

# Computertomographie für die Instandhaltung elektronischer Komponenten

Eckart UHLMANN<sup>1,2</sup>, Dirk OBERSCHMIDT<sup>1</sup>, Armin LÖWENSTEIN<sup>1</sup>,  
Nikolas SAWCZYN<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Fraunhofer-Institut für Produktionsanlagen und Konstruktionstechnik IPK, Berlin

<sup>2</sup> Institut für Werkzeugmaschinen und Fabrikbetrieb IWF, Technische Universität Berlin  
Pascalstr. 8 – 9, 10587 Berlin, sawczyn@iwf.tu-berlin.de

**Kurzfassung.** Die Instandhaltung und Reparatur (Maintenance, Repair and Overhaul - MRO) von langlebigen Gütern wird zunehmend durch die Anfälligkeit und Verfügbarkeit von elektronischen Komponenten, insbesondere bestückten Leiterplatten (Printed Circuit Board - PCB), erschwert oder sogar unmöglich gemacht. Doch besonders in Industriebereichen mit hohen Sicherheitsanforderungen, wie beispielsweise der Verkehrsindustrie, ist eine Instandhaltung von elektronischen Komponenten, aufgrund der hohen Anforderungen bezüglich der Zulassungsverfahren neuer elektronischer Komponenten, notwendig.

Konventionelle Instandhaltungsprozesse von PCBs erfordern einen hohen manuellen Aufwand bei gleichzeitiger zerstörender Prüfung, besonders bei mehrlagigen Leiterplatten (Multilayer Printed Circuit Boards). Dort ist sowohl eine mechanische Entfernung der elektronischen Komponenten, als auch eine optische Erfassung der leitenden Verbindungen zur Erstellung des Schaltplans erforderlich. Die Anwendung der industriellen Computertomographie (iCT) für die Instandhaltung elektronischer Komponenten ermöglicht, aufgrund der computertomographischen Eigenschaft, auch innere Strukturen dreidimensional zu erfassen, die Entwicklung einer neuen Prozesskette für die Instandhaltung elektronischer Komponenten. Hierbei wird durch den Einsatz der iCT eine Prozesskette ohne zerstörende Prozessschritte zur Instandhaltung elektronischer Komponenten ermöglicht. Jedoch ist der Einsatz der iCT als zerstörungsfreies Prüfverfahren für PCBs noch nicht etabliert, sodass beispielweise Aussagen bezüglich geeigneter Messparameter oder bezüglich zu erwartender Bildqualität nicht getroffen werden können.

In diesem Beitrag wird eine innovative Prozesskette zur Instandhaltung elektronischer Komponenten auf Basis der industriellen Computertomographie dargestellt. Darauf aufbauend werden relevante Einflussgrößen, wie beispielsweise die Bauteilausrichtung, identifiziert.

## 1 Einführung

Hohe Sicherheitsvoraussetzungen im Betrieb, breites Einsatzspektrum und lange Produktlebenszyklen in der Verkehrsindustrie von mittlerweile bis zu 30 Jahren fordern neue Prozesse für eine wirtschaftliche und nachhaltige Inspektion und Instandhaltung (MRO - Maintenance, Repair and Overhaul). Die Umsetzung dieser Forderung wird durch die Anfälligkeit und Verfügbarkeit elektronischer Komponenten, insbesondere von Printed



Circuit Boards (PCBs), erschwert oder sogar unmöglich gemacht. Dies ist unter anderem auf die vergleichsweise sehr kurzen Produktlebenszyklen der elektronischen Komponenten zurückzuführen, wodurch diese entweder nicht mehr am Markt verfügbar sind oder die Lieferanten Ersatz und Reparaturen nur zu unwirtschaftlichen Konditionen anbieten [1].

Eine Durchführung der Inspektion und Reparatur von PCBs erfordert die Kenntnis der Funktionsweise, Logik und der Bauteile der elektronischen Komponenten, welche in Form von Stromlaufplänen, Stücklisten und Bestückungsplänen zu beschreiben sind. Diese Informationen können insbesondere in der Verkehrsindustrie mit langen Lebenszyklen unvollständig sein. Im Zuge der MRO wird daher versucht, diese Informationen wieder herzustellen. Der MRO-Prozess für die Instandhaltung von elektrischen Komponenten (siehe Abbildung 1) ist insbesondere von der Verfügbarkeit detaillierter technischer Dokumentationen, dem allgemeinen Zustand des PCBs sowie der Kundenanforderungen abhängig.

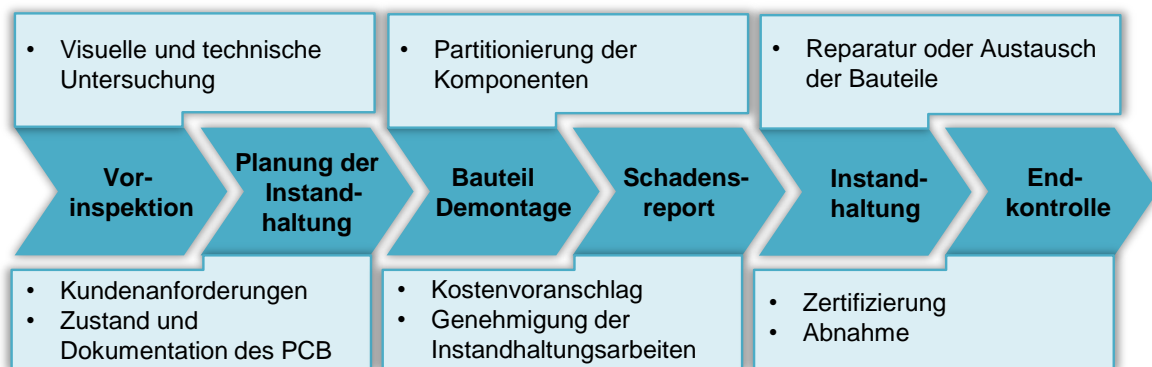


Abbildung 1: Konventioneller Instandhaltungsprozess für PCBs

## 2 Innovative Prozesskette für die Instandhaltung elektronischer Komponenten

Derzeitige Instandhaltungsprozesse besitzen einen hohen manuellen Anteil bei der Funktionsanalyse der Komponenten. In diesem Zusammenhang werden sowohl elektrische als auch optische Prüfverfahren verwendet. Stand der Technik sind halbautomatisierte Prüfmethoden, die optische und elektrische Prüfverfahren miteinander kombinieren und von spezialisierten Dienstleistern angeboten werden. Hierbei ist der manuelle Aufwand der Inspektion hoch, da oftmals eine zerstörende Prüfung erforderlich ist.

In dem Verbundprojekt „Integrierte Prozesskette für die Instandhaltung elektronischer Komponenten“ (kurz: **INPIKO**) soll eine innovative Prozesskette für Instandhaltungsunternehmen entwickelt werden, welche diese befähigt, alte PCBs bei Nichtverfügbarkeit von Dokumentationen oder Schaltplänen (ECAD-Daten) inspizieren und reparieren zu können. Dazu sollen die existierenden Verfahren mittels Flying Probe Testern dadurch optimiert werden, dass sie mit optischen Verfahren zur Generierung von Netzlisten kombiniert werden (siehe Abbildung 2). Insbesondere bestehen folgende Anforderungen, die wesentlich über den Stand der Technik hinausführen:

- das Verfahren soll nicht-destruktiv bezüglich der untersuchten PCB sein,
- die Generierung der Netzliste soll weitgehend automatisch erfolgen und
- die resultierende Netzliste soll fehlerfrei sein.

Die innovative Prozesskette kann in vier Teilschritte unterteilt werden. Zunächst erfolgt die Erstellung der CT- und 3D-Scan-Datensätze. Hierfür werden die Leiterplatten mit den beiden Verfahren hinreichend genau digitalisiert. Das digitale Modell dient als

Grundlage zur Objektidentifizierung. Anschließend erfolgt die Identifizierung der Strukturen, durch eine Segmentierung von Bauteilen, Pins und Leiterbahnen anhand von Grauwertdifferenzen mit anschließendem Datenbankabgleich. Aufgrund der Abhängigkeit zwischen Dichte und Grauwerten innerhalb des Voxel-Datensatzes lassen sich Bauteile, Pins und Leiterbahnen in allen Lagen identifizieren. Um eine deutliche Abgrenzung der Strukturen zu erzielen, werden die statistisch selten auftretenden Grauwerte herausgefiltert. Dann erfolgt über Algorithmen eine Segmentierung der Bauteile, indem zunächst nach benachbarten Voxeln mit geringer Grauwertdifferenz gesucht wird. An Stellen an denen sich ähnliche Voxel häufen werden Region-Growing-Verfahren angewendet, die die Voxel-Menge eines Bauteils erfassen. Anschließend werden die erfassten Bauteile separiert und über eine Shape-Search-Software einem Geometrievergleich mit einer Datenbank unterzogen, so dass eine Identifikation über eine Liste mit ähnlichen Bauteilen möglich ist. Bauteile, die nicht identifiziert werden konnten sind entweder nicht in der Datenbank vorhanden oder wurden nicht richtig segmentiert. Im ersten Fall kann die Datenbank manuell aufgefüllt werden, sofern über einen anderen Weg eine Identifikation möglich ist. Dies ermöglicht die Automatisierung zukünftiger Identifikationsprozesse. Im zweiten Fall kann die Segmentierung manuell nachkorrigiert werden. Weiterhin werden Bauteilpins über eine automatische Suche nach charakteristischen Grauwertanhäufungen markiert. Im dritten Schritt erfolgt die Generierung der Netzliste mittels bestehender Flying Probe Testmethoden. Über dieses Verfahren können in Ergänzung des vorangegangenen Teilprozesses zusätzlich Bauteilspezifikationen über elektrische Messungen ermittelt werden. Als Inputdaten für den Flying Probe Tester dienen die zuvor ermittelten Pinkoordinaten, die als Testpunkte für die Nadeln dienen. Die so erzeugte Netzliste enthält neben den Verbindungsinformationen auch die Information zu den Bauteilen. Dazu zählen zugehörige Pinpositionen, Bauteilkoordinaten und Messergebnisse der Bauteile. Über den Identifikationsprozess werden der Netzliste zusätzlich Bauteilbezeichnungen hinzugefügt. Abschließend wird zur Ableitung des Stromlaufplans unter Einsatz von ECAD-Software die Netzliste modelliert. Je nach Software und Formatierung der Netzliste wird diese automatisch über die ECAD-API1 oder manuell importiert. Aus einer Systembibliothek werden die Bauteile selektiert und positioniert. Zusätzlich erfolgt nach den Vorgaben der Netzliste die Verknüpfung der Bauteilpins mittels Leiterbahnen als flexible Objekte. In einem manuellen Schritt erfolgt die Ausrichtung der Symbole sowie die genaue Zuordnung von Pins und zugehörigen Leiterbahnenenden zu den Symbolen.

Die definierte Prozesskette (siehe Abbildung 2) setzt gezielt auf die Kombination und redundante Anwendung unterschiedlicher physikalischer Verfahren, um zusätzliche Prüfmöglichkeiten zu schaffen und somit eine Fehlerreduktion zu erreichen.

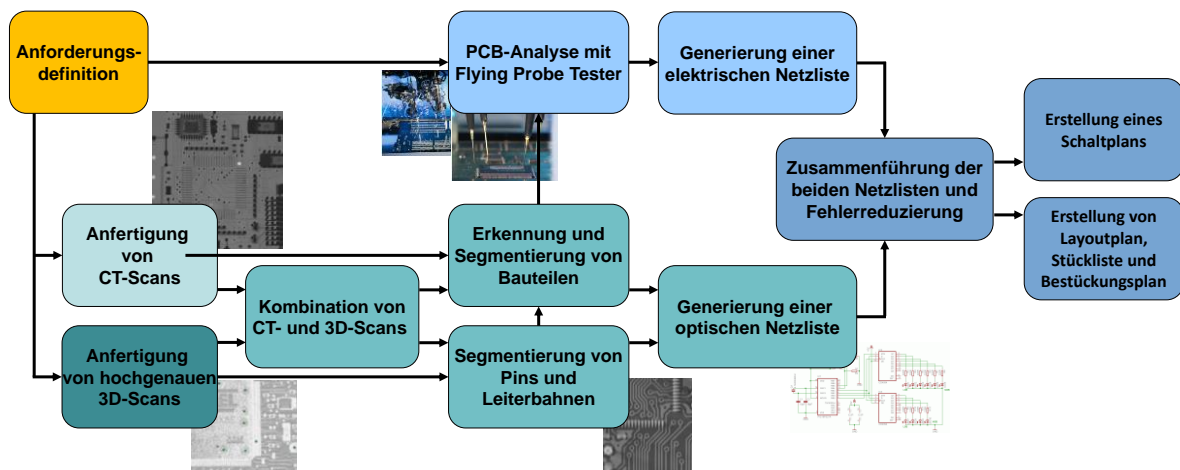


Abbildung 2: INPIKO Prozesskette für die Instandhaltung elektronischer Komponenten

### 3 Untersuchungsergebnisse

Für die Anwendung der industriellen CT in der Instandhaltung elektronischer Komponenten ist die Auswahl geeigneter Aufnahmeparameter von besonders hoher Bedeutung [2]. Hierfür wurden am Fraunhofer-Institut für Produktionsanlagen und Konstruktionstechnik IPK, Berlin, Untersuchungen mit einem Röntgen-Computertomographen des Typs Metrotom 800 des Herstellers Carl Zeiss IMT, Oberkochen, durchgeführt (siehe Abbildung 3).



**Abbildung 3:** Zeiss IMT Metrotom 800 am Fraunhofer Institut für Produktionsanlagen und Konstruktionstechnik IPK, Berlin

Die Zielgrößen für die Untersuchungen ist die Qualität der Rekonstruktion sowie das Kontrastverhältnis zwischen Material und Hintergrund.

#### 3.1 Einfluss der Bauteilorientierung

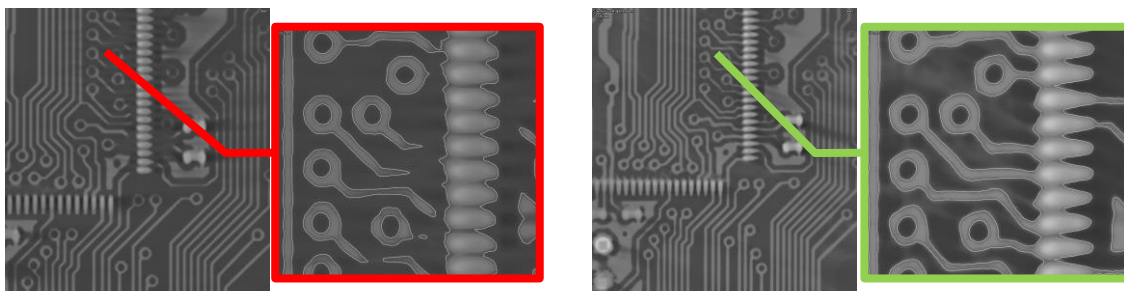
Zur Bestimmung des Einflusses der Bauteilorientierung auf die Qualität der Rekonstruktion, wurden Aufnahmen mit unterschiedlicher Bauteilpositionierung durchgeführt. Der Fokus der Untersuchungen lag auf der Orientierung der PCB bezüglich der x- und y-Achse des Drehtisches. Hierfür wurden die Orientierungen bezüglich der beiden Achsen zunächst einzeln und anschließend kombiniert betrachtet.

Die für die INPIKO Prozesskette relevanten Informationen des CT-Datensatzes sind nicht ausschließlich aus den rekonstruierten dreidimensionalen Modellen extrahierbar, sodass auch zweidimensionale Schnittbilder, insbesondere für die Segmentierung der Leiterbahnen, notwendig sind. Für eine erfolgreiche Segmentierung ist ein ausreichend hoher Kontrast zwischen Leiterbahn und Platine erforderlich, der nur bei optimaler Auswahl der Aufnahmeparameter erreicht werden kann.

Zunächst wurde der Einfluss der Bauteilorientierung auf den Kontrast zwischen Leiterbahn und Platine untersucht. Hierfür wurden geeignete Aufnahmeparameter (siehe Tabelle 1) mit Hilfe von Vorversuchen bestimmt. Anschließend wurden die CT-Aufnahmen zur Bestimmung des Bauteileinflusses durchgeführt. Hierfür wurde das PCB-1 mit einem Kippwinkel  $\alpha_x = 20^\circ$  positioniert (Abbildung 4 links). Die zweidimensionalen Schnittbilder zeigen, dass die senkrecht zur Drehachse angeordneten Leiterbahnen einen geringeren Kontrast im Vergleich zu den parallel angeordneten Leiterbahnen aufweisen. Eine Segmentierung der Leiterbahnen ist nur unvollständig, sodass die Leiterbahnverläufe unterbrochen sind (rote Markierung). Bei einer Positionierung des PCB-2 mit Kippwinkeln  $\alpha_x = 20^\circ$  und  $\alpha_y = 20^\circ$  wird insgesamt ein höherer Kontrast erreicht (Abbildung 4 rechts). Die Segmentierung der Leiterbahnen ist vollständig, sodass die Leiterbahnverläufe ununterbrochen sind (grüne Markierung).

**Tabelle 1:** Aufnahmeparameter für die PCB-1 und PCB-2

Beschleunigungsspannung $U_B$	130 kV
Röhrenstrom $I_R$	100 $\mu$ A
Vorfilter	0,25 mm Cu
Integrationszeit $t_{Int}$	667 ms
Anzahl der Projektionen $N_{Proj}$	2000
Verstärkung	8-fach

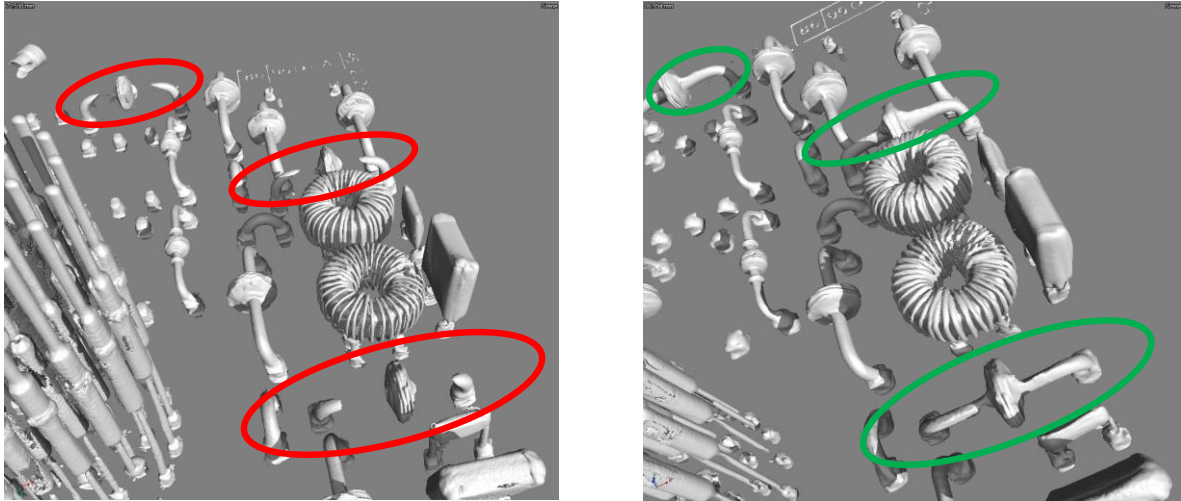


**Abbildung 4:** Einfluss der Bauteilorientierung auf den Kontrast der Leiterbahnen; links: für eine Segmentierung zu schwacher Kontrast zwischen Leiterbahn und Platine (PCB-1); rechts: für eine Segmentierung ausreichender Kontrast zwischen Leiterbahn und Platine (PCB-2)

Für die Untersuchung des Einflusses der Bauteilorientierung auf die Qualität der Rekonstruktion wurde ein PCB mit einer höheren Bestückungsdichte ausgewählt. Die ausgewählten Aufnahmeparameter sind in Tabelle 2 dargestellt. Abbildung 5 zeigt den Einfluss der Bauteilorientierung auf die Qualität der Rekonstruktion. In Abbildung 5 links wurde das PCB (PCB-3) mit einem Kippwinkel  $\alpha_x = 20^\circ$  positioniert. Die Rekonstruktion des PCB-3 zeigt eine unvollständige Abbildung der senkrecht zur Drehachse angeordneten Strukturen (rot markiert). Die fehlerhafte Rekonstruktion betrifft sowohl feine Strukturen, wie beispielsweise Leiterbahnen, als auch grobe Strukturen, wie z. B. Spannungsschutzdioden. Strukturen, die nicht senkrecht zur Drehachse angeordnet sind, werden fehlerfrei rekonstruiert. Um den Einfluss der Bauteilorientierung weiter beurteilen zu können, wurde das PCB (PCB-4) mit einem Kippwinkel  $\alpha_x = 20^\circ$  und  $\alpha_y = 20^\circ$  positioniert (siehe Abbildung 5 rechts). Die Rekonstruktion des PCB-4 zeigt eine fehlerfreie Darstellung des gesamten PCB. Die Spannungsschutzdioden, welche bei der Rekonstruktion des PCB-3 unvollständig abgebildet wurden, sind bei der Rekonstruktion des PCB-4 fehlerfrei dargestellt (grüne Markierung). Anhand von weiteren Versuchen mit unterschiedlicher Bauteilorientierung bezüglich der x- und y-Achse konnte nachgewiesen werden, dass Strukturen senkrecht zur Drehachse eher zur Artefaktbildung neigen, als Strukturen, die parallel zur Drehachse angeordnet sind.

**Tabelle 2:** Aufnahmeparameter für die PCB-3 und PCB-4

Beschleunigungsspannung $U_B$	130 kV
Röhrenstrom $I_R$	300 $\mu$ A
Vorfilter	1,75 mm Cu
Integrationszeit $t_{Int}$	1000 ms
Anzahl der Projektionen $N_{Proj}$	1600
Verstärkung	8-fach



**Abbildung 5:** Einfluss der Bauteilorientierung auf die Qualität der Rekonstruktion des PCB; links: fehlerhafte Rekonstruktion der senkrecht zur Drehachse angeordneten Strukturen (PCB-3); rechts: fehlerfreie Rekonstruktion aller Strukturen (PCB-4)

### 3.2 Einfluss der Messzeit

Die Messzeit  $t$  kann bei der iCT in die Aufnahmezeit  $t_A$  und Rekonstruktionszeit  $t_R$  aufgeteilt werden. Die Aufnahmezeit  $t_A$  setzt sich überwiegend aus der Projektionsanzahl  $N_{\text{Proj}}$  und der Integrationszeit  $t_{\text{Int}}$  zusammen. Die Rekonstruktionszeit  $t_R$  wird im Wesentlichen durch die Projektionsanzahl  $N_{\text{Proj}}$  bestimmt [3]. Die für eine CT-Aufnahme nötige Projektionsanzahl  $N_{\text{Proj}}$  kann näherungsweise durch folgende Gleichung abgeschätzt werden:

$$N_{\text{Proj}} \approx \frac{\pi}{2} N_D$$

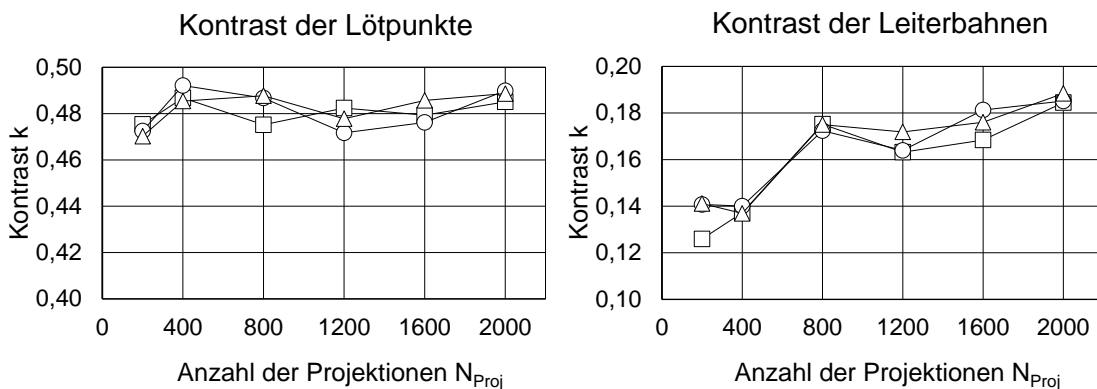
$N_D$  entspricht der Objektbreite in Pixel am Detektor. Werden nicht ausreichend viele Projektionen aufgenommen, so wird das Abtasttheorem verletzt. Daraus resultiert eine Signalüberlagerung, die als Aliasing bezeichnet wird. Das Abtasttheorem besagt, dass im Messobjekt nur Ortsfrequenzen vorkommen dürfen, die kleiner als die Nyquist-Frequenz (halbe Abtastfrequenz) sind.

Da die Auswahl der Integrationszeit  $t_{\text{Int}}$  von der Wahl weiterer Aufnahmeparameter, wie beispielsweise Beschleunigungsspannung  $U_B$ , Röhrenstrom  $I_R$  oder Anzahl der Bildmittelung  $N_{\text{BM}}$ , zusammenhängt, muss die Optimierung der Messzeit  $t$  über die Anzahl der Projektionen  $N_{\text{Proj}}$  erfolgen. Für die Untersuchung des Einflusses der Projektionsanzahl  $N_{\text{Proj}}$  auf den Kontrast der Leiterbahnen und Lötunkte wurden CT-Aufnahmen eines PCB mit unterschiedlicher Projektionsanzahl  $N_{\text{Proj}}$  durchgeführt. Um die Reproduzierbarkeit der Ergebnisse zur Gewährleisten wurden drei verschiedene Lötunkte und Leiterbahnabschnitte für die Auswertung ausgewählt. Die Ermittlung des Kontrasts  $k$  erfolgt mit folgender Gleichung:

$$\text{Kontrast } k = \frac{\text{Grauwert}_{\text{Material}} - \text{Grauwert}_{\text{Platine}}}{\text{Grauwert}_{\text{Platine}}}$$

In Abbildung 6 ist der Kontrast  $k$  in Abhängigkeit der Projektionsanzahl  $N_{\text{Proj}}$  für Lötunkte (links) und Leiterbahnen (rechts) dargestellt. Der Einfluss der Projektionsanzahl  $N_{\text{Proj}}$  auf den Kontrast  $k$  ist bei den Leiterbahnen stärker ausgeprägt als bei den Lötunkten. Bei den Lötunkten wird bereits bei einer geringen Projektionsanzahl  $N_{\text{Proj}}$  (200

Projektionen) ein für die Segmentierung ausreichender Kontrast  $k$  ( $k \approx 0,48$ ) erreicht. Eine Steigerung der Projektionsanzahl  $N_{\text{Proj}}$  führt zu keiner signifikanten Steigerung des Kontrasts  $k$  bei den Lötunkten. Somit kann trotz Verletzung des Abtasttheorems eine für die Prozesskette zur Instandhaltung elektronischer Komponenten verwertbarer CT-Datensatz mit einer sehr geringen Messzeit  $t$  ( $t \leq 2$  min) erzeugt werden. Im Gegensatz zu den Lötunkten ist bei den Leiterbahnen eine deutliche Zunahme des Kontrasts  $k$  bei einer Zunahme der Projektionsanzahl  $N_{\text{Proj}}$  zu beobachten. Bei Verletzung des Abtasttheorems ( $N_{\text{Proj}} \leq 800$ ) ist eine deutliche Abnahme des Kontrasts  $k$  zu beobachten. Ein Vergleich zwischen  $N_{\text{Proj}} = 400$  und  $N_{\text{Proj}} = 800$  zeigt eine Zunahme des Kontrasts  $k$  um im Durchschnitt 78 % bei einer Zunahme der Messzeit  $t$  um 110 %. Die Verdopplung der Projektionsanzahl  $N_{\text{Proj}}$  bewirkt zum einen eine Verdopplung der Aufnahmezeit  $t_A$  und zum anderen eine Erhöhung der Rekonstruktionszeit  $t_{\text{Rek}}$ , sodass die Messzeit  $t$  bei einer Projektionsanzahl  $N_{\text{Proj}} = 800$  gegenüber  $N_{\text{Proj}} = 400$  effektiv um 121 % zunimmt. Somit tritt ein überproportionaler Zuwachs der Messzeit  $t$  bezüglich des erzielten Kontrast  $k$  bei Leiterbahnen auf.



**Abbildung 6:** Einfluss der Projektionsanzahl  $N_{\text{Proj}}$  auf den Kontrast bei Lötunkten und Leiterbahnen; links: Kontrast  $k$  der Lötunkte in Abhängigkeit der Projektionsanzahl  $N_{\text{Proj}}$ ; rechts: Kontrast  $k$  der Leiterbahnen in Abhängigkeit der Projektionsanzahl  $N_{\text{Proj}}$

#### 4 Zusammenfassung und Ausblick

Für die Instandhaltung von elektronischen Komponenten wurde eine innovative Prozesskette (INPIKO Prozesskette), die sowohl optische als auch elektronische Prüfverfahren miteinander verbindet, entwickelt. Die Einbeziehung der industriellen Computertomographie bietet eine Vielzahl an Vorteilen und ermöglicht neue Ansätze für die Instandhaltung elektronischer Komponenten. Anhand von Untersuchungen am Fraunhofer Institut für Produktionsanlagen und Konstruktionstechnik IPK konnten Einflussfaktoren auf die Bildqualität bzw. der Güte der Rekonstruktion quantifiziert werden. Anhand der Ergebnisse ist eine Reduzierung der Messzeit  $t$  durch eine anwendungsspezifische Anpassung der Anzahl der Projektionen  $N_{\text{Proj}}$  möglich.

Im Zuge weiterer Untersuchungen werden weitere relevante Einflussgrößen bei der Anwendung industrieller Computertomographie für die Instandhaltung elektronischer Komponenten quantifiziert. Daraus wird dann eine allgemeingültige Messmethodik für die Instandhaltung elektronischer Komponenten mittels industrieller Computertomographie abgeleitet.

## **Danksagung**

Die Autoren danken dem Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi) für die Förderung des Verbundprojekts INPIKO (Laufzeit 2013 – 2015) unter dem Förderkennzeichen VP2449304PR3.

## **Referenzen**

- [1] H. Grosser, D. Kuhn, M. Wewetzer: Produktdigitalisierung zur Instandhaltungsplanung, Fraunhofer-Institut für Produktionsanlagen und Konstruktionstechnik, Konferenzbeitrag: 3D-NordOst 2010.
- [2] H. Roth: Hochauflösende Röntgenanalyse und Computertomographie von Lötstellen. In: Elektronische Baugruppen und Leiterplatten - EBL 2008 - Systemintegration und Zuverlässigkeit - 4. DVS/GMM-Fachtagung, VDE Verlag, Berlin, 2008.
- [3] T. M. Buzug: Computed Tomography – From Photon Statistic to Modern Cone-Beam CT, Springer Verlag, Berlin, 2008.