.112 mm abgetragen
- 3a, b: 0.170 mm abgetragen
- 4a, b: 0.318 mm abgetragen
- 5a, b: 0.419 mm abgetragen
- 6a, b: 0.437 mm abgetragen.

Die Thermographie erwies sich als gut geeignet, um Defekte in keramischen Bauelementen aufzuspüren. Bei allen untersuchten Proben konnten sehr genau die Defekte durch Schleifen freigelegt werden. Da allerdings immer eine geringe Phasenverschiebung aufgrund der zeitlichen Verzögerung zwischen Ansteuern der Bauteile und Schalten der Bauteile besteht, bleibt eine gewisse Unsicherheit in Bezug auf das genaue Erreichen der Defekte.

Um die Methode noch weiter zu verfeinern, wurden die Proben, bevor sie zu weiteren Untersuchungen freigegeben wurden, noch elektrisch untersucht. Dabei wurden die Bauteile in 10 µm Schritten abgeschliffen und danach ihr Widerstand gemessen. Da sich der Widerstand der Bauteile bei Erreichen des Defektes deutlich ändert, kann der Defekt so sehr genau lokalisiert werden.

3.4 Experimentelle Limitierungen und Auswege

Ein grundsätzliches Problem beim Abschleifen der Proben war das, trotz aller Vorsicht vorkommende Verkippen der Proben. Die abgetragene Höhe der Proben wurde über eine

Messuhr gemessen. Dabei wurde die Höhe in der Mitte der Probe kontrolliert. Durch das weichere Einbettmittel welches einen geringeren Widerstand gegen das Abtragen bot als die im Verhältnis kleinen Proben (sie haben nur eine Fläche von $0,96 \text{ mm}^2$) mit größerer Härte kam es zu einem Verkippen der Proben beim Abschleifen. Das eigentliche Problem ist, dass bei manchen Proben durch das Verkippen die Innenelektroden auf einer Seite abgeschliffen wurden und so der Kontakt verloren ging (**Abb. 43**). Dadurch floss kein Strom mehr durch den noch vorhandenen Defekt und er konnte nicht mehr detektiert werden.

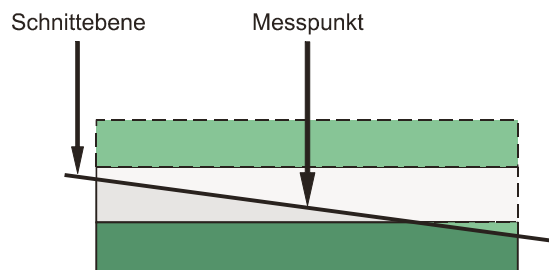


Abb. 43: Schematischer Schliff schräg durch einen MLV.

Wegen des schiefen Abschleifens stieg auch der Fehler bei der Tiefen- (Abtrags-) Messung an. Aber auch Thermographisch kam es durch das schräge Abschleifen zu unerwünschten Effekten. So ist beispielsweise in zahlreichen Bildern ein Gradient im Thermographiebild zu sehen aufgrund der unterschiedlich breiten Innenelektroden entstand.

An diese Diplomarbeit anschließende Untersuchungen und damit im Zusammenhang stehende Probenpräparationen werden verbesserte Abtragsmethoden benötigen.

Bei allen Thermographiebildern von Proben die bis zum Defekt Abgetragen wurden ist immer eine Restphasenverschiebung von ungefähr 20° zu sehen. Diese Phasenverschiebung ist darauf zurück zu führen, dass die Lock-in Technik auf sinusförmigen Signalen beruht. Da es sich bei Varistoren jedoch um nichtlineare Bauteile handelt erhält die Thermokamera auf das sinusförmige Anregungssignal kein Sinusförmiges Antwortsignal. Wie in **Abb. 26** zu sehen ist, schaltet der Varistor erst bei Erreichen einer bestimmten Spannung. Dieses verspätete Schalten wird von der Lock-in Box als Phasenverzögerung interpretiert. Diese Phasenverschiebung ist allerdings rein elektrisch bedingt.

Abgesehen von der Phasenverschiebung wurden noch andere Phänomene beobachtet:

Die Bauteile verändern ihre Eigenschaften, wenn sie im angeschliffenen Zustand (also mit ungeschützten Oberflächen) der Raumatmosphäre ausgesetzt sind. Es bildet sich eine schwach leitfähige Schicht an der Oberfläche, die dafür sorgt, dass Defekte diffus wirken. Bei manchen Proben war auch ein zusätzlicher Hot Spot zu sehen. Des weitem reagierten die Proben empfindlich auf das Reinigen mit destilliertem Wasser im Ultraschallbad. Nach der Reinigung waren zahlreiche ausgebrochene Körner zu erkennen.

Außerdem zeigten die Strommessungen, dass sich bei manchen Varistoren der Maximalwert des gemessenen Stromes verschob. Dabei kam es sowohl zu einer Erhöhung des Stromes als auch zu einer Verminderung während der Messung. Auch setzte bei einigen Proben das Driften erst nach einiger Zeit ein.

Die mittels der Thermographie gefundenen Defekte können weiterführend untersucht werden um die Defektart genau zu bestimmen.

Da aber bei der Probenpräparation Schwierigkeiten erkannt wurden, sollten zukünftige Proben dahingehend eingebettet werden, dass ein Verkappen der Proben möglichst verhindert wird. Dies kann zum Beispiel durch das Aufbringen von Halbkugeln auf die Platine gesehen (**Abb. 44**). Anhand dieser Halbkugeln kann die Abtragstiefe genauer bemessen werden. Dies geschieht anhand der Durchmesser der Halbkugeln. Dadurch kann die Verkippung der Proben gemessen werden. Gleichzeitig wirken die Halbkugeln stabilisierend auf das Abschleifen der Proben.

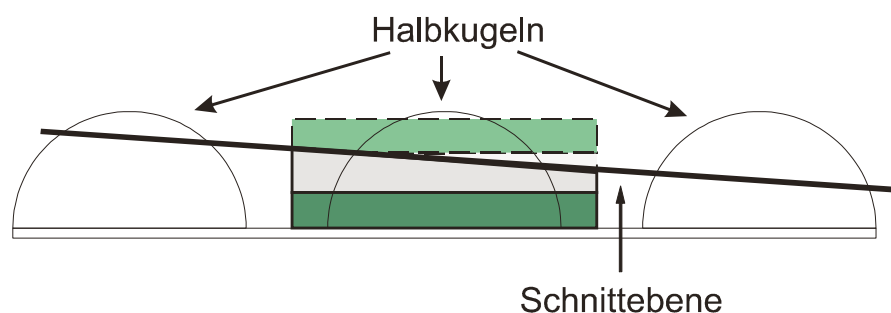


Abb. 44: Schematischer Schliff schräg durch einen MLV mit aufgetragenen Halbkugeln.

Des Weiteren wäre eine Analyse der elektrisch bedingten Phasenverschiebung von Vorteil. Wenn es möglich ist, diese elektrische Phasenverschiebung rechnerisch zu korrigieren, ist das Erreichen der Defekte genauer zu erkennen.

4 Zusammenfassung

Die Thermographie hat sich als geeignetes Werkzeug für die Auffindung von Defekten in Leckstrombehafteten MLVs bewiesen. Da diese Bauteile keinen sichtbaren Schaden aufweisen, wenn sie nicht mehr ihren Funktionen nachkommen können, ist es mit den herkömmlichen Methoden nicht möglich gewesen die Defekte zu lokalisieren. Die Leckströme erzeugen aber Wärme, die mittels Thermographie detektiert werden kann. Durch die Verwendete Lokin- Technik und die Ortsauflösung der Thermokamera ist es möglich, die genaue Position der Leckstrompfade zu finden.

Wenn hingegen die Bauteile überlastet werden, kommt es oft zu Schädigungen, die mittels Lichtmikroskopie auffindbar sind. Diese Schädigungen sind ebenfalls lokalisiert.

Die Bauteile wurden stromgesteuert beschalten, wodurch der Schaltvorgang im Varistor aufgezeichnet werden konnte. Dadurch wurde ersichtlich dass die unterschiedlichen Klassen unterschiedlich auf die Spannungserhöhung reagieren. Bei allen mit Leckströmen behafteten Proben konnte die Position der Leckströme hinreichend genau positioniert werden (**Tab. 2**)

Probe	relative Position des Defektes in x-Richtung	relative Position des Defektes in y-Richtung	gesamt Abtragstiefe z-Richtung [mm]
01 Kl 2	Ende der Elektroden	zwischen 4. und 5. Elektrode	0,334
17 Kl 2	Ende der Elektroden	zwischen 1. und 2. Elektrode	0,460
28 Kl 2	Ende der Elektroden	zwischen 2. und 3. Elektrode	0,549
05 Kl 3	Ende der Elektroden	zwischen 1. und 2. Elektrode	0,381
13 Kl 3	Ende der Elektroden	zwischen 3. und 4. Elektrode	0,224
18 Kl 3	Ende der Elektroden	zwischen 2. und 3. Elektrode	0,332
22 Kl 3	Ende der Elektroden	zwischen 4. und 5. Elektrode	0,346
30 Kl 3	Mitte der Elektroden	zwischen 2. und 3. Elektrode	0,437

4.1 Ausblick

Um zu verstehen, was genau die Leckstrompfade in den MLVs verursacht, müssen weiterführende Untersuchungen bezüglich der Struktur und der chemischen Zusammensetzung im Leckstrombereich durchgeführt werden.

Dies geschah zum einen bereits durch Untersuchungen mittels eines Lichtmikroskops, um Unterschiede in der Korngrößenverteilung zu untersuchen, andererseits durch Untersuchungen mittels eines Atomic Force Mikroskope (AFM). Dabei wurde der gefundene Leckstrombereich einzelner Proben mittels des AFMs gescannt und die Leitfähigkeit der einzelnen Körner bzw. Korngrenzbereiche untersucht.

Die Untersuchungen im Lichtmikroskop brachten keine signifikanten Auffälligkeiten innerhalb des Gefüges, also zwischen den Körnern der Leckstrombereiche, zu Tage. Außerdem besteht kein Unterschied zwischen den Leckstrombereichen und dem Randmaterial. In beiden Bereichen waren die Korngrößen im gleichen Größenbereich.

Beim AFM konnten Unterschiede in der Leitfähigkeit der einzelnen Körner gefunden werden. Im Leckstrombereich wiesen einzelne Körner eine höhere Leitfähigkeit als die restlichen Körner auf. Die genaue Untersuchung dieser Thematik wird in Folgeprojekten stattfinden.

5 Anhang

5.1 Verwendete Geräte und Programme:

Verwendete Geräte:

- Struers RotoPol - 25
- Thermokamera: Cedip:
 - Jade III MWIR mit InSb Detektor
 - Mikroskoplinse
 - Lock-in Box
- PC
- Funktionsgenerator: Tektronix AFG3102
- Leistungsverstärker NF4052
- Oszilloskop: LeCroy Waverunner 44 Xi
- Lichtmikroskop: OLYMPUS BX50, Digitale Kamera Colorview II

Verwendete Programme:

- Thermographie:
 - Altair
 - Altair LI
- Mathematica
- Origin 7.5
- Bildbearbeitungssoftware:
 - Analysis

6 Literatur

- [Bej93] A. Bejan, (1993) Heat Transfer, John Wiley & Sons, Inc., New York
- [Bai95] S.-N. Bai and T.-Y. Tseng, "Degradation Phenomena Due to Impulse-Current in Zinc Oxide Varistors," Journal of the American Ceramic Society, vol. 78, pp. 2685-2689, 1995.
- [Bar04] C.M. Barrado, E. R. Leite, P. R. Bueno, E. Longo, and J. A. Varela, "Thermal conductivity features of ZnO-based varistors using the laser-pulse method," Materials Science and Engineering A, vol. 371, pp. 377-381, 2004.
- [Ced03] Altair LI User Manual, Rev. G, CEDIP Infrared Systems Frankreich
- [Ced04a] Altair Reference Guide, Rev. 5.50, (2004), CEDIP Infrared Systems, Frankreich.
- [Ced04b] Cedip Cameras USER MANUAL, Rev. A, (2004), CEDIP Infrared Systems, Frankreich.
- [Che02] W.-P. Chen and H. L. W. Chan, "Water-Induced Degradation in Zinc Oxide-Based Ceramic Varistors," Journal of the American Ceramic Society, vol. 85, pp. 1625-1627, 2002.
- [Chi97] Y.M. Chiang, D. Birnie III, W. Kilgery, (1997) Physical Ceramics, John Wiley & Sons, Inc., New York
- [Cla99] D.R. Clarke, "Varistor Ceramics," Journal of the American Ceramic Society, vol. 82, pp. 485-502, 1999.
- [Epc02] EPCOS, (2002) PDF_General.pdf
http://www.epcos.com/web/generator/Web/Sections/ProductCatalog/NonlinearResistors/Varistors/PDF/PDF__General,property=Data__nn.pdf;/PDF_General.pdf
- [Epc05] EPCOS, (2005) Zarte Folien
<http://www.epcos.de/web/generator/Web/Sections/Components/Page,locale=nn,r=263282,a=248772.html>
- [Gup90] T. K. Gupta, "Application of Zinc Oxide Varistors," Journal of the American Ceramic Society, vol. 73, pp. 1817-1840, 1990.
- [Hoh91] G. Hohenberger, G. Tomandl, R. Ebert, and T. Taube, "Inhomogeneous Conductivity in Varistor Ceramics: Methods of Investigation," Journal of the American Ceramic Society, vol. 74, pp. 2067-2072, 1991.
- [Kah88] M. Kahn, D. P. Burks, I. Burn, and W. A. Schulze, (1988) "Ceramic Capacitor Technology" Electronic Ceramics – Properties, Devices, and Applications, Marcel Dekker, New York pp. 224-235.
- [Kim86] E. Kim, M. Oh, and C. Kim, "Effects of annealing on the grain boundary potential barrier of ZnO varistor," Journal of Materials Science, vol. 21, pp. 3491-3496, 1986.
- [Mal92] X.P.V. Maldague, (1992) Nondestructive Evaluation of Materials by Infrared Thermography, Springer-Verlag, London, Berlin, Heidelberg, New York
- [Mal01a] X.P.V. Maldague, P.O. Moore, (2001) Nondestructive Testing Handbook, Third Edition, Volume 3, Infrared and Thermal Testing, American Society for Nondestructive Testing, Inc., Columbus (USA)
- [Mal01b] X.P.V. Maldague, (2001) Theory and Practice of Infrared Technology for Nondestructive Testing, John Wiley & Sons, Inc., New York (USA)
- [Mou03] A.J. Moulson, J.M. Herbert, (2003) Electroceramics Second Edition, John Wiley & Sons, Inc., New York [u.a.]

- [Ols85] E. Olsson, L. K. L. Falk, G. L. Dunlop, and R. Österlund, "The microstructure of a ZnO varistor material," *Journal of Materials Science*, vol. 20, pp. 4091-4098, 1985.
- [Osw05] B. Oswald-Tranta, (2005) *Infrarot Thermographie, Vorlesungs- unterlagen Wintersemester 2004/05*
- [Ott01] J. Ott, A. Lorenz, M. Harrer, E. A. Preissner, C. Hesse, A. Feltz, A. H. Whitehead, and M. Schreiber, "The Influence of Bi₂O₃ and Sb₂O₃ on the Electrical Properties of ZnO-Based Varistors," *Journal of Electroceramics*, vol. 6, pp. 135-146, 2001.
- [Rod99] R. P. Rodrigues, J.-H. Hwang, and V. P. Dravid, "4-Probe Micropatterning and Electrical Measurements Across Individual Grain Boundaries in Electroceramics," *Journal of Electroceramics*, vol. 3, pp. 245-254, 1999.
- [Sie02] R. Siegel, J.R: Howell, (2002) *Thermal Radiation Heat Transfer*, 4th Edition, Taylor & Francis, New York, London
- [Sup07] P. Supancic, Z. Wang, J. Kreith, R. Danzer (2007) Ber-39a-2007, *Materialeigenschaften von Multi-Layer-Varistorkeramik (bulk)*
- [Tan99] S. Tanaka and K. Takahashi, "Direct measurements of voltage-Current characteristics of single grain boundary of ZnO varistors," *Journal of the European Ceramic Society*, vol. 19, pp. 727-730, 1999.
- [Wak91] N. Wakiya, H. Sumino, K. Shinozaki, and N. Mizutani, "I-V Characteristics of Single Grain Boundary in ZnO Varistor," *Journal of the Ceramic Society of Japan, Int. Edition*, vol. 99, pp. 772-776, 1991 1991.
- [Wan98] H. Wang, M. Bartkowiak, F. A. Modine, R. B. Dinwiddie, L. A. Boatner, and G. D. Mahan, "Nonuniform Heating in Zinc Oxide Varistors Studied by Infrared Imaging and Computer Simulation," *Journal of the American Ceramic Society*, vol. 81, pp. 2013-2022, 1998.
- [Wan07] M.-h. Wang, K.-a. Hu, B.-y. Zhao, and N.-f. Zhang, "Degradation phenomena due to humidity in low voltage ZnO varistors," *Ceramics International*, vol. 33, pp. 151-154, 2007.
- [Yen94] A.-J. Yen, Y.-S. Lee, and T.-Y. Tsen, "Electrical Properties of Multilayer-Chip ZnO Varistors in a Moist-Air Environment," *Journal of the American Ceramic Society*, vol. 77, pp. 3006-3011, 1994.
- [Zho03] D. Zhou, C. Zhang, and S. Gong, "Degradation phenomena due to dc bias in low-voltage ZnO varistors," *Materials Science and Engineering B*, vol. 99, pp. 412-415, 2003.