

# Auswahl geeigneter Sicherheitselemente aus LTCC für eine vertrauenswürdige Elektronik

*Dr. rer. nat. Annett Schroeter<sup>1</sup>, Dr.-Ing. Uwe Krieger<sup>1</sup>, Dr.-Ing. Gunter Hagen<sup>2</sup>, Dr.-Ing. Christoph Lehnberger<sup>3</sup>, Dr.-Ing. Peter Uhlig<sup>4</sup>, Dr.-Ing. Hartmut Stoltenberg<sup>5</sup>, Dipl.-Ing. Adrian Goldberg<sup>6</sup>*

<sup>1</sup>VIA electronic GmbH, Robert-Friese-Straße 3, 07629 Hermsdorf, Germany

<sup>2</sup>KMS Technology Center GmbH, Gostritzer Straße 61-63, 01217 Dresden, Germany

<sup>3</sup>ANDUS ELECTRONIC GmbH LEITERPLATTENTECHNIK, Görlitzer Str. 52, 10997 Berlin, Germany

<sup>4</sup>IMST GmbH, Hybridtechnologie, Carl-Friedrich-Gauss-Str. 2, 47475 Kamp-Lintfort, Germany

<sup>5</sup>PRIGNITZ Mikrosystemtechnik GmbH, Margarethenstraße 61, 19322 Wittenberge / Elbe, Germany

<sup>6</sup>Fraunhofer-Institut für Keramische Technologien und Systeme - IKTS, Winterbergstraße 28, 01277 Dresden, Germany

## Zusammenfassung

Im Rahmen des Projektes VE-CeraTrust haben die Projektpartner gemeinsam mit der VIA electronic GmbH (VIA) verschiedene Sicherheitselemente für elektronische Bauteile entworfen, und diese sowohl in Mehrlagen-Keramik (Low Temperature Cofired Ceramics - LTCC) als auch in klassischen Leiterplatten (printed circuit boards - PCB) aufgebaut und getestet. So entstand ein Katalog verschiedener Sicherheitselemente, die einzeln oder in Kombination, die Vertrauenswürdigkeit der jeweiligen Elektronik erhöhen, zum Beispiel durch Verhinderung oder Erschweren des Reverse Engineering. VIA prägte zur Identifikation, als nicht-nachahmbare Fingerprints (PUF, physical unclonable function) u. a. Data Matrix Codes (DMC) in LTCC-Tapes mit verschiedenen Stempeln (minimaler Durchmesser von 50 µm). Zum Manipulationsschutz dienten darüber hinaus verschiedene Elemente, wie z. B. Kavitäten in LTCC zur Abschirmung akustischer Wellen. Zudem wurden Elemente, wie Widerstände oder Heizer auf LTCC-Basis, in PCB integriert, um die Vorteile verschiedener Materialsysteme zu nutzen, das Auslesen von Daten zu erschweren, und damit insgesamt das Sicherheitslevel zu erhöhen. Die vorliegende Veröffentlichung zeigt den aktuellen Stand einiger dieser Sicherheitselemente, welche modular als Elektronik-Bausteine dienen.

**Keywords:** Sicherheitselemente, LTCC, Identifikation, Fingerprint, Manipulationsschutz, Tamper-Sensorik

## VE-CeraTrust – Sicherheitselemente mit LTCC

Die Themen rückverfolgbare Produktions- und Lieferketten sowie Sicherheit gewinnen in der Elektronik zunehmend an Relevanz. Gleichzeitig kommen immer mehr und immer komplexere Elektronik-Anwendungen in verschiedenen Lebensbereichen zum Einsatz (z. B. in Automotive oder bei Smart Devices), Digitalisierung und Konnektivität haben in den letzten Jahren rasant zugenommen [1, 2]. Mehr denn je sind Manipulation und Fälschung in der Elektronik eine Gefahr, wodurch der Bedarf an zuverlässigen Elementen steigt [3, 4]. Bereits die Hardware bzw. insbesondere die Auswahl geeigneter Materialien ist von entscheidender Bedeutung für sichere elektronische Anwendungen. Daher hatte das Projekt VE-CeraTrust das Ziel durch

Integration verschiedener Sicherheitsfunktionen (zur Identifikation und zum Manipulationsschutz) in Mehrlagenschaltungen u. a. aus LTCC und PCB die Sicherheit elektronischer Anwendungen zu erhöhen.

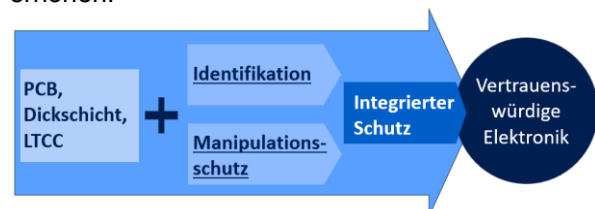


Abb. 1: Konzept des Projektes VE-CeraTrust für vertrauenswürdige Elektronik

Während klassische Leiterplatten (PCB) auf dem Markt besonders aufgrund ihrer ökonomischen Eigenschaften (u. a.

kostengünstige Herstellung) geschätzt werden, kommt LTCC – ein keramisches Material, das ebenfalls auf dem Elektronikmarkt bereits etabliert ist (z. B. in Multi-Chip-Modulen) – aufgrund seiner besonderen technischen Eigenschaften zum Einsatz, z. B. in rauen Umgebungen (Temperaturstabilität bis 300°C oder Resistenz gegenüber aggressiven Medien, siehe Tabelle 1) [5, 6, 7]. Zudem besitzt LTCC eine längere Lebensdauer als die meisten anderen organischen Materialien, wie z. B. FR4. Darüber hinaus ist LTCC für seine hervorragenden HF-Eigenschaften bekannt [5]. Die Idee war, die Vor- und Nachteile verschiedener Materialsysteme zu verbinden sowie Sicherheitselemente zu entwickeln, und damit den Schutz und die Sicherheit elektronischer Anwendungen zu erhöhen.

Tab. 1: Eigenschaften von PCB (FR4) und LTCC [7]

Technische Eigenschaften	PCB	LTCC
Lebensdauer	-	+
Isolationswiderstand	-	+
Hochtemperaturbeständigkeit	-	+
Korrosionsbeständigkeit	-	+
Wärmeleitfähigkeit	-	+
Elektrische Leitfähigkeit	+	+/-
Integrationsdichte	+/-	+/-
Integration von passiven Komponenten	-	+
Ökonomische Eigenschaften	PCB	LTCC
Kosten pro Anbindung	++	+/-
Kosten für Entwicklung und Werkzeugbau	+++	+
Zeit bis zur Markteinführung	++	+
Infrastruktur der Lieferanten	++	-
Infrastruktur der Maschinen	++	-

Die Herstellung von LTCC-Mehrschichtsystemen bei VIA beginnt mit sogenannten „grünen Tapes“, in die Löcher für Durchkontaktierungen, d. h. Vias, Kavitäten oder Hohlräume gestanzt werden. Auf den Stanzprozess folgt in der Regel der Siebdruck, bei dem die Durchgangslöcher, sogenannte „Vias“ gefüllt und Leiterbahnen aufgedruckt werden. Nach dem Druck werden die Tapes gestapelt und laminiert, um die Multilagen aufzubauen. Außerdem können vor dem Sintern Hohlräume oder Kanten geätzt werden. Das Sintern der Tapes, die neben Aluminiumoxid aus Glaspulver und organischen Bindemitteln und Weichmachern bestehen, erfolgt bei ca. 850°C bis 900°C Spitzentemperatur [8]. Im sogenannten Post-Firing-Verfahren können zusätzliche Deck-

schichten (z. B. für Widerstände) mittels Siebdruck erzeugt und eingebrannt werden. Anschließend werden die Substrate optisch inspiziert, elektrisch getestet und die Module vereinzelt.

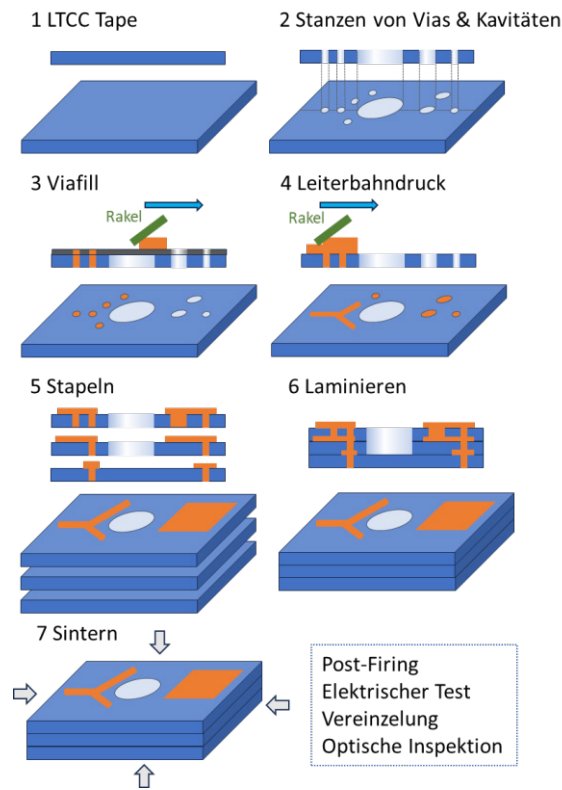


Abb. 2: Schematische Darstellung der LTCC-Prozessschritte

**Prägen von DMC in LTCC zur Identifikation**

Bereits beim ersten Schritt der LTCC-Prozessierung, dem Stanzen, können mit der Stanzvorrichtung mit nur geringem Mehraufwand Markierungen wie DMC oder QR-Codes in das Keramik-Tape eingepreßt werden, ein Verfahren, das innerhalb dieses Projekts etabliert, eingesetzt und analysiert wurde [9].

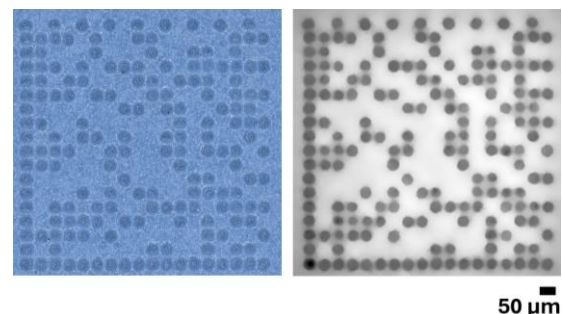


Abb. 3: Geprägter und gesinterter DMC in Micromax™ 951™(Celanese) – Draufsicht links, Höhendarstellung monochromatisch rechts (schwarz – tiefster, weiß – höchster Punkt)

VIA gelang es innerhalb des Projektes DMC in LTCC-Tapes mit minimalen Stempeldurchmessern von ca. 50  $\mu\text{m}$  zu prägen und zu prozessieren. In Abbildung 3 sind exemplarisch ein solches gesintertes Keramiksubstrat und das zugehörige Höhenprofil des DMC, mit einer Kantenlänge von 0,78 mm dargestellt. Die Codes der so prozessierten, gesinterten Substrate konnten mit einem industriellen Reader (von Keyence) zu 100 % ausgelesen werden. Auf diese Weise wird eine Markierung und spätere Rückverfolgbarkeit von Substraten oder sogar einzelner Module ermöglicht. Abbildung 4 zeigt exemplarisch die erste Tapelage eines RFID-Moduls (Radio Frequency Identification) im Grünzustand mit vier kreisförmig angeordneten Stanzungen für die Vias in den Ecken und einem geprägten DMC in der Mitte des Moduls. Die ideale Prägetiefe im Grünzustand lag bei 20  $\mu\text{m}$  bis maximal 50  $\mu\text{m}$ . Bei deutlich höheren Prägetiefen als 50  $\mu\text{m}$  bestand die Gefahr, dass sich das Tape zu stark verformt und Tapematerial in benachbarte Einzelprägungen gedrückt würde. Dadurch könnten die Codes schließlich schlechter oder nicht mehr lesbar sein sowie das Tape zerstört werden.

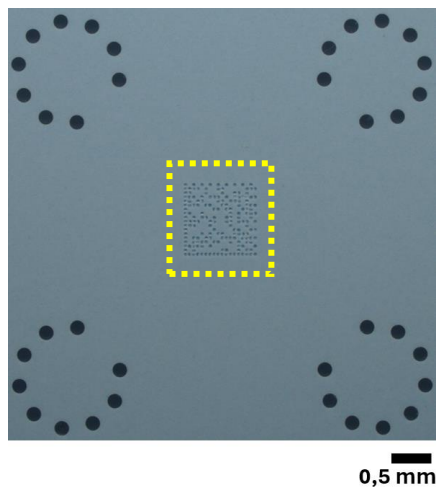


Abb. 4: RFID-Modul Draufsicht auf ungesinterte Toplage mit geprägtem DMC in der Mitte des Bildes

Neben dem eigentlichen Code dient die Prägereihenfolge als zusätzliches Sicherheitsmerkmal. Denn je nach Reihenfolge der einzelnen Prägung wird das LTCC-Material in unterschiedliche Richtungen verdrängt, wodurch neben kreisförmigen auch halbkreis- und viertelförmige Einzelprägungen entstehen (gelbe Hervorhebung in Abbildung 5B).

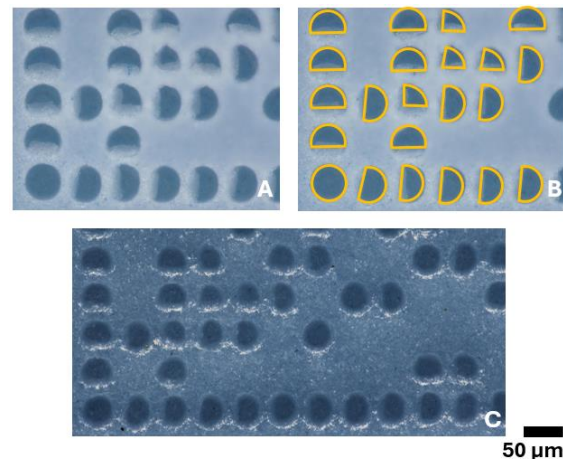


Abb. 5: Ausschnitt aus DMC im Grünzustand (A, B) und gesintert (C)

Eine randomisierte Prägereihenfolge führt so zu einem spezifischen Muster, das nur schwer nachzuahmen ist. In Kombination mit weiteren Merkmalen des DMC, wie z. B. durch das Prägen mit einer angeschrägten Stempelspitze, lässt sich der Code weiter individualisieren. Einzelne markierte Module können auf diese Weise mit einem Fingerabdruck versehen werden, welcher beispielsweise mittels automatischer optischer Inspektion (AOI) ausgelesen und zugeordnet werden kann.

Zudem wurden Substrate hergestellt bei dem der DMC nach dem Prägen mit metallischer Paste, wie sie für Leiterbahnen in der LTCC-Prozessierung üblich sind (Abbildung 6A), überdruckt und anschließend gesintert wurden.

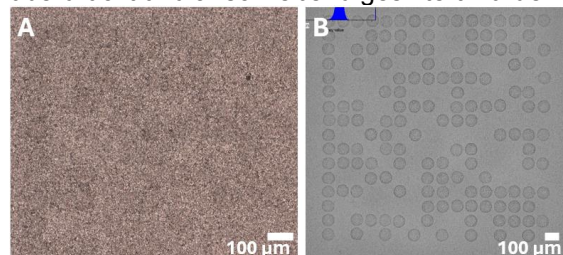


Abb. 6: DMC (Stempel:  $\varnothing$  100  $\mu\text{m}$ ), nach dem Prägen überdruckt mit konventioneller LTCC-Silberpaste unter dem Lichtmikroskop (A) und Röntgenmikroskopie-Aufnahme (B) [9]

Bei höheren Schichtdicken als den geprägten Strukturen des DMC, war die Struktur des DMC mit einfacher optischer Mikroskopie nicht mehr aufzulösen. Unter Röntgenmikroskopie ist der Code allerdings gut zu erkennen und kann ausgelesen werden (Abbildung 6B). Damit können auf diese Weise DMC als versteckte Sicherheitsmerkmale in LTCC gezielt platziert werden.

### Manipulationsschutz mit LTCC

Als Schutz vor diagnostischem Ultraschall wurden Kavitäten in LTCC erzeugt, bis hin zu minimalen Durchmessern  $< 80 \mu\text{m}$  im gesinterten Zustand (siehe Abbildung 7A). Darunterliegende metallische Strukturen, z. B. Leiterbahnen, wurden bei bestimmten Dimensionen der Kavitäten erfolgreich vor den akustischen Wellen abgeschirmt, sodass bei verschiedenen Fokussierungen des Ultraschalls lediglich die Kavitäten erkennbar sind, jedoch nicht die darunter liegenden Strukturen (Abb. 2B, C). Zudem wurden zur Abschirmung elektromagnetischer Wellen Designs entworfen, welche im nächsten Schritt parallel in LTCC, HTCC und PCB aufgebaut werden.

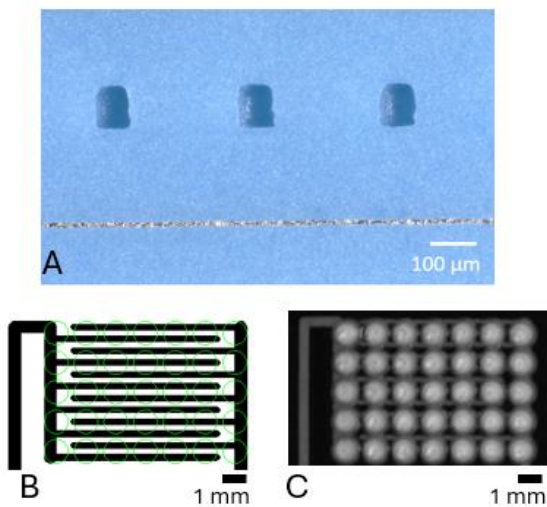


Abb. 7: Geschliffenes, gesintertes Substrat mit Kavitäten über der Leiterbahnstruktur (A), Illustration Draufsicht mit Kavitäten (grün) über Leiterbahnstruktur (schwarz, B), Ultraschallmikroskopie des gesinterten Substrates (C)

### Kombination von LTCC und herkömmlichen Leiterplatten aus FR4

Die Kombination von FR4-Leiterplatten mit anderen Materialien wie z. B. LTCC ist in der Vergangenheit für verschiedene Anwendungen bereits durchgeführt worden. So wurden z.B. diskrete Bauteile und blanke Chips integriert, um die Bauteildichte zu erhöhen. Elektrooptische Leiterplatten wurden durch Integration von Wellenleitern hergestellt [10]. Die Einbettung von Kupferleitungen und Fluidikkanälen wurde entwickelt, um das Wärmemanagement zu verbessern. LTCC-Komponenten mit einer Vielzahl von Sensor- und Aktuatorfunktionen wurden in Leiterplatten

integriert, um die Robustheit gegenüber Manipulationen an der Elektronik zu erhöhen.

Für die Integration von LTCC in Leiterplatten gibt es dabei im Wesentlichen zwei Einbettungsverfahren (siehe Abbildung 8). Die erste Methode (A) ähnelt dem Einbettungsprozess für diskrete Bauteile. Das Bauteil wird als Flip-Chip im SMD-Reflow-Verfahren auf eine Innenlage gelötet, anschließend mehrlagig laminiert und die Leiterplatte fertiggestellt.

Die zweite Methode (B) entstammt der Chip-on-Board-Technologie. Das LTCC-Modul wird vor der Mehrlagenlaminiierung auf die Innenlage aufgebracht. Der elektrische Kontakt zum LTCC wird durch Verkupferung der mittels Laser gebohrten Blind-Vias hergestellt.

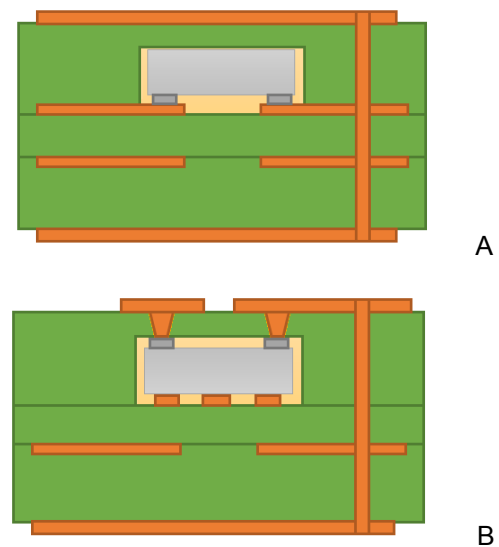


Abb. 8: Keramik in PCB (FR4) – Gelötet auf Innenlagen (A) oder kontaktiert durch lasergebohrte und verkupferte Löcher (B)

Um die Qualität und die Vorteile von LTCC zu gewährleisten, müssen die verwendeten Werkstoffkombinationen gut durchdacht und kompatibel sein. Die Migration oder Diffusion von Metallen, insbesondere während des Sinterns, die zu einer zusätzlichen Drift von Bauelementen führen kann, ist nur eine der Herausforderungen. Die für HF- oder Mikrowellenanwendungen verwendeten Materialien (z. B. Widerstandspaste) reagieren empfindlich auf Änderungen der Prozessparameter im Vergleich zu Standard-LTCC-Tapes oder Leiterpasten [11]. Daher wurden in einem ersten Versuch LTCC-Testwiderstandsmodule (von IMST, siehe Abbildung 9) vor und nach der Integration in

die Leiterplatte (bei ANDUS) analysiert, um die Langzeitstabilität zu untersuchen.

Dazu wurden LTCC-Tapes aus Micromax™ GreenTape™ 9K7 verwendet, mit der Widerstandspaste HFB22 mit  $200\Omega/\square$  bedruckt und Substrate mit Widerständen auf Toplage (A) sowie mit vergrabenen Widerständen (B) hergestellt [11].

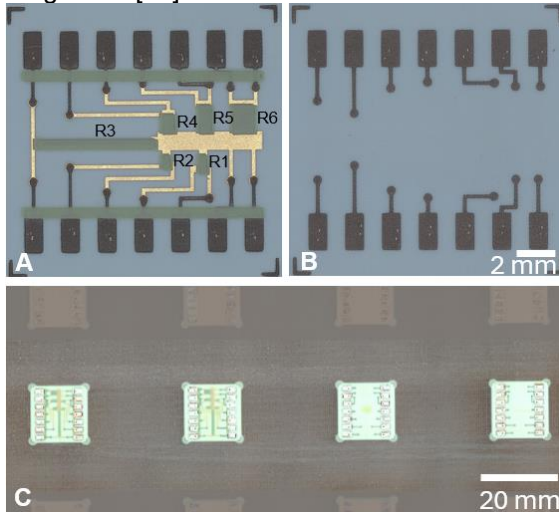


Abb. 9: Gesinterte LTCC-Substrate mit Widerständen auf Toplage (A) und vergrabenen (B), beide anschließend integriert in FR4 (C)

Die Abmessungen sowie die Seitenverhältnisse (Länge zu Breite) für die Widerstände R1 bis R6 sind in Tabelle 2 angegeben.

Tab. 2: Maße der LTCC-Widerstände

Widerstands-Aspektverhältnis	R1	R2	R3	R4	R5	R6
Länge [ $\mu\text{m}$ ]	500	250	6000	500	1000	1000
Breite [ $\mu\text{m}$ ]	250	250	300	500	500	1000
Länge / Breite	2	1	20	1	2	1

In Abbildung 10 sind die Widerstandswerte vor und nach dem Einbau in die Leiterplatte dargestellt. Es zeigte sich, dass sich die Widerstandswerte durch die Integration in FR4 nicht signifikant änderten, d. h. die Werte innerhalb der ermittelten einfachen Standardabweichung lagen. Dies zeigt die gute Voraussetzung der Integration von LTCC in FR4.

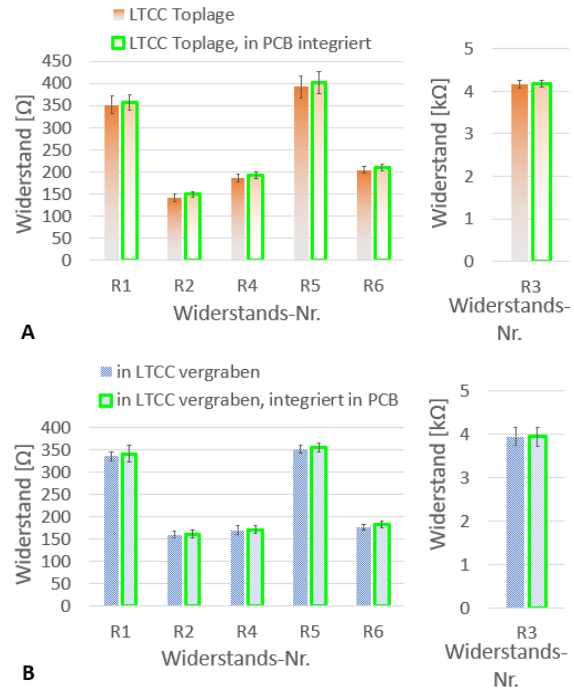


Abb. 10: Vergleich der LTCC-Widerstände von R1-R6 (jeweils  $n = 4$ , Toplage A, vergrabene B) vor und nach der Integration in FR4 (nach der Integration: Balken in hellgrüner Umrandung)

Aktuell laufen Zuverlässigkeitstests von in FR4 integrierten LTCC-Elementen, um deren Langzeitstabilität zu prüfen. Im Falle eines gemischten Metallsystems oder sogar einer Mischung verschiedener Materialsysteme könnte der Einfluss von Temperaturänderungen oder höherer Luftfeuchtigkeit größere Auswirkungen auf die Zuverlässigkeit des Systems haben. Beispielsweise ist die Wärmebeständigkeit von LTCC besser und der Wärmeausdehnungskoeffizient von LTCC niedriger im Vergleich zu gewöhnlichem Leiterplattenmaterial wie FR4 [9, 6]. Darüber hinaus ist LTCC feuchtigkeitsbeständiger als PCB [12]. Die Tatsache, dass Leiterplatten Feuchtigkeit absorbieren, kann nicht nur in der Schiffs- oder Automobilelektronik, sondern auch in jeder anderen Umgebung mit wechselnder Luftfeuchtigkeit eine Herausforderung darstellen. Neben den Auswirkungen der Kombination von LTCC und PCB muss auch die Migration der verwendeten Metalle berücksichtigt werden: Beispielsweise sind Silber oder Kupfer als Metalle bekannt, bei denen es zu Ionenmigration kommt [8].

### Integration von LTCC-Sicherheitselementen in PCB

LTCC-Komponenten, wie Heizelemente, wurden in Leiterplatten integriert, um elektronische Geräte vor Manipulation zu

schützen. Die Idee ist, dass sobald ein Angriff oder eine Störung auf eine zu schützende Struktur erkannt wird, die aktivierte Heizung den Halbleiter ( $\Delta T > 250 \text{ K}$ ) und die Leiterplatte thermisch beeinflusst oder zerstört (siehe Abbildung 11).

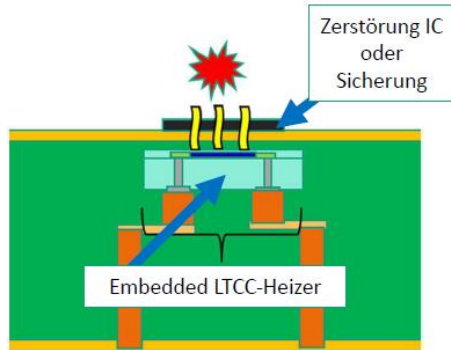


Abb. 11: Illustration eines Heizelementes integriert in PCB, Seitenansicht

Zunächst wurde dazu das Konzept eines mäanderförmigen Temperatursensors modifiziert und aktiv als Heizelement ausgelegt (IKTS Dresden). Der Heizwiderstand wurde auf die Heizleistung und Versorgungsspannung ausgelegt, um ihn anschließend in der Nähe oder unter dem zu schützenden IC zu platzieren. Ein Beispiel für eine Einbettung eines LTCC-Heizers in PCB wird in Abbildung 12 gezeigt.

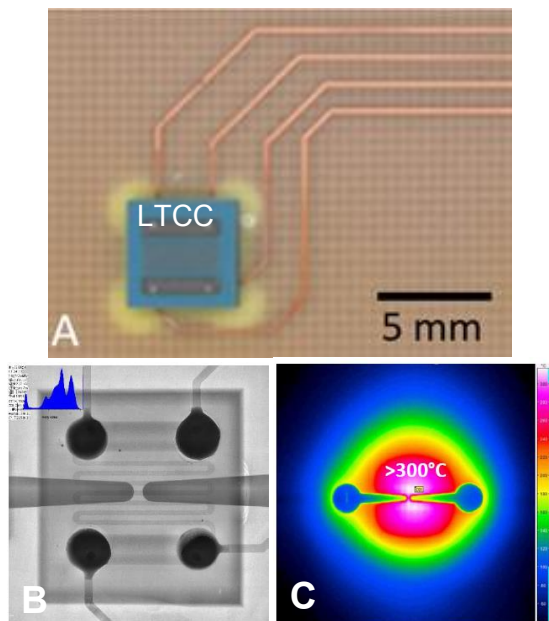


Abb. 12: Draufsicht auf Heizelement integriert in PCB (A), zugehörige Röntgenmikroskopie- (B) und Thermografie-Aufnahme (C)

Bei einer elektrischen Leistung von 4 Watt wurde die Höchsttemperatur des keramischen

Heizelements von bis zu  $650 \text{ }^\circ\text{C}$ , an Luft gemessen, erreicht. Nach der Integration der Heizer aus LTCC wurden so Temperaturen auf der Oberfläche der PCB von mehr als  $300 \text{ }^\circ\text{C}$  erzielt.

Neben Heizern wurden u. a. auch Drucksensoren in FR4 integriert und untersucht (Abbildung 13).

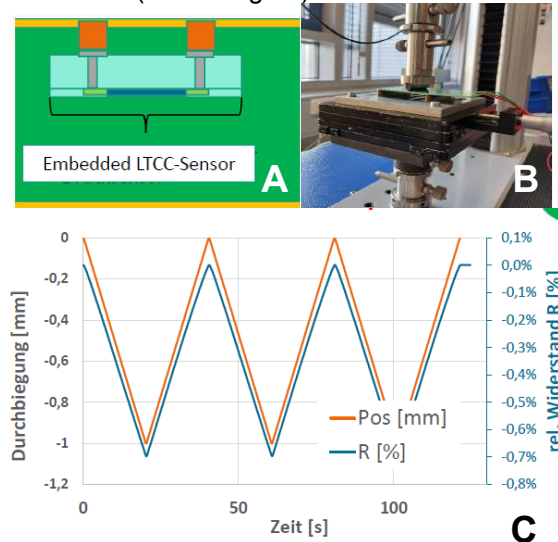
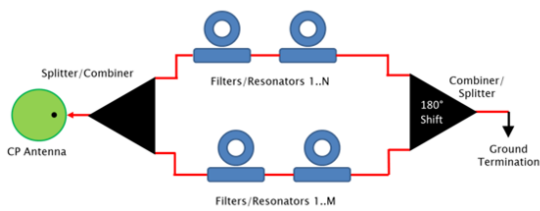


Abb. 13: Drucksensor integriert in FR4 – illustrierte Seitenansicht (A), Setup zur Gauge-Messung in FR4 (B), Zeit- und Verformungsabhängige Vermessung (C)

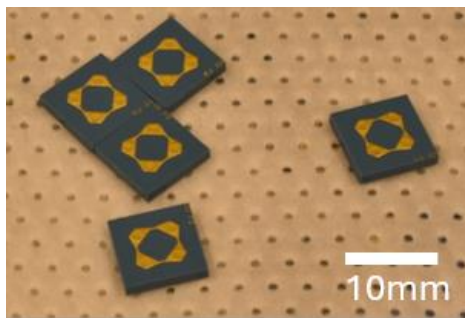
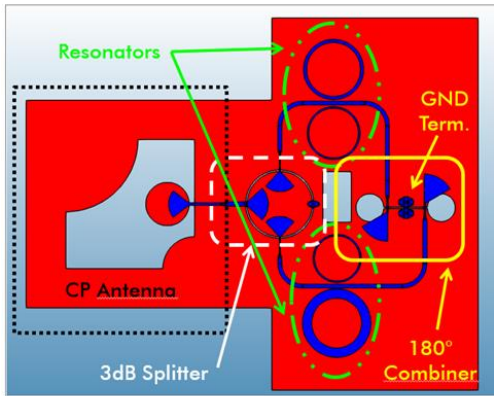
Die in FR4 eingebetteten Drucksensoren zeigten in der verformungsabhängigen Vermessung für verschiedene Durchbiegungen reversible Widerstandsänderungen. Somit lassen sich LTCC-Drucksensoren in FR4 als Tamper-Sensorik nutzen.

### RFID-Tag aus LTCC

Als weiteres LTCC-Sicherheitselement wurde ein „Chipless RFID-Tag“ in LTCC realisiert, der ein empfangenes HF-Signal (Abfrage) charakteristisch verändert und wieder abstrahlt (Antwort) (Abbildung 14) [13]. Dabei werden anders als bei den üblichen RFID-Tags keine Halbleiterbauteile eingesetzt. Das bietet neben der Einsparung der Chips den Vorteil, dass der Schaltungsträger sehr früh in der Prozesskette gekennzeichnet wird und alle weiteren thermischen und chemischen Prozessschritte übersteht. So können vom Schaltungsdesign unabhängige Sicherheitsmerkmale auf Substrat, Baugruppe und Geräteebene in PCB, Dickschicht und LTCC realisiert werden.



A



C

Abb. 14: Schematische Darstellung des Konzeptes (A) und des Designs eines RFID-Tags (B), RFID-Tags in LTCC-Technologie gefertigt

### Weitere Sicherheitselemente

Neben den hier vorgestellten Sicherheitselementen aus LTCC wurden im Rahmen des Projektes weitere Sicherheitselemente u. a. durch den Projektpartner ANDUS in FR4 (PCB) realisiert. In Abbildung 15 ist ein versteckter Polymerleiterzug (in Hellgrün) illustriert. Eine solche „C-ID“ lässt sich kostengünstig in die Leiterplatte als versteckte Struktur integrieren.



Abb. 15: Schematische Darstellung eines Multilagen-Aufbaus mit Polymer-Leiterzug, kurz „C-ID“ (in Hellgrün)

Mit verschiedenen „einfachen“ Methoden war die „C-ID“ nicht zu erkennen. So konnte diese weder in der optischen Mikroskopie noch in der Profilometrie (3) oder im 2D-Röntgen registriert werden. Erst im 3D-Röntgen wurde die Struktur erkannt, siehe Abbildung 16.

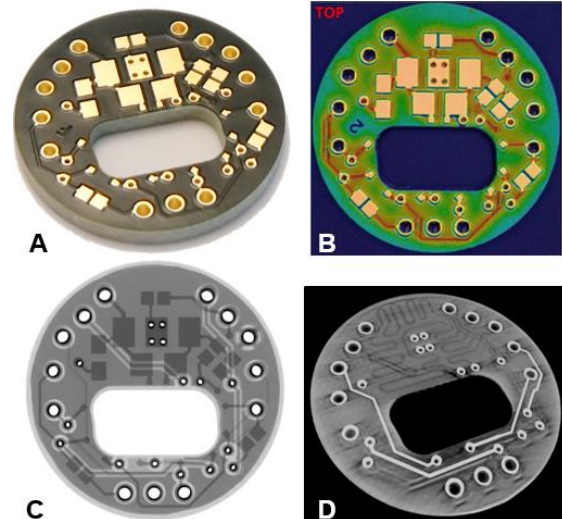


Abb. 16: Analyse eines PCB-Boards (Durchmesser ca. 20 mm) mit versteckter C-ID – optische Inspektion (A), Profilometrie (B), 2D-Röntgen (C), 3D-Röntgen (D)

### Ausblick

Keramische Multilagenschaltungen (LTCC), die in Leiterplatten integriert werden, eröffnen der Mikroelektronik und Leiterplattentechnik neue Möglichkeiten, die sonst nur durch SMD-Bestückung oder andere Verpackungstechniken möglich sind. Vorab getestete und kalibrierte Sensormodule („bekannte gute Module“) in LTCC [14,15] können in größere Leiterplattensysteme integriert werden. Verlustarme LTCC-Materialsysteme sind besonders nützlich für HF- und Mikrowellenmodule. Aufgrund der Permittivität typischer LTCC-Dielektrika [14-16] und der Möglichkeit der dreidimensionalen Integration sind sehr kompakte Mikrowellenmodule wie Filter [16], Dämpfungsglieder und

Leistungsteiler [17] möglich. Für die Mikrowellenmodule gilt das Gleiche wie für die Sensormodule: Das einzelne Bauteil kann getestet und abgestimmt werden, bevor es in das Leiterplattensystem integriert wird. Dies ist ein entscheidender Vorteil für die Prozessierung und den Aufbau des Gesamtsystems.

### Zusammenfassung

Neue Sicherheitsfunktionen auf Basis keramischer Multilagenschaltungen (LTCC) bzw. die folgenden Sicherheitselemente wurden entwickelt, in klassische Leiterplatten integriert und in diesem Beitrag vorgestellt:

- Geprägte DMC in LTCC zur Identifikation
- Kavitäten in LTCC zur Abschirmung akustischer Wellen
- LTCC-Heizelement als aktiver Tamper-Schutz
- LTCC-Drucksensor als Tamper-Sensor
- RFID-Tag aus LTCC zur Identifikation
- Versteckter Polymerleiterzug in PCB zur Identifikation („C-ID“)

Mit einer geeigneten Kombination dieser neu entwickelten Sicherheitsfunktionen können elektronische Anwendungen zukünftig sicherer gestaltet werden, sodass Produktionsketten besser rückverfolgt, Angriffe besser und schneller erkannt sowie Daten geschützt werden können als ein Beitrag zu einer vertrauenswürdigen Elektronik.

### Danksagung

Die vorgestellte Arbeit wurde vom Bundesministerium für Bildung und Forschung im Rahmen des Projekts VE-CeraTrust / 16ME0330K finanziell gefördert. Die Autoren danken allen Kooperationspartnern.



[www.VE-CeraTrust.de](http://www.VE-CeraTrust.de)

### Literaturnachweis

- [1] Key business figures of the German electro and digital sector, *ZVEI* (2024), <https://www.zvei.org/en/press-media/publications/key-business-figures-of-the-german-electro-and-digital-industry>
- [2] Global Automotive Cybersecurity Report, *Upstream Security Ltd* (2024), <https://upstream.auto/reports/global-automotive-cybersecurity-report/>
- [3] VDMA press release, 01.06.2022, VDMA: Measures against product piracy in mechanical engineering pay off, [https://www.thenewsmarket.com/news/vdma--measures-against-product-piracy-in-](https://www.thenewsmarket.com/news/vdma--measures-against-product-piracy-in-mechanical-engineering-pay-off/s/c4f490e9-c2df-4403-8494-e011b9482550)
- [4] M. Yasin, J. Rajendran, O. Sinanoglu; M. Ismail, & M. Sawan: Trustworthy Hardware Design: Combinational Logic Locking Techniques, Cham: *Springer International Publishing* (2019)
- [5] [https://www.ikts.fraunhofer.de/de/abteilungen/el/elektronik\\_mikrosystem\\_biomedizintechnik/hybrid\\_e\\_mikrosysteme/mikrosysteme\\_ltcc\\_htcc.html](https://www.ikts.fraunhofer.de/de/abteilungen/el/elektronik_mikrosystem_biomedizintechnik/hybrid_e_mikrosysteme/mikrosysteme_ltcc_htcc.html), letzter Zugriff: 25.03.2024
- [6] M. T. Sebastian and H. Jantunen, "Low loss dielectric materials for LTCC applications: a review", *International Materials Reviews* 53(2): 57–90 (2008), doi:10.1179/174328008X277524
- [7] F. Bechtold, Anwendung von LTCC für Sensoren und Mikrosysteme, VIA electronic GmbH, Hermsdorf, *Forschungs- und Technologieforum des FTVT*, Ilmenau (2009), Vortrag
- [8] Y. Imanaka: Multilayered Low Temperature Cofired Ceramics (LTCC) Technology, *Springer* (2004)
- [9] U. Krieger et al., "LTCC-based Ceramic Substrates for Identification of Trustworthy Electronics" *EMPC 2023*, Vortrag
- [10] U. Grünhaupt, H.-J. Gevatter. Elektronische Komponenten. In: Bender, B., Göhlich, D. (eds) *Dubbel Taschenbuch für den Maschinenbau 2: Anwendungen*. Springer Vieweg, Berlin, Heidelberg (2020), [https://doi.org/10.1007/978-3-662-59713-2\\_29](https://doi.org/10.1007/978-3-662-59713-2_29)
- [11] P. Uhlig et al., "LTCC Resistors – The Influence of Production Conditions on the Absolute Value and its Reproducibility," *IMAPS Nordic Conference on Microelectronics Packaging (NordPac)*, Oulu, Finnland, pp. 61–66 (2018). doi: 10.23919/NORDPAC.2018.8423847.
- [12] T. Rovensky, "Influence of Accelerating Ageing on LTCC and PCB Substrates' Dielectric Properties in GHz Area," 39th *International Spring Seminar on Electronics Technology* (ISSE, 2016)
- [13] S. Preradovic and N. Karmakar, "Chipless RFID: Bar Code of the Future," *IEEE Microwave Magazine*, vol. 11, no. 7, pp. 87–97, Dec. 2010, doi: 10.1109/mmm.2010.938571.
- [14] D. Belavic et al., "Design of a Capacitive LTCC-based Pressure Sensor," in 2009 *15th International Symposium for Design and Technology of Electronics Packages* (SIITME), 2009-09. doi: 10.1109/siitme.2009.5407406.
- [15] L. J. Golonka, "Technology and applications of Low Temperature Cofired Ceramic (LTCC) based sensors and microsystems," *Bull. Polish Acad. Sci.*, vol. 54, no. 2, pp. 221–231 (2006).
- [16] P. Uhlig, J. Kassner, C. Günner, E. Noack: Micro-wave Filter Design Optimized for Ceramic Multilayer Technique, *Proc. Int. Conf. Exhib. Ceram. Interconnect Ceram. Microsyst. Technol.*, CICMT 2016
- [17] T. Klein, P. Uhlig, C. Günner, and R. Kulke, "Sub-strate-integrated divider networks in LTCC with optimized tolerance / isolation properties for Ka-Band satellite systems," in *Proc. Intl. Symp. Microel.* 47th, 2014. doi: 10.4071/isom-THP22.