

# Schlussbericht

---

zu IGF-Vorhaben Nr. 18683 N/1

## Thema

KMU-taugliche Methoden zur Absicherung der Produktoriginalität elektronischer Baugruppen anhand intrinsischer Merkmale

## Berichtszeitraum

01.10.2016 - 30.06.2019

## Forschungsvereinigung

Forschungsvereinigung Elektrotechnik beim ZVEI e.V.

## Forschungseinrichtung(en)

[1] Albert-Ludwigs-Universität Freiburg  
Institut für Mikrosystemtechnik  
Professur für Aufbau- und Verbindungstechnik  
Georges-Köhler-Alle 103 79110 Freiburg

Freiburg, 06.12.2019

---

Ort, Datum



Prof. Dr.-Ing. Jürgen Wilde

---

Name und Unterschrift aller Projektleiterinnen und Projektleiter der  
Forschungseinrichtung(en)

Gefördert durch:



Bundesministerium  
für Wirtschaft  
und Energie

aufgrund eines Beschlusses  
des Deutschen Bundestages

# KMU-taugliche Methoden zur Absicherung der Produktoriginalität elektronischer Baugruppen anhand intrinsischer Hardware-Merkmale (ETRACE)

Schlussbericht zu IGF-Vorhaben 18683 N: ETRACE

## Inhaltsverzeichnis

|       |  |    |
|-------|--|----|
| 1     | Zusammenfassung .....  | 1  |
| 2     | Danksagung .....   | 2  |
| 3     | Erläuterung zur Verwendung der Zuwendung.....                        | 3  |
| 4     | Sitzungen des Projektbegleitenden Ausschusses.....                   | 3  |
| 5     | Wissenschaftlich-technische und wirtschaftliche Problemstellung..... | 4  |
| 5.1   | Anlass für das Forschungsvorhaben.....                               | 4  |
| 5.2   | Stand von Technik und Wissenschaft .....                             | 5  |
| 5.2.1 | Künstliche Intelligenz .....   | 5  |
| 5.2.2 | Spektroskopie.....   | 5  |
| 5.2.3 | Optische Technologien .....  | 5  |
| 5.2.4 | SAE-Norm AS6171 „Counterfeit Test Evaluation“.....                   | 6  |
| 5.2.5 | Definitionen.....  | 6  |
| 6     | Ziele des Forschungsvorhabens .....                                  | 7  |
| 6.1   | Wissenschaftlich-technische Ziele .....                              | 8  |
| 6.2   | Wirtschaftliche Ziele.....   | 9  |
| 7     | Systematik der Untersuchungen .....                                  | 11 |
| 7.1   | Spezifikation zu untersuchender Produkte.....                        | 11 |
| 7.1.1 | Testobjekte, AVT-Prozesse und Merkmale.....                          | 11 |
| 7.1.2 | Funktionsmuster und Klassifizierung von Produkten.....               | 12 |
| 7.2   | Merkmale und Auslesemethoden.....                                    | 14 |
| 7.2.1 | Relevante Prozesse der AVT.....                                      | 14 |
| 7.2.2 | Verfahren zum Erfassen fälschungsrelevanter Merkmale .....           | 15 |
| 7.2.3 | Fälschungsrelevante Merkmale .....                                   | 18 |
| 8     | Untersuchungen zur Authentifizierung .....                           | 22 |
| 8.1   | Ziele .....  | 22 |
| 8.2   | Spektroskopische Methoden an Polymeren.....                          | 22 |
| 8.2.1 | Proben und Probenverpackung.....                                     | 22 |
| 8.2.2 | Farbmessungen.....   | 23 |
| 8.2.3 | Spektrometer im UV und sichtbaren Bereich (UV/vis) .....             | 25 |
| 8.2.4 | FTIR (Fourier-transformierte Infrarotspektroskopie) .....            | 25 |
| 8.2.5 | Reflexionsspektrometer (Reflektanz) .....                            | 28 |
| 8.2.6 | Raman-Spektrometer .....   | 30 |
| 8.2.7 | Magnetresonanz-Relaxometrie (NMR) an Sensorgehäusen .....            | 31 |

|        |   |    |
|--------|---|----|
| 8.2.8  | EDX-Spektrometer .....  | 32 |
| 8.3    | Thermoanalysen: TGA und DTA .....   | 33 |
| 8.4    | Mechanische Größen .....  | 35 |
| 8.4.1  | Masse.....  | 35 |
| 8.4.2  | Geometrische Größen .....   | 37 |
| 8.5    | Innere Merkmale (Röntgenanalyse).....   | 38 |
| 8.5.1  | Qualitative Bewertung.....  | 38 |
| 8.5.2  | Identifikation von Bauelementen durch Deep-Learning-Ansätze .....               | 39 |
| 9      | Identifikation mit digitalen Fingerabdrücken .....                              | 43 |
| 9.1    | Ziele .....   | 43 |
| 9.1.1  | Bauteilversatz auf SMD-Platinen .....   | 43 |
| 9.1.2  | Geometrie von Lotkugeln auf Ball-Grid-Array-Bauelementen.....                   | 46 |
| 9.2    | Oberflächenstrukturen von Gerätegehäusen .....                                  | 49 |
| 9.3    | Poren in Lötstellen .....   | 51 |
| 10     | Leitfaden zur Nutzung von Authentifizierungs- und Identifikationsverfahren..... | 53 |
| 10.1   | Bewertung der Authentifizierungsverfahren .....                                 | 53 |
| 10.2   | Einführung einer Authentifizierung .....  | 55 |
| 10.3   | Bewertung der Identifikationsverfahren.....                                     | 58 |
| 11     | Einschätzung der Forschungsergebnisse .....                                     | 60 |
| 11.1   | Erreichung der wiss.-technischen Ziele.....                                     | 60 |
| 11.2   | Erreichung der wirtschaftlichen Ziele .....                                     | 61 |
| 11.3   | Ergebnistransfer in die Wirtschaft .....  | 62 |
| 11.3.1 | Ergebnistransfer während der Projektlaufzeit.....                               | 62 |
| 11.3.2 | Geplanter Ergebnistransfer nach Abschluss des Vorhabens .....                   | 63 |
| 12     | Anhang: Statistische Methoden .....   | 64 |
| 12.1   | Wahrscheinlichkeit der Gleichheit zweier Merkmale .....                         | 64 |
| 12.2   | Boolesche Verknüpfungen mehrerer Messungen .....                                | 65 |
| 12.3   | Test auf Verteilungsfunktion .....  | 66 |
| 12.4   | Binominalverteilung und Poissonverteilung.....                                  | 67 |
| 12.5   | Gütebewertung der Fehlererkennung .....   | 68 |
| 13     | Literaturverzeichnis.....   | 69 |



# 1 Zusammenfassung

Ziel des Projekts ETRACE war es, KMU-taugliche Identifikations- und Authentifizierungsverfahren für Elektronikprodukte zu entwickeln und zu verifizieren. Das Konzept nutzt intrinsische, nicht beeinflussbare Merkmale an Elementen der elektronischen Aufbau- und Verbindungstechnik (AVT). Dabei wurden Bauteile mit den Integrationsstufen Bauelement, Baugruppe und Kleingerät einbezogen. Derartige Teile werden häufig im Rahmen einer Lieferkette von Firmen erworben und in höher integrierte Systeme oder Anlagen verbaut. Hohe Systemkompetenz des Herstellers, eine bekannte Marke und ein hoher Warenwert erhöhen das Fälschungsrisiko signifikant.

Das Konzept des Vorhabens sieht vor, dass beim Originalhersteller bestimmte physikalische oder chemische Merkmale erfasst und zu einem digitalen Fingerabdruck kombiniert werden. Dieser wird als Referenz in einer Datenbank hinterlegt. Während der Authentifizierung beim Kunden werden die Merkmale erneut abgeprüft und zu einem digitalen Verifikationsabdruck verarbeitet. Ist in der Referenzdatenbank ein gut übereinstimmender Datensatz vorhanden, so handelt es sich um ein Originalprodukt. Andernfalls muss von einer Fälschung ausgegangen werden. Zielgrößen der Umsetzung sind ein geringer Prüfaufwand, Automatisierbarkeit, schnelle und wirtschaftliche 100 %-Prüfung sowie die sichere Erkennung der relevanten Fälschungsmethoden. Hieraus ergab sich der Forschungsbedarf, geeignete Merkmale zu identifizieren und geeignete Prüf- und Analyseverfahren Aufnahme zu qualifizieren. Dabei sollten die Verfahren merkmalsbezogen qualitativ und quantitativ bewertet werden.

Am Beispiel der gemeinsam mit dem PA definierten Prüfobjekte wurden die entsprechenden Untersuchungen durchgeführt. Dabei konnten die Untersuchungen zum Teil an originalen und gefälschten Bauteilen vergleichend durchgeführt werden, ansonsten erfolgte die Untersuchung an Originalteilen. Die Bauteile wurden durch topologische, gravimetrische und optische Verfahren geprüft. Dabei kamen diverse Varianten der Mikroskopie bis hin zur Röntgendurchstrahlung sowie die Bildverarbeitung zum Einsatz. Im Hinblick auf die chemische Zusammensetzung wurden insbesondere spektroskopische Verfahren von UV-Spektroskopie über sichtbares Licht bis hin zur FTIR getestet. Aus den gewonnenen Informationen wurde ein Konzept zur Erstellung eindeutiger digitaler Fingerabdrücke aus den Daten, auf Basis von Algorithmen, erarbeitet. Dabei war die Wahrscheinlichkeit, mit der es sich um eine Fälschung bzw. um ein Original handelt, die wichtigste Zielgröße.

Im Ergebnis hat das Vorhaben zu einem Portfolio an Merkmalen und validierten Verifikationstechniken geführt, die eine chargenbezogene oder die individuelle Authentifizierung von produzierten Einheiten und Losen ermöglichen. Dies wurde an Produktbeispielen aus dem Projektbegleitenden Ausschuss demonstriert. Die Ergebnisse wurden in einem Leitfaden für KMU zusammengefasst: Dieser stellt das Gesamtkonzept mit den Aspekten Implementierung, Prüftechniken, Digitalisierung, notwendige Infrastruktur und unterstützende mathematische Methoden zur Authentifizierung sowie zur Identitätsprüfung dar.

**Die Ziele des Vorhabens wurden erreicht.**

## 2 Danksagung

Das IGF-Vorhaben der Forschungsvereinigung Elektrotechnik des ZVEI wurde über die AiF im Rahmen des Programms zur Förderung der industriellen Gemeinschaftsförderung und -entwicklung (IGF) vom Bundesministerium für Wirtschaft und Energie aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages gefördert. Die Forschungseinrichtung, das Institut für Mikrosystemtechnik (IMTEK AVT) der Albert-Ludwigs-Universität Freiburg, möchte für diese Förderung und Unterstützung an dieser Stelle ausdrücklich danken.

Die Forschungseinrichtung dankt weiterhin den Mitgliedern des projektbegleitenden Ausschusses für die Unterstützung bei der Bearbeitung des Forschungsvorhabens durch die fruchtbaren Diskussionen und kritischen Anmerkungen bei der Planung des Projektes, in den Sitzungen des projektbegleitenden Ausschusses und bei den Arbeitstreffen in den Unternehmen und in der Forschungsstelle. Besonderer Dank gilt den Unternehmen für Materiallieferungen, Herstellung von Versuchsproben und -bauteile und die Ausführung der Arbeiten zur Charakterisierung gefälschter und originaler Bauteile.

Die Mitglieder des projektbegleitenden Ausschusses waren (in alphabetischer Reihenfolge):

| <b>Firma</b>               | <b>Ansprechperson</b>            |
|----------------------------|----------------------------------|
| Binder Elektronik GmbH     | Dipl.-Ing. Christian Rückert     |
| Eltroplan GmbH             | Dipl.-Ing. Frank Burmeister      |
| Endress+Hauser GmbH&Co.KG  | Dipl.-Ing. Michael Feucht        |
| Hopp Elektronik GmbH&Co.KG | Stefan Ohlig                     |
| Merkur Elektronik GmbH     | Dipl.-Ing. Helmut Gerstner       |
| Neurocheck GmbH            | Dipl.-Ing. Sebastian Lichtenberg |
| Sick AG GmbH               | Dipl.-Phys. Thomas Blümcke       |
| Fraunhofer IPM             | Dipl.-Phys. Andreas Hofmann      |

### 3 Erläuterung zur Verwendung der Zuwendung

Im Folgenden sind die geleisteten Personenmonate (Einzelansatz A.1, Wissenschaftliche Mitarbeiter, HPA-Stufe A) dargestellt.

| Jahr   | IMTEK AVT |
|--------|-----------|
| 2017   | 10,5 PM   |
| 2018   | 12,0 PM   |
| 2019   | 6,0 PM    |
| Gesamt | 28,5 PM   |

Im Rahmen des Projektes wurde an der Forschungseinrichtung eine Versuchsanlage aufgebaut. Diese besteht nach einem Änderungsantrag aus einer Flächenkamera (hochauflösende Digitalkamera NCCG-124C) zur Aufnahme von Oberflächenbildern und metallographischen Schliffen. Leistungen Dritter (Einzelansatz C) wurden nicht geltend gemacht.

Die geleistete Arbeit entspricht in vollem Umfang dem begutachteten und bewilligten Antrag und war damit notwendig und angemessen.

Es wurden keine gewerblichen Schutzrechte erworben oder angemeldet.

### 4 Sitzungen des Projektbegleitenden Ausschusses

Folgende Sitzungen des Projektbegleitenden Ausschusses (PA) haben stattgefunden:

| PA-Treffen | Datum      | Ort / Gastgeber      | Anzahl der Teilnehmer |
|------------|------------|----------------------|-----------------------|
| 1          | 07.03.2017 | Universität Freiburg | 7 PA-Mitglieder       |
| 2          | 11.12.2017 | Waldkirch, SICK AG   | 6 PA-Mitglieder       |
| 3          | 12.06.2018 | Endingen, Eltroplan  | 4 PA-Mitglieder       |
| 4          | 23.01.2019 | Universität Freiburg | 5 PA-Mitglieder       |
| 5          | 05.06.2019 | Universität Freiburg | 4 PA-Mitglieder       |



## 5 Wissenschaftlich-technische und wirtschaftliche Problemstellung

### 5.1 Anlass für das Forschungsvorhaben

Fälschungen können jede Integrationsstufe von Elektronik betreffen, vom ungehäuteten Chip, über umhüllte Integrierte Schaltkreise bis zum endgültigen Produkt (Abb. 1 und Abb. 2).

Vom Zentralverband Elektrotechnik- und Elektronikindustrie e.V. (ZVEI) wurden bereits im November 2011 Handlungsempfehlungen zur Risikoreduzierung durch gefälschte Bauteile herausgegeben [1]. Durch den VDE und die IEC wurde hierzu 2013 ein Strategiepapier [2] veröffentlicht, nach dem Produktfälschung und -piraterie auf über 650 Mrd. US \$/Jahr geschätzt wurde. Die nachgemachten Produkte entsprechen in der Regel nicht den vorgegebenen Standards und können daher erhebliche Sicherheitsrisiken darstellen.



Abbildung 1: Öffentliche Zerstörung gefälschter PC-Komponenten in München [3].

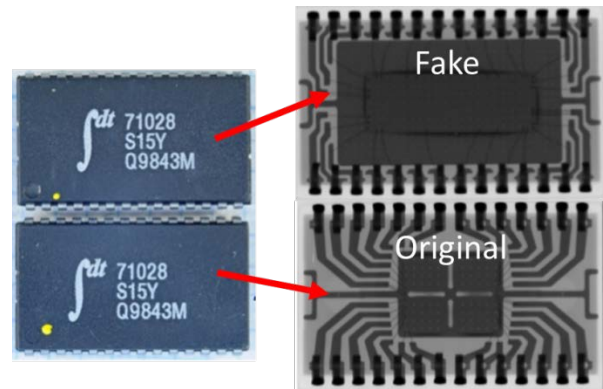


Abbildung 2: Vergleich von originalem und gefälschtem Elektronikbauteil [4] in Übersicht und Röntgenbild.

Als strategische technische Gegenmaßnahmen werden insbesondere die Punkte „Aufbau einer Anti-Fälschungs-Strategie“ und „die Anwendung verdeckter und offener Technologien zum Schutz vor Fälschung“ genannt. Das beantragte Forschungsvorhaben sollte die Grundlagen schaffen, damit auch KMU entsprechende Schutztechnologien einführen können. Es sollte zu neuen Authentifizierungsverfahren führen, die eine sichere und möglichst automatisierte Unterscheidung zwischen gefälschten und originalen Elektronikprodukten ermöglichen.

Heute übliche Authentifizierungsverfahren beruhen oft auf Marken, die zusätzlich an das Produkt angebracht werden. Zu diesen sog. extrinsischen Merkmalen gehören Hologramme oder zufällige Seriennummern, welche einen Aufwand bei der Produktfälschung bedeuten und daher tendenziell den Profit für Fälscher vermindern und das Entdeckungsrisiko erhöhen. Um Produktpiraterie besser zu verhindern, werden Authentifizierungsverfahren benötigt, die nicht täuschbar sind, und deren Authentifizierungsprinzip auf nicht fälschbaren Merkmalen am Produkt basiert.

## 5.2 Stand von Technik und Wissenschaft

Angesichts der dargestellten Situation sollte eine Strategie gegen Produktpiraterie idealerweise aus Einzelstrategien zur Vermeidung, Verhinderung, Erkennung und der rechtlichen Verfolgung von Produktpiraterie bestehen [5]. Zur Verwirklichung entwickelten sich am Markt bereits vielfältige technische Lösungsmöglichkeiten, von denen nur einige an dieser Stelle vorgestellt werden sollen.

### 5.2.1 Künstliche Intelligenz

Bei der Verwendung von künstlicher Intelligenz zur Detektion von Fälschungen handelt es sich im Wesentlichen um eine Klassifizierung in die Kategorien „Original“ und „nicht Original“. Das Startup DataWeave (Seattle, USA) hat ein Deep-Learning-Netzwerk auf Basis von Millionen frei zugänglicher Informationen trainiert und ist unter anderem in der Lage anhand von Produktabbildungen plagierte Bekleidung, Möbel etc. aufzuspüren, die auf fremden Webseiten zum Verkauf angeboten werden [6].

Entrupy, ein Startup-Unternehmen aus New York, hat sich auf die Authentifikation von Luxusartikeln, beispielsweise Leder-Handtaschen, mittels speziell trainierten Deep-Learning-Netzen spezialisiert. Mit Hilfe einer Smartphone-App und einer mikroskopischen Aufnahme kann das zugehörige Deep-Learning-Netzwerk mit einer Zuverlässigkeit von ca. 98% zwischen Originalen und Plagiaten unterscheiden [7].

### 5.2.2 Spektroskopie

Ein Miniatur-Infrarotspektrometer Stratio-LinkSquare (San Jose, USA) kann mit Hilfe einer zugehörigen Smartphone-Applikation Medikamente darauf hin überprüfen, ob sie den entsprechenden Wirkstoff enthalten. Hierbei handelt es sich laut Herstellerangaben um Spektroskopie diffus reflektierten Lichts im Wellenlängenbereich von 400 bis 1000 nm, bei einer Auflösung von 10 nm, die in Kombination mit einer Spektraldatenbank wie Bio-Rad die Messsignale auf die Anteile des entsprechenden Wirkstoffs hin untersucht. Der Funktionsumfang der Spektrometer lässt sich mit Machine-Learning-Algorithmen erweitern [8].

### 5.2.3 Optische Technologien

Covisus (Monrovia, USA) stellt mit Vtag eine Smartphone-Lösung bereit, die mit sogenannten „virtuellen Tags“ einzelne Produkte identifizieren kann. Mit einem Smartphone und einer spezifischen Optik wird eine Aufnahme einer Referenzfläche getätigt. Auf Basis der einzigartigen Oberflächenstruktur und -rauheit eines Produktes wird eine individuelle, digitale Signatur erstellt und in einer Datenbank abgespeichert. Der zugrundeliegende Algorithmus sei robust und verspreche eine Wiedererkennung des einzelnen Produktes selbst unter widrigsten Bedingungen, wie bspw. nach Alterung, physikalischen Beschädigungen der Oberfläche, Staub und anderen Umwelteinflüssen [9].

Eine hierzu ähnliche Lösung existiert am Fraunhofer Institut für Physikalische Messtechnik (Freiburg im Breisgau). Das sogenannte „Track and Trace“-System ist hierbei für die Rückverfolgung von einzelnen Produktbestandteilen innerhalb einer Produktionsstätte vorgesehen. Mithilfe einer hochaufgelösten Kameraaufnahme einer Oberfläche, beispielsweise von Schrauben, können individuelle Signaturen erstellt werden, die selbst bei verkratzten Oberflächen sicher aus der Datenbank extrahiert werden können [10].

### 5.2.4 SAE-Norm AS6171 „Counterfeit Test Evaluation“

Von der “Society of Automotive Engineers” wurde die Norm SAE 6171 „Counterfeit Test Evaluation Method“ als Sammlung standardisierter Analysemethoden, zur Durchführung bei Fälschungsverdacht vorgeschlagen [11]. Hiermit wurde ein Online-Tool auf Basis bisher gesammelter Daten, z.B. Häufigkeiten, implementiert. Bisher normierte Standardmethoden umfassen:

|   |   |
|---|---|
| 1. External Visual Inspection (EVI)             | 2. X-Ray Fluorescence (XRF)                       |
| 3. Delid/Decapsulation Physical Analysis (DDPA) | 4. Radiological Inspection (RI) (Röntgen)         |
| 5. Acoustic Microscopy (AM)                     | 6. Electrical Test                                |
| 7. Raman Spectroscopy                           | 8. Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FTIR) |
| 9. Thermogravimetric Analysis (TGA)             | 10. Design Recovery (DR)                          |

Weitere in Methoden befinden sich in Bearbeitung, z.B. Computertomographie (CT).

### 5.2.5 Definitionen

**Merkmale:** Gemäß Definition sind Merkmale messtechnisch erfassbare Produkteigenschaften. Im Folgenden betrachten wir nur intrinsische Merkmale. Solche Charakteristika liegen ohne weiteres Zutun produktionsbedingt an einem Produkt vor. Sie sind somit im Gegensatz zu extrinsischen Merkmalen, die zusätzlich angebracht werden, unmittelbarer Bestandteil des Produkts.

Ein **direktes Merkmal** ist eine

- kontrollierbare Prozessgröße.
- Der tatsächliche Wert streut jedoch innerhalb eines Toleranzbereichs.
- Die Verteilungsform ist prozessabhängig.

Ein **indirektes Merkmal** ist ein

- unkontrolliertes Prozessartefakt eines Herstellprozesses.
- Es hat daher einen hohen Zufallscharakter.
- Somit kann es zur Erstellung von Fingerprints verwendet werden.

**Authentifizierung und Identifikation** sind die beiden grundsätzlichen Fragestellungen im Zusammenhang mit Fälschungserkennung.

**Identifikation** klärt die Frage ob es sich bei einem bestimmten Individuum um ein eindeutig bekanntes Individuum handelt.

**Authentifizierung** hat zur Aufgabe, die Zugehörigkeit eines Bauteils oder einer Stichprobe zu einer Grundmenge zu prüfen. Letztere kann beispielsweise durch einen Hersteller, eine Fertigungslinie, eine Serie oder sogar eine bestimmte Maschine gebildet werden.

## 6 Ziele des Forschungsvorhabens

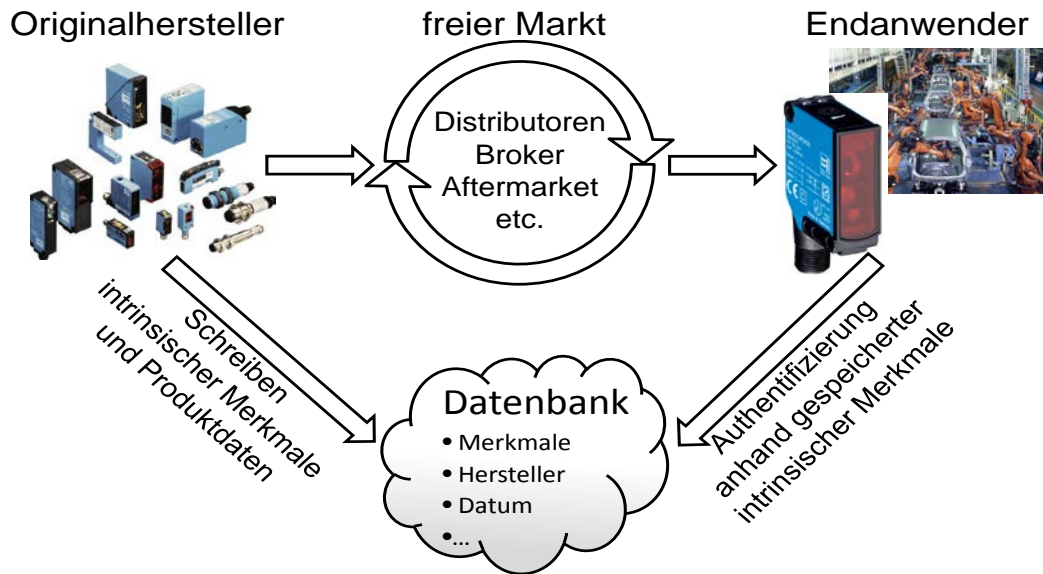


Abbildung 3: Konzept für die Verwendung intrinsischer Merkmale zu Identifikation und Authentifizierung elektronischer Produkte.

Ziel des Vorhabens ETRACE ist die Darstellung und Validierung einer Methode zur Absicherung einer Zulieferkette auf Basis intrinsischer Merkmale an elektronischen Bauteilen.

Wir gehen von der Hypothese aus, dass beim Stand der Technik eine sichere Identifikation oder Authentifizierung anhand intrinsischer Merkmale durchgeführt werden kann. Eine Strategie unter Verwendung intrinsischer Merkmale beruht darauf, dass die Merkmale durch eine autorisierte Stelle, z.B. den Originalhersteller, erfasst und in Form eines digitalen Fingerabdrucks in einer Datenbank gespeichert werden (Abb.3). Während der Identifikation oder Authentifizierung beim Kunden werden die Merkmale erneut prüftechnisch erfasst. Die Originalität des Produkts soll durch Vergleich mit dem gespeicherten Datensatz unabhängig von den Stufen des Zwischenhandels verifiziert werden.

Die Fähigkeit von derartigen Verfahren ist stark von den genutzten intrinsischen Merkmalen abhängig. Unter wissenschaftlichen, technischen und wirtschaftlichen Aspekten, wurden für geeignete Merkmale die folgenden Eigenschaften benannt:

- Wissenschaftlich relevant ist die Validierung, dass Merkmale praktisch nicht fälschbar und die Authentifizierungsverfahren nicht täuschbar sind. Außerdem muss der Korrelationsabstand zwischen den digitalen Fingerabdrücken oder Merkmalen ausreichend hoch sein, um die Eindeutigkeit der Zuordnung zu gewährleisten.
- Technisch ist die Zugänglichkeit der Merkmale durch eine geeignete Prüftechnik sehr wichtig. Merkmale müssen mit limitiertem Aufwand erfasst werden können, und die Prüftechnologie sollte in einen Wareneingang integrierbar sein. Auch die Kompatibilität spielt eine große Rolle.
- Unter wirtschaftlichen Aspekten sind geringe Investitionskosten, eine schnelle automatisierte Lesetechnik sowie die Möglichkeit zur Identifikation individueller Bauteile und die 100%-Authentifizierung von Losen bedeutsam.

Gegenwärtig bekannte intrinsische Merkmale wie die Physical Unclonable Funktionen (PUF) Integrierter Schaltungen (IC) erfüllen ihren Zweck sehr gut. Prozessschwankungen werden genutzt, um für jeden Chip einen eindeutigen digitalen Fingerabdruck zu erstellen [12]. Leider sind diese effektiven Verfahren mit hohen Kosten verbunden, da die Mess- und Prüfverfahren zeitlich und apparativ aufwändig sind, und weil teilweise zusätzliche chipintegrierte Teststrukturen angebracht werden müssen. Insgesamt ist Nutzbarkeit von PUFs für Elektronikprodukte eingeschränkt.

Somit wurde es erforderlich, zusätzliche intrinsische Merkmale mit dem Potential zur Verwendung in Identifikation und Authentifizierung bereitzustellen. Hier bietet sich die Aufbau- und Verbindungstechnik (AVT) mit ihren vielfältigen Verfahren an. Ihre Eigenschaften müssen auf die Anforderungen hin wissenschaftlich untersucht werden. Hierauf aufbauend sollten Authentifizierungs- und Identifikations-Techniken entwickelt werden, die auf etablierten messtechnischen und analytischen Methoden der AVT beruhen. Dies ist eine Voraussetzung, um wirtschaftlichen und logistischen Erfordernissen der KMU zu genügen.

## 6.1 Wissenschaftlich-technische Ziele

Im Rahmen von Vorarbeiten an der Forschungsstelle konnte eine bislang unberücksichtigte Klasse intrinsischer Merkmale identifiziert werden. Dies sind detektierbare Strukturen als Folge natürlicher Prozessschwankungen der Aufbau- und Verbindungstechnologien (AVT). Sie sind in ihrer konkreten Ausprägung zufällig, und können Bauteile bzw. Baugruppen eindeutig kennzeichnen. Derartige Merkmale lassen sich auf allen Integrationsstufen vom Bare-Chip bis zur Baugruppe finden. Wir gingen daher von der Hypothese aus, dass sich mit AVT-Merkmalen Identifikations- oder Authentifizierungs-Systeme aufbauen lassen. Beispiele dafür sind in Tab. 1 sind aufgeführt.

Bei Intrinsischen Merkmale werden *direkte Merkmale* und *indirekte* oder *mittelbare Merkmale* unterschieden, je nach ihrer Entstehung im Prozess:

- **Direkte Merkmale** entstehen aufgrund einer vorhersehbaren Maschinen- bzw. Prozessungenauigkeit als Teil des Prozessergebnisses. Direkte Merkmale sind als Prozessvarianzen häufig bekannt und gut dokumentiert. Ein Beispiel ist die Platziergenauigkeit von Bestückungsautomaten, die vorhersehbare Varianzen von Lage in X- und Y-Richtung sowie der Bauteilverdrehung umfasst.
- **Indirekte oder mittelbare Merkmale** entstehen weitgehend zufällig und sie sind nicht Bestandteil eines angestrebten Prozessergebnisses. Daher werden sie in der Regel auch nicht gesteuert, solange sie innerhalb bestimmter Grenzen liegen. Ein Beispiel sind Kantendefekte an Chips oder Poren in Lötstellen.

Ziel dieses Projektes war die Bewertung geeigneter Techniken zur Verwirklichung des Konzepts intrinsischer Merkmale und die Bereitstellung des Know-hows zur Produkt-Identifikation und Authentifizierung. Für die anzuwendenden Verfahren werden fünf wichtige Eigenschaften gefordert:

- Geringer Prüfaufwand (Logistik, Zeit, Kapital)
- Automatisierbarkeit
- Identifikation und Authentifizierung der fertig aufgebauten Baugruppe

- Schnelle und zerstörungsfreie 100%-Prüfung
- Sichere Erkennung der relevanten Fälschungsmerkmale

Aus den Anforderungspunkten kann eine Fokussierung zunächst auf äußere Gehäusemerkmale, die beispielsweise mittels Lichtmikroskopie zugänglich sind (Abb. 6), abgeleitet werden. Dies ermöglicht eine schnelle Registrierung und Authentifizierung der Baugruppen mit geringem apparativem Aufwand.

Wesentliche technisch-wissenschaftliche Projektergebnisse sind Informationen,

- welche Produktmerkmale bei bestimmten Produkten, bzw. auf Integrationsstufen geeignet sind,
- mit welcher Messtechnik diese zu erfassen sind,
- und welche Leistungsmerkmale die Verfahren aufweisen, insbesondere Erkennungssicherheit, Pseudofehlerquote, Prüfgeschwindigkeit bzw. Wirtschaftlichkeit.

Das Projekt sollte zu einer Übersicht der untersuchten Methoden führen, die es Unternehmen ermöglicht ein System zur Identifikation und Authentifizierung aufzubauen. In einem Handbuch werden Produkte nach Integrationstiefe gegliedert und gruppenweise werden passende Authentifizierungsmethoden benannt. So wird produktbezogen erkennbar, welche Optionen bestehen und welche Erkennungssicherheit zu erwarten ist.

## 6.2 Wirtschaftliche Ziele

Die Ergebnisse des Projekts sollen auch zur Erreichung wirtschaftlicher Ziele in KMU beitragen: In dem von VDE und die IEC 2013 veröffentlichten Strategiepapier „Produktpiraterie bei Elektronik und Elektronikprodukten“ wird Produktfälschung und -piraterie als weltweites Geschäft mit 650 Mrd. US-\$ pro Jahr geschätzt. Gefälschte Elektro- und Elektronikprodukte wie Leistungsschalter, Haushaltsgeräte und professionelle Arbeitsgeräte stehen demnach an zweiter Stelle hinter Pharmazeutika. Von großer Bedeutung in der deutschen Elektro- und Elektronikindustrie sind Produkte der Automatisierungstechnik, Messtechnik, Sensorik und Medizintechnik. Ihre technische und wirtschaftliche Relevanz wird im Zusammenhang mit Industrie 4.0 sicher weiter zunehmen; gleichermaßen gilt dies für die Anforderungen wie Zuverlässigkeit und Sicherheit.

Die deutsche Elektrobranche wies im Jahr 2018 rund 193,5 Milliarden Euro Umsatz auf. Dabei sind ca. 890.000 Inlandsbeschäftigte für die Branche tätig [13]. Ein nicht unbeträchtlicher Anteil der Produkte deutscher Firmen wird im Ausland, speziell in Asien, über Distributoren, Vertriebsbeauftragte und webbasierte Systeme wie Alibaba vertrieben. Dies gilt insbesondere für KMU, für die der Aufwand für Direktvertrieb unverhältnismäßig hoch wäre, oder welche noch den Marktzugang erlangen wollen. Weiterhin sind Produkte deutscher Hersteller in der Regel hochwertig, eher hochpreisig und die Marken besitzen ein sehr gutes Image. All dies erhöht die Wahrscheinlichkeit von Fälschungen signifikant.

Leider kann das Patentrecht außerhalb Deutschlands nur begrenzt als Schutzmechanismus für das geistige Eigentum wirken. Wir betrachten die Abwehr von Produktpiraten und Know-how-Dieben mit physikalisch basierten Ansätzen als wesentlich effizienter, um die Nutzung

von nachgebauten Komponenten oder Ersatzteilen zu erschweren oder zu unterbinden. Die hier vorgeschlagene Methode soll über intrinsische Merkmale eine sichere Unterscheidung zwischen illegal nachgebauten und originalen Elektronikprodukten ermöglichen, welche am Markt erworben wurden. Ein Ansatz kann sein, diese Unterscheidung kurz nach der Lieferung und vor der Bezahlung zu treffen. Dadurch sollen Herstellern, Kunden und der Branche insgesamt hohe Schäden durch verlorene Marktanteile und Imageverluste erspart werden.

Neben dem Verlust von Marktanteilen gewinnen Aspekte wie Produkthaftung und Regress zunehmend an Relevanz. Die Erwartungen an die Zuverlässigkeit elektronischer Produkte steigen in erheblichem Maße. Sicherheitsrelevant sind insbesondere Luft- und Raumfahrt, Medizintechnik, Automobile (Autonomes Fahren) und Automatisierungstechnik (Chemische Anlagen). Auch Empfängerfirmen können dabei eine Verantwortlichkeit für eine funktionierende Unterscheidung zwischen Plagiaten und Originalen bei zugekauften elektrotechnischen Bauteilen haben, insbesondere bei sicherheitsrelevanten Anwendungen besteht hier eine Sorgfaltspflicht.

Der hohe Nutzen des Vorhabens ist für KMU als Lieferanten und Abnehmer gleichermaßen zu sehen: Die Forschungsergebnisse versetzen sie in die Lage, eingehende Elektronik redundant zur Zulieferkette anhand intrinsischer Merkmale auf ihre Originalität hin zu überprüfen, oder für eigene Produkte eine von der Vermarktungskette unabhängige und fälschungssichere Authentifizierung anzubieten. KMU können so ihre Produkte auch über komplexe Marktstrukturen hinweg gegen Fälschung schützen. Mit der hier vorgeschlagenen technologiebasierten Authentifizierung sollen Schäden durch Fälschungen und ihre Folgekosten deutlich vermindert werden. Der Schaden für Systemlieferanten, die Plagiate verbauen, kann in Form von Imageschaden, Gewährleistungsansprüchen, oder Schadensersatz eintreten. Somit wird die Wettbewerbsfähigkeit der KMU wesentlich verbessert, wenn sie sich besser gegen den Zukauf von Fälschungen absichern.

## 7 Systematik der Untersuchungen

Die Ergebnisse des Vorhabens sind hier nicht exakt entsprechend der ursprünglichen Arbeitspaketstruktur gegliedert. Insbesondere eine Unterscheidung zwischen Authentifizierung und Identifikation von Produkten hatte sich als sinnvoll erwiesen.

### 7.1 Spezifikation zu untersuchender Produkte

#### 7.1.1 Testobjekte, AVT-Prozesse und Merkmale

Durch das Projekt soll eine Fälschungserkennung für ein möglichst breites Spektrum an Elektronikprodukten in verschiedenen Integrationsstufen entwickelt werden. Daher war es erforderlich, relevante Produkte zu bestimmen, und deren Gemeinsamkeiten zu identifizieren. Bereits kurz nach Projektbeginn sollten exemplarische Festlegungen gemeinsam mit dem PA getroffen werden.

In der vorliegenden Arbeit gehen wir von den etablierten Integrationsstufen 0 bis 3 der AVT aus, also Bare-Chips, Einzelbauelemente, Baugruppen und gehauste Endprodukte. Für diese wurden mit dem PA zusammen jeweils relevante Produktbeispiele identifiziert. In den Integrationsstufen sind jeweils typische Fertigungsprozesse etabliert. Die Klassifizierung von Produkten und die Identifizierung gruppenrelevanter Prozesse sind für die nachfolgende Suche nach Merkmalen wichtig. Auf Basis von vorangehenden Arbeiten an der Forschungsstelle konnte eine große Anzahl von vorhabenrelevanten intrinsischen Merkmalen identifiziert werden. In der folgenden Tab. 1 und den Abb. 4 bis 6 sind wesentliche Beispiele dazu aufgeführt.

Tabelle 1: Beispiele für Merkmale, die bei Prozessen der AVT entstehen.

| Intrinsisches Merkmal        | Entstehung                               | Detektion                 |
|------------------------------|--|---------------------------|
| Kantenschaden, Abb. 4        | Sägeprozesse                             | Optisch, Bildverarbeitung |
| Poren, Abb. 5                | Klebe-, Lötprozesse                      | Röntgendurchstrahlung     |
| Oberflächentopologie, Abb. 6 | Erstarrungsprozesse (Molden, Spritzguss) | Rauheitsmessung           |
| Geometrieversatz, z.B. SMD   | Bestückung, Montage                      | Vision-System (AOI)       |

Dabei handelt es sich um optisch oder bildbasiert detektierbare Strukturmerkmale als Folge von natürlichen Prozessschwankungen der AVT. Diese sind in ihrer konkreten Ausprägung zufällig und sie kennzeichnen jedes Bauteil oder jede Baugruppe eindeutig. Wie die Tab. 1 zeigt, lassen sich derartige Merkmale für verschiedene Integrationsstufen und Prozesse finden, vom Bare-Chip bis zur Baugruppe. Es war naheliegend, auf diesen Merkmalen ein geeignetes Authentifizierungssystem aufzubauen.



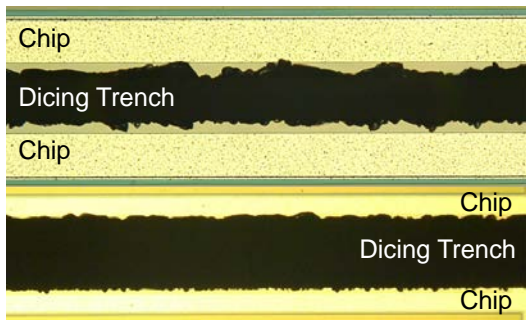


Abbildung 4: Zufällige Beschädigungen an Chipkanten nach der Vereinzelung mittels Sägen.

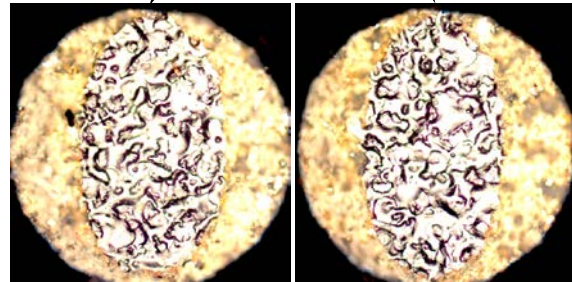
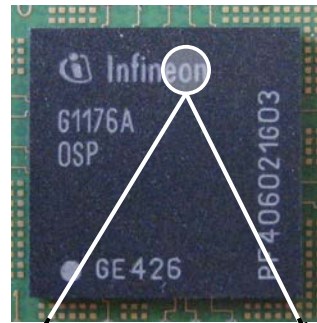


Abbildung 6: Zufällige Oberflächenstrukturen auf Moldmassen für höhere Integrationsstufen.

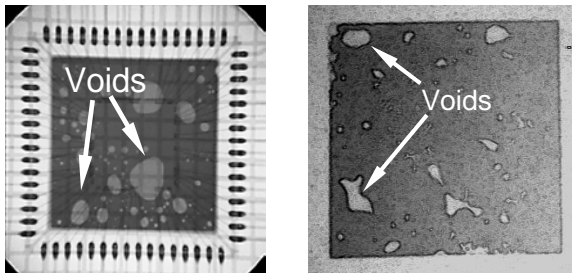


Abbildung 5: Poren in Lötstellen (l) und Klebstoffschichten (r) für gehauste Chips.

## 7.1.2 Funktionsmuster und Klassifizierung von Produkten

Die Vielfalt an Produkten macht eine Klassifizierung in Produktgruppen erforderlich. Da häufig Merkmale aus vorherigen Prozessen durch nachfolgende Integrationschritte unzugänglich werden, ist eine Einteilung nach der Integrationstiefe sinnvoll, Abb. 7. Die Klassifizierung nach Integrationsgrad stellt die Zugänglichkeit von Merkmalen zumindest in der Gruppe eines Produkts sicher.

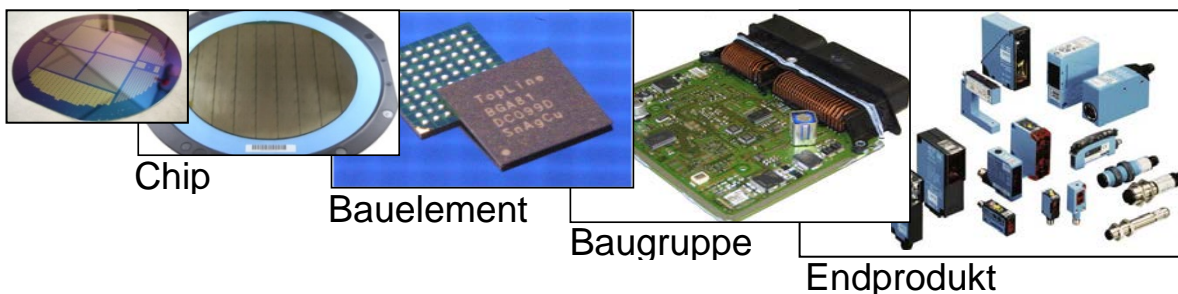


Abbildung 7: Einteilung in Produktklassen nach Integrationsebenen der elektronischen Aufbau- und Verbindungstechnik.

Die zu untersuchenden Produkte wurden entlang der Wertschöpfungskette entsprechend ihrer Integrationsstufen in vier Produktklassen unterteilt (Abb. 7). Zu jeder Produktklasse wurden anschließend Prozesse der Aufbau- und Verbindungstechnik identifiziert, die im Wesentlichen alle relevanten Produkte bzw. Produktgruppen einer Produktklasse durchlaufen (Tab. 2).

## Schlussbericht zu IGF-Vorhaben 18683 N: ETRACE

Tabelle 2: Einteilung in Produktklassen und zugehörige merkmalsrelevante Prozesse der Aufbau- und Verbindungstechnik.

| Integrations-ebene | Beschreibung                        | Prozesse  |
|--------------------|-------------------------------------|---|
| 0                  | Ungehauste Bare-Chips               | Dotierung, Beschichtung, Vereinzelnung          |
| 1                  | Bauelemente                         | Chipbonden, Kontaktierung, Verkapselung/Verguss |
| 2                  | Baugruppen, bestückte Leiterplatten | Lotaufbringung, Bestückung, Löten, Lackieren    |
| 3                  | Geräte, Endprodukte                 | Gehäusetechnik, Montage                         |







In bilateralem Kontakt mit den Mitgliedern des projektbegleitenden Ausschusses (PA) wurden geeignete Teile zur weiteren Untersuchung gesucht. Es wurden Produkte ausgewählt und bereitgestellt, welche die PA-Mitglieder selbst herstellen oder zukaufen. Weiterhin sollten sie als fälschungsgefährdet eingestuft oder bereits als Fälschung aufgefallen sein. Zusätzlich wurden weitere Produkte aus dem Handel bezogen (Tab. 3). Die Planung, vom Zoll sichergestellte Plagiate für Analysezwecke zu erhalten, war trotz guter Beziehungen nicht zu realisieren, da dem organisatorische und rechtliche Hindernisse entgegenstehen.

Tabelle 3: Ausgewählte und verfügbar gemachte Produkte zur Untersuchung von Merkmalen zur Überprüfung der Originalität und Identität.

| Integrations-stufe | Produkte Bauelementtyp          | Anzahl | Herkunft                   |
|--------------------|---------------------------------|--------|----------------------------|
| 0                  | Unverbaute Dioden<br>Bare chips | 50     | Diotec Semiconductor AG    |
| 1                  | A14G                            | 20     | Eltroplan Engineering GmbH |
|                    | A82C250                         | 20     | Eltroplan Engineering GmbH |
|                    | M430                            | 25     | Eltroplan Engineering GmbH |
| →                  |                                 | 7/25   | Eltroplan Engineering GmbH |
| →                  | LM317EMP                        | 10     | Eltroplan Engineering GmbH |
|                    | R76721067                       | 50     | Handel                     |
|                    | IPP120P04P4L                    | 50     | Handel                     |
|                    | IRLB3813PBF                     | 50     | Handel                     |
|                    | DC1031                          | 50     | IMTEK                      |
| 2                  | Sick 4067876                    | 50     | Sick AG                    |
| →                  | Sick 2074911                    | 50     | Sick AG                    |
|                    | PCI 1672E GigE                  | 1      | NeuroCheck GmbH            |
|                    | aTAB                            | 2      | Binder Elektronik GmbH     |
|                    | Raspberry Pi B                  | 2      | Handel                     |
|                    | Arduino Uno                     | 10/10  | Handel                     |
| 3                  | Sick IME12                      | 50     | Sick AG                    |
| →                  | Sick GL6                        | 50     | Sick AG                    |

Mit dem LM317EMP konnte bei einem PA-Mitglied ein Spannungsregler sichergestellt werden, der in der laufenden Fertigung durch eine wesentliche Abweichung von der Herstellerspezifikation aufgefallen ist. Unabhängige Untersuchungen hatten ergeben, dass die verwendeten Bauteile gefälscht waren. Die genannten Bauelemente bildeten die Grundmenge für weitere vertiefte Untersuchungen (Tab. 4).

Tabelle 4: Für vertiefte Untersuchungen ausgewählte Produkte.

| Integrationsstufe 1<br>Bauelemente  | Integrationsstufe 2<br>Baugruppe  | Integrationsstufe 3<br>Gerät   |
|---|---|--|
|  <p data-bbox="311 840 470 873">LM317 EMP</p>    |  <p data-bbox="742 873 901 907">Arduino Uno</p>      |  <p data-bbox="1157 862 1300 896">Sick IME12</p>  |
|  <p data-bbox="319 1176 462 1209">R76721067</p> |  <p data-bbox="742 1164 901 1198">Sick 4087678</p> |  <p data-bbox="1173 1198 1284 1232">Sick GL6</p> |

## 7.2 Merkmale und Auslesemethoden

### 7.2.1 Relevante Prozesse der AVT

In Abb. 8 sind die wesentlichen Prozesse und Verfahren dargestellt, die in der Aufbau- und Verbindungstechnik der Mikrosystemtechnik eingesetzt werden. Sie wurden systematisch in Untergruppen für die Substratherstellung, Strukturierung, Metallisierung, Verbindungsverfahren und Beschichtung gegliedert (Abb. 8).

Die Herstellung von mikrotechnischen Baugruppen in Leiterplattentechnologie umfasst beispielsweise folgende Prozesse:

- Herstellung des Ausgangsmaterials: Laminieren von Glasfasergewebe mit Epoxidharz (FR4) und vollflächiges Kaschieren mit Kupferfolie
- Übertragung des Leiterbildes mittels Masken oder Laser und Fotolithografie
- Ätzen oder Laserabtrag zur Erzeugung der der Leiterbildstrukturen
- Additive Metallisierung mit Funktionsschichten (z. B. chemische Nickelabscheidung, Heißverzinnung)

## Schlussbericht zu IGF-Vorhaben 18683 N: ETRACE

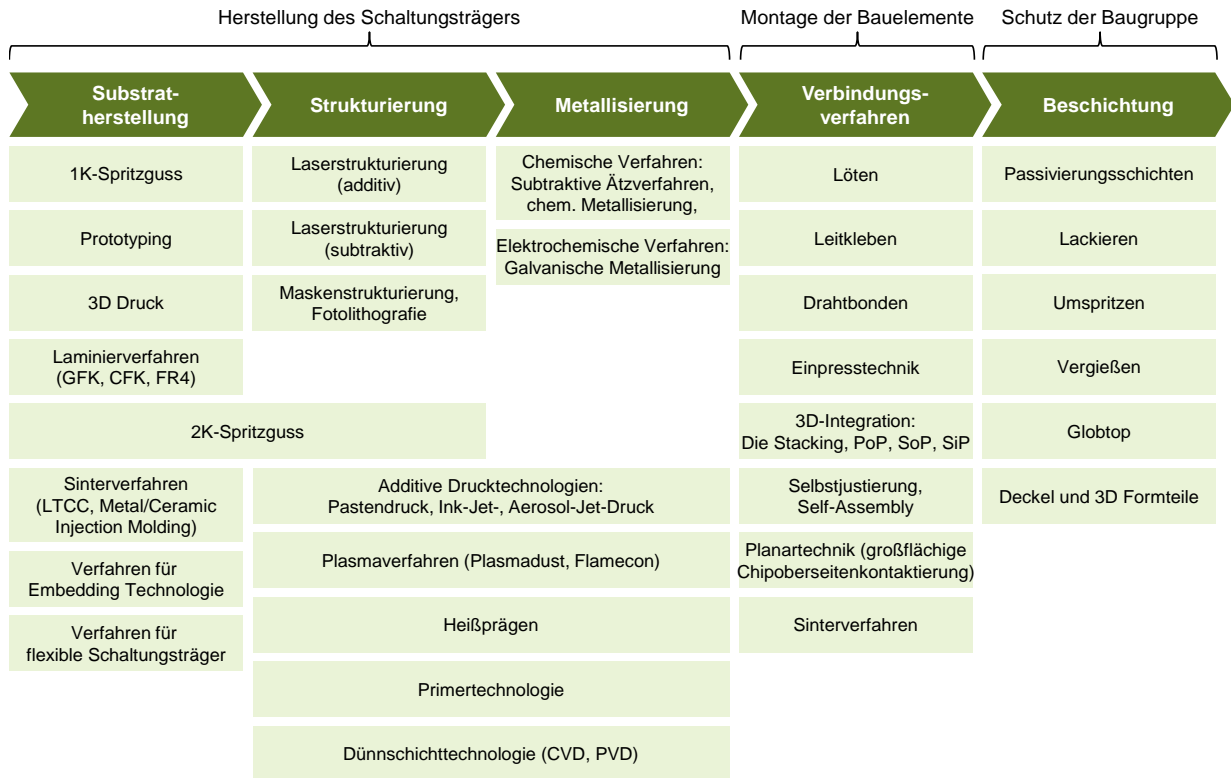


Abbildung 8: Prozesse und Verfahren der Aufbau- und Verbindungstechnik für elektronische Baugruppen (Quelle: FAPS, Universität Erlangen) [14].

### 7.2.2 Verfahren zum Erfassen fälschungsrelevanter Merkmale

Aus Voruntersuchungen waren einige geeignete Merkmale und die Prinzipien ihrer Entstehung bereits bekannt. Im zweiten Arbeitspaket wurde gezielt nach weiteren intrinsischen Merkmalen gesucht, die für die jeweiligen Produktgruppen spezifisch, und zur Authentifizierung geeignet sind. Die Suche nach Merkmalen ist unmittelbar mit der Frage nach geeigneten Prüfverfahren verknüpft, und beide werden gemeinsam betrachtet.

Zum Lesen von Merkmalen sind bildgebende Verfahren wie Kamerasystem, Lichtmikroskop und Röntgendurchstrahlung gut geeignet, die bereits standardmäßig in Produktion oder Qualitätssicherung implementiert sind. Kamerasysteme dienen der Überwachung der Genauigkeit von Bestückungsautomaten; Röntgenanlagen prüfen Lötstellen, und Digitalmikroskope vermessen beispielsweise Lotbumps dreidimensional. Derartige Systeme sind Standard in modernen Unternehmen, und sie sollten auch zur Erfassung intrinsischer Merkmale genutzt werden.

Es wurden zunächst Messverfahren bestimmt, die als branchenüblich und KMU-tauglich anzusehen sind. Hierfür wurden auf Messen und durch Kontakte mit Anlagenherstellern Informationen gesammelt. Anschließend wurden an den in AP1 zusammengestellten Produkten nach Merkmalen gesucht, die mit den jeweiligen Messverfahren erfassbar sind und der Unterscheidung von Originalen und Fälschungen dienlich sein können. Anhand von Beispielmessungen wurden in Abstimmung mit dem PA intrinsische Merkmale ausgewählt, die im weiteren Projektverlauf näher untersucht werden sollen.

Bei diesen haben wir sowohl direkte Merkmale aufgrund einer prognostizierbaren Ungenauigkeit im Prozessergebnis als auch mittelbare, indirekte Merkmale betrachtet

(Abb. 4 bis 6). Letztere entstehen während des Prozesses als Artefakte. Da sie unkontrollierter als direkte Merkmale entstehen, sind sie für Identifikation oder Authentifizierung besonders geeignet.

### **Röntgenverfahren**

Bei der Röntgenprüfung sind im Wesentlichen drei Klassen von Geräten zu unterscheiden, einfache zweidimensionale Durchstrahlungsgeräte mit visueller Kontrolle, dreidimensionale Computertomographen (CT), und sog. AXI-Geräte mit automatisierter digitaler Bildauswertung und Fehlererkennung.

Die Verwendung von 2D-Röntgengeräten zur Qualitätskontrolle und Fehlerkontrolle ist Stand der Technik und wird nach Informationen der PA-Mitglieder ebenfalls von KMU eingesetzt. Derartige Geräte erzeugen digitale Bilder; sie sind inzwischen zu Kosten von ab 50.000 € verfügbar. Insbesondere in Verbindung mit einer wirtschaftlichen Software zur Bildanalyse wurde dieses Messverfahren als gut geeignet erachtet. Zudem lassen sich die wesentlichen Erkenntnisse auch mit manueller Auswertung erlangen.

Computertomographen sind aktuell nicht so weit verbreitet. Eine Nutzung ihres Potentials erfordert hohen Zeitaufwand und eine Anschaffung ist mit großem finanziellem Aufwand verbunden. Ähnliche Aussagen lassen sich für die AXI (Automated X-ray inspection) treffen. Beide Messverfahren werden daher nicht als KMU-tauglich erachtet und nicht weiter verfolgt. Bei inlinenfähigen Röntgen-Geräten kann jedoch davon ausgegangen werden, dass diese Technologie in der Zukunft Einzug in die Produktionslinien erhalten wird.

### **Optische Verfahren**

Automatische optische Inspektionssysteme (AOI) sind bereits Stand der Technik und werden nach PA-Informationen auch in KMUs intensiv verwendet. AOIs erfassen bereits eine Vielzahl von Parametern, auf die zurückgegriffen werden kann. Die Lichtmikroskopie ist als Gruppe bildgebender Verfahren ist besonders interessant, da damit vielfältige von Merkmalen optisch erfasst und digital ausgewertet werden können.

### **Profilometer**

Mittels Profilometer können dreidimensionale topologische Informationen an den Produkten erfasst und verarbeitet werden. Da jede technische Oberfläche einzigartig ist, stellt dieses Verfahren hoch individuelle Produktinformationen zur Verfügung. Zudem existieren bereits Profilometer, die in Lichtmikroskope integriert sind. Diese Gruppe von Messverfahren wird aufgrund der Informationstiefe und der breiten Anwendbarkeit ebenfalls als geeignet erachtet.

### **Spektrometer**

Spektrometrie ist eine Klasse von Messverfahren, die zur Materialanalyse verwendet wird. Es ist anzunehmen, dass Fälschungen mit zum Original verwandten, aber teilweise andersartigen Materialien angefertigt werden. Mit den Verfahren FTIR und Raman-Spektroskopie können Kunststoffe untersucht werden, es gibt jedoch auch Anwendungen von Spektrometern im ultravioletten (UV), sichtbaren (vis) und infraroten (IR) Bereich des Lichts. Mit Röntgenfluoreszenz-Analyse, Glimmentladung oder Funkenspektrometer werden dagegen eher Metalle und Legierungen bezüglich ihrer Zusammensetzung geprüft.

**Mechanische Größen**

Des Weiteren wurden auch Untersuchungsmöglichkeiten mit einfachen Geräten aus Labor und Werkstatt wie Feinwaage, Analysenwaage, Schieblehre, Mikrometerschraube, Mess-taster und Messmikroskop in Betracht gezogen und getestet.

Tabelle 5: Identifizierte Merkmale und Messverfahren.

| Nr. | Integrations-ebene | Merkmal                                      | Prozessschritt            | Messverfahren              |
|-----|--------------------|--|---------------------------|----------------------------|
| 1   | 0                  | Metallisierungsstruktur                      | Beschichtung              | Mikroskop                  |
| 2   | 0                  | Sägekanten                                   | Vereinzelung              | Mikroskop                  |
| 3   | 1                  | Gewicht                                      |                           | Waage                      |
| 4   | 1                  | Abmessung                                    |                           | Mikroskop                  |
| 5   | 1                  | Moldmasse Zusammensetzung                    | Verguss                   | Spektrometer               |
| 6   | 1                  | Oberfläche Moldmasse                         | Verguss                   | Mikroskop                  |
| 7   | 1                  | Oberflächentopographie                       | Verguss                   | Profilometer               |
| 8   | 1                  | Oberflächenstruktur Metallgehäuse            | Umkapselung               | Mikroskop                  |
| 9   | 1                  | Durchmesser/Höhe von Lotkugeln               | Elektrische Kontaktierung | Mikroskop/<br>Profilometer |
| 10  | 1                  | Poren in Lotkugeln                           | Elektrische Kontaktierung | Röntgen                    |
| 11  | 1                  | Poren im Lot                                 | Chipbonden                | Röntgen                    |
| 12  | 1                  | Innerer Aufbau                               | Elektrische Kontaktierung | Röntgen                    |
| 13  | 2                  | Oberflächenstruktur Metallpads               |                           | Mikroskop/<br>Profilometer |
| 14  | 2                  | Partikeleinschlüsse auf Platinenoberfläche   |                           | Mikroskop/<br>Kamera       |
| 15  | 2                  | Bearbeitungsspuren auf Platinenoberfläche    |                           | Mikroskop/<br>Kamera       |
| 16  | 2                  | Flussmittelrückstände auf Platinenoberfläche | Elektr. Kontaktierung     | Mikroskop/<br>Fluoreszenz  |
| 17  | 2                  | Beschriftung/Schriftkanten                   |                           | Mikroskop/<br>Kamera       |
| 18  | 2                  | Bestückungsvarianz                           | Bestückung                | AOI                        |
| 19  | 2                  | Poren in Lötstellen                          | Elektr. Kontaktierung     | Röntgen                    |
| 20  | 3                  | Gewicht                                      |                           | Waage                      |
| 21  | 3                  | Äußere Maße                                  | Montage                   | Schieblehre                |
| 22  | 3                  | Kunststoff Zusammensetzung                   |                           | Spektrometer               |
| 23  | 3                  | Metallisierung Zusammensetzung               |                           | Spektrometer               |
| 24  | 3                  | Oberflächenstruktur Kunststoffteile          |                           | Mikroskop/<br>Profilometer |
| 25  | 3                  | Farbkoordinaten Gehäuseteile                 |                           | Vis Spektrometer           |

Eine Übersicht der potentiell geeigneten Merkmale und Messverfahren zur Erfassung des Probenzustands ist in Tab. 5 enthalten. Die Merkmale wurden dem PA vorgestellt und diskutiert. Aus der Vielzahl von Merkmalen wurden zur näheren Untersuchung im weiteren

Projektverlauf besonders vielversprechende und praktikabel erscheinende Merkmale ausgewählt.

### 7.2.3 Fälschungsrelevante Merkmale

#### Oberflächenstrukturen von Moldmaterialien an Bauelementen

Beim Reaktiven Transfermolden elektronischer Bauelemente werden vormontierte Aufbauten mit einer aushärtenden Epoxidmasse in einer Moldform umspritzt. Oberflächenstrukturen an Moldmassen ergeben sich insbesondere aufgrund der darin enthaltenen Füllstoffe und sie zeigen materialabhängig große Streuungen.

Beim mikroskopischen Vergleich von Produkten derselben Produktlinie und Moldmasse ist erkennbar, dass sich die Oberflächen der Individuen deutlich unterscheiden. Die zufälligen Erstarrungsmuster eignen sich daher potentiell zum Identifizieren einzelner Proben in der Analogie eines Fingerabdrucks (Abb. 9 und 10).

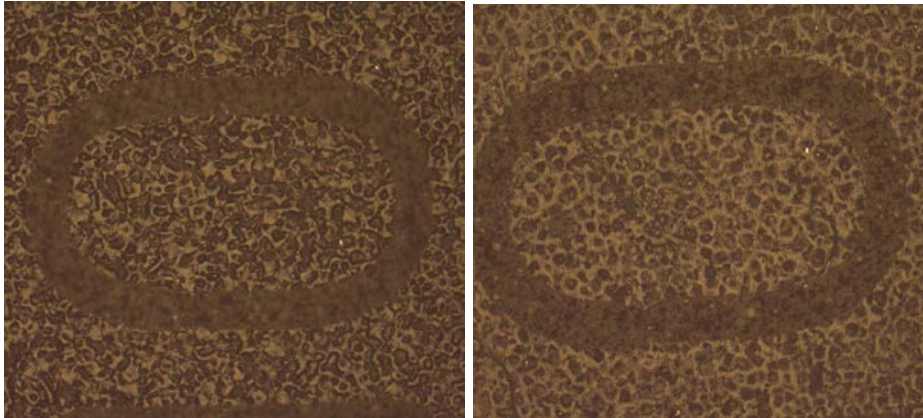


Abbildung 9: Moldoberflächen und Beschriftungen an originalen LM317EMP.

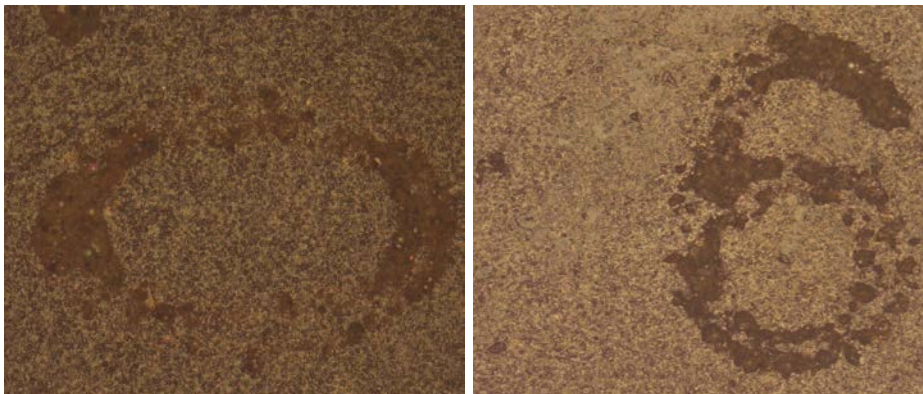


Abbildung 10: Moldoberflächen und Beschriftungen an gefälschten LM317EMP.

Auffällig ist, dass unterschiedliche Produktlinien stark unterschiedliche Oberflächentopologie bei einer großen Varianz aufweisen (Abb. 9 und 10). Wesentliche Einflussgröße ist hier die Moldmasse aufgrund der Morphologie der Füllstoffe. Dies bedeutet, dass das Merkmal prinzipiell auch zur Prüfung auf Zugehörigkeit zu einer bestimmten Grundgesamtheit, also Authentifizierung nutzbar ist. Zumindest kann hieraus auf eine Nichtübereinstimmung des Materials geschlossen werden.

Die mit dem Laser eingebrannte Aufschrift auf gefälschten Bauteilen stimmt nach unseren Erkenntnissen oft signifikant nicht mit der auf Originalen überein (Abb. 9 und 10). Dies betrifft Schriftgröße, Font und auch die Qualität des Drucks. Das Merkmal ist daher im Prinzip sehr gut für Überprüfungen geeignet. Es ist jedoch ein über Software gut kontrollierbares, direktes Merkmal, und es erscheint uns daher einfach, es gut zu fälschen.

### Innerer Aufbau von Bauelementen

Der innere Aufbau wird vom in erster Linie vom Design durch den Konstrukteur und daneben durch herstellungsbedingte Abweichungen bestimmt. Erfahrungsgemäß unterscheiden sich Fälschungen in der Regel durch Chipgröße (Si), Leadframe-Topologie (Cu), Heat-Sink-Geometrie (Cu) und die Zahl der Bonddrähte. Diese Merkmale sind in der Regel auch mit einfacher Röntgendurchstrahlung gut abzubilden und auswertbar. Insgesamt haben speziell die Merkmale des konstruktiven Aufbaus im Inneren ein großes Potential für die Authentifikation. Röntgendurchstrahlung ist daher ein hervorragendes, zerstörungsfreies Verfahren um Nonkonformität bei der Originalitätsprüfung zu erkennen (Abb. 11).

Durch automatisierte Produktionsanlagen sind in der Chipposition eher geringe Varianzen zu erwarten, ebenso bei den Abmessungen des Leadframes. Die Abbildung der typisch 25 µm dünnen Bonddrähte wird bei produktionsüblichen Röntgenanlagen durch das Auflösungsvermögen begrenzt. Dies gilt insbesondere für gering absorbierende Feinstdrähte aus Aluminium. Das Potential zur Identifikation durch Röntgenbilder ist daher als sehr eingeschränkt anzusehen.

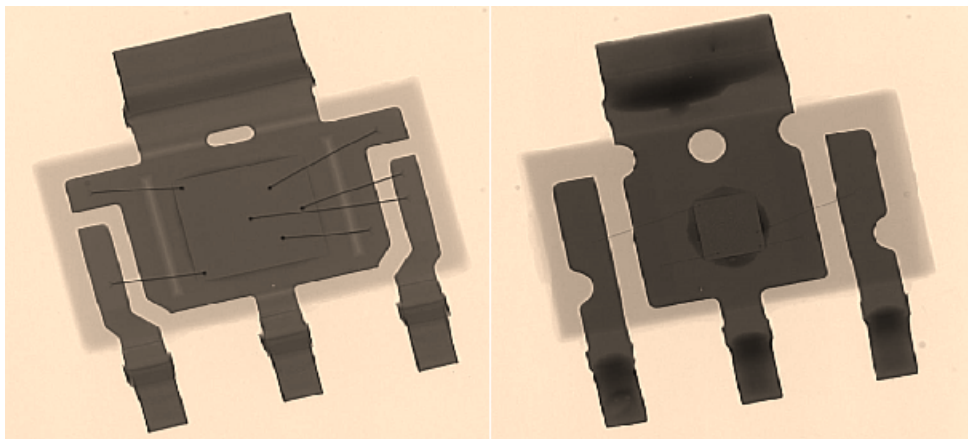


Abbildung 11: Unterschiede im Inneren Aufbau von LM317EMP (links Original, rechts Fälschung).

### Durchmesser und Position von Lotkugeln an Bauelementen

Lotkugeln werden auf BGA-Bauteilen beim 1st-Level-Packaging in einem Raster angeordnet (Abb. 12). Prozessschwankungen wirken sich über abweichende XY-Positionen sowie abweichende Höhen und Durchmesser aus. Es handelt sich hierbei typisch um direkte Merkmale. Grundsätzlich hatten wir zum frühen Zeitpunkt im Vorhaben eine Nutzbarkeit für Identifikation und Authentifizierung erwartet. Dies sollte durch vertiefte Untersuchungen verifiziert werden.



### **Poren in Lotkugeln und Lötstellen an Baugruppen**

Durch Ausgasungseffekte im Lötprozess entstehen in Lötstellen eingeschlossene Hohlräume, die eine hohe Varianz aufweisen. Variabel sind Anzahl, Lage, Größe (Fläche) und Form (Abb. 13). Da diese Merkmale nicht gesteuert werden können, handelt es sich um indirekte Merkmale mit hohem Potential zur Identifikation.

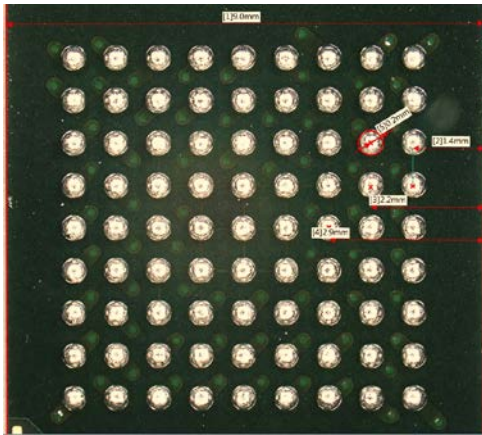


Abbildung 12: Geometriemessung von BGA-Lotkugeln.

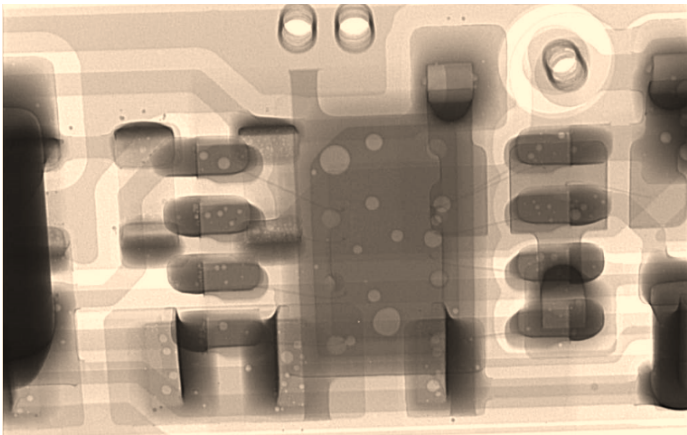


Abbildung 13: Poren in Lötstellen.

### **Positionsinvarianz von Bauelementen auf Baugruppen**

Die derzeit eingesetzten Bestückungsautomaten in der Baugruppenfertigung können Bauteile auf 10 bis 50  $\mu\text{m}$  genau auf die Sollposition der Leiterplatte ablegen. Diese Abweichung wird insbesondere im Reflow-Lötprozess durch „einschwimmende“ Bauteile oder kapillare Selbstzentrierung weiter verändert. Moderne AOI-Systeme erfassen die Ist-Position von Bauteilen am Prozessende bereits automatisiert. Zu Projektbeginn war auf Basis theoretischer Überlegungen noch ungeklärt, ob über die Lageabweichungen aller Bauelemente in „Fingerprint“ zur Identifikation oder Originalitätsprüfung generiert werden kann.

### **Metallisierungsanalyse und Kunststoffanalyse**

Es ist davon auszugehen, dass in Fälschungen andere, insbesondere kostengünstigere Materialien verwendet werden. Mithilfe spektraler Analysemethoden lassen sich Unterschiede in der Materialzusammensetzung praktisch aller Komponenten aufspüren und die Authentizität verifizieren. Daher sollten diese Methoden vertieft bei der Originalitätsprüfung untersucht werden.

### **Kunststoffoberflächen von Geräten**

An Endprodukten sind die meisten Merkmale, die innerhalb des Gehäuses liegen, nicht mehr erfassbar. Augenfällige Oberflächenstrukturen der Kunststoffoberflächen entstehen jedoch einerseits durch Oberflächenartefakte der verwendeten Spritzgussformen und andererseits durch zufällig angeordnete Füllstoffe in den Verbundwerkstoffen, insbesondere Glasfasern und anorganische Pulver. Beide bieten an spritzgegossenen Teilen ebenso wie an durch Molden verkapselten Bauelementen einzigartige Oberflächenstrukturen, die mit vergleichbaren Methoden erfasst und im Hinblick auf Identität und Originalität untersucht werden

können (Abb. 14). Bei nachgemachten Bauteilen stimmt in manchen Fällen die im Spritzguss eingeprägte Aufschrift, z.B. das Logo, nicht mit dem Original überein.

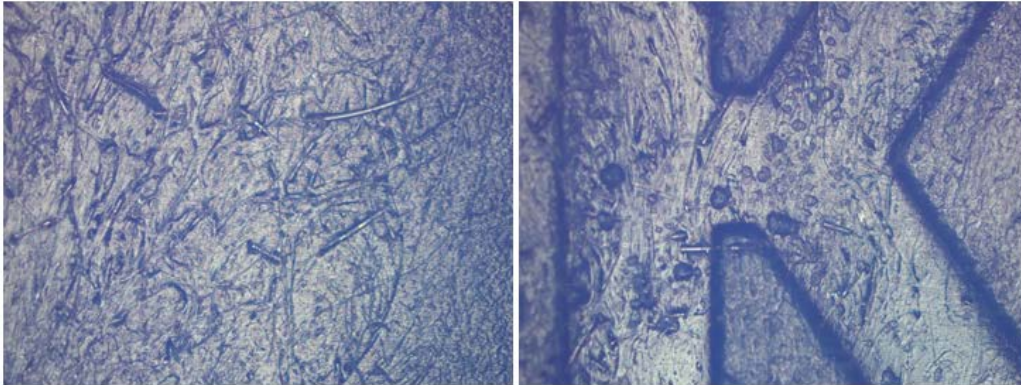


Abbildung 14: Oberflächenstrukturen auf originalen Sick GL6 Lichtschranken.

## 8 Untersuchungen zur Authentifizierung

### 8.1 Ziele

Dieses Arbeitspaket diente der systematischen Untersuchung verschiedenster Verfahren zur Authentifizierung, also Originalitätsprüfung, auf Basis der Gehäusetechnik. Dies bietet sich an, da die Gehäusetechnik direkt zugänglich und daher im Idealfall eine Überprüfung ohne Zerlegung möglich ist. Die Untersuchung umfasste diverse Analysen mit einer Anzahl photonischer Methoden, und an die Sensorik angepasster Datenverarbeitungssysteme und Algorithmen.

### 8.2 Spektroskopische Methoden an Polymeren

Spektrometrie ist eine Methode, um entweder die energieabhängige oder die wellenlängenabhängige Intensität in Spektren zu bestimmen [15]. Bei Materialuntersuchungen betrachtet man Spektren nach Emission, Absorption, Streuung oder Reflektion. Absorption der Strahlung im Material wird durch das Lambert-Beer'sche Gesetz beschrieben, wobei der Absorptionskoeffizient von der Wellenlänge  $\lambda$  abhängig ist.

#### 8.2.1 Proben und Probenverpackung

Polymere wie der blaue Gehäusewerkstoff sind komplex aufgebaut. Die Vielzahl der Komponenten und die Möglichkeit wechselnder Zusammensetzungen erlaubt erfahrungsgemäß eine recht sichere Identifikation. Jedoch müssen die Untersuchungsverfahren spezifisch auf die Bestandteile abgestimmt sein. Weiterhin kann der Oberflächenzustand der Bauteile herstellungsbedingt variieren. Dies kann einerseits optische Analysen beeinträchtigen und andererseits neue Messgrößen ergeben.

Das Gehäuse der Lichtschranke GL6 besteht aus einem Thermoplast mit den Komponenten Polystyrol (PS), Polycarbonat (PC) und möglicherweise Polybutadien (PB). Weitere Bestandteile sind Glasfasern, mögliche mineralische Füllstoffe und ein blauer Farbstoff. Diese Bestandteile wechselwirken mit elektromagnetischer Strahlung im Wellenlängenbereich von UV über sichtbares Licht bis zum Infrarot. Daneben ergibt sich eine spezifische Oberflächenmorphologie, welche primär von den Füllstoffpartikeln und der Oberflächenqualität der Spritzgussform abhängt.

In diesem Kapitel werden Lichtschranken des Herstellers Sick AG, GL6 P0511 aus drei Bezugsquellen untersucht. SICK lieferte originale Exemplare der GL6 P0511S50. Darüber hinaus konnten weitere Produkte der Typen GL6 P0511S03 und Sick GL6 P0511S21 über Internetplattformen aus China erworben werden. Originale Varianten S03 und S21 sind kundenspezifisch gefertigt und eigentlich nicht im freien Handel zu erwerben. Die Sensoren S03 und S21 kosteten etwa 10% des Listenpreises. Daher wird davon ausgegangen, dass es sich um Plagiate handelt.

Die Originalprodukte lagen jeweils in einer bedruckten Verpackung, während die anderen in Blankotüten stecken (Abb.15). Weiterhin besitzen die Originale auf dem Deckel ein Label mit Firmen- und Typbezeichnung, während die Alternativen blanko sind (Abb. 16).



Abbildung 15: Sensoren mit Packung.  
Von links nach rechts: Sick GL6 P0511S50, GL6 P0511S03, GL6 P0511S21.

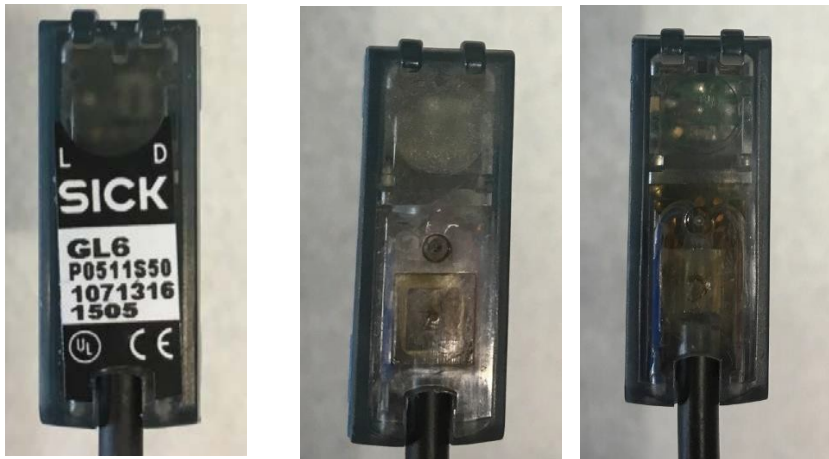


Abbildung 16: Detailaufnahme der Sensoren.  
Von links nach rechts: Sick GL6 P0511S50, GL6 P0511S03, GL6 P0511S21.

Die Untersuchungen in diesem Abschnitt umfassen Farbmessungen, Raman-Spektroskopie, FTIR-Spektroskopie in Transmission und Reflexion und Reflektanzmessungen von UV bis IR.

## 8.2.2 Farbmessungen

Farbe ist ein subjektiver Sinneseindruck, den Licht im spektralen Bereich zwischen 380 nm und 760 nm hervorruft. Der RGB-Farbraum wurde an die Empfindlichkeit der Augen angepasst. Additive Farbmischung ergibt sich aus den Basisfarben Rot (700 nm), Grün (546,1 nm) und Blau (435,8 nm). Im Farbraum CIE Lab 1976 werden die Farbvektoren ebenfalls aus den drei Primärvektoren Rot, Grün und Blau zusammengesetzt. Zusammenhang zwischen RGB- oder CIE-Lab-Werten und einem Spektrum ist nicht eindeutig: Aus einer Farbmessung kann das Spektrum nicht eindeutig rekonstruiert werden. Drei Eigenschaften der Farbmessung sind Farbton, Helligkeit und Farbsättigung [16].

Bei der visuellen Beurteilung ergab sich im direkten Vergleich kein Unterschied in der blauen Gehäusefarbe der drei Vergleichsmuster. Anschließend wurden die Gehäuseoberflächen lokal mit dem Mikroskop (Fa. Zeiss) und angeschlossener Kamera (Fa. Progress) fotografiert.

Auf allen Bauteilen ist das SICK-Logo im Spritzguss eingeprägt worden. Die Feinstruktur ist bei dem Original und den Plagiaten deutlich unterschiedlich (Abb. 17). Das Original ist farblich heterogen, und erscheint blau-weiß marmoriert. Die weißen Striche sind vermutlich Glasfasern. Die Oberflächen beider Alternativen sind nicht unterscheidbar. Sie sind glatter, und homogener als das Original und zeigen allenfalls einige Partikel.



Abbildung 17: Oberflächen von Sick GL6 Sensorgehäuse; v.l.n.r.: Original, Fälschung 1, Fälschung 2.

Um eine erste quantitative Beurteilung durchzuführen, wurden die unter gleichen Bedingungen im Zeichen I aufgenommenen Bilder mit einer Standard-Computersoftware (Windows Draw) untersucht. Hieraus wurden Farbwerte, Sättigung und Helligkeit ermittelt. Zwischen den Farben der Gehäuse besteht bei keinem der Farbparameter ein messbarer Unterschied. Durch Farbmessung mittels einfacher Labormethoden an massiven Bauteilen sind die originalen Proben auch im direkten Vergleich farblich nicht von alternativen Produkten zu unterscheiden.

Weitere Tests wurden mit dem Messgerät Micro-Epsilon ACS7000 durchgeführt, das als eines der empfindlichsten Farbmesssysteme auf dem Markt angesehen werden kann. Der Farbabstand liegt bei  $dE < 0,01$ . Auch hiermit waren keine signifikanten Farbunterschiede messbar.

Die Gehäuse der Sensoren wurden nach Reinigung mit Isopropanol zersägt, um Granulat für weitere Untersuchungen zu erzeugen (Abb.18). In der Abbildung ist zu erkennen, dass das Pulver des Originals eine dunklere Blaufarbe hat, während die zwei gefälschten Produkte heller sind. Vermutlich beeinflusst die Oberflächenstruktur so die wahrgenommene Farbe des Objektes. Die Methode des Pulververgleichs erscheint jedoch nur im unmittelbaren Vergleich von Proben gegen eine Referenz aussagekräftig.



Abbildung 18: Pulver aus Gehäusematerial, v.l.n.r.: Original, Fälschung 1, Fälschung 2.

### 8.2.3 Spektrometer im UV und sichtbaren Bereich (UV/vis)

Licht kann im UV/vis-Bereich Elektronen auf höhere Energieniveaus anregen [17]. Die Elektronenübergänge sind spezifisch für bestimmte Gruppen im Molekül. Die quantitative Analyse mit UV/Vis wird als Zweistrahlmessung von monochromatisiertem Weißlicht zwischen einer Probe und einer Referenz-Quelle durchgeführt und nach dem Lambert-Beer'schen Gesetz ausgewertet. Im vorliegenden Fall wird ein aromatischer  $\pi \rightarrow \pi^*$  Übergang des Benzolrings in Polyestern und Polycarbonaten bei Absorptions-Wellenlängen von 204 und 255 nm erwartet [18]; der Carbonatübergang  $\pi \rightarrow \pi^*$  tritt bei 210-220 nm auf [19].

Mit dem UV/Vis-Spektrometers Cary, Model 50 BIO, wurden Proben der blauen Gehäuse in Transmission untersucht. Dazu wurden 4 mg Probenpulver mit 200 mg KBr gemischt und dann vermessen. Der erwartete Peak von Carbonat wurde beobachtet. Er scheint schwächer als an den Plagiaten zu sein, wobei wegen Rauschen und großer Streuung eine quantitative Analyse nicht sinnvoll ist (Tab. 6). Alle Werte weisen eine große relative Streuung von ca. 30-50 % auf. Der statistische Test ergibt, dass Original und Plagiate mit moderater Konfidenz unterschiedlich sind.

Tabelle 6: Die Absorption von Carbonat bei 227 nm.

| Probe      | Original    | S03         | S21         |
|------------|-------------|-------------|-------------|
| Absorption | 0,30 ± 0,10 | 0,41 ± 0,23 | 0,44 ± 0,19 |

### 8.2.4 FTIR (Fourier-transformierte Infrarotspektroskopie)

Moleküle mit N Atomen besitzen 3N Freiheitsgrade der Bewegung. Sie werden durch absorbierte Photonen mit der zum Freiheitsgrad passenden Wellenlänge auf ein höheres Energieniveau angeregt. Da viele Schwingungsenergien im Infraroten liegen, ist FTIR eine zur Materialcharakterisierung geeignete Technik um spezifische Energien sehr vieler Bindungen oder funktionale Gruppen zu messen [20].

FTIR kann als Referenzverfahren zur Analyse von polymeren Werkstoffen betrachtet werden. Die Fa. Biorad gibt an, dass sie über Datenbanken verfügt, in denen ca. 250.000 Spektren verschiedenster Substanzen hinterlegt sind [21]. Somit können Kunststoffe oder andere Stoffe ggf. bezüglich Polymerart, Hersteller, Typ und Variante identifiziert werden. Dies erlaubt es prinzipiell, die FTIR einzusetzen, ohne selbst Referenzproben für eine Originalteile-Datenbank zu vermessen.

In diesem Versuch sollten Benzol, Carbonate und weitere Gruppen mit FTIR detektiert und anschließend die Verhältnisse zwischen Originalen und Plagiaten berechnet werden [Liu9]. Zur Analyse wurden 2 mg Probenpulver der blauen Gehäusen mit 200 mg KBr gemischt und dann per FTIR (Bio-Rad FTS 3000 Excalibur Series FTIR) gemessen.

## Schlussbericht zu IGF-Vorhaben 18683 N: ETRACE

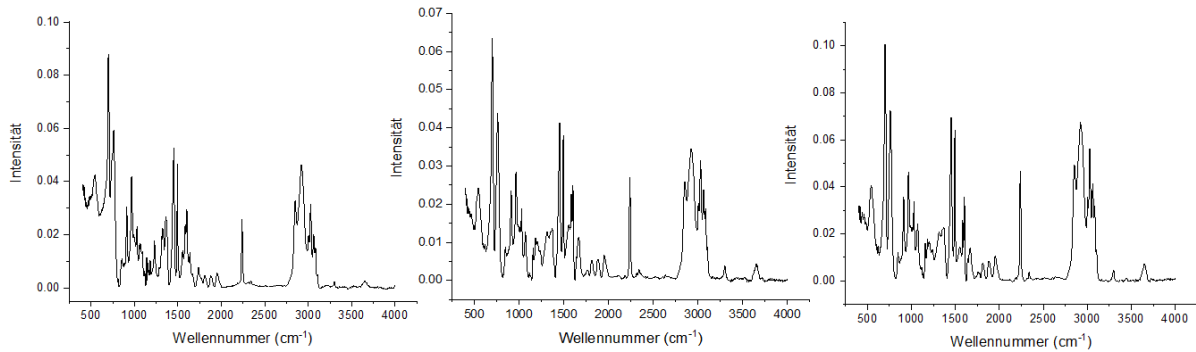


Abbildung 19: FTIR-Signale; v.l.n.r. Original, Fälschung 1 (S03), Fälschung 2 (S21).

Abb. 19 zeigt die Transmissionsspektren der Gehäuse im FTIR. Alle drei Spektren sind bezüglich der Lage der Peaks ähnlich, die Höhen der Signale sind jedoch sehr unterschiedlich. Man kann die charakteristischen Wellenzahlen in jeder Polymerprobe durch Vergleich mit einer Referenz ermitteln. Auf Basis der Information seitens Sick AG, dass das Original aus einem Blend oder Copolymer aus Polybutadien (PB), Polycarbonat (PC) und Polystyren (PS) und Polyacrylnitril (PAN) besteht, wurde eine Zuordnung der Peaks zu funktionellen Gruppen vorgenommen (Tab. 7).

Tabelle 7: Wellenzahlen von funktionellen Gruppen in den Proben.

| Signal | Wellenzahl (cm <sup>-1</sup> )         | Funktionale Gruppe | Polymer  |
|--------|--|--------------------|----------|
| 1      | 700                                    | C=C-H              | PS+PC+PB |
| 2      | 760                                    | C=C-H              | PS+PC+PB |
| 3      | 911                                    | C=C-H              | 1,2-PB   |
| 4      | 966                                    | C=C-H              | 1,4-PB   |
| 5      | 1228 beim Original<br>1238 Fälschungen | Carbonyl           | PC       |
| 6      | 1450                                   | C=C                | PB       |
| 7      | 1495                                   | C=C                | PS+PC    |
| 8      | 2237                                   | C≡N                | PAN      |
| 9      | 2922                                   | Benzol             | PS+PC    |

Wegen unterschiedlicher Konzentrationen in den Proben können die Intensitäten der Signale unterschiedlicher Proben nicht direkt verglichen werden. Daher wurde die Methode der Verhältnisbildung von zwei Signalen zweier funktioneller Gruppen angewendet, um so Signaturen der Polymere zu erhalten. Auf Basis der Verhältnisse von Signal 1 zu Signal 2 und von Signal 7 zu S9 wurde eine Korrektur der Grundlinie erreicht. Danach ergeben sich die Verhältnisse der Signale (Tab. 8). Peak 1 wurde als stärkstes Signal mit den geringsten Streuungen als Referenz genommen.

Tabelle 8: Relative Peakhöhen in FTIR-Spektren der Sensorgehäuse.

| Produkte | Verhältnis S3 / S4 | Verhältnis S5 / S1 | Verhältnis S6 / S1 |
|----------|--------------------|--------------------|--------------------|
| Original | 0,71 ± 0,01        | 0,190 ± 0,010      | 0,58 ± 0,01        |
| S03      | 0,78 ± 0,03        | 0,078 ± 0,019      | 0,64 ± 0,03        |
| S21      | 0,78 ± 0,02        | 0,077 ± 0,019      | 0,64 ± 0,02        |
|          |                    |                    |                    |
| Produkt  | Verhältnis S7 / S1 | Verhältnis S8 / S1 | Verhältnis S9 / S1 |
| Original | 0,49 ± 0,02        | 0,25 ± 0,03        | 0,54 ± 0,02        |
| S03      | 0,58 ± 0,03        | 0,39 ± 0,04        | 0,61 ± 0,02        |
| S21      | 0,58 ± 0,01        | 0,43 ± 0,03        | 0,64 ± 0,02        |

Tabelle 9: Prüfwerte P im Kolgomorov-Smirnov-Test auf Unterschied zwischen Original und Plagiaten auf Basis der relative Peakhöhen in FTIR-Spektren in Tab. 8.

| Peak-Verhältnis | Original / S03<br>P  | Original / S21<br>P  | S03 / S21<br>P |
|-----------------|----------------------|----------------------|----------------|
| 3 / 4           | $1,89 \cdot 10^{-5}$ | $1,89 \cdot 10^{-5}$ | 0,9748         |
| 5 / 1           | $1,89 \cdot 10^{-5}$ | $1,89 \cdot 10^{-5}$ | 0,9748         |
| 6 / 1           | $1,7 \cdot 10^{-4}$  | $1,89 \cdot 10^{-5}$ | 0,6751         |
| 9 / 1           | 0,031                | 0,6751               | 0,1108         |
| 8 / 1           | $1,89 \cdot 10^{-5}$ | $1,89 \cdot 10^{-5}$ | 0,1108         |
| 7 / 1           | 0,3129               | 0,1108               | 0,1108         |

- Signal 3 zu 4: Das Verhältnis von 1,2-Polybutadien zu 1,4- Polybutadien zeigt generell nur geringe Differenzen.
- Signal 5 zu 1 bestimmt die Menge an Polycarbonat. Da sich auch die Wellenzahl zwischen Original und S03 und S21 unterscheidet, sind Gehalt und Art des Polycarbonats unterschiedlich. Im Original ist mehr Polycarbonat enthalten.
- Peak 6 zu 1: Das Original enthält weniger Polybutadien als die gefälschten Produkte S03 und S21.
- Peaks 7:1, 8:1 und 9:1 bestätigt auch den geringeren Gehalt an Polystyren, Polyacrylnitril und Polycarbonat im Original.

Mit der genutzten Auswertemethode der Transmissions-FTIR-Spektren wird die exakte Zusammensetzung zwar nicht ermittelt, es ist jedoch eindeutig, dass im Original mehr Polycarbonat und weniger Polybutadien, Polystyren und Polyacrylnitril enthalten sind. Die Werte der beiden Plagiate aus unterschiedlichen Quellen liegen sehr dicht beieinander. Die genannten Unterschiede werden durch die Überprüfung mit dem Kolgomorov-Smirnov-Test gemäß Anhang 12.3 bestätigt (Tab. 9).

Insgesamt hat sich die Eignung der FTIR als Referenzmethode zur Authentizitätsprüfung von Materialien bestätigt. Dies gilt auch ohne Rückgriff auf eine kommerzielle Datenbank, wenn im Vergleich zur Originalprobe gemessen wird.

Zur Vermeidung aufwändiger Probenvorbereitung vor FTIR-Transmissionsmessungen wurden auch Versuche mit FTIR in Reflexion unternommen. Die Bauteilproben wurde nach Reinigung direkt im FTIR (Bruker Vertex 70v) unter N<sub>2</sub>-Atmosphäre vermessen.



Charakteristische spektrale Signaturen der funktionalen Gruppen waren nicht eindeutig unterscheidbar. FTIR in Reflektion erscheint daher nicht als geeignetes Verfahren. Einen Kompromiss zwischen präparativem Aufwand und Genauigkeit könnte die Durchstrahlung an Mikrotom-Dünnschnitten darstellen, die jedoch hier nicht erprobt wurde.

### 8.2.5 Reflexionsspektrometer (Reflektanz)

Das Reflexionsspektrometer misst die Gesamtintensität der Reflexions- und Streustrahlung der Probe im Bereich vom UV- bis zum NIR, also von 200 bis 2000 nm. Aus dem NIR kann man Informationen über C-H Gruppen ziehen [22], während man aus dem visuellen Bereich die Farbinformationen bekommt.

Die gereinigten Proben wurden direkt mit einem Reflexionsspektrometer (Perkin-Elmer Lambda 1050 UV/Vis/NIR) am Lichttechnischen Institut des KIT gemessen. Bei 250-860 nm wurde mit dem InGaAs-Detektor und bei 860-1500 nm mit dem PMT-Sensor jeweils an 10 Proben gemessen [23]. Die Streuung ist für die genannten Wellenlängen in Tab. 10 dargestellt. Im Infraroten erzeugen die C-H-Verbindungen drei Absorptionssignale. Es gibt um 860 nm erhöhtes Rauschen wegen des Detektorwechsels (Abb. 20).

Die Darstellung der Mittelwerte verdeutlicht dies (Abb. 21). Im Infrarotbereich ist die Reflektanz der Originale mit ca. 80 % höher als die der Plagiate S03 und S21 mit ca. 45 %. Um 656 nm tritt ein Peak im Spektrum des Originals auf, jedoch nicht in den Fälschungen S03 und S21.

Um den Unterschied zwischen diesen drei Produkten zu untersuchen, werden fünf spezielle Punkte untersucht. Um 370 nm ist das Plateau von UV-Licht. Um 454 nm liegt der größte Peak im Spektrum und um 656 nm ist der typische Peak vom Original. Um 1000 nm ist das Plateau von IR-Licht und um 1173 nm ist der Peak bei der Absorption in IR-Bereich. An den Wellenlängen im Spektrum wurden diskrete Werte entnommen und statistische Parameter bestimmt.

Zunächst fallen an den Originalen die äußerst geringen Streuungen auf, die zwischen 0,2 und 2,5 % vom Mittelwert liegen. Demgegenüber streuen die Reflektanzen der Plagiate größenordnungsmäßig im Bereich von 2 bis 20 %. Unterschiede zwischen den Spektren zwischen Originalen und Plagiaten wurden auch durch die weitergehenden Auswertungen belegt.

Tabelle 10: Reflektanz in % bei fünf ausgewählten Wellenlängen. Mittelwert und Standardabweichung an jeweils 10 Proben.

| Probe    | 370 nm     | 454 nm     | 656 nm     | 1000 nm    | 1173 nm    |
|----------|------------|------------|------------|------------|------------|
| Original | 12,5 ± 0,3 | 50,3 ± 0,5 | 15,9 ± 0,4 | 82,1 ± 0,1 | 77,8 ± 0,1 |
| S03      | 15,9 ± 3,0 | 44,7 ± 2,7 | 11,1 ± 0,2 | 40,4 ± 3,3 | 36,0 ± 3,0 |
| S21      | 13,9 ± 4,0 | 46,2 ± 3,2 | 11,2 ± 0,4 | 42,4 ± 4,1 | 38,0 ± 3,8 |

Die Betrachtung der P-Prüfwerte aus dem Kolmogorov-Smirnov-Test in Tab. 11 zeigt, dass die Unterschiede zwischen allen Wellenlängen außer 370 nm signifikant sind, und dass es sich daher auch in der Gesamtbetrachtung um unterschiedliche Spektren und damit um

unterschiedliche Materialien handelt.  $P$  ist eine Wahrscheinlichkeit den gemessenen Abstand der beiden Verteilungskurven zu beobachten, wenn die Hypothese der Gleichheit stimmt.

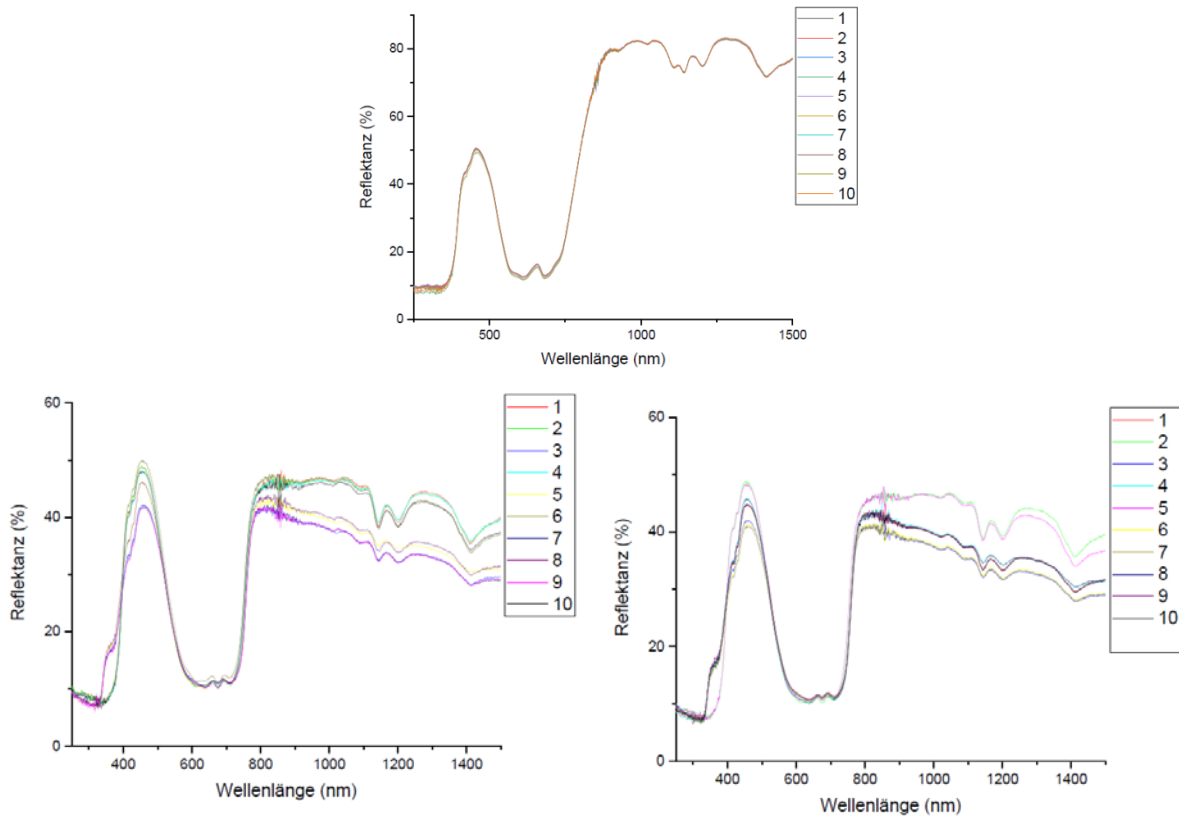


Abbildung 20: Reflektanz von jeweils 10 Exemplaren von Original (o), Fälschung 1 (unten links) und Fälschung 2 (unten rechts).

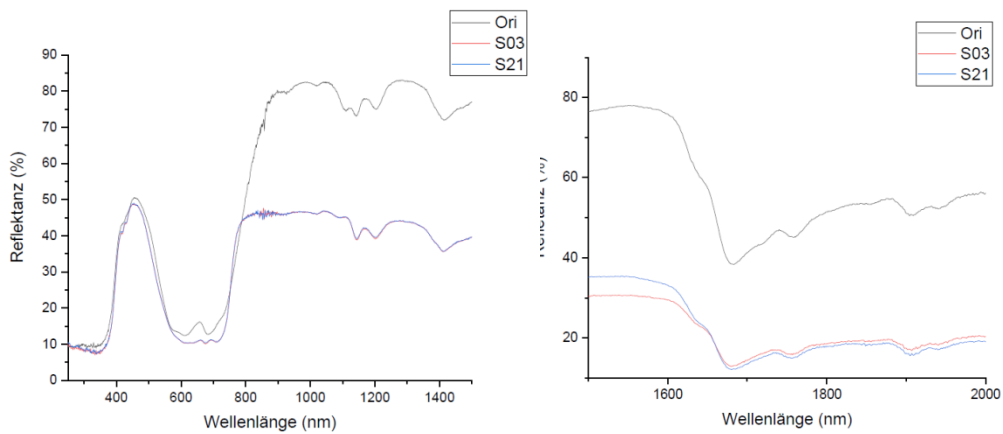


Abbildung 21: Verlauf der Reflektanz im Bereich 350 nm bis 2000nm (Mittelwerte).

Tabelle 11: Prüfwerte im Kolgomorov-Smirnov-Test auf Unterschied zwischen Original und Plagiaten. Basis der Auswertung Reflektanz bei fünf Wellenlängen gemäß Tab. 9.

| Wellenlänge (nm) | Original / S03<br>P   | Original / S21<br>P   | S03 1 / S 21<br>P    |
|------------------|-----------------------|-----------------------|----------------------|
| 370              | 0,0012                | 0,1108                | 0,6751               |
| 454              | $1,89 \cdot 10^{-5}$  | $1,70 \cdot 10^{-4}$  | 0,1108               |
| 656              | $1,89 \cdot 10^{-5}$  | $1,89 \cdot 10^{-5}$  | 0,9748               |
| 1000             | $1,89 \cdot 10^{-5}$  | $1,89 \cdot 10^{-5}$  | 0,3129               |
| 1173             | $1,89 \cdot 10^{-5}$  | $1,89 \cdot 10^{-5}$  | 0,6751               |
| <b>Gesamt</b>    | $1,52 \cdot 10^{-22}$ | $1,27 \cdot 10^{-19}$ | $1,54 \cdot 10^{-2}$ |

Dem gegenüber zeigt sich auch, dass die Unterschiede zwischen den beiden Plagiatstypen im Rahmen der Streuungen nicht nachweisbar sind.

Insgesamt erscheint die Methode, Licht-Spektren über einen Wellenlängenbereich von ca. 350 bis 1500 nm in Reflexion aufzunehmen, gut geeignet, um Unterschiede im Material zwischen verschiedenen Prüflosen und damit Nicht-Authentizität nachzuweisen. Dies gelingt offensichtlich auch an Proben, welche weder bei visueller Betrachtung noch bei Farbmessung mit Farbmessgeräten nach dem Stand der Technik Unterschiede zeigten.

### 8.2.6 Raman-Spektrometer

Raman-Spektroskopie im inversen Wellenlängenbereich zwischen 400 und 4000  $\text{cm}^{-1}$  beruht auf inelastischer Streuung von Laserlicht an Molekülen. Beim Raman-Effekt wird der negative oder positive Energieunterschied zwischen eingestrahlttem und emittiertem Licht durch die sog. Stokes- bzw. Anti-Stokes-Verschiebung beschrieben [24]. Das Verfahren kann gemeinsam mit FTIR zur Identifizierung funktionaler Gruppen eingesetzt werden. Die Laserstrahlung kann jedoch auch Fluoreszenz oder Aufheizung und thermische Zersetzung der Probe bewirken.

Zur Raman-Spektroskopie wurden Probenpulver wurde in Glaskapillargefäße eingebracht und mit dem Spektrometer Bruker Vertex 70 gemessen. Ziel war die Identifikation funktioneller Gruppen in den Polymeren. Die Originalteile wurden bei 3 mW gemessen, während die gefälschten bei 20 mW gemessen werden konnten. Da die Proben bei der Messung nicht stabil blieben wurden sie nur dreimal gemessen.

Raman-Spektren sind in Abb. 22 zu sehen. Vom Original gibt es nur ein einziges Signal im Raman-Spektrum aufgrund der thermischen Zersetzung. Ein Charakteristisches Spektrum war daher nicht zu ermitteln.

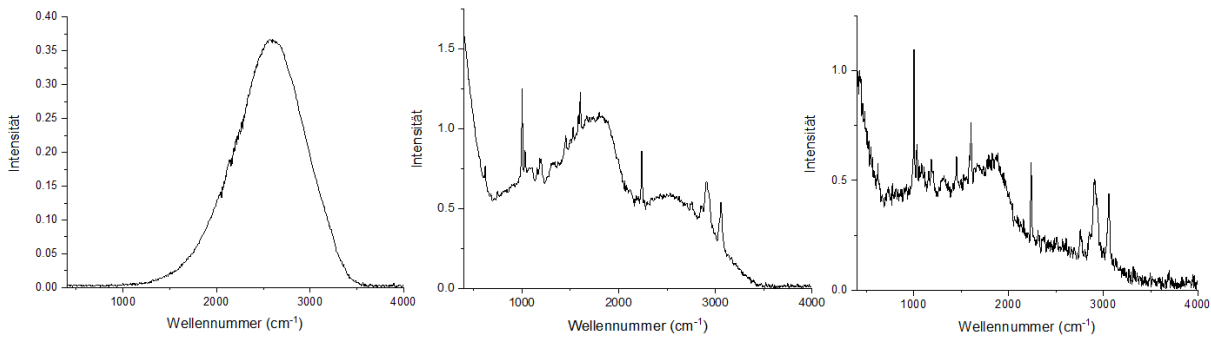


Abbildung 22: Raman-Spektren vom Original und den beiden Fälschungen.

Die Raman-Spektren der Plagiate S03 und S21 unterscheiden sich kaum. Auf Basis publizierter Spektren können die zugehörigen funktionellen Gruppen identifiziert werden, Tab. 12. Die folgende Tabelle zeigt die Analyse von den Signalen in S03 und S21. Wegen der unregelmäßigen Grundlinie kann man die Bestandteile nur qualitativ analysieren.

Tabelle 12: Die funktionellen Gruppen in den Fälschungen S03 und S21.

| Wellenzahl (cm <sup>-1</sup> ) | Polymer | Wellenzahl (cm <sup>-1</sup> ) | Polymer      |
|--------------------------------|---------|--------------------------------|--------------|
| 1002                           | PS      | 1665                           | Trans-1,4-PB |
| 1033                           | PS      | 2239                           | PAN          |
| 1158                           | PC      | 2757                           | PC           |
| 1186                           | PS      | 2861                           | PC           |
| 1440                           | 1,2-PB  | 2911                           | PC           |
| 1604                           | PS+PC   | 3064                           | PS           |

Die qualitative Raman-Untersuchung bestätigt die Ergebnisse der FTIR weitgehend. Alle Komponenten der gefälschten Gehäusewerkstoffe mit Ausnahme von cis-1,4-Polybutadien werden gefunden. Im vorliegenden Fall kann man auf Basis der Raman-Spektren das Original von den Fälschungen S03 und S21 nur aufgrund des Schmelzsignals unterscheiden. Zugleich wird die Annahme der Übereinstimmung der beiden Plagiate durch die sehr ähnlichen Spektren weiter bestätigt. Grundsätzlich erscheint Raman-Spektroskopie als ein geeignetes Verfahren zum Nachweis unterschiedlicher Materialien an pulverisierten Proben.

### 8.2.7 Magnetresonanz-Relaxometrie (NMR) an Sensorgehäusen

Die Untersuchungen wurden am Fraunhofer EZRT, Magnetic Resonance and X-Ray-Imaging Department in Würzburg an einem dort entwickelten kostengünstigen und portablen Gerät durchgeführt. Sechs Proben wurden mit der NMR-Relaxometrie untersucht [25]. Dabei handelte es sich um zwei Originale und jeweils zwei Fälschungen Typ S03 bzw. S21. Die Messungen wurden pro Probe dreimal wiederholt, wobei die Proben vor jeder Messung geschüttelt wurden, um das Proben-Pulver neu im Messvolumen (Reagenzglas) zu verteilen. Die Auswertung der drei Messungen ergab immer das gleiche Relaxationszeit-spektrum.

Es wurden reproduzierbare, signifikante Unterschiede im T<sub>2</sub>-Signalabfall, sowie im dazu berechneten Relaxationszeit-Spektrum der Proben erkannt werden. Die Proben lassen sich anhand des T<sub>2</sub>-Spektrums (excl. first, no norm) grob in drei Gruppen einteilen (Abb. 23).

- Bei den Originalen ist der linke Relaxationszeit-Peak kleiner als der rechte.
- Bei den Fälschungen S21-6 und S03-5, hier beide Peak ungefähr gleich hoch.
- Bei den Fälschungen S03-10“ und S21-7“, hier ist der linke Peak höher als der rechte.

Im Rahmen des vorliegenden Vorhabens waren die Unterschiede bei der Betrachtung von einzelnen NMR-Signalen (T<sub>2</sub>) noch nicht ausreichend, um hieraus eine anwendungsreife Prüfung auf Originalität zu erlauben. Eine Weiterentwicklung stellt die korrelierte Betrachtung mehrerer NMR-Signaturen dar. Hierdurch soll es zukünftig möglich sein, Fingerabdrücke des jeweiligen Materials zu erstellen [22].

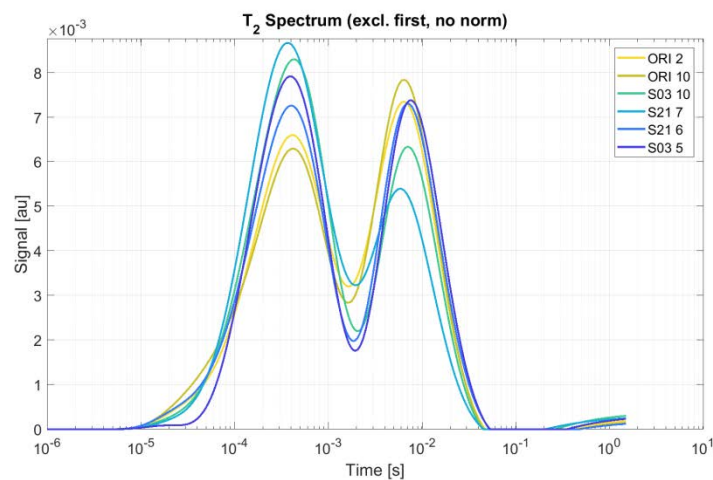


Abbildung 23: NMR-Spektren von zwei Originalproben und den beiden Fälschungen S03 und S21.

## 8.2.8 EDX-Spektrometer

Energiedispersive Röntgenspektroskopie (EDX) ist eine im Rasterelektronenmikroskop (REM, SEM) integrierte Analysemethode der chemischen Zusammensetzung [26]. Mit EDX-Spektrometer können Elemente mit Ordnungszahlen  $Z > 10$  in oberflächennahen Bereichen bis zu einer Tiefe von einigen Mikrometern analysiert werden. Zur Verhinderung der elektrostatischen Aufladung der Polymeroberflächen wird mit einer dünnen Graphitschicht bedampft, was die C-Analyse beeinträchtigt. Die Proben wurden mit Isopropanol gespült, graphitbeschichtet und im Rasterelektronenmikroskop Zeiss DSM 962 untersucht.

Die Übersicht der Elemente gemäß Tab. 13 listet die atomaren Gehalte in den Proben. In allen Produkten tritt neben Kohlenstoff und Sauerstoff auch Silizium auf, das typischerweise als Siliziumoxid in den Glasfasern enthalten ist. Nur das Original weist Brom und Antimon auf, die in flammhemmenden Zusätzen enthalten sind, beispielsweise als Tetrabromobisphenol A (TBBPA) in ABS [27] oder als Antimontrioxid ( $\text{SbO}_3$ ) in ABS und PC. Dabei ist die Kombination beider Stoffe häufig [28, 29, 30]. In beiden Plagiaten wird Schwefel nachgewiesen. S wird bei Kunststoffen wie ABS als Vernetzer bei der Polymerisation eingesetzt, um Festigkeit und chemische Stabilität zu erhöhen [31].

Tabelle 13: Der Anteil der Elemente auf der Oberfläche von drei Produkten.

| Element | Original<br>at-% | Plagiat S03<br>at-% | Plagiat S21<br>at-% |
|---------|------------------|---------------------|---------------------|
| C       | 91,2 ± 0,80      | 90,9 ± 0,40         | 91,5 ± 0,4          |
| O       | 6,90 ± 0,80      | 8,8 ± 0,40          | 8,4 ± 0,3           |
| Si      | 0,25 ± 0,11      | 0,19 ± 0,04         | 0,12 ± 0,04         |
| Br      | 1,46 ± 0,11      | -                   | -                   |
| Sb      | 0,19 ± 0,04      | -                   | -                   |
| S       | -                | 0,14 ± 0,02         | 0,05 ± 0,01         |

Auf Basis der EDX-Spektren kann man die Aussage treffen, dass das Original die flammhemmenden Elemente Brom und Antimon enthält, die in den Plagiaten fehlen. In beiden Plagiaten wurde offensichtlich ein anderes Polymerisationschema auf Basis von Schwefel angewendet. Grundsätzlich hat sich bestätigt, dass man mit EDX die Materialien bezüglich schwererer Elemente sehr gut differenzieren kann. Die Streuung der absoluten Gehalte lag zwischen 0,04 at % und 0,8 at% bzw. relativ zwischen 0,4 % und 40 % an der unteren Nachweisgrenze.

### 8.3 Thermoanalysen: TGA und DTA

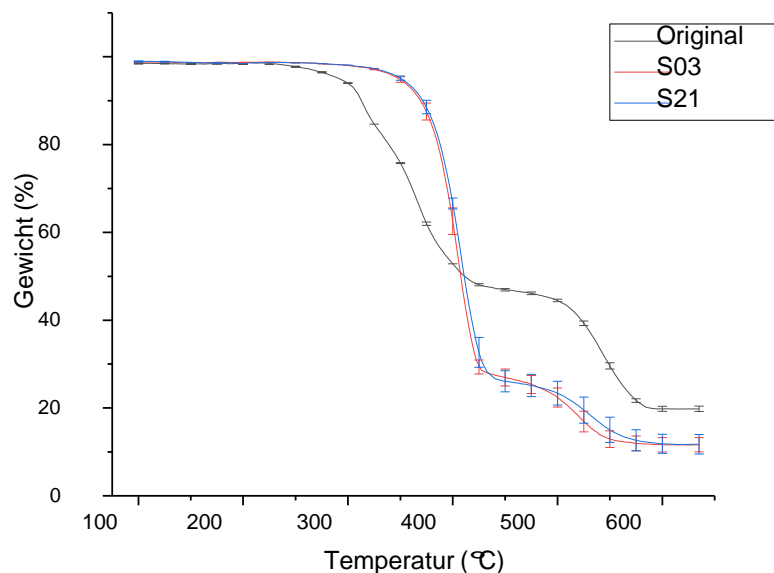


Abbildung 24: TGA von Original, S03 und S21.

Die Thermogravimetrische Analyse (TGA) und die Differenzielle Thermoanalyse (DTA) sind zwei gängige Polymeranalysen. TGA misst die Gewichtsänderung einer Probe bei Erhitzung unter Sauerstoffzufuhr. Beim Verbrennen gibt eine Probe Energie ab und reduziert ihre Masse. DTA bestimmt den endothermen und exothermen Energieumsatz einer Probe beim Erwärmen. Man kann dadurch die Verbrennungsenergie, -temperatur sowie den Kunststoffanteil bestimmen. Auch können Glasübergangstemperatur und thermische Stabili-

tät untersucht werden. Die in einen Tiegel eingebrachte Probe wird beim Aufheizen bezüglich Temperatur und Masse gegen eine inerte Referenzmasse gemessen. Aufgrund der oxidativen Bedingungen an Luft im Ofen pyrolysiert die Probe. So ergeben sich Informationen zu organischen und anorganischen Gehäuse-Bestandteilen.

Für die TGA-Messungen wurden jeweils 15 mg Polymerpulver im Tiegel in das TGA-DTA-Gerät (Netzsch STA 409C) eingebracht. Die Aufheizung bis 650 °C erfolgte mit einer Rate von 10 K/min an Luft. Nach der TGA wurden die Restpulver mittels FTIR (Bio-Rad FTS 3000 Excalibur series) noch einmal analysiert.

Gemäß Abb. 24 ergibt sich jeweils ein charakteristischer Verlauf bei Originalen und Plagiaten. Bei allen drei Produkten bleibt nach der Pyrolyse ein unbrennbarer Rest übrig. Dies sind 21 % im Original und jeweils 13% in S03 und S21. Auch der Gradient des Gewichtsverlusts gibt Hinweise auf die Zusammensetzung: Der zwischen 300 und 400 °C geringere Gradient beim Original kann nach Literatur [32] auf die Flammhemmer TBBPA und  $Sb_2O_3$  zurückzuführen sein. ABS pyrolysiert bereits unter 400 °C, während Polycarbonat um bis 500°C stabil ist. Daher existiert ein Plateau zwischen 400 und 500 °C. Aus den Gewichtsänderungen kann man die Anteile an PC und ABS berechnen. Der Massenanteil an ABS ist im Original geringer und der an PC ist höher als in S03 und S21 (Tab. 14). Dies ist mit dem Ergebnis der FTIR-Analyse konsistent.

Tabelle 14: Mit TGA ermittelte Massenanteile an ABS, PC und anorganischem Pyrolyserest.

| Bestandteil | Original (%) | S03 (%)   | S21 (%)   |
|-------------|--------------|-----------|-----------|
| Rest        | 21,0 ±0,3    | 12,9 ±0,8 | 13,0 ±0,6 |
| ABS         | 48,5 ±0,1    | 69,4 ±0,6 | 69,4 ±0,8 |
| PC          | 30,5 ±0,3    | 17,7 ±0,2 | 17,6 ±0,4 |

Die DTA Ergebnisse streuen im Vergleich mit der TGA wesentlich stärker (Abb. 25). Der Peak der ABS-Verbrennung tritt um 350 °C im DTA-Diagramm des Originals auf, aber um 420 °C in den Fälschungen S03 und S21. Um 550 °C gibt es ein stark endothermes Signal der Pyrolyse von Polycarbonat bei allen Produkten. Der übrig bleibende Feststoffanteil wurde zum Vergleich mit FTIR weiter untersucht.

Die FTIR-Diagramme identifizieren Siliziumoxid in allen Proben und daran adsorbiertes Wasser. In den Spektren der Plagiate fehlt der Peak von  $Sb_2O_3$ . Das Fehlen der Flammhemmer ist konsistent mit den Ergebnissen der EDX-Analyse.

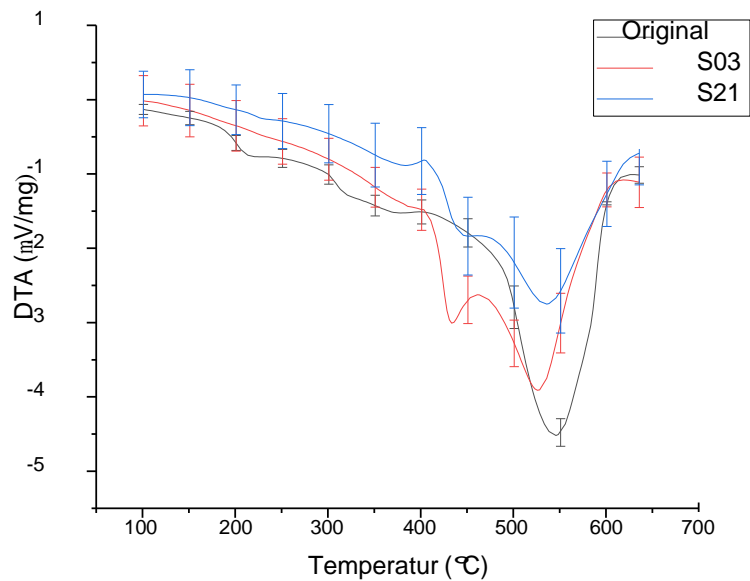


Abbildung 25: DTA von Original, S03 und S21.

Zusammenfassend sind die pyrolytischen Thermoanalysen TGA und DTA sehr gut geeignet, um technische Thermoplaste zwischen Original und Fälschungen zu unterscheiden. Die Massenänderungen bei der TGA erlauben darüber hinaus die quantitative Bestimmung von organischen, überwiegend polymeren, und anorganischen Bestandteilen. Durch Analyse der Rückstände mittels FTIR oder EDX können deren Stoffe dann genauer identifiziert werden als mit den gleichen Methoden an den Polymerbauteilen.

## 8.4 Mechanische Größen

### 8.4.1 Masse

In Abb. 9 sind die Röntgendurchstrahlungsaufnahmen des Spannungsreglers LM317EMP, einem Bauelement in der Bauform SOT223-4 dargestellt. Die Bauform ist nach JEDEC genormt [33], wobei die Dimensionen in engen Grenzen festgelegt sind. Die Masse wird daher im Wesentlichen vom inneren Aufbau, also durch die Konstruktion bestimmt. Die wesentlichen gewichtsrelevanten Elemente sind dabei der Siliziumchip, der Leadframe aus Kupfer, und die Moldmasse, welche primär aus Siliziumoxid und einem Epoxid-Duromer besteht. Dagegen tragen die Bonddrähte mit Durchmessern von 25  $\mu\text{m}$ , die Diebondschicht aus Epoxidklebstoff und die Verzinnung nur in geringem Umfang zur Masse bei.

Für die Untersuchung wurden Originalbauteile von der Firma Eltroplan beigelegt, ebenso eine Variante der Fälschungen. Ein weiteres Originalteil wurde von der Distributionsfirma RS Components bezogen, und eine Fälschung wurde über einen Lieferanten bei Ebay bezogen.

Die Bauteile wurden auf einer Hochpräzisions-Waage Wipotec MTC50/30-FS gewogen. Deren Messgenauigkeit für  $\Delta m=0$ , ist durch eine  $3\sigma$ -Streuung von  $\pm 5 \mu\text{g}$  charakterisiert. Der Stichprobenumfang war vier bis 10 Proben.



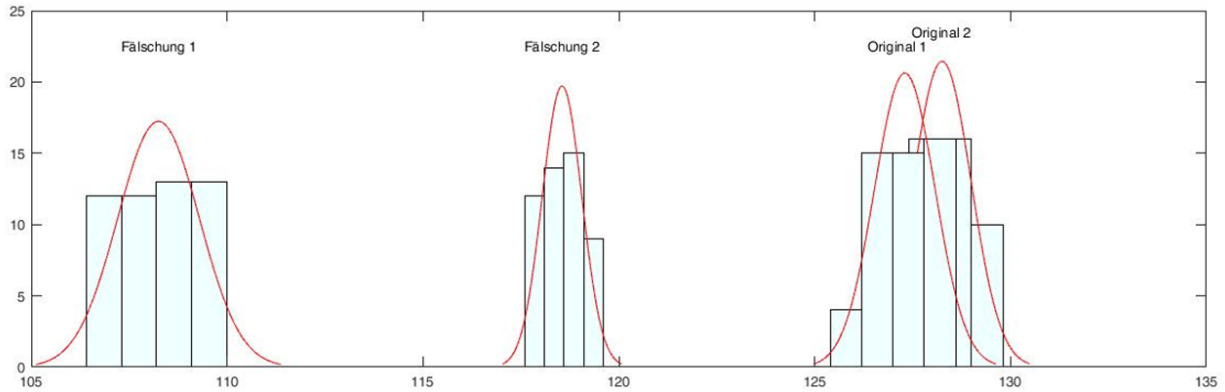


Abbildung 26: Verteilungsfunktionen der Massen der Spannungsregler LM317EMP im SOT223-Gehäuse an Originalen und Plagiaten. X-Achse: Masse in mg.

Die Ergebnisse sind in Abb. 26 und in Tab. 16 dargestellt. Die Massen der Plagiate sind deutlich kleiner als die der Originale. Während sich die Massen der beiden Originale um weniger als eine Standardabweichung von ca. 1,5 mg unterscheiden, liegen die Fälschungen um ca. 10 bis 20 mg darunter. Bemerkenswert ist, dass ein Plagiat eine deutlich höhere Standardabweichung von ca. 2 mg aufweist, während diese bei der zweiten Fälschung geringer als bei den Originalen ist.

Originale und Plagiate sind daher bereits bei graphischer Auftragung der Verteilungskurven hervorragend unterscheidbar. Dies wird auch durch die Auswertung mit dem Kolmogorov-Smirnow-Test bestätigt, in dem die Prüfwerte ein Maß für die Wahrscheinlichkeit der Gleichheit der verglichenen Lose darstellt.

Somit ergibt eine Bewertung des Merkmals Masse, dass diese eine hervorragend geeignete Messgröße ist, wenn die Übereinstimmung eines Prüfloses oder auch einer Einzelprobe gegeben ist. Die Merkmalsstreuung ist generell moderat. Dies liegt auch an der hohen Genauigkeit des Prüfmittels, einer Präzisionswaage, welches nur zu vernachlässigbar geringen absoluten Abweichungen und Streuungen beiträgt. Weiterhin sind sowohl die Investitionskosten als auch der Messaufwand gering, Proben müssen nicht präpariert werden, und sie sind weiterverwendbar. Zusammenfassend handelt es sich um ein kostengünstiges, effizientes Verfahren mit Eignung zur Authentifikation.

Tabelle 15: Masse der Spannungsregler LM317EMP im SOT223-Gehäuse. Vergleich von Mittelwerten und Standardabweichung an Originalen und Plagiaten.

| Probe                 | Mittlere Masse in mg | Standardabweichung in mg |
|-----------------------|----------------------|--------------------------|
| Original Eltroplan    | 127                  | 1,5                      |
| Original RSComponents | 128                  | 1,5                      |
| Fälschung 1           | 108                  | 2                        |
| Fälschung 2           | 118                  | 1                        |

Tabelle 16: Prüfwerte im Kolgomorow-Smirnow-Test zwischen unterschiedlichen Originalen und Plagiaten. Basis der Auswertung war die Messung der Masse gemäß Tab. 9.

| Test gegen          | Fälschung Ebay        | Fälschung Eltroplan   | Original RS Components |
|---------------------|-----------------------|-----------------------|------------------------|
| Original Eltroplan  | $1,72 \cdot 10^{-6}$  | $6,39 \cdot 10^{-6}$  | 0,0288                 |
| Fälschung Ebay      | -                     | $2,35 \cdot 10^{-16}$ | $6,85 \cdot 10^{-13}$  |
| Fälschung Eltroplan | $2,35 \cdot 10^{-16}$ | -                     | $1,48 \cdot 10^{-10}$  |

### 8.4.2 Geometrische Größen

An den als Original und Fälschung vorliegenden LM317EMP-Bauteilen wurden Breiten und Längen gemessen. Gemessen wurde mit der als VAW bereitgestellten Software NeuroCheck anhand optischer Größen mit einer Genauigkeit von 12 µm. Die Aufnahmen erfolgten mit der Farbkameraeinheit, die im Rahmen des Projektes angeschafft wurde. Erkennbar ist, dass die gefälschten Bauteile im Mittel um 2,7 % kleiner ausfallen als Originale. Erkennbar ist ebenfalls die Überschneidung der Verteilungen (Schwarz Originale, Blau Fälschung). Die Gehäusedimensionen streuen dabei in einer Bandbreite in der Größenordnung von etwa 100 µm, wobei sie bei beiden Losen eher gleichverteilt und bei den Originalen deutlich enger toleriert sind.

Insgesamt erscheinen Dimensionsmessungen auch als eine wirtschaftliche und schnelle Methode zur Prüfung auf Authentizität. Aufgrund des physikalischen Zusammenhangs sind die Längenmerkmale am besten mit der physikalischen Merkmalsgröße Gewicht zu kombinieren, die eine deutlich bessere Unterscheidbarkeit beziehungsweise messbare Diskrepanz aufzeigt. Hierbei ist auch zu sehen, dass die Erfassung mehrerer Größen nicht nur kombinatorisch eine höhere Detektionswahrscheinlichkeit ergibt, sondern dass auch die simultane Fälschung mehrerer Merkmale den Aufwand deutlich erhöht.

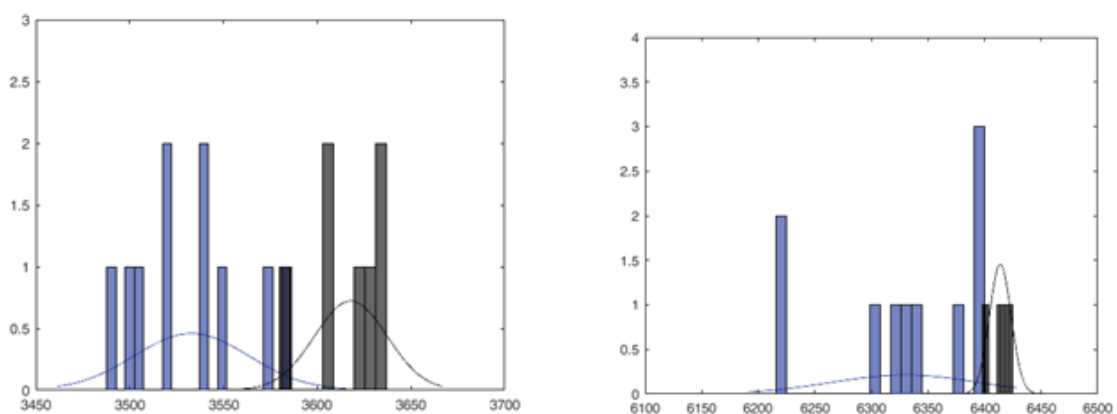


Abbildung 27: Streuungen der Längen (links) und Breiten (rechts) der Spannungsregler LM317EMP im SOT223-Gehäuse an Original und Plagiat. X-Achse: Dimension in µm.

## 8.5 Innere Merkmale (Röntgenanalyse)

Mithilfe der Untersuchungen mit Röntgendurchstrahlung sollten geklärt werden, in wieweit der innere Aufbau von Bauelementen Erkenntnisse über Unterschiede zu einem als Referenz aufgenommenen Originalbauteil ergibt. Für die Untersuchung wurden Originalbauteile der Firma Eltroplan und die beiden beschriebenen Varianten der Fälschungen untersucht. Die Proben (LM317EMP-Bauteile) wurden bei der Fa. Eltroplan mit einem industriüblichen Röntgengerät durchstrahlt. Die Auflösung der digitalen Bilder war 512 \* 512 Pixel.

### 8.5.1 Qualitative Bewertung

Der qualitative Vergleich der Röntgenbilder ergibt eine ganze Reihe von Merkmalen aus dem Package-Inneren, die quantitativ hieraus extrahierbar sind (Tab. 17).

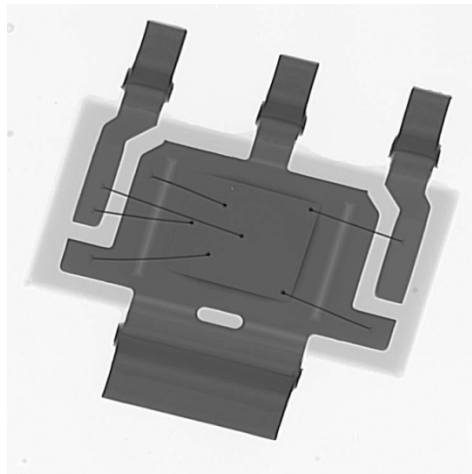


Abbildung 28: Röntgenaufnahme originaler LM317EMP.

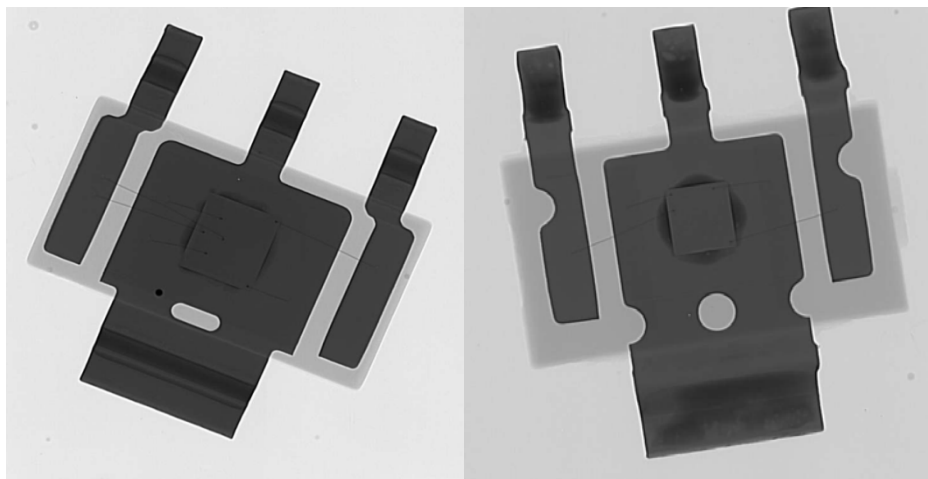


Abbildung 29: Röntgenaufnahmen gefälschter LM317EMP.

Tabelle 17: Übersicht von inneren Merkmalen von Bauelement- Package, die aus Röntgendurchstrahlungs-Aufnahmen extrahierbar sind.

| Packageelement       | Merkmal  | Anzahl           |
|----------------------|--|------------------|
| Leadframe zentral:   | Form, Breite, Länge,<br>Ankerloch: Form, Position X,Y, Durchmesser,                                  | 5                |
| Leadframes seitlich: | Länge, Breite, Ankerstrukturen links und rechts:<br>Vorhandensein, Position X,Y, Form, Länge, Breite | 8                |
| Chip:                | Länge, Breite, Zentralposition X, Zentralposition Y  | 4                |
| Bonddrähte:          | Anzahl, Durchmesser, je Bonddraht Startposition X,<br>Y, Endposition X,Y                             | 2 bis 26         |
| <b>Gesamt:</b>       |  | <b>19 bis 43</b> |

Die beobachteten Unterschiede sind auch quantifizierbar und die Ergebnisse können ähnlich verwendet werden, wie die Messungen von Masse und äußeren Dimensionen. Auch hier sind die Abweichungen zwischen den Dimensionen um mindestens eine Größenordnung größer als die Auflösung der Messung. Bei der vorliegenden Vergrößerung entspricht ein Pixel etwa 20  $\mu\text{m}$ , und dies wird hier auch als die Längenauflösung angenommen. Röntgendurchstrahlung ist auch in Übersichtsaufnahmen sehr gut geeignet, um auf Basis diskreter Längenverteilungen eine Klassifikation in Original und Fälschung vorzunehmen.

### 8.5.2 Identifikation von Bauelementen durch Deep-Learning-Ansätze

Die dargestellten Merkmale können mit Standardmethoden der Bildverarbeitung aus den Bilddateien extrahiert werden. Eine automatisierte Extraktion von Merkmalskennwerten ist mithilfe kommerzieller Software, beispielsweise dem Programm Neurocheck [34] möglich.

Im vorliegenden Fall sollte das KI-Konzept des Deep Learning erprobt werden, um Fälschungen in Losen von Bauteilen zu anhand von Röntgenbildern zu erkennen, bzw. um Originale und Fälschungen zu sortieren. Der Grundgedanke ist, Röntgenübersichtsaufnahmen von den Bauteilen zu erstellen und automatisiert auszuwerten. Derartige Bilder werden zu Trainingszwecken in ein Convolutional Neural Network (CNN) eingespeist. Ziel kann dabei eine Klassifizierung (Klasseneinteilung) oder ein Ranking nach Ähnlichkeit sein.

Erzeugung des CNN. Deep Learning mit CNN erfordert die Erzeugung von Netzwerken mit mehreren Lagen. Jeder Layer entspricht dabei einer bestimmten Operation in der Bildverarbeitung. Leider existieren keine verfügbaren kommerziellen Lösungen für die Aufgabenstellung. Es gibt jedoch eine Reihe von publizierten Open-Source-Beispielen, die sehr gut dokumentiert sind. Im vorliegenden Fall wurde ausschließlich solche frei verfügbare Software verwendet. Diese umfasste

- Python als Programmier- und Skriptsprache
- TensorFlow ist ein Programmierrahmen (Framework) für Python, speziell zur datenstromorientierten Programmierung. TensorFlow wird insbesondere im Bereich des maschinellen Lernens eingesetzt und als Open Source von Google bereitgestellt.

- Keras ist eine freie Softwarebibliothek für Python, speziell zum Deep-Learning in Verbindung mit TensorFlow.
- VGG16 ist ein Keras-Modell, das ein 16-lagiges Netzwerk zur Bilderkennung definiert. Dieses wurde von einem Team in dem Programmierwettbewerb ILSVRC-2014 erfolgreich eingesetzt [35].
- CUDA ist eine Programmierschnittstelle, die von der Fa. Nvidia bereitgestellt wird, um rechenintensive, paralisierbare Berechnungen auf dem Grafikprozessor (GPU) durchzuführen.

Im vorliegenden Fall wurde die Software auf einem leistungsfähigen PC mit GPU in einer Grafikkarte und großer Speicherausstattung installiert.

Die Trainingsphase hat die Aufgabe Bilddateien in Klassen einzuteilen, oder ein Ranking von Ähnlichkeiten aufzubauen. Wichtig sind dabei Merkmalsextraktion, Validierung und Berechnung der Trainingsgenauigkeit. Die Daten sollten dabei vorab aufbereitet werden, um eine gewisse Standardisierung der Eingabe zu ermöglichen. Weiterhin können die Bilddateien modifiziert werden, um mehr Eingabedateien in den Trainingsdaten zu erzeugen und damit eine größere Varianz abzudecken.

Sofern die Methode noch evaluiert und optimiert wird, ist es sinnvoll, die verfügbaren Bilddateien in Trainingsdatensätze und Testdaten zu splitten.

Das implementierte CNN mit dem Bildrankingmodell wurde zuerst mit Dateien aus dem image-Net getestet. Anschließend wurden 420 Röntgenbilder verfügbar gemacht, aus denen durch Bildverarbeitung 1680 Bilder generiert wurden. Bilder stammten von den Aufnahmen der LM317EMP-Bauteile bei Fa. Eltroplan. Während VGG16 ursprünglich mit 224 x 224 Pixel-RGB-Bildern arbeitet, wurden die Röntgenaufnahmen zunächst mit dem Format 256\*256 in Graustufen verarbeitet. In einer späteren Phase wurde die Originalauflösung von 512\*512 Pixel- Bildern genutzt, um die Genauigkeit zu erhöhen. In dieser Untersuchung wurden dann 800 Original-Bilder und 20 von Fälschungen eingesetzt.

In der Testphase werden Bilder gerankt, indem das trainierte Modell zur Vorhersage genutzt wird. Ein wesentliches Kriterium bei der Erkennung von Fälschungen ist die Erkennungssicherheit, Quote, mit der Plagiate erkannt werden. Hier ist ein möglichst hoher Wert nahe 100 % zu fordern. Die Erkennungssicherheit kann durch die Eingabe-Parameter beeinflusst werden. Im vorliegenden Fall gibt der Schwellwert einen normierten Euklidischen Abstand zwischen Eigenschaftsvektoren von Bildern an. In Abb. 30 ist erkennbar, dass bei geringen Einstellungen des Schwellwerts, die Erkennungssicherheit bei nahezu 100 % liegt. Der Komplementärwert wäre die Quote nicht erkannter Fälschungen, also der Fehler erster Art.

Leider führen derartige Einstellungen dazu, dass Originale kaum noch erkannt werden. Der Komplementärwert zur Erkennungsquote der Originale ist die Fehlalarmquote oder Pseudofehlerrate. Sie sagt als Fehler zweiter Art aus, welcher Anteil der Originale irrtümlich als gefälscht identifiziert wird. Dieser Kennwert steigt mit höher gewähltem Schwellwert an (Abb. 30).

Es ist anzustreben, dass bei einer optimalen Systemparametrisierung simultan hohe Erkennungsraten für beide, Fälschung und Original, erzielt werden. Die Höhe des Niveaus, auf dem sich beide Kurven schneiden, kann als Güte für das Prüfverfahren angesehen

werden. Entsprechend Tab. 18 liegt dieser Schnittpunkt bei etwa 89 %. Bei geringerer Bildauflösung von 256\*256 Pixeln ergibt sich ein Wert von ca. 87 %.

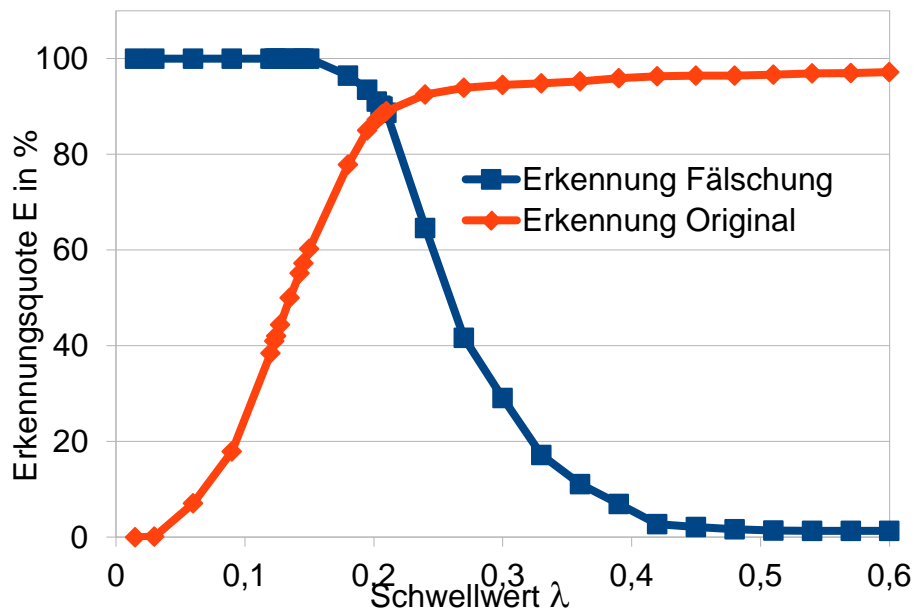


Abbildung 30: Erkennungssicherheit bezüglich Fälschung und Original beim Spannungsregler LM317EMP. Bilderkennung mit dem modifizierten CNN VGG16 an Röntgenaufnahmen.

Tabelle 18: Quote richtig erkannter Fälschungen und Originale bei Bilderkennung mit dem modifizierten CNN VGG16 an Röntgenaufnahmen des Spannungsreglers LM317EMP.

| Schwellewert | Erkennungsquote Fälschung | Erkennungsquote Original | Fehlalarmquote |
|--------------|---------------------------|--------------------------|----------------|
| 0,150        | 100,00                    | 60,3                     | 39,7           |
| 0,180        | 96,4                      | 77,8                     | 22,2           |
| 0,195        | 93,5                      | 85,0                     | 15,0           |
| 0,2025       | 91,0                      | 87,3                     | 12,7           |
| 0,2055       | 90,1                      | 88,1                     | 11,9           |
| 0,207        | 89,9                      | 88,4                     | 11,6           |
| 0,210        | 88,7                      | 89,0                     | 11,0           |
| 0,240        | 64,6                      | 92,5                     | 7,5            |

Der Einsatz der Röntgendurchstrahlung als qualitatives Verfahren zur Erkennung von Nonkonformität zeigt, dass diese Art der Bildgenerierung in Verbindung mit manueller Auswertung ein hervorragendes Potential aufweist, da es eine Vielzahl von gut erkennbaren Merkmalen gibt. Die Methode wurde nicht in Verbindung mit gängiger automatisierter Bildverarbeitung erprobt.

Der Ansatz, Originale und Fälschungen basierend auf Ansätzen des Deep Learning mit Convolutional Neural Networks zu klassifizieren, führte bereits bei einer beschränkten Anzahl an Trainingsbildern zu simultanen Erkennungs- und Fehlalarmquoten von fast 90 %. Dieser Wert muss jedoch insbesondere im Hinblick auf große Prüflose mit geringen

Fälschungsanteilen noch gesteigert werden. Dies war aber im Rahmen des vorliegenden Vorhabens nicht mehr möglich. Die Teiluntersuchung zeigt aber auch, dass KI-Methoden des Deep Learning mit CNN auch für KMU großes Potential bieten und mit beschränktem Aufwand implementiert werden können.

## 9 Identifikation mit digitalen Fingerabdrücken

### 9.1 Ziele

In diesem Abschnitt sollte systematisch untersucht und validiert werden, ob auf Basis indirekter Merkmale eindeutige Muster nachgewiesen werden können, mit denen eine Identifikation einzelner Individuen mit definierter Erkennungssicherheit möglich ist.

Dazu wurden mehrere Konzepte entwickelt:

- Für direkte Merkmale sollte geprüft werden, ob diese noch vorhandenen zufälligen Streuungen bestimmter Merkmale insgesamt zu einem „Fingerabdruck“ zusammengefasst werden können. Dies wurde am Beispiel der Streuung des X- und Y-Versatzes von diskreten Bauelementen, Chipwiderständen und Chipkondensatoren, geprüft.
- In analoger Weise sollten die charakteristischen Maße der Lotkugel auf BGA-Bauelementen, die ebenfalls direkte Merkmale darstellen, evaluiert werden.
- Es sollte erprobt werden, die Oberflächentopologie von Bauelementgehäusen, welche ein indirektes Merkmal darstellt, zu digitalisieren und das entstehende Bitmuster zur Identifikation heranzuziehen.
- Poren in Lötstellen sind ein typisches Beispiel indirekter Merkmale. Aus dem Porenmuster kann beispielsweise ein Vektor aus stetigen geometrischen Merkmalen wie Anzahl, Position und Größe gebildet werden. Dieser soll im Abgleich mit einem vorhandenen Porenmustern eine Identifikation erlauben.

Für diese Konzepte wurden theoretische Ansätze entwickelt, um „Fingerabdrücke“ zu erhalten und die Übereinstimmung mit Referenzdaten quantitativ zu prüfen.

#### 9.1.1 Bauteilversatz auf SMD-Platinen

Die Grundidee war, dass die Bestückung von SMD-Bauelementen auf Grund der begrenzten Genauigkeit Lagefehler der Bauelemente bewirkt. Von Bedeutung ist insbesondere der Versatz in X- und Y-Richtung in der Leiterplattenebene. Im vorliegenden Fall handelt es sich um ein direktes Merkmal. Der Versatz kann sowohl systematisch durch die Programmierung als auch stochastisch durch Fertigungstoleranzen variieren. Die Aufgabe war daher zu prüfen, ob die Versatzdaten einer hohen Anzahl von Bauelementen einen Fingerabdruck ergeben, der entweder zur eindeutigen Identifikation der Leiterplatte oder zu einer Authentifizierung, also einer Loszuordnung, führt.



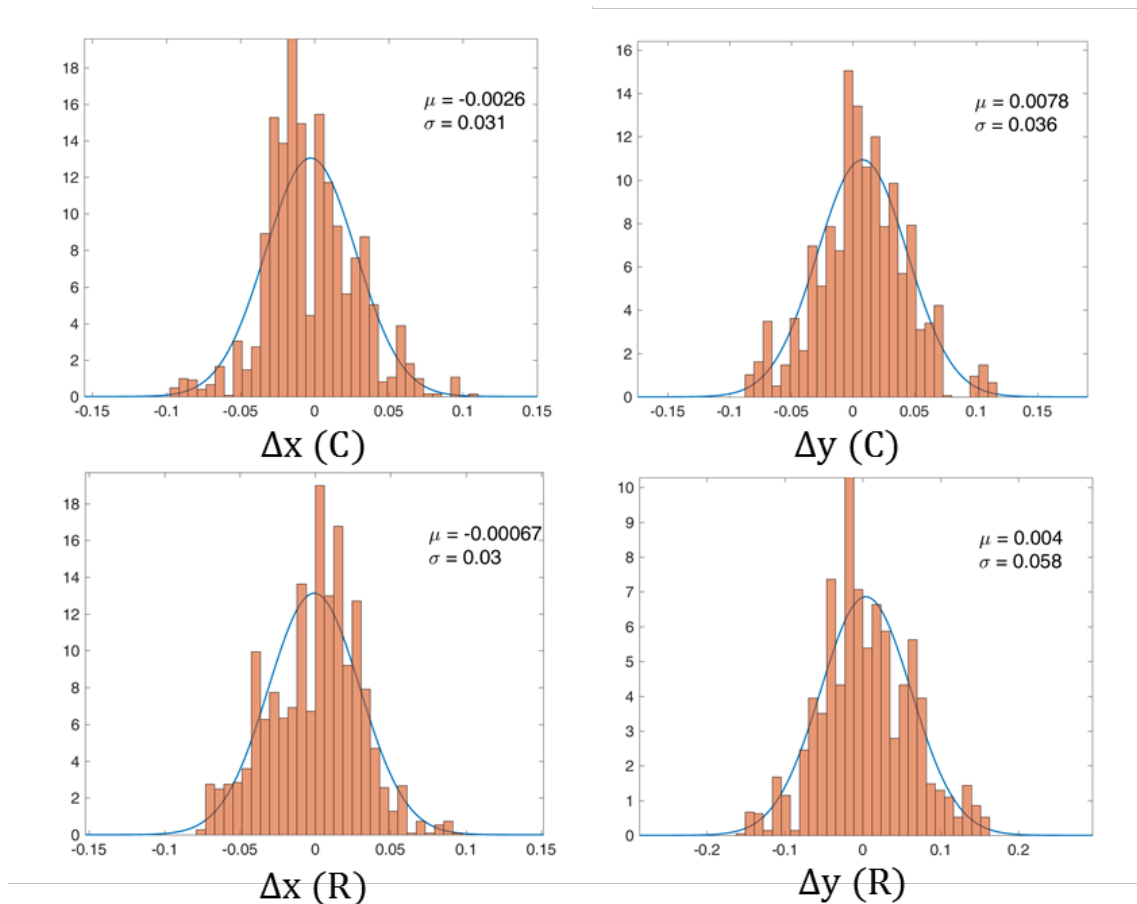


Abbildung 31: Streuung des Versatzes in x- und y-Richtungen von Kondensatoren und Widerständen bei wiederholten Messungen an derselben Platine. Angaben in mm.

Die Versuche wurden im Rahmen von VAW beim PA-Mitglied Binder Elektronik GmbH durchgeführt. Die für die Bestückungsversuche eingesetzten Automaten waren der Mydata MY19, für den Positionsvarianzen (x- und y-Versatz) von 25-69  $\mu\text{m}$  bei  $3\sigma$  spezifiziert waren, und der Mydata MY200, für den Positionsvarianzen von  $< 30 \mu\text{m}$  bei  $3\sigma$  spezifiziert sind. Der Bauteilversatz auf den Platinen wurde mittels AOI (Automatisierte Optische Inspektion) maschinell ermittelt. Die Spezifikation des Geräts, Yamaha YSi-V, ergab eine Auflösung von 7-18  $\mu\text{m}$  pro Kamerapixel. Es gab keine Angaben des AOI-Herstellers zur Messgenauigkeit. Ziel war zunächst die Identifikation von Platinen mit N Bauelementen mit Merkmalsvektoren der Art  $\vec{m} = (\Delta x_1, \Delta y_1, \dots, \Delta x_N, \Delta y_N)$

Der Versuch umfasste zwei Stufen, zunächst die Bestimmung der Messgenauigkeit durch Wiederholmessungen und dann die Bestimmung der Positioniergenauigkeit.

### Messgenauigkeit und Wiederholgenauigkeit des AOI

Eine Platine mit 119 Widerständen und 132 Kondensatoren wurde fünfzehnmal vermessen. Die Verteilungen sind in Abb. 3 dargestellt. Die Auswertung ergab für die Wiederholgenauigkeit der Messung folgendes Ergebnis:

$$\mu_{\Delta x,C}=0,0026 \text{ mm}, \mu_{\Delta y,C}=0,0078 \text{ mm}, \mu_{\Delta x,R}=0,0007 \text{ mm}, \mu_{\Delta y,R}=0,004 \text{ mm}$$

Die Bauelemente weichen im Mittel um +1 bis +8  $\mu\text{m}$  von der Sollposition ab.

$$\sigma_{\Delta x,C}=0,031 \text{ mm}, \sigma_{\Delta y,C}=0,036 \text{ mm}, \sigma_{\Delta x,R}=0,030 \text{ mm}, [\sigma_{\Delta y,R}=0,058 \text{ mm}]$$

Damit ergibt sich eine mittlere Standardabweichung der Messungen  $\bar{\sigma}_{mes} = 0,032 \text{ mm}$ , bzw.  $\bar{s} = 0,096 \text{ mm}$  ( $3\sigma$ ).

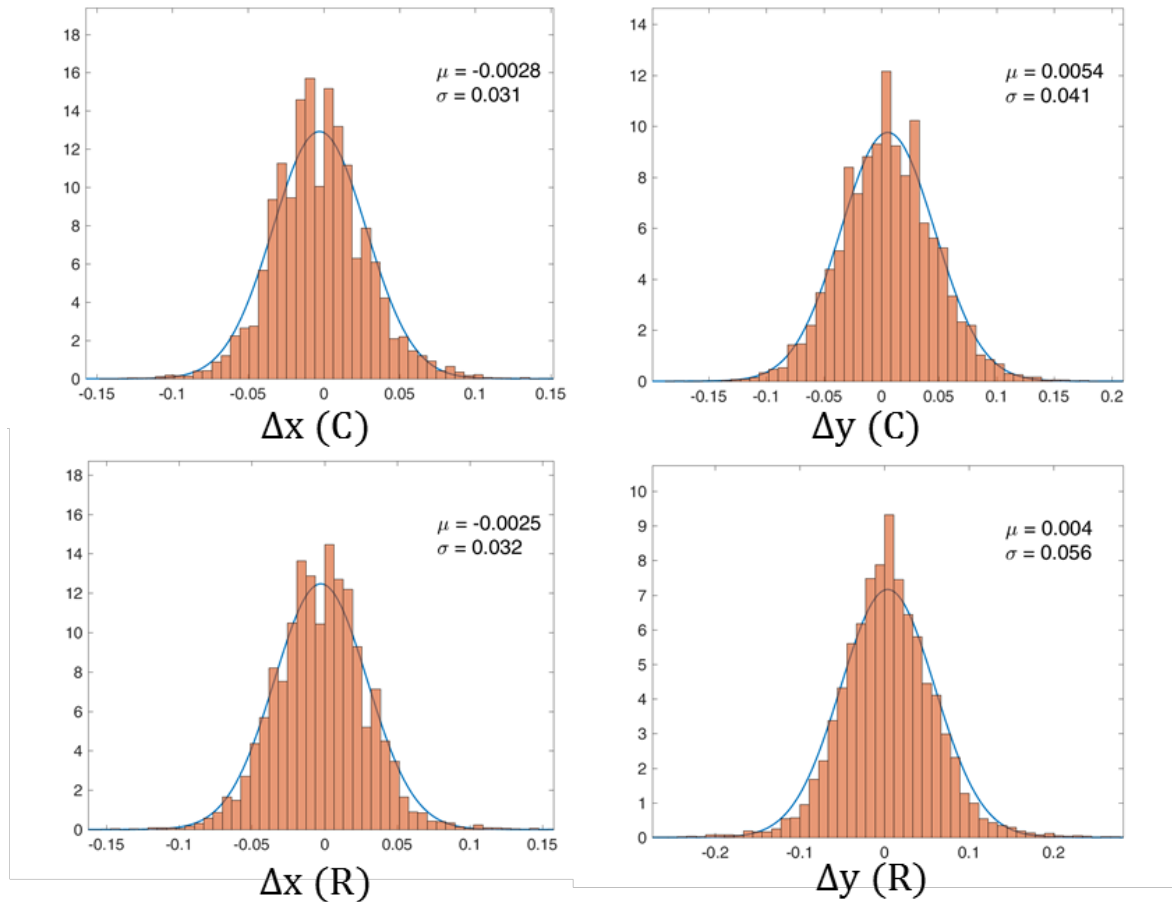


Abbildung 32: Streuung des Versatzes in x- und y-Richtungen von Kondensatoren und Widerständen bei Messungen an 100 Platinen mit 119 Widerständen und 132 Kondensatoren, Angaben in mm.

### Positioniergenauigkeit

Dazu wurden 100 Platinen mit 119 Widerständen und 132 Kondensatoren jeweils einmal vermessen. Die Ermittlung von X- und Y-Versatz von Kondensatoren und Widerständen erfolgte wie zuvor. Das Ergebnis war

$$\mu_{\Delta x,C} = -0,0028 \text{ mm}, \mu_{\Delta y,C} = 0,0054 \text{ mm}, \mu_{\Delta x,R} = -0,025 \text{ mm}, [\mu_{\Delta y,R} = 0,004 \text{ mm}]$$

Die mittlere Lageabweichung der Bauelemente lag danach bei  $-3 \mu\text{m}$  bis  $5 \mu\text{m}$ , Abb. 4.

$$\sigma_{\Delta x,C} = 0,031 \text{ mm}, \sigma_{\Delta y,C} = 0,041 \text{ mm}, \sigma_{\Delta x,R} = 0,032 \text{ mm}, [\sigma_{\Delta y,R} = 0,056 \text{ mm}]$$

Die Standardabweichungen betragen etwa das Zehnfache dieses Wertes und ergaben im Mittel  $\bar{\sigma}_{ges} = 0,034 \text{ mm}$ .

Nach der Regel, dass sich die Gesamtvarianzen als Quadrate der Streuungen aus Herstellung und Messung addieren, wurde die Standardabweichung der Bestückungs-

genauigkeit berechnet.

$$\overline{\sigma}_{best} = \sqrt{\overline{\sigma}_{ges}^2 - \overline{\sigma}^2} = 0,011 \text{ mm}, \quad s = 0,033 \text{ mm } (3\sigma)$$

### Bewertung

Die auf einer SMD-Linie nach dem Stand der Technik ermittelte Bestückungsgenauigkeit von  $33 \mu\text{m}$  ( $3\sigma$ ) steht in Übereinstimmung mit Herstellerangaben der Bestückungsautomaten. Dem gegenüber ist die Messungsgenauigkeit bei der Versatzmessung mit  $96 \mu\text{m}$  ( $3\sigma$ ) etwa um den Faktor Drei größer als die Streuung der zu messenden Größe. Die sogenannte „Goldene Regel der Messtechnik“ erfordert demgegenüber:  $s_{Messung} < \frac{1}{10} s_{Merkmal}$ . Die analoge bauteilbezogene Betrachtung der Mittelwerte und Streuungen bestätigt diese Ergebnisse und wird daher nicht separat dargestellt.

Eine Identifikation einzelner Baugruppen auf Basis der Lagestreuungen der Bauelemente ist daher nicht möglich.

Eine Authentifikation, also z.B. losbezogene Prüfung der Originalität erscheint jedoch mittels statistischer Tests durchführbar. Hierbei erwarten wir bei gefälschten Platinen insbesondere Abweichungen bei der Topologie und den Dimensionen des Layouts. Aufgrund des Fehlens entsprechender Plagiate konnten entsprechende Vergleiche nicht durchgeführt werden.

### 9.1.2 Geometrie von Lotkugeln auf Ball-Grid-Array-Bauelementen

Die SMD-Fertigungstechnik mit BGA erfordert, dass die Lotkugeln an den Bauelementen bereits eine sehr hohe Gleichförmigkeit von Geometrie und Lotmenge aufweisen. Frühere Untersuchungen hatten gezeigt, dass Durchmesser und Höhen der Lotkugeln normalverteilt sind. Es handelt sich dabei um direkte Merkmale. Wegen der hohen Anzahl an Lotkugeln von einigen Hundert sollte geprüft werden, ob diese Größen zur Erstellung von Fingerabdrücken zur Identifizierung geeignet sind.

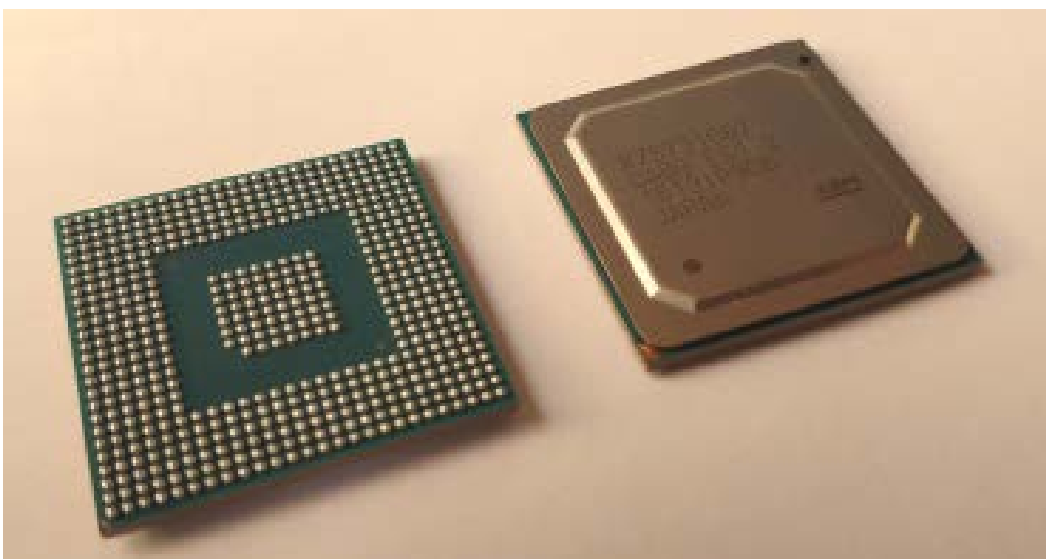


Abbildung 33: BGA563 von Videoprozessoren R7672 1067 zur Vermessung von Lotkugeln.

Für die Versuche wurden Kugelhöhen und Durchmessern von Videoprozessoren, Typ R76721067, mit je 563 Lotkugeln vermessen werden. Durchmesser  $d$  und Höhe  $h$  der Kugeln waren unbekannt und sollten ermittelt werden. Dabei erfolgte ein Vergleich verschiedener Messverfahren für die Geometrie. Damit sollte geprüft werden, ob das Messergebnis unabhängig vom Messverfahren ist.

- Konfokalprofilometer (Referenzverfahren)
- Digitalmikroskop mit automatisiertem Zusammensetzen mehrerer Bildebenen (Stitching)
- Lasertriangulationssensor

Mit dem Konfokalprofilometer sind nach Herstellerangaben Höhe und Durchmesser der Lotkugeln auf  $\pm 1 \mu\text{m}$  ( $3\sigma$ ) messbar. Das Polytec TopSens-CL4 hat einen Messpunkt-Durchmesser von  $12,3 \mu\text{m}$  und eine Genauigkeit von  $110 \text{ nm}$ . Da die Prüfzeit pro Kugel dabei 10 bis 100 min beträgt, wurde das Verfahren lediglich als Referenzverfahren mit hoher Messgenauigkeit betrachtet. Zur Verkürzung der Prüfzeiten wurden nur Stichproben von 83 Balls genommen. Es ergab sich für die

Höhe  $h = 457,0 \mu\text{m} \pm 24,9 \mu\text{m}$  ( $3\sigma$ ) und den

Durchmesser  $d = 644,69 \mu\text{m} \pm 19,92 \mu\text{m}$  ( $3\sigma$ )

Zur Bestimmung der Wiederholgenauigkeit wurde die Messung des Durchmessers einer Kugel sechsmal durchgeführt. Dies ergab eine Standardabweichung von  $\sigma=0,31 \mu\text{m}$  bzw. für  $3\sigma=0,93 \mu\text{m}$ . Messfehler entstehen jedoch durch Krümmung und Oberflächenreflexionen und die Ungenauigkeit der Referenzhöhe.

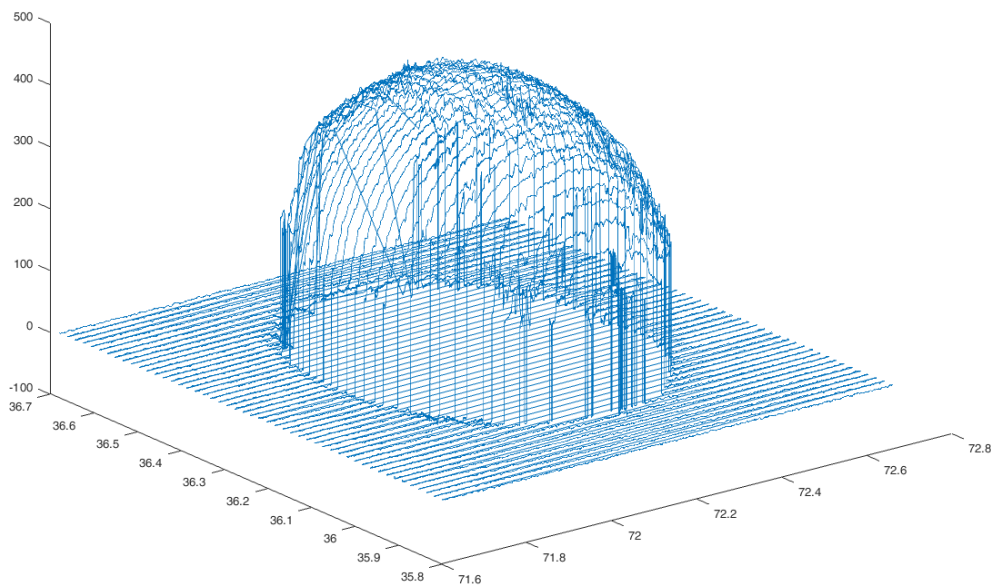


Abbildung 34: Dreidimensionale Darstellung der Lotkugelgeometrie von einem BGA563, gemessen mit einem Konfokalprofilometer. Angaben in mm.

Weiterhin wurden Höhe und Durchmesser von BGA-Kugeln mit dem Digitalmikroskop Zeiss Smartzoom 5 ermittelt. Das Gerät ist mit einer planaren Auflösung von  $\pm 5 \mu\text{m}$  spezifiziert; es

gab jedoch keine Angabe für Messgenauigkeit in z-Richtung. Durchmesser wurden sowohl aus 3d-Aufnahmen (Abb. 35) als auch aus 2d-Schnitten (Abb. 35 links unten) ermittelt.

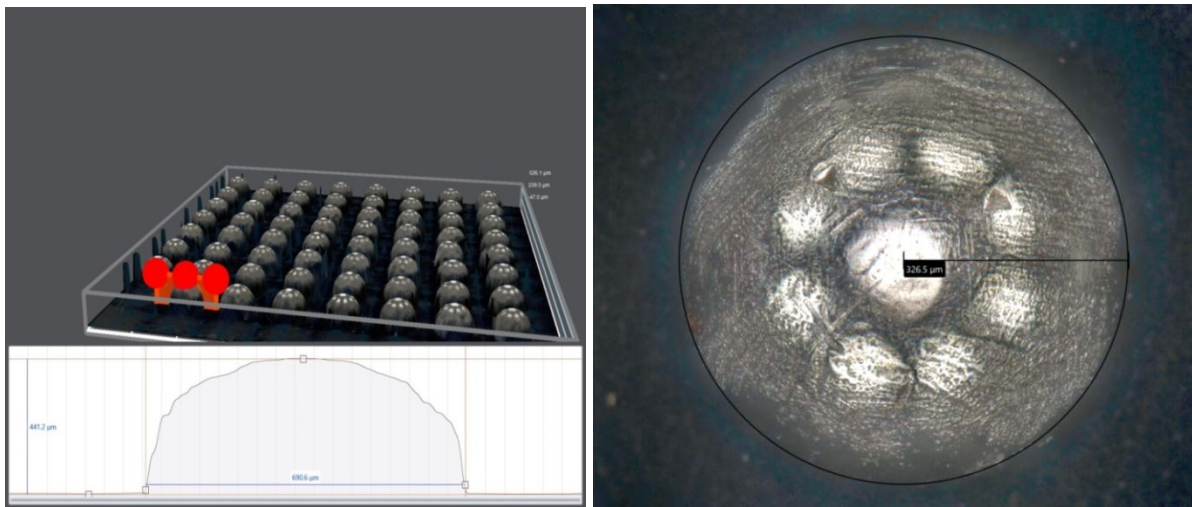


Abbildung 35: Dreidimensionale Übersicht der Lotkugel an einem BGA563 mit 2D-Querschnitt (links) und Aufsicht im Detail. Messung mit Digitalmikroskop Zeiss Smartzoom 5.

Tabelle 19: Mittelwerte und Standardabweichung der Höhen und Durchmesser der Lotkugeln an BGA-Bauelementen.

| Höhen  | Konfokalprofilometer | Mikroskop |
|--|----------------------|-----------|
| $\mu$ in $\mu\text{m}$                           | 457,0                | 441,3     |
| $\sigma / 3\sigma$ in $\mu\text{m}$              | 8,3 / 24,9           | 2,7       |
| Messstreuung $\sigma / 3\sigma$ in $\mu\text{m}$ | 0,3 / 0,9            | n.b.      |

| Durchmesser                            | Konfokalprofilometer | Mikroskop 3d | Mikroskop 2d |
|--|----------------------|--------------|--------------|
| $\mu$ in $\mu\text{m}$                 | 648,4                | 678,8        | 639,8        |
| $\sigma / 3\sigma$ in $\mu\text{m}$    | 7,4 / 22,2           | 20,4 / 61,2  | 5,8          |
| Messstreuung $\sigma$ in $\mu\text{m}$ | <1,0                 | n.b.         | ?2,0 ? 4,0   |

## Bewertung

Die Merkmale Durchmesser und Höhe von BGA Kugeln weisen eine moderate Merkmalsstreuung auf. Die an den Bauteilen beobachtete Standardabweichung bei Messung mit dem Profilometer liegt bei etwa 2 % des Höhenwerts, die Standardabweichung bei wiederholten Messungen bei 0,06 %. Dieses Kriterium alleine sollte das Messverfahren geeignet erscheinen lassen. Die Höhenmessung mit dem Digitalmikroskop führt zu einer Standardabweichung von etwa 0,6 % bzw. 2,7  $\mu\text{m}$ . Dieser Wert scheint generell als zu gering, um hierauf eine Identifikation aufzubauen. Gravierender ist jedoch, dass beide Messungen um ca. 16  $\mu\text{m}$ , entsprechend 3,6 % voneinander abweichen. Die Ursache hierfür ist unklar. Es zeigt jedoch, dass die Höhenmessung von BGA-Kugeln stark vom Messmittel abhängig ist.

Ähnliche Aussagen lassen sich für die Durchmesser treffen. Die absoluten Abweichungen der Mikroskopmessungen zum Profilometer betragen 4,5 % bzw. 1,5 % bei Standardabweichungen von 3 % bzw. 1 %. Auch hier lässt sich die Aussage treffen, dass diese Streuungen vermutlich in hohem Maße von der Messtechnik abhängig sind. Zudem sind die Dimensionen von BGA-Kugeln in hohem Maße kontrollierte und beherrschte Messgrößen, also direkte Merkmale. Insbesondere die Streuung der Höhe ist dabei kritisch für nachfolgende Prozessschritte.

Die Ergebnisse dieser stichprobenartigen Untersuchung führten jedoch zu der Schlussfolgerung, dass die Messung der Lotkugelgeometrie kein geeignetes Merkmal zur Identifikation einzelner BGA ist. Die Eignung zur Authentifizierung wurde mangels Vergleichsproben nicht geprüft. Hierfür stehen jedoch grundsätzlich dieselben Verfahren zur Verfügung wie für den SOT223-4 des vorangehenden Abschnitts.

Zusammenfassend lässt sich für unsere Untersuchung direkter Merkmale die Aussage treffen, dass weder die Streuungen der Bestückungsposition noch der BGA-Geometrie zur Identifikation mittels digitaler Fingerabdrücke geeignet sind, da die fertigungsbedingten Streuungen signifikant geringer sind als die Genauigkeit der zugehörigen Messungen.

## 9.2 Oberflächenstrukturen von Gerätegehäusen

Ausgegangen wird von kamerabasierten Verfahren zum Auslesen der Merkmale. Eine entsprechende hoch auflösende Kamera wurde im Rahmen des Vorhabens beschafft. Die Aufgabe besteht darin, zunächst mit Methoden der Mustererkennung aus den Bildern die für die Originalität relevanten Merkmalscharakteristika zu extrahieren, um diese im Weiteren algorithmisch zu einem digitalen Fingerabdruck zu verarbeiten. Bei der Software wurden etablierte Programme genutzt. Für die Bildaufnahme und die Merkmalsextraktion wurde das Programm des PA-Mitglieds NeuroCheck genutzt. Ergänzend kamen auch Open Source Programme wie ImageJ und eigene Algorithmen in Matlab bzw. Mathematica zum Einsatz.

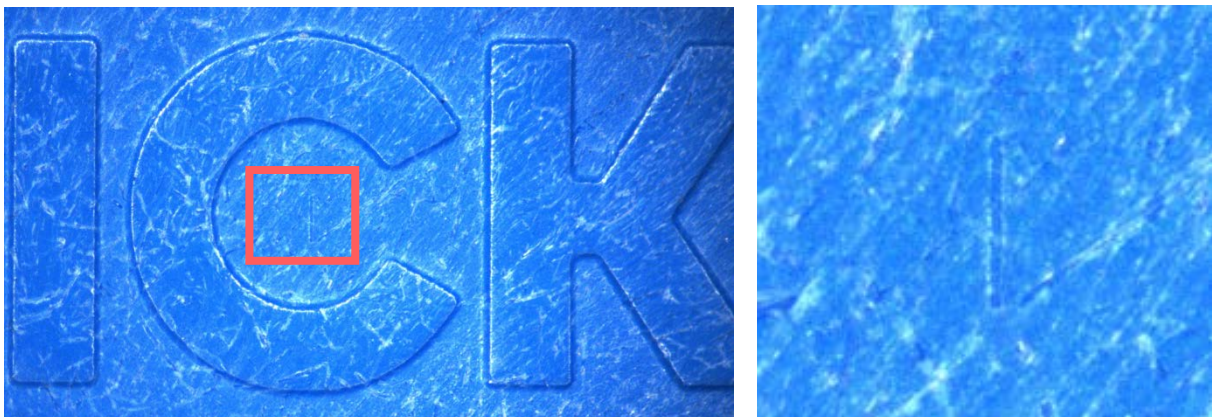


Abbildung 36: Oberflächentopologie auf den Spritzgussgehäusen von Sensoren GL6 der FA. Sick AG im Stereomikroskop. Links: Übersicht, rechts Ausschnitt.

Zur Extraktion von digitalen Fingerabdrücken aus den Daten wird auf das in AP1 festgelegte Produkt, die Lichtschranke GL6 der Fa. Sick zurückgegriffen. Dieses Arbeitspaket soll aus

der bestehenden Vielzahl an Möglichkeiten zur Informationsgenerierung diejenigen herausheben, die für die jeweiligen Merkmale besonders geeignet sind. Dabei werden grundlegende Erkenntnisse über die notwendige Qualität der Daten erwartet, welche an einer unabhängigen Alternative bestätigt werden.

Bei der Untersuchung der Strukturen auf Oberflächen von spritzgegossenen GL6-Sensoren im Hinblick auf Identifikation ist zunächst die präzise Ermittlung von Referenzflächen notwendig. Im Rahmen des Vorhabens wurden dazu aus Gründen der Reproduzierbarkeit Referenzmarkierungen mit dem UV-Laser aufgebracht. Diese Methode liefert sehr zuverlässige Ergebnisse bezüglich der Erfassung der Referenzfläche und wurde für alle folgenden Untersuchungen verwendet. In der endgültigen Anwendung ist dies nicht mehr möglich. Hier sollen dann inhärent vorhandene Landmarken wie etwa die Beschriftung die Referenzflächen zur Generierung von „Fingerprints“ definieren. Die Positionserkennung erfordert jedoch noch einigen Forschungsaufwand.

Großen Einfluss hat die Wahl und Ausgestaltung der Probenbelichtung. Direkte Belichtung hat aufgrund der beschränkten Justiergenauigkeit und durch den Glasfaseranteil der Probenoberfläche wechselnde Lichtreflexe verursacht. Um diese Fehlerquelle zu eliminieren wurde zunächst eine diffuse Beleuchtungseinheit beschafft und erprobt. Alternativ wurden Versuche mit Dunkelfeld, also seitlich streifender Beleuchtung, durchgeführt.

Einen weiteren Freiheitsgrad stellt die algorithmische Merkmalsextraktion aus den Referenzflächen dar. Die zugehörigen Algorithmen werden eigens als Software-Plugins programmiert und in NeuroCheck eingebunden. Favorisiert wurde eine KMU-gerechte einfache Methode, die Aufnahmen in ein Grauwertbild zu überführen und anschließend mittels Schwellwerten in einen binären QR-Code (Abb. 37). Für die QR-Codes wurden Inter- und Intra-Abstände entsprechend der zugehörigen mathematischen Grundlagen in der Anlage ermittelt und überprüft, ob eine Identifikation prinzipiell möglich ist. In einem Los von 20 Bauteilen konnte mit dieser Methode jedes Individuum identifiziert werden.

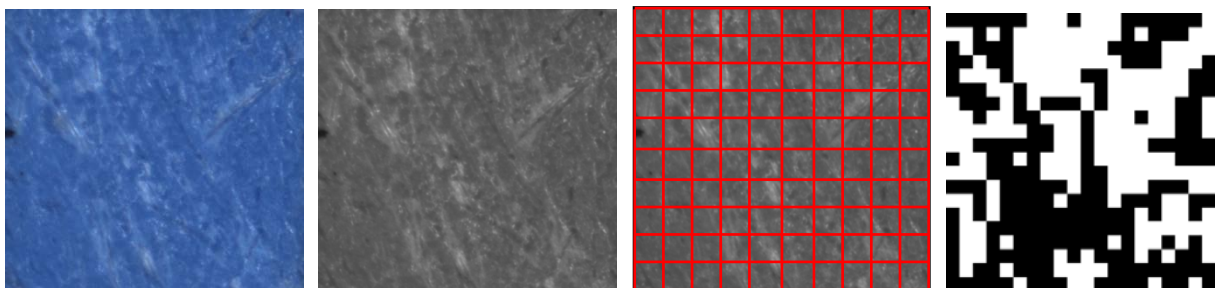


Abbildung 37: Schrittweise Umsetzung der Abbildung der Oberflächentopologie auf Spritzgussgehäusen von Sensoren in einen QR-Code.

Als weitere Option wurden Objekterkennungsalgorithmen recherchiert. Einen interessanten Ansatz stellt die kürzlich vom Fraunhofer IPM mitentwickelte Methode zum in-line Tracking von Bauteilen in Produktionsflüssen dar. Diese ermöglicht eine individuelle Wiedererkennung, also Identifikation. Die Tracking-Technologie nutzt die individuellen mikroskopischen Oberflächenstrukturen oder Farbtexturen der Teile in zuvor definierten Bereichen. Aus den hoch aufgelösten Bildern wird „eine numerische Kennung errechnet und einer ID

zugeordnet“ [32]. Diese wird zusammen mit weiteren Produkt- und Herstellungsdaten in einer Datenbank hinterlegt. Zur Identifizierung im Produktionsfluss werden dann erneut Bilder aufgenommen und codiert. Eine Datenbankabfrage liefert dann die ID des Bauteils zurück.

Das Identifikationsverfahren „T4Q“ war im Rahmen des AIF-IGF-Vorhabens [IPM2] entwickelt worden. Es erfüllt im Wesentlichen die hier gestellten Anforderungen an Identifikation. Es ist auch entsprechend publiziert und transferiert worden. Von daher wurde auf eine weitere eigene Beschäftigung mit der Trackingtechnik verzichtet.

### 9.3 Poren in Lötstellen

Poren sind indirekte Merkmale, deren Entstehung teilweise von einigen steuerbaren Einflußgrößen und auch von diversen Störgrößen im Prozess abhängt. Grundsätzlich sind jedoch Anzahl, Ort und Größe von individuellen Poren zufällig. Demnach sind Poren typische indirekte Merkmale. Der maximale Porengehalt und die maximale Porengröße werden daher von diversen Regelwerken reglementiert. Somit ist die Fehlerprüfung auf Poren mithilfe der Röntgendurchstrahlung eine etablierte Methode, welche auch durch den hohen Bildkontrast der Fehlstellen im Lot und die resultierende gute Visualisierbarkeit begünstigt wird.

In diesem Arbeitspaket sollte die Möglichkeit zur Erstellung von Fingerabdrücken auf Basis von Röntgenbildern evaluiert werden. Im Gegensatz zur produktionsbegleitenden Fehlerprüfung erfordert die Identifikation von Baugruppen auf Basis von Porenabbildungen keine 100 %-Prüfung aller Lötstellen, sondern wenige reichen hierzu aus.

Im Vorhaben ETRACE wurden daher Röntgenaufnahmen von Platinen des Typs GL6 der Firma Sick durchstrahlt.

- Dazu wurden in einem gewählten Bildausschnitt von Lötstellen mit hohem Kontrast mit quadratische Referenzflächen festgelegt.
- Die Angabe absoluter Dimensionen ist in Röntgenaufnahmen wegen Parallaxe und Vergrößerung nicht trivial. Daher erfolgte hier eine Normierung Längen auf die Seitenlänge  $a$  des Pads. Somit ergibt sich eine wertebereich von 0 bis 1.
- Welche topologische Merkmale der Poren erfasst werden, ist weitgehend dem Anwender überlassen. Mehr Merkmale ergeben einen höher Dimensionalen Merkmalsvektor.
- Im vorliegenden Fall erfolgte die Erfassung der Schwerpunktskoordinaten der drei größten Poren.
- Damit ergibt sich der Merkmalsvektor  $m_X = (r_{x,1}, r_{x,2}, r_{x,3}, r_{y,1}, r_{y,2}, r_{y,3})$



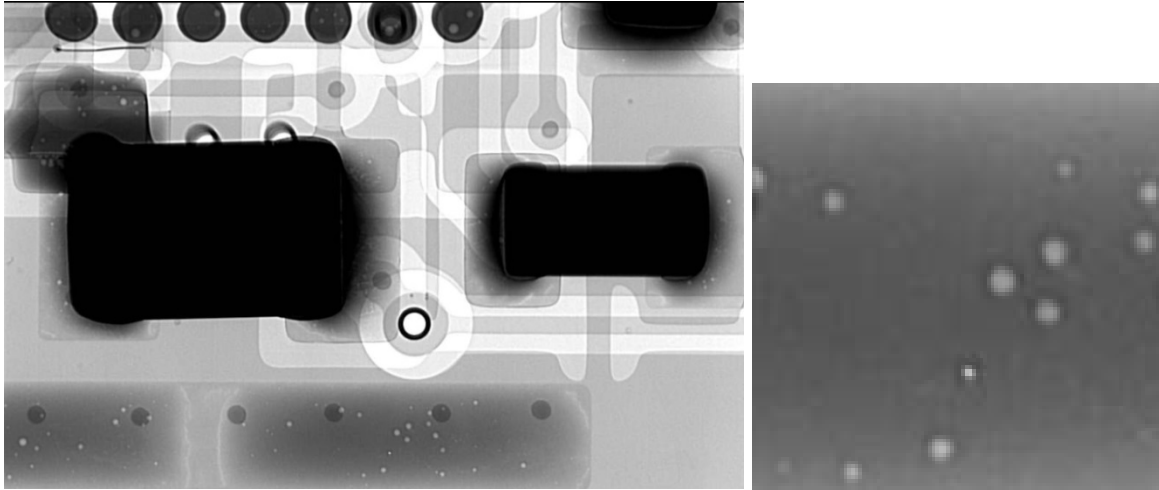


Abbildung 38: Abbildung von Poren in der Röntgendurchstrahlung von Lötstellen in Sensor-Baugruppen.

Bereits mit diesem relativ gering dimensionierten Vektor ergibt sich ein Verhältnis von

$$\frac{\overline{d_{inter}}}{d_{intra}} \approx 1300$$

Dieser Wert ist auch im Vergleich zu den anderen, im Rahmen dieser Arbeit beobachteten Verhältnissen hoch. Das bedeutet, dass die Unterscheidung von Merkmalsvektoren praktisch nicht durch Messunsicherheiten beeinträchtigt wird. Hierdurch ergibt sich ein hervorragendes Potential, Röntgenbilder von Poren zur Generierung von Fingerabdrücken zu nutzen.

Entsprechend den Ausführungen im Anhang ergibt sich, dass der mittlere Abstand  $\overline{d_{inter}}$  ungefähr mit der Wurzel der Dimension  $N$  wächst, während die Streuung nahezu konstant bleibt. Dies bedeutet, dass durch die Erweiterung der Merkmalsvektoren, beispielsweise um die Porengröße, eine weitere Verbesserung der Unterscheidbarkeit erreicht werden kann.

Wegen der insgesamt hohen Zahl der untersuchten Verfahren war es leider nicht möglich, vertiefte empirische Untersuchungen mit einer erhöhten Stichprobenanzahl durchzuführen.

## 10 Leitfaden zur Nutzung von Authentifizierungs- und Identifikationsverfahren

### 10.1 Bewertung der Authentifizierungsverfahren

Die Sicherheit der entwickelten Authentifizierung gegen Fälschung wird anhand von mehreren zusammenhängenden Parametern bewertet: Dies sind die Merkmalseigenschaften, deren Varianz und die statistische Bewertung. Hierfür kommen statistische Tests wie der t-Test oder der Chi-Quadratstest infrage. Hieraus ergeben sich Erkenntnisse über die Erkennungssicherheit und die Pseudofehlerquote des jeweiligen Authentifizierungsverfahrens.

Bei der Bewertung ist das erste Kriterium die Tauglichkeit des Verfahrens, d.h. die Frage ob die Unterschiede zwischen einer Referenz und einem Prüfling so groß sind, dass trotz Streuung eine Diskriminierung sicher möglich ist. Hierzu sollte die Differenz des Merkmals gegen das Original groß und die Standardabweichung der Messung klein sein, Tab. 20. Daneben spielt noch der Messfehler eine Rolle, d.h. die absolute Genauigkeit mit der ein Merkmal bestimmt werden kann.

Zwei weitere wesentliche Kriterien sind der Investitionsaufwand für die zugehörige Messtechnik und der Messaufwand. Letzter bestimmt im Wesentlichen die variablen Kosten und er berücksichtigt Aspekte wie den präparativen Aufwand, den Durchsatz und die Automatisierbarkeit. Von großer Bedeutung für die Prüfstrategie ist auch die Frage, ob es sich um eine zerstörungsfreie Prüfung (zfP) handelt. So spielt es bei größeren Losen sicher keine Rolle, ob ein geringer Anteil an Proben zur Authentifizierung verbraucht wird. Dagegen kann der Verlust von Teilen bei kleineren Chargen ein Ausschlusskriterium darstellen.

Im Folgenden werden die betrachteten Authentifizierungsmethoden einzeln betrachtet.

**Farbmessungen** und visuelle Beurteilungen sind im Prinzip gut geeignet, um auch geringe Unterschiede im direkten Farbvergleich zu erkennen. Allerdings hat sich gezeigt, dass Gehäusefarben trotz nachweislich unterschiedlicher Farbstoffarten nahezu perfekt fälschbar sind. Zudem erfordert der Farbvergleich bei Herstellern und Abnehmern eine hohe absolute Genauigkeit, die nur durch aufwändige Messgeräte zu gewährleisten sind (Tab. 20).

Mithilfe des **Absorptionsspektrometers** waren mit Ausnahme einer einzigen Wellenlänge keine Unterschiede nachweisbar. Ähnliche Aussagen lassen sich für die visuellen und UV-Anteile der Spektren auch bei Betrachtung von **Reflexionsspektren** treffen. Im nahen Infrarotbereich ergaben sich jedoch breitbandig sehr große Unterschiede der reflektierten Spektren. Von daher kann man aus Unterschieden zumindest auf Fälschungsverdacht schließen.

Ähnliche Aussagen lassen sich treffen, wenn spezifisch angeregte Schwingungsenergien mittels **Raman-Spektrometer** ausgewertet werden. Insgesamt ist das Raman-Verfahren allerdings aufwändig. Eine gravierende Einschränkung sehen wir auch darin, dass es nicht möglich war, ein auswertbares Ramanspektrum des Originals zu messen.

Eine stoffliche Analyse von polymeren und Verbundwerkstoffen mit **FTIR** ist bereits seit langem Stand der Technik. Die von Herstellern angegebene Möglichkeit zur Identifikation

von Materialien auf Basis einer umfassenden Bibliothek kann als glaubhaft angesehen werden. Im vorliegenden Fall konnte aus damit erzeugten Spektren auch die polymere Zusammensetzung abgeschätzt werden. FTIR-Spektren scheinen auch mit vertretbarem Aufwand nicht fälschbar zu sein. Die Transmissions-Variante ist jedoch zerstörend und präparativ aufwändig. FTIR in Reflexion erbrachte keine verwertbaren Ergebnisse.

Trotz grundsätzlich unterschiedlicher Messprinzipien können **Thermoanalysen** (Thermogravimetrie und Kalorimetrie) bis hin zur Pyrolyse bezüglich Vor- und Nachteilen ähnlich bewertet werden wie die FTIR. Thermoanalysen sind apparativ und präparativ aufwändig und zerstörend. Sofern unterschiedliche Materialien verwendet wurden, so ist dies eindeutig nachweisbar und der Gehalt an anorganischen Füllstoffen kann nach der thermischen Zersetzung gut quantifiziert werden.

Ein weiteres gut geeignetes Verfahren zu Bestimmung der Zusammensetzung ist die **Röntgenspektroskopie**, entweder bei Anregung mit dem Elektronenstrahl im Rasterelektronenmikroskop (**EDX**) oder bei Fluoreszenzanregung mit dem Röntgenstrahl (**RFA**). Beide Methoden können alle Elemente oberhalb einer Ordnungszahl von  $Z=10$  hoch genau quantifizieren. Beobachtet wurde beispielsweise, dass Gehäusematerialien an Fälschungen andere oder keine Elemente zur Flammhemmung (Brom, Antimonoxid) enthalten, oder dass unzulässige bleihaltige Lote verwendet wurden. Mit den Analysen ist es möglich, mehrere Messstellen nebeneinander zu prüfen. In der Regel sind Proben nach dem Test verloren.

Ein hervorragendes Verfahren zur quantitativen Merkmalerfassung ist das **Wiegen**. Die Gewichts- bzw. **Massemessung** zeichnet sich durch hohe absolute Genauigkeit und geringe Messmittelstreuung aus, dass auch geringe Unterschiede als signifikant bewertet werden können. Zudem erfordert das Verfahren weder hohe Investitionen noch irgendwelche Präparation, und es ist gut automatisierbar. Grundsätzlich erscheint es möglich, dass Fälscher die Masse von Bauelementen auf den Wert des Originals „trimmen“. Dies ist jedoch insbesondere logistisch aufwändig und beschränkt andere Design-Freiheitsgrade.

Obwohl Bauelementabmessungen typabhängig genormt sind, wurden Unterschiede beobachtet. Die Streuungen waren deutlich größer als bei der Masse, und die Abweichungen der Mittelwerte lagen innerhalb der Streubereiche. Die **Erfassung der Geometrie** von Bauteilen erscheint zielführend, wenn Stichproben und nicht nur Einzelproben geprüft werden. Zudem sollten die gleichen Prüfverfahren beim Hersteller und bei der Verifikationsabfrage eingesetzt werden. Vorteil der äußeren Geometriemessung ist, dass an den Bauteilen sehr viele Parameter (Länge, Breite, Höhe) genutzt werden können.

Sehr universell einsetzbar ist die Vermessung von Dimensionen der Bauteile im Inneren. Mit **Röntgendurchstrahlung** werden digitale Bilder erzeugt, welche mit Standardmethoden der Bildauswertung vermessen werden können. Die meisten Elemente, welche ein Bauteil ausmachen, erzeugen einen signifikanten Kontrast. Auch wenn nur zweidimensionale Röntgendurchstrahlung angewendet wird, können sehr viele innere geometrische Merkmale mit einer absoluten Genauigkeit von etwa einem Prozent erfasst werden. Insgesamt möchten wir das Verfahren als eine Standardmethode empfehlen. Röntgengeräte sind inzwischen sehr kostengünstig, ebenso Software zur automatisierten Bildvermessung. Das Verfahren ist zerstörungsfrei und auch automatisierbar. Daher kann man Röntgen als Referenzmethode ansehen.

## 10.2 Einführung einer Authentifizierung

Die im Vorhaben ETRACE gewonnenen Erkenntnisse werden in einem kurzen „Leitfaden zur Absicherung der Lieferkette mit Hilfe intrinsischer Merkmale“ bei der Originalitätsprüfung zusammengefasst. In dieser Untersuchung hat sich gezeigt, dass beispielsweise die Masse und die äußeren Abmessungen von Bauelementen und Geräten sehr gut geeignete Merkmale sind. Bei der Implementierung der Originaldaten ist es nicht notwendig alle hergestellten Einheiten 100 % zu prüfen. Es ist lediglich erforderlich, sicherzustellen, dass nicht durch unterschiedliche Chargen, Zukaufteile oder Herstellungsmaschinen systematische Abweichungen generiert werden. Zugleich ist es von großem Vorteil wenn das zum Merkmal gehörige Messverfahren eine hohe absolute Genauigkeit (Messfehler) erlaubt.

Die Nutzung nur einer physikalischen Größe ist zur Absicherung nicht ausreichend, da diese in der Regel leicht reproduziert werden kann. Dies gilt beispielsweise für Farbe, Masse oder Dimensionen. Wenn mehrere dieser Größen im Zusammenhang stehen, so haben Fälscher in der Regel weder Freiheitsgrade noch Ressourcen, um alle Größen auf die Werte der Originale zu trimmen. Durch kombinatorische Betrachtung kann auch die Wahrscheinlichkeit einer Fehlentscheidung (Nichterkenntnis von Fälschung) verringert werden. So kann die Irrtumswahrscheinlichkeit je Prüfstufe multiplikativ verringert werden.

Die Außendimensionen sind direkte Merkmale, und als solche zumindest bei Bauelementen genormt. In diesem Fall sind sie nur bedingt zur Originalitätsprüfung geeignet. Im Gegensatz dazu sind innere Abmessungen in der Regel für den Designer frei. Fälschungen von Bauelementen weisen signifikant andere verdeckte Geometriemerkmale auf. Deren Messung ist sehr gut an Röntgenaufnahmen möglich. Die Erfassung von Absolutwerten gelingt entweder unter standardisierten Durchleuchtungsbedingungen (Proben- und Detektorabstand zur Anode), oder wenn charakteristische Außendimensionen als Referenz genommen werden.

Röntgenbilder repräsentativer Proben können ebenso wie daraus entnommene charakteristische Dimensionen in einer Original-Datenbank abgelegt werden. Da aus den Röntgenbildern effizient eine hohe Anzahl von schnell erfassbaren Charakteristika ( $\gg 10$ ) entnommen werden kann, sollten diese auch weitestgehend genutzt und hinterlegt werden. Dies ist eine Aufgabe für den Hersteller der elektronischen Bauteile. Dabei ist generell die Angabe von Mittelwerten, Standardabweichungen und Prüfumfang notwendig, wenn die Wahrscheinlichkeit einer Fälschung abgeschätzt werden soll.

Der Empfänger der Ware muss zur Prüfung der Originalität die gleichen Untersuchungsverfahren verfügbar haben, wie der Lieferant. Dies bedeutet im vorliegenden Fall, dass er Waage, Längenmessmittel und ein Röntgensystem zur Verfügung hat. Im Hinblick auf hohe Effizienz bietet sich ein stufenweises Vorgehen an: Zunächst sollten mehrere einfach messbare, jedoch nicht unabhängig fälschbare Größen erfasst werden. Sobald sich dabei Hinweise auf Nichtkonformität ergeben, kann beispielsweise vertieft mit Röntgentechnik geprüft werden.

In der Regel sind die dabei offensichtlichen Abweichungen geeignet, um eine sichere Prognose über die Wahrscheinlichkeit von Fälschung zu treffen. In diesem Fall sind weitergehende Untersuchungen mit den oben beschriebenen analytischen Methoden, insbesondere auch FTIR und RFA anzuwenden.

| <b>Merkmal</b>   | <b>Farbe</b>   | <b>Reflektionsspektrum<br/>(Reflektanz)</b>         | <b>Charakteristische<br/>Schwingungs<br/>energien</b> | <b>IR-Spektrum</b>  | <b>Thermoanalyse<br/>TGA, DSC</b>                |
|--|--|---|---|---|--|
| <b>Merkmalsabweichungen O-F<br/>Varianz d. M.<br/>Messfehler</b> | Sehr gering<br><br>Gering<br>Gering                          | Sehr gering<br><br>Gering                           | Sehr gering<br><br>Gering                             | Sehr gering<br><br>Gering   | Sehr gering<br><br>Mittel                        |
| <b>Messtechnik</b>   | Farbspektrometer,<br>visuell<br>Kamera                       | Spektrometer<br>Wellenlängen abhängige<br>Reflexion | Ramanspektrometer                                     | FTIR  | Gewichtsverlust<br>Exothermie                    |
| <b>Zerstörungsfrei</b>   | Ja   | Ja  | Nein  | Nein  | Nein   |
| <b>Mess-<br/>aufwand</b>   | Sehr gering bis<br>gering                                    | Moderat   | Sehr hoch   | Transmission: Hoch<br>Reflexion: gering                             | Mittel   |
| <b>Geräteaufwand</b>   | Gering bis<br>Hoch   | Hoch  | Moderat/<br>Hoch                                      | Hoch  | Hoch   |
| <b>Eignung zur<br/>Authentifikation</b>                          | -  | ✓   | ✓   | ✓   | ✓  |
| <b>Bemerkung</b>   | Exakter Farbton ist<br>offensichtlich sehr gut<br>fälschbar- | Abweichung gibt<br>Hinweis auf<br>Nichtoriginalität | Abweichung gibt<br>Hinweis auf<br>Nichtoriginalität   | FTIR ist nur in<br>Transmission als<br>Referenzmethode<br>anzusehen | Abweichung gibt Hinweis<br>auf Nichtoriginalität |

Tabelle 20: Bewertung von Verfahren zur Authentifizierung von Bauteilen.

Schlussbericht zu IGF-Vorhaben 18683 N: ETRACE

| <b>Merkmal</b>                          | <b>Chemische Zusammensetzung</b>  | <b>Masse</b>  | <b>Dimensionen Außen</b> | <b>Dimensionen im Inneren</b>                                    |
|---|---|---|--------------------------|--|
| <b>Merkmalsabweichungen O-F</b>         | Signifikant   | Signifikant   | Signifikant              | Signifikant  |
| <b>Varianz</b>                          |   | Mitte   | Mittel                   | Hoch   |
| <b>Messfehler</b>                       | Gering  | Sehr geringl  | Gering                   | Gering   |
| <b>Messtechnik</b>                      | Röntgenfluoreszenz XRF<br>Energiedispersive<br>Röntgenspektroskopie EDX | Präzisions-<br>waage  | Optisch<br>mechanisch    | 2D-Röntgen<br>(Röntgentomografie)                                |
| <b>Zerstörungsfrei</b>                  | Bedingt   | Ja  | Ja                       | Ja   |
| <b>Mess-<br/>aufwand</b>                | Groß  | Gering  | Gering bis<br>mittel     | Mittel bis<br>sehr hoch  |
| <b>Geräteaufwand</b>                    | Hoch  | Gering/<br>Moderat  | Gering bis<br>mittel     | Mittel bis<br>sehr hoch  |
| <b>Eignung zur<br/>Authentifikation</b> | ✓   | ✓   | ✓                        | ✓  |
| <b>Bemerkung</b>                        | XRF ist Referenzmethode für<br>Anorganika                               | Einfaches schnelles Verfahren<br>Kombination mit anderen<br>Methoden! |                          | Referenzmethode,<br>auch als Einzelverfahren,<br>automatisierbar |

Tabelle 20, Fortsetzung: Bewertung von Verfahren zur Authentifizierung von Bauteilen.

## 10.3 Bewertung der Identifikationsverfahren

Neben der Bewertung der Erkennungssicherheit werden die Prüfgeschwindigkeit bzw. die Wirtschaftlichkeit der Verfahren betrachtet und gehen in die Beurteilung der Eignung von den Merkmalen mit ein.

Wenn **Durchmesser oder Höhe von Lot-Kugeln auf BGA-Bauelementen** zur Erstellung von Fingerabdrücken verwendet werden, so erlaubt dies im Prinzip die Erstellung von Breiten- oder Höhenprofilen jeweils mit einigen hundert Stützstellen. Der hohen Anzahl der Datenpunkte steht gegenüber, dass es sich um direkte Merkmale handelt, welche in der Fertigung mit hohem Aufwand hin zu geringen Streuungen optimiert wurden. Leider ergab die Messung mit unterschiedlichen Verfahren keine konsistenten Ergebnisse. Messungen mit Profilometer, Messmikroskop oder Laser-Triangulation waren weder bezüglich der Mittelwerte noch bezüglich der Streuungen konsistent. Zudem ist bei einigen Verfahren der apparative Aufwand hoch und die Messzeit sehr lang. Daher war im Rahmen von ETRACE eine verfahrensunabhängige Absolutmessung der Ballhöhenverteilungen zu Identifikationszwecken nicht möglich (Tab. 21).

Ähnliche Aussagen lassen sich für das ebenfalls direkte, prozesstechnisch sehr gut kontrollierte Merkmal **Bauelementversatz** treffen. Automatisierte optische Inspektion AOI ist ein schnelles und sicheres Verfahren. Da die Streuungen der Messung aber offensichtlich höher sind als die Positionsabweichungen der Bauelemente war das Merkmal nicht zur Erstellung digitaler Fingerabdrücke geeignet.

Im Gegensatz zu den zuvor geprüften sind **Poren in Lötstellen** indirekte, nicht kontrollierte Merkmale. Ihr Potential für die Erzeugung digitaler Fingerabdrücke wurde durch die Untersuchung bestätigt. Es existieren zwar eine Reihe von Verfahren zur Abbildung und Vermessung innerer Fehler in Bauelementen bzw. in deren Lötstellen. Unter Aspekten wie Wirtschaftlichkeit, Prüfgeschwindigkeit und Einfachheit der Anwendung ist dabei die Röntgendurchstrahlung (Radiography) herausragend. Weiterhin kann die Röntgentechnik gleichermaßen für Bauelemente, Leiterplatten-Baugruppen und Geräte sogar in der Verpackung angewendet werden, ohne dass eine Zerlegung notwendig ist. Somit ist das Verfahren zerstörungsfrei und Teile können weiterverarbeitet werden.

In ähnlicher Weise können die **Oberflächenstrukturen von Spritzgussbauteilen** bzw. gemoldeten Bauteilen herangezogen werden, deren Entstehung ebenfalls weitestgehend unkontrolliert ist. Das anzuwendende Prüfverfahren umfasst im Wesentlichen ein **Kamerasystem**, eine geeignete Beleuchtung und eine **automatisierte Bildauswertung**. Für diese können kommerzielle Lösungen herangezogen werden, welche eventuell noch an die Prüfaufgabe zu adaptieren sind. Insgesamt ist das Verfahren somit wenig kapitalintensiv, schnell und sicher in seiner Aussage. Nachteil ist die Beschränkung auf visuell zugängliche Flächen.

| <b>Merkmal</b>   | <b>Durchmesser/Höhe<br/>BGA-Kugeln<br/>Direkt</b>   | <b>Bauteilversatz<br/>Direkt</b>  | <b>Poren in<br/>Lötstellen<br/>Indirekt</b>                                    | <b>Oberflächen-<br/>strukturen<br/>Indirekt</b>                 |
|--|---|---|--|---|
| <b>Merkmalsabweichungen<br/>O-F<br/>Varianz<br/>Messfehler</b> | Moderat<br><br>Gering<br>Mittel   | Gering<br><br>Gering<br>Mittel  | Sehr groß<br><br>Groß<br>Gering  | Sehr groß   |
| <b>Messtechnik</b>   | Profilometer<br>Mikroskop<br>Triangulation  | Automatisierte<br>optische<br>Inspektion (AOI)  | Röntgen-<br>durchstrahlung<br>Bildverarbeitung                                 | Kamera oder<br>Mikroskop<br>Bildverarbeitung                    |
| <b>Zerstörungsfrei</b>   | Ja  | Ja  | Ja   | Ja  |
| <b>Messaufwand</b>   | Sehr groß<br>Groß<br>Moderat  | Mittel  | Gering   | Gering  |
| <b>Geräteaufwand</b>   | Hoch<br>Hoch<br>Moderat   | Hoch  | Moderat bis<br>hoch  | Moderat   |
| <b>Eignung zur<br/>Identifikation</b>                          | Nein  | Nein  | Gut  | Gut   |
| <b>Bemerkung</b>   | Verfahrensunabhängige<br>Absolutmessung der<br>Ballhöhen- und<br>Breitenverteilungen<br>war nicht möglich | Bestückgenauigkeit,<br>höher als Messge-<br>nauigkeit verhindert<br>Mustererkennung zur<br>Identifikation | Verfahren ist mit visueller<br>und mit automatisierter<br>Inspektion anwendbar | Aussage stützt sich auf<br>Untersuchungen des<br>Fraunhofer IPM |

Tabelle 21, Bewertung von Verfahren zur Identifikation von Bauteilen.



# 11 Einschätzung der Forschungsergebnisse

## 11.1 Erreichung der wiss.-technischen Ziele

Die folgenden wissenschaftlich-technischen Ziele wurden erreicht:

- Im Rahmen des Vorhabens wurde eine Vielzahl von Merkmalen als Prüfkriterien zur Originalitätsprüfung (Authentifikation) und zur individuellen Identifikation von elektronischer Hardware identifiziert.
- Diese Merkmale wurden systematisch den vier relevanten Integrationsebenen der Elektronik zugeordnet. Zu den Merkmalen wurden Prüfverfahren gefunden, und bewertet, wobei der Schwerpunkt auf einer hohen Erkennungssicherheit lag.
- Im Hinblick auf Originalitätsprüfungen sind statistisch abgesicherte, einfache Methoden wie Wiegen oder geometrisch Vermessen sehr wirkungsvoll, da sich hierbei Abweichungen zeigen, die weit über den Merkmalsstreuungen liegen.
- Insbesondere die quantitative Auswertung von Röntgendurchstrahlungsbildern kann auch bei einfacher 2D-Durchleuchtung eine sehr sichere Überprüfung gewährleisten.
- Einige der optischen Verfahren, die im Wellenlängenbereich von UV bis NIR arbeiten, können eine Zuordnung der Materialoriginalität sicherstellen. Sie sind jedoch allesamt präparativ aufwändig und kapitalintensiv. Die bereits sehr gut etablierte FTIR kann hier als Referenzmethode angesehen werden.
- Im Hinblick auf die Bestimmung von absoluten Materialzusammensetzungen sind röntgenspektroskopische Methoden wie EDX und XRF hoch genau und vor allem für anorganische Komponenten sehr gut geeignet.
- Die Treffsicherheit und Wahrscheinlichkeit der Originalitätsprüfung kann durch Kombination mehrerer einfacher Verfahren wie Wiegen und Längenmessung, also durch Prinzip-Redundanz, deutlich erhöht werden.
- Im Hinblick auf die Identifikation von Einzelproben wurden verschiedene Methoden zur Erstellung von digitalen Fingerabdrücken bewertet.
- Identifikationsmethoden, die auf direkte Merkmale, insbesondere auf Dimensionen und Lagepositionen abzielen, erwiesen sich als ungeeignet, da einerseits die Merkmalstreuungen gering und andererseits die Messmitteltreuungen vergleichsweise hoch sind. Dies entspricht sehr stark „verrauschten“ Fingerabdrücken.
- Im Gegensatz dazu zeigen optische und röntgenoptische Verfahren, die auf indirekte, nicht im Herstellprozess steuerbare Merkmale, wie Oberflächenrauheit oder Poren, abzielen, ein hervorragendes Potential zur Identifikation von Individuen elektronischer Bauelemente.

## 11.2 Erreichung der wirtschaftlichen Ziele

Die folgenden wirtschaftlichen Ziele wurden erreicht:

Der wesentliche angestrebte Nutzen des Vorhabens für KMU besteht darin, dass es damit gelingen kann, Zulieferketten zwischen Herstellern und Endabnehmern gegen die Einschleusung von gefälschter Ware abzusichern. Wesentlicher Vorteil der hier vorgestellten Methode ist die Tatsache, dass es nicht notwendig, ist Markierungen oder Codierungen an den Bauteilen anzubringen, welche ebenfalls gefälscht werden können und zusätzliche Kosten verursachen. Im Gegensatz dazu ergeben sich die genutzten indirekten Merkmale aus natürlichen Prozess- und Materialfluktuationen, und es ist meist nicht möglich diese synthetisch zu generieren. Dies ist insbesondere für die eindeutige Identifikation von Einzelteilen von Bedeutung. Speziell im Hinblick auf die Originalitätsprüfung von Losen und Chargen existieren jedoch auch einige gut nutzbare direkte Merkmale, die statistisch ausgewertet werden können.

Die Forschungsergebnisse versetzen kooperierende Lieferanten und ihre Endabnehmer in die Lage, redundant auch zu komplexen Zulieferketten elektronische Produkte auf ihre Originalität und Identität zu überprüfen, und nicht-konforme Teile zu identifizieren.

Wirtschaftliche Vorteile ergeben sich zunächst für den Abnehmer, der den Erwerb wertloser Produkte und mögliche Folgekosten bis hin zu Schadensersatzforderungen vermeidet. Zudem erfordert die unternehmerische Sorgfalt auch die Einbeziehung von Zukaufteilen in ein geeignetes Qualitätsmanagement. Nach unserer Ansicht können die Ergebnisse des Vorhabens zu einer Realisierung eines solchen Einkaufsmanagements beitragen

KMU als Lieferanten können so ihre Produkte auch über komplexe Marktstrukturen hinweg gegen Folgekosten durch Fälschung schützen. Die betrifft Aspekte Imageschaden, und unberechtigte Gewährleistungsansprüchen und deren Abwehr. Somit kann die Wettbewerbsfähigkeit von KMU sowohl auf der Abnehmerseite als auf der Lieferantenseite wesentlich verbessert werden.

## 11.3 Ergebnistransfer in die Wirtschaft

### 11.3.1 Ergebnistransfer während der Projektlaufzeit

| Maßnahme  | Ziel  | Rahmen  | Datum/Zeitraum   |
|---|---|---|--|
| Interaktion:<br>Vorstellung der Ergebnisse an den projektbegleitenden Ausschuss | Abstimmung der Versuchsplanung und Projektausrichtung;<br>Berücksichtigung von Anregungen und Wünschen des PA<br><br>Ggf. Diskussion über mögl. Probleme<br><br>Abstimmung über VAW durch den PA  | Sitzungen zur Präsentation der Ergebnisse im PA ETRACE;<br><br>Diskussion und Abstimmung über weitere Vorgehensweise  | 07.03.2017<br>11.12.2017<br>12.06.2018<br>23.01.2019<br>05.06.2019<br><br><b>Erfolgt</b>   |
| Forschungsreport  | Fortschrittsbericht, Festlegungen, Abstimmungen   | FV Elektrotechnik beim ZVEI   | jährlich<br><b>Berichterstattung nach Projektende</b>  |
| Projekt- und Ergebnisvorstellung an Fachtagungen                                | Vorstellung von Projektvorhaben und Ergebnissen;<br>Aufzeigen von industriellen Einsatzmöglichkeiten, Ergebnispräsentation  | Publikation, Tagungsbeiträge und Vorträge an wissenschaftlichen Tagungen  | 20.02.2018<br>EBL2018<br>26.06.2018<br>SMTA 2018<br><b>Erfolgt</b>   |
| Übernahme der Ergebnisse in die akademische Lehre                               | Einbindung der Ergebnisse und Methoden in studentische Ausbildung<br><br>Ergebnisse werden in den Wissensschatz der Studenten aufgenommen und gewinnbringend an späteren Arbeitsplätzen angewandt | HiWi-Tätigkeiten<br><br>Vertiefungs- und Forschungspraktika im Studiengang „Functional Materials“<br><br>Masterarbeit:<br>„Charakterisierung chemischer und physikalischer Eigenschaften von originalen und plagiierten Gehäusematerialien“<br><br>Vorlesungsbeitrag zu „Advanced assembly and packaging“ | 01.01.2017 bis 30.6.2019<br><b>Erfolgt</b><br><br>01.02.2018 bis 31.03.2018<br><b>Erfolgt</b><br><br>01.09.2018 bis 28.02.2019<br><b>Weitere geplant</b><br><br>SS2017<br>SS2018<br>SS2019<br><b>Erfolgt</b> |

### 11.3.2 Geplanter Ergebnistransfer nach Abschluss des Vorhabens

| Maßnahme   | Ziel  | Rahmen                                    | Datum/<br>Zeitraum                      |
|--|---|---|---|
| Abschluss- und Forschungsbericht, gedruckt und elektronisch: | Zusammenstellung und vertiefte Darstellung der Forschungsergebnisse | Freiburger Dokumentenserver, TIB Hannover | 03/2020<br><b>Erfolgt nach Freigabe</b> |
| Veröffentlichung in Fachzeitschriften                        | Ergebnistransfer in die Wirtschaft                                  | PLUS, Mechatronik, Elektronik             | Bis 06/2020<br><b>Geplant</b>           |
| Forschungsreport   | Fortschrittsbericht, Festlegungen, Abstimmungen                     | FV Elektrotechnik beim ZVEI               | Bis 06/2020<br><b>Geplant</b>           |

Die Forschungsstelle schätzt die Realisierbarkeit dieses Transferkonzepts nach Abschluss des Vorhabens als gut ein. Sowohl die Forschungsstelle als auch die Forschungsvereinigung Elektrotechnik beim ZVEI publizieren standardmäßig die Forschungsberichte in elektronischer Form auf ihren jeweiligen Dokumentenservern und geben diese zum Download frei. Darüber hinaus befindet sich auch die Veröffentlichung in einer branchenspezifischen Fachzeitschrift in Vorbereitung.

Auf Basis dieses Transferkonzepts ist auch eine industrielle Umsetzung der Ergebnisse zur Anwendung auf existierende Lieferketten in Reichweite. Innerhalb von etwa einem Jahr könnten dabei für ein Ziel-KMU spezifische Anforderungen gemeinsam von KMU und Forschungsstelle herausgearbeitet werden. Anschließend könnte innerhalb eines Jahres die Implementierung erfolgen.

## 12 Anhang: Statistische Methoden

### 12.1 Wahrscheinlichkeit der Gleichheit zweier Merkmale

Im Rahmen von ETRACE existiert folgende Aufgabe: Ein Merkmal wird vermessen, einmal die Referenzmessungen beim Lieferanten und einmal die Überprüfungsmessung beim Abnehmer. Es ist zu untersuchen, ob die Unterschiede statistisch signifikant sind und wie hoch die Wahrscheinlichkeit der Aussage, also das Vertrauensniveau ist.

Zur statistischen Prüfung der Gleichheit zweier Stichproben ist die Gleichheit der Mittelwerte. Für die diesbezügliche statistische Prüfung existieren eine Reihe von Tests, beispielsweise der t-Test auf Basis der Studentverteilung, oder für den Fall von mehr als zwei Stichproben die ANOVA (Analysis of Variance). Das folgende, vereinfachte Verfahren nutzt die Normalverteilung:

Zwei Verteilungen beispielsweise von Originalen und Fälschungen sind charakterisiert durch Mittelwerte  $\bar{\mu}_1$  bzw.  $\bar{\mu}_2$  und Standardabweichungen  $\sigma_1$  und  $\sigma_2$  sowie jeweils den Stichprobenumfang  $n$ . Die Differenz der Mittelwerte ist  $d = \mu_1 - \mu_2$  und die resultierende Gesamtstreuung  $s = \sqrt{(\sigma_1^2 + \sigma_2^2)/n}$ .

Wir sind an der Wahrscheinlichkeit interessiert, mit der die Aussage zu Gleichheit oder Differenz der Stichprobenmittelwerte gilt. Dabei sind  $\alpha$  und  $\beta$  die Irrtumswahrscheinlichkeiten bei der Prüfung der Hypothese. Dazu werden nun Hilfsgrößen gebildet, für  $\mu_1 < \mu_2$ , welche Gültigkeitsbereiche für die Mittelwerte definieren. Darin ist  $u$  der Wert der Standard-Normalverteilung.

$$z_1 = \mu_1 + u_{1-\alpha} \cdot s_1 = \mu_1 + u_{1-\alpha} \cdot \sqrt{\frac{\sigma_1^2 + \sigma_2^2}{n}} \quad \text{und} \quad z_2 = \mu_2 + u_{1-\beta} \cdot s_2 = \mu_2 - u_{1-\beta} \cdot \sqrt{\frac{\sigma_1^2 + \sigma_2^2}{n}}$$

Überlappen sich die Bereiche nicht, so kann von der Unterschiedlichkeit der Mittelwerte ausgegangen werden. Für eine Differenz  $d = \mu_1 - \mu_2$ , kann man als Grenzwert eine Irrtumswahrscheinlichkeit  $\alpha$  ermitteln, wenn  $z_1 - z_2 = 0$ . Für größeren Stichprobenumfang kann nutzt man die Normalverteilung als Sonderfall der Studentverteilung ( $f \geq 5$ ,  $n > 6$  bis 8).

Für  $z_1 = z_2$  und unter Annahme von  $\alpha = \beta$  führt erhält man  $u_{1-\alpha} = \frac{\sqrt{n} \cdot (\mu_1 - \mu_2)}{2 \cdot \sqrt{(\sigma_1^2 + \sigma_2^2)}}$ .

Der entsprechende  $\alpha$ -Wert der Irrtumswahrscheinlichkeit kann der tabellierten Standard-Normalverteilung oder einer Tabellenkalkulation entnommen werden.

In analoger Weise kann auch mit der Studentverteilung gerechnet werden. Die statistische Sicherheit wird bei allen mathematisch-statistischen Auswertungen als Vorgabe benötigt, so auch für die Durchführung von t-Tests mit der sog. Student-Verteilung. Hier braucht man dann die Anzahl der Freiheitsgrade  $f$ , die je nach Art des Test  $f = n-1$  bis  $f = n-3$  beträgt.

## 12.2 Boolesche Verknüpfungen mehrerer Messungen

Es werden Messungen mit  $n$  unterschiedlichen Verfahren zur Fälschungsprüfung durchgeführt, von denen jede eine Wahrscheinlichkeit  $p_i$  hat, dass sie die Fälschung nachweist, und die Wahrscheinlichkeit  $1-p_i$ , dass sie die Fälschung NICHT nachweist.

- Als Wahrscheinlichkeit des Nachweises der Fälschung wird hier das Vertrauensniveau  $1-\alpha$  beim obigen Statistischen Test auf Nichtübereinstimmung zwischen Original und Prüfobjekt genommen.
- Als Wahrscheinlichkeit, dass es sich um keine Fälschung handelt wird das Signifikanzniveau  $\alpha$  beim Statistischen Test auf Nichtübereinstimmung zwischen Original und Prüfobjekt genommen.

Nun ist die Frage von Interesse, wie hoch die Wahrscheinlichkeit ist, dass die Fälschung erkannt wird  $p_s$  bzw. dass sie NICHT erkannt wird  $1-p_s$ , wenn alle Test berücksichtigt werden. Für letztere müssen die Irrtumswahrscheinlichkeiten  $1-p_i$  multipliziert werden. Es gilt für die Irrtumswahrscheinlichkeit bei  $n$  parallel angewendeten Testverfahren, also für die Wahrscheinlichkeit, dass man sich simultan bei allen angewendeten Tests irrt:

$$1 - p_s = \prod_{i=1}^n (1 - p_i),$$

bzw. für die Erkennungswahrscheinlichkeit von Fälschungen

$$p_s = \prod_{i=1}^n p_i$$

Dies zeigt, dass durch redundante Untersuchungen mit verschiedenen Verfahren oder durch Einsatz mehrerer Prüfparameter die Wahrscheinlichkeit der Erkennung von Fälschungen deutlich erhöht werden kann.

Beispiel:  $p_1 = 0,9$ ;  $p_2 = 0,9$ ;  $p_1 = 0,9$ ,  $1 - p_1 = 0,1$ ;  $1 - p_2 = 0,1$ ;  $(1 - p_1) (1 - p_2) = 0,01$ ;  $p_s = 0,99$

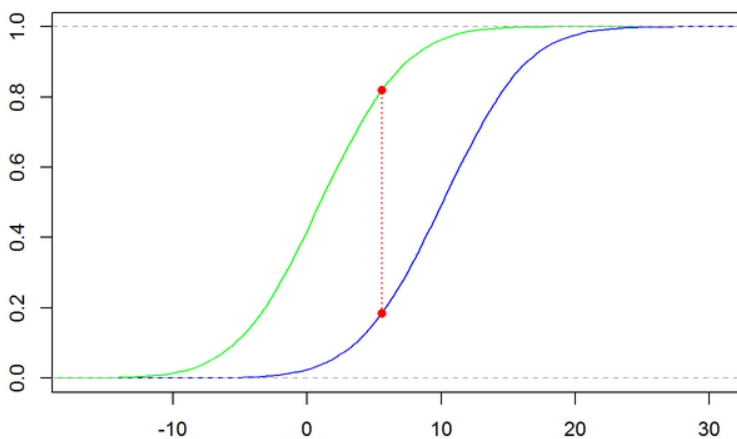
## 12.3 Test auf Verteilungsfunktion

Wenn zwei Stichproben aus der gleichen Grundgesamtheit stammen, so ist zu erwarten, dass sie nicht nur denselben Mittelwert, sondern auch die gleiche Verteilungsfunktion der Messwerte aufweisen. Im Fall der Normalverteilung müsste also auch die Standardabweichung im Rahmen der Streuungen gleich sein. Es gibt eine Reihe von Tests um zwei Verteilungen von Messwerten auf Gleichheit zu prüfen. Eine der Möglichkeiten ist der Chi-Quadrattest, eine andere der Kolmogorow-Smirnow-Test.

### Kolmogorow-Smirnow-Test

Dieser Statistische Test, geht von der Nullhypothese  $H_0$ : aus, dass X und Y die gleiche Grundverteilung besitzen. Er erlaubt Prüfungen ob zwei Zufallsvariablen der gleichen Verteilung folgen, oder ob eine Zufallsvariable einer angenommenen Verteilung folgt.

Verteilungsfunktionen  $F_{X,n}, F_{Y,m}$  haben die Stichprobengrößen n, m. Die größte Abweichung zwischen den Verteilungen sei  $d_{n,m} = \|F_{X,n} - F_{Y,m}\|$ , Abb.



Ablehnung der Hypothese erfolgt beim Signifikanzniveau  $\alpha$ , wenn die Prüfgröße

$$\sqrt{\frac{nm}{n+m}} \cdot d_{n,m} > \sqrt{\frac{\ln(\frac{2}{\alpha})}{2}}, \text{ d.h. wenn } d_{n,m} > d_{krit}(n, m, \alpha)$$

Eine alternative Entscheidungsgrundlage ist:  $p < \alpha$ . p ist die Wahrscheinlichkeit den Abstand  $d_{n,m}$  zu beobachten, wenn die Hypothese stimmt. Dabei erfolgt die Berechnung des p-Werts  $p = P(\tilde{d}_{m,n} \geq d_{n,m} | H_0)$ .

## 12.4 Binominalverteilung und Poissonverteilung

Binominalverteilung und Poissonverteilung sind diskrete Verteilungen. Ein Zufallsexperiment wird  $n$  mal durchgeführt.  $p$  ist die Wahrscheinlichkeit, dass das Experiment pro Versuch gelingt.  $k$  ist die Anzahl der erwarteten oder angenommenen Erfolge.

### Anwendung in ETRACE:

Man hat eine bestimmte Anzahl von Bits durch Messungen ermittelt, beispielsweise durch die Zuordnung von Kantenfehlern an Chips oder von Pixeln einer rauen Oberfläche. Für jedes Bit gilt, dass es eine bestimmte Wahrscheinlichkeit  $p$  aufweist, dass es richtig ist, und eine Wahrscheinlichkeit  $(1-p)$  dass es falsch ist.

Es gilt für die Funktion  $\Pr(\text{alle\_richtig}) = p^n$ , für die Funktion  $\Pr(\text{alle\_falsch}) = (1-p)^n$  und Funktion  $\Pr\{k\_falsch \cap n-k\_richtig\} = p^{n-k} \cdot (1-p)^k$

Insgesamt existieren  $n+1$  Zustände: 0 bis  $n$  Bits sind falsch

Gesucht ist nun die Wahrscheinlichkeit, dass das Bitmuster mit einem vorgegebenen Referenz-Bitmuster übereinstimmt, obwohl einzelne Bits falsch sein können.

Es gilt für die Funktion  $\Pr(n, k, p) = b(n, k, p) = \binom{n}{k} \cdot p^k \cdot (1-p)^{n-k}$

$b(n, k, p)$  ist somit die Wahrscheinlichkeit bei  $n$  unabhängigen Versuchen  $k$  Treffer zu erzielen, wenn man je Versuch eine Trefferwahrscheinlichkeit  $p$  hat. Übertragen auf ETRACE bedeutet das, dass man bei  $n$  Bit Datenumfang man die Wahrscheinlichkeit  $b(n, k, p)$  hat, dass  $k$  Bit falsch sein können.

Lässt man  $n$  groß werden ( $n \geq 10 \rightarrow \infty$ ), und wird gleichzeitig  $p$  die Einzelereignis-Wahrscheinlichkeit klein ( $p \leq 0,05$ ), so ergibt sich die Poissonverteilung. Sie hat den Erwartungswert des Mittelwerts  $\lambda = n \cdot p = \text{const.}$  Die Wahrscheinlichkeit  $p(\lambda, k)$  ist dann:

$$p(\lambda, k) = \frac{\lambda^k}{k!} \cdot e^{-\lambda}$$

Als Anwendung könnte man annehmen, dass ein Muster aus  $n$  Bit gebildet wird.  $p$  ist die Wahrscheinlichkeit, dass ein einzelnes Bit falsch ist.  $p(\lambda, k)$  ist also die Wahrscheinlichkeit, dass in einem  $n$ -Bitstring  $k$  falsche Bit stecken. Umgekehrt kann man auch die Frage stellen, wenn  $k$  von  $n$  Bit nicht übereinstimmen, wie hoch die Wahrscheinlichkeit ist, dass es sich nicht um den gleichen Wert handelt



## 12.5 Gütebewertung der Fehlererkennung

In der statistischen Prüfung sind Fehler Erster und Zweiter Art definiert. Fehler Erster Art bestehen darin dass eine zu prüfende Hypothese als richtig angesehen wird, obwohl sie falsch ist. Fehler Zweiter Art bestehen darin dass eine zu prüfende Hypothese abgelehnt wird, obwohl sie richtig ist.

Diese Betrachtungsweise kann auch auf die Prüfung auf Authentizität angewendet werden. Die Null-Hypothese sei: Das Los ist gefälscht. Zur Beurteilung der Qualität einer Prüfung auf Originalität sollten drei Kriterien angelegt werden:

- Statistische Sicherheit/Wahrscheinlichkeit, eine Fälschung zu detektieren
- Wahrscheinlichkeit, ein originales Produkt als gefälscht zu klassifizieren
- Reproduzierbarkeit bzw. Wiederholgenauigkeit der Bewertung

**Quote erkannter bzw. nicht erkannter Fehler** wird definiert als:

$$FN = \frac{\text{Anzahl nicht erkannter Fälschungen}}{\text{Gesamtzahl der Fälschungen}} \quad (9.9)$$

Die Gesamtzahl der Fehler muss durch eine unabhängige Untersuchung ermittelt werden. Komplementär kann auch die Quote der erkannten Fehler angegeben werden:

$$FE = \frac{\text{Anzahl erkannter Fälschungen}}{\text{Gesamtzahl der Fälschungen}} = 1 - FN \quad (9.10)$$

**Fehlalarmquote FQ** ist [1] als der Anteil originaler, bei der Prüfung jedoch als gefälscht erkannter Teile festgelegt:

$$FQ = \frac{\text{Anzahl irrtümlich als Fälschung identifizierter Proben}}{\text{Gesamtzahl fehlerfreier Proben}} \quad (9.11)$$

**Eine weitere Größe ist die Reproduzierbarkeit R** als der Prozentsatz der aufeinander folgenden Prüfungen den gleichen Status Prüfung bestanden/nicht bestanden aufweist“.

## 13 Literaturverzeichnis

- [1] Zentralverband Elektrotechnik- und Elektronikindustrie e.V. (ZVEI): „Gefälschte Bauteile in der Elektronikproduktion: Handlungsempfehlungen zur Risikoreduzierung“, November 2011
- [2] Electronical Commission: “Produktpiraterie bei Elektro- und Elektronikprodukten: Methoden und Strategien im Kampf gegen Produktfälschung und -piraterie”, [http://www.vde.com/de/Institut/Kunden/Documents/IEC\\_Counterfeiting\\_brochure\\_LR-de.pdf](http://www.vde.com/de/Institut/Kunden/Documents/IEC_Counterfeiting_brochure_LR-de.pdf)
- [3] Pecht, M.; Tiku, S.: “Bogus: electronic manufacturing and consumers confront a rising tide of counterfeit electronics”, *Spectrum, IEEE*, vol.43, no.5, pp.37-46, May 2006, doi: 10.1109/MSPEC.2006.1628506
- [4] Zweig, S.: “Understanding the counterfeit components problem”, <http://www.glenbrooktech.com/blog/2011/10/understanding-the-counterfeit-components-problem/>, Aufruf: 14.10.2014
- [5] Wildemann, H.: „Produktpiraterie - Leitfaden zur Einführung eines effizienten und effektiven Kopierschutz-Managements“. s.l. : TCW Transfer-Centrum GmbH & Co. KG, 2012
- [6] Homepage der Fa. DataWeave, Seattle, WA, USA, <https://dataweave.com/in/technology>, Aufruf: 26.11.2019
- [7] Homepage der Fa. Entrupy, New York, NY, USA, Fingerprinting, <https://fingerprinting.entropy.com/>, Aufruf: 26.11.2019
- [8] Homepage der Fa. Stratio, Inc., San Jose, CA, USA, LinkSquare Spektrometer, <https://linksquare.io/>, Aufruf: 26.11.2019
- [9] Homepage der Fa. Covisus, Inc., Monrovia, CA, USA, V-Tag Solutions, <https://covisus.com/vtagapplications-html/>, Aufruf: 26.11.2019
- [10] Schmid-Schirling, T.; Förste, A.: Fraunhofer-Institut für Physikalische Messtechnik IPM: Track4Quality - markierungsfreie Einzelteilverfolgung in anspruchsvoller Produktionsumgebung zur Prozessverbesserung und Qualitätssicherung: Schlussbericht zum BMBF-Vorhaben 16ES0426K. - Verbund-Nummer 01165128, Freiburg, 2018, DOI: <https://doi.org/10.2314/GBV:104651847X>
- [11] Test Methods Standard; AS6171A, General requirements, suspect/counterfeit, electrical, electronic, and electromechanical parts, überarbeitete Auflage vom 18. 04.2018, kostenpflichtig zu beziehen über <https://www.sae.org/standards/content/as6171a/>
- [12] Merli, D.; Sigl, G.: “Physical unclonable functions”, Springer, J. Datenschutz und Datensicherheit, Volume 36, Issue 12, pp 876-880, doi: 10.1007/s11623-012-0294-0
- [13] Merkblatt des ZVEI, Frankfurt, 2019, auf ZVEI-Homepage abrufbar über <https://www.zvei.org/presse-medien/publikationen/infokasten-umsatz-produktion-exportquote-markt/>

- [14] *Technologie Roadmap - Stressarme MST-Packages*, ZVEI, Frankfurt, 2013, auf ZVEI-Homepage abrufbar über <https://www.zvei.org/presse-medien/publikationen/technologie-roadmap-stressarme-mst-packages/>
- [15] *Workman, J.; Springsteen, A.: "Applied spectroscopy: a compact reference for practitioners"*. Academic Press, 1998
- [16] *Westland, S.: "Review of the CIE system of colorimetry and its use in dentistry"*, *J. Esthet. Restor. Dent.*, 2003; *Pathare, P.B.; Opara, U.L.; Al-Said, F. A. J.: "Colour Measurement and Analysis in Fresh and Processed Foods: A Review"*, in: *Food and Bioprocess Technology* 2013
- [17] *Thermo Spectronic, "Basic UV-Vis theory, concepts and applications basic"*, *ThermoSpectronic Magazine*, 2013
- [18] *Li, T.; Zhou, C.; Jiang, M.: "UV absorption spectra of polystyrene"*, *Polym. Bull.* 1991
- [19] *Lehmann, T.: "UV/Vis Spektroskopie"*, *Freie Universität Berlin*, 1997-2009
- [20] *Ganzoury, M.A.; Al am, N.K.; Nicolet, T.; Al, C.: "Introduction to fourier transform infrared spectrometry"*, *Renew. Sustain. Energy Rev.*, 2015
- [21] *Verkaufsseite zur Spektrendatenbank der Fa. Biorad: <http://www.bio-rad.com/de-de/product/ir-spectral-databases?ID=N0ZXNZE8Z>*, Aufruf: 08.08.2019
- [22] *Xu G; Yuan H F; Lu W Z: "Development of modern near infrared spectroscopic techniques and its applications "*. *Guang pu xue yu guang pu fen xi*, 2000
- [23] *Handbook of Bruker Vertex 70v*
- [24] *Koenig, J. L.: "Raman scattering of synthetic polymers - A Review, "* *Applied Spectroscopy Reviews* 1971
- [25] *Hildenbrand, M.; Mörchel, P.: "Non-destructive testing with magnetic resonance"*, *Sensoren und Messsysteme*, 26. – 27. Juni 2018 in Nürnberg, Berlin Offenbach
- [26] *Sawyer, L. C., Grubb, D. T.; Meyers, G. F.: "Polymer microscopy", Third edition. 2008*
- [27] *Alaee, M.; Arias, P.; Sjödin, A.; Bergman, Å.: "An overview of commercially used brominated flame retardants, their applications, their use patterns in different countries/regions and possible modes of release,"* *Environ. Int.*, vol. 29, no. 6, pp. 683-689, Sep. 2003
- [28] *Chiang, W. Y.; Hu, C. H.: "The relationship between molecular structure and the effect of coupling agents in flame-retardant ABS blends,"* *Eur. Polym. J.*, 1999
- [29] *Sato, H.; Kondo, K.; Tsuge, S.; Ohtani, H.; Sato, N.: "Mechanisms of thermal degradation of a polyester flame-retarded with antimony oxide/brominated polycarbonate studied by temperature-programmed analytical pyrolysis"*, *Polym. Degrad. Stab.*, 1998
- [30] *Laachachi, A.; Cochez, M.; Ferriol, M.; Leroy, E.; Lopez Cuesta, J. M.; Oget, N.: "Influence of Sb<sub>2</sub>O<sub>3</sub> particles as filler on the thermal stability and flammability properties of poly(methyl methacrylate) (PMMA)"*, *Polym. Degrad. Stab.*, 2004

[31] Koltzenburg S.; Maskos, M.; Nuyken, O., et al.: „Polymere: Synthese, Eigenschaften und Anwendungen“, Berlin Heidelberg: Springer Spektrum, 2014

[32] Czégény, Z.; Jakab, E.; Blazsó, M.; Bhaskar, T.; Sakata, Y.: “Thermal decomposition of polymer mixtures of PVC, PET and ABS containing brominated flame retardant: Formation of chlorinated and brominated organic compounds”, J. Anal. Appl. Pyrolysis, 2012

[33] Beschreibung der Dimensionen des Bauelementtyps Small-Outline-Transistor SOT223-4 auf wikipedia, [https://en.wikipedia.org/wiki/Small-outline\\_transistor#SOT223\\_\(SOT223-4\)](https://en.wikipedia.org/wiki/Small-outline_transistor#SOT223_(SOT223-4)), Aufruf: 26.11.20019

[34] Bedienungsanleitung zur Anwendungssoftware für die industrielle Bildverarbeitung NeuroCheck, Fa. NeuroCheck GmbH, Remseck

[35] Simonyan, K.; Zisserman, A.: “Very deep convolutional networks for largescale image recognition”, ICLR 2015, 3rd International Conference on Learning Representations, San Diego, CA, USA

[36] Koushanfar, F; Fazzari, S.; McCants, C.; Bryson, W.; Song, P.; Sale, M.; Potkonjak, M.: "Can EDA combat the rise of electronic counterfeiting?", proc. of the 49th ACM/EDAC/IEEE Design Automation Conference (DAC), June 2012, pp.133-138