

---

# Methode für die Bewertung von Porositätsanalysen von CT Daten

Jördis Rosc<sup>1</sup>, Georg Geier<sup>1</sup>, Daniel Habe<sup>1</sup>, Thomas Pabel<sup>1</sup>, Peter Schumacher<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Österreichisches Gießerei-Institut, Leoben, Österreich

<sup>2</sup>Lehrstuhl für Gießereikunde, Montanuniversität Leoben, Leoben, Österreich

## Kurzfassung

Die Bestimmung von Porositäten in Bauteilen ist in unterschiedlichsten Bereichen der Industrie eine wichtige Maßzahl in der Qualitätssicherung. In der Praxis bringen solche Analysen eine Reihe von Herausforderungen mit sich. Die Computertomographie ermöglicht eine zerstörungsfreie dreidimensionale Darstellung des zu untersuchenden Objektes, womit sie eine immer wichtigere Untersuchungsmethode für die zerstörungsfreie Analyse von Volumsdefiziten im Inneren eines Bauteils wird.

Porendetektionen in CT Datensätzen können nur mit geeigneten Parametern hinreichend genaue Ergebnisse liefern. Werden die Parameter nicht optimal gewählt, führt dies zu fehlerhaften Ergebnissen, die Volumsdefizite über- oder unterschätzen.

Darüber hinaus können örtlich unterschiedliche Grauwertkontraste im CT-Datensatz dazu führen, dass Volumsdefizite im Inneren des betrachteten Volumens mit jeweils unterschiedlichen Parametern detektiert werden sollten.

Zusätzlich zu den Anforderungen, die an die Parameterwahl für die Porendetektion gestellt werden, benötigen die verwendeten Datensätze sowohl eine ausreichende räumliche Auflösung als auch möglichst hohe Grauwertkontrast. Um optimale Ergebnisse zu erzielen, müssen also auch die Bedingungen während des CT-Scans im Hinblick auf das spezielle Objekt und die erwarteten Porengrößen hin optimiert werden.

Die Bewertung der Güte einer Porendetektion von CT Daten ist im Allgemeinen nur eingeschränkt qualitativ durchzuführen, da die Verteilung der Volumsdefizite und deren Anteil am Gesamtvolumen des Bauteils a priori unbekannt ist und aus diesem Grunde keine exakte Referenz vorhanden ist.

Die Herausforderung besteht darin, einen Probekörper für die Porendetektion zu finden, dessen Eigenschaften exakt bekannt sind und der geeignet ist, unterschiedliche Güten der Porendetektion quantitativ aufzuzeigen.

Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wurde ein solcher Referenzkörper entwickelt. Es kann gezeigt werden, dass dieser die Anforderungen zur Porengrößenbestimmung hinreichend genau erfüllt.

Der Referenzkörper wurde in einer Untersuchungsreihe mit unterschiedlichen Parametern mittels CT aufgenommen. Die gewonnenen Datensätze wurden mit dem „Defect detection“-Modul der Software „VG Studio MAX 2.0“ analysiert. Die Ergebnisse aus den CT-Daten wurden theoretischen Berechnungen gegenübergestellt, woraus die Abhängigkeiten der Porendetektionsgüte quantitativ abgeleitet wurden.

**Keywords:** Porendetektion, Referenzkörper

---

## Einleitung

Die Computertomographie nimmt in den letzten Jahren als zerstörungsfreie Prüfmethode in den unterschiedlichsten Industriesektoren einen immer höheren Stellenwert ein.

Seit mehr als 30 Jahren ist die Computertomographie (CT) in der Medizin eine anerkannte Analyse-methode. Aus der modernen Medizin ist dieses bildgebende, diagnostische Verfahren nicht mehr wegzudenken. Die Fortschritte in der CT-Anlagentechnik sowie in der Verfügbarkeit von Rechenleistung ermöglichten es in den vergangenen Jahren, diese Technologie vermehrt für technische Anwendungen zu nutzen.

Die stark steigenden Anforderungen an moderne Bauteile - egal ob in der automotiven Industrie, in der Kunststoffindustrie oder anderen Sektoren - benötigen auch entsprechend moderne Verfahren und Techniken, um die Qualität dieser Teile zu prüfen.

In diesem Zusammenhang ist die Porosität in den verschiedenen Materialien eine wesentliche Problematik. In diesem Zusammenhang wird insbesondere bei Gussteilen immer stärker auf Computertomographie gesetzt.

Im Vergleich zu anderen zerstörungsfreien Prüfmethoden, etwa Ultraschall-Prüfung oder radioskopische Prüfung, die zwar eine qualitative Aussage über das Vorhandensein oder Erscheinungsbild von Gussfehlern wie etwa Porositäten im Bauteil ermöglichen, ist es mit der Computertomographie möglich, eine dreidimensionale qualitative Auswertung der Porositäten zu machen.

## 1 Stand der Technik

Eine heute weithin anerkannte Methode für die qualitative Bewertung von Gussfehlern ist die metallographische Untersuchung. Für diese zerstörende Prüfmethode müssen geeignete Bereiche des Bauteils ausgewählt, aus diesem entfernt und anschließend mikroskopisch untersucht werden. Bei dieser Methode müssen trotz ihrer hohen Genauigkeit einige Dinge beachtet werden. Zum Einen müssen die passenden Bereiche für die metallographische Untersuchung im Vorhinein lokalisiert und aufwändig präpariert werden, außerdem kann mit einem metallographischen Schliff nur eine Ebene der Probe ausgewertet werden. Im Gegensatz dazu kann mit der Computertomographie das gesamte Bauteil zerstörungsfrei dreidimensional dargestellt werden.

## 2 Porositätsanalyse an CT-Datensätzen

Dreidimensionale Datenanalyse für industrielle CT-Datensätze erfolgt üblicherweise mit dem Softwarepaket VG Studio MAX. VG Studio MAX verfügt über ein Modul zur dreidimensionalen Porositätsdetektion, welches auch für die vorliegende Arbeit verwendet wurde.

Um eine zuverlässige Porositätsanalyse berechnen zu können muss ein geeigneter Schwellwert für die Grenze zwischen Material und Luft – den eingeschlossenen Porositäten - gefunden werden. Da der Schwellwert mit heutigen Methoden nur unter großem Aufwand automatisch festgelegt werden kann, ist die übliche Vorgangsweise die, dass der Anwender den Schwellwert für jede Problemstellung händisch festlegt. Die Schwellwertsetzung erfolgt für Porendetektionen an CT-Datensätzen nach Kriterien analog zur Metallographie. Der Übergang zwischen Material und Luft ist in keinem Fall ein diskreter Sprung zwischen zwei Grauwerten sondern in jedem Fall ein verschmierter Übergang über mehrere Voxel (Siehe Abbildung 1).

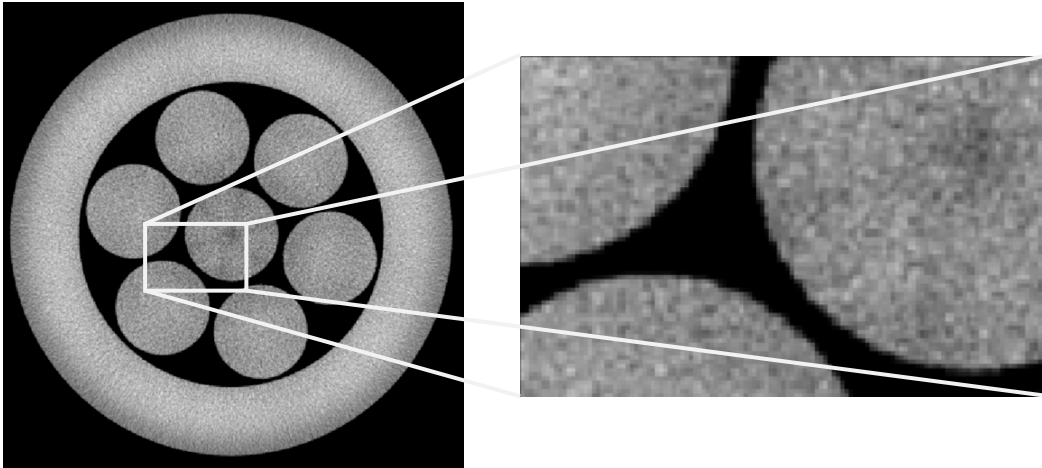


Abbildung 1: Darstellung des verschmierten Übergangs zwischen Material und Luft in einem Schichtbild aus einem CT-Datensatz.

Wird der Schwellwert zu weit in den höheren Grauwerten, das heißt im Material gesetzt, wird die Porengröße überschätzt. Eine Schwellwertsetzung zu weit in den niedrigen Grauwerten führt zu einer zu geringen detektierten Porengröße.

Abbildung 2 zeigt jeweils ein Schnittbild des CT-Datensatzes einer Unterdruck-Dichte-Probe (UDIP), die zwei Mal mit leicht variierenden Parametern auf Porositäten untersucht wurde. Dieses Beispiel macht den Einfluss von Auflösung und Grauwertkontrast auf die Porositätsanalyse deutlich.

Als ein Merkmal, das markant unterschiedlich detektiert wurde sind die Volumendefizite hervorzuheben, die sich oben in der Mitte der Probe befinden. Mit geringerem Kontrast und geringerer Auflösung konnten diese Ungängen mit VG Studio MAX nicht detektiert werden, während mit einer besseren Abbildung der Probe zumindest einige der Porositäten gefunden wurden. Die fein verästelten Lunker in diesem Bereich, die sich mit hohen Ortsfrequenzen und geringem Grauwertkontrast darstellen, konnten in keinem Fall detektiert werden.

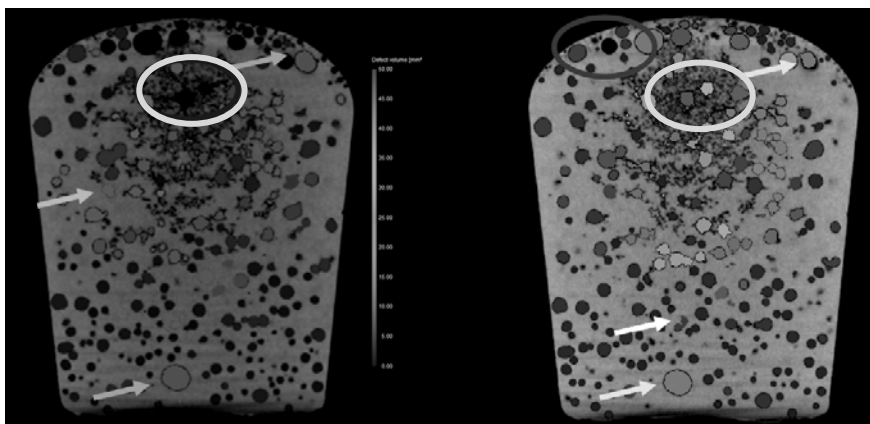


Abbildung 2: Defektanalyse an einer Unterdruck-Dichte-Probe (UDIP) mit variierender Parameterwahl. Pfeile markieren Poren, die nicht im vollen Ausmaß detektiert wurden, ovale Markierungen markieren Poren oder Lunker die nicht detektiert wurden. *Linke Seite*: geringere Auflösung, zentraler Lunker nicht detektiert. *Rechte Seite*: bessere Auflösung, zentraler Lunker zum Teil detektiert.

---

Generell kann festgestellt werden, dass große Poren in Bereichen mit hohen Grauwertunterschieden zwischen Material und Poren zuverlässig detektiert werden, auch wenn diese mit bestimmten Einstellungen in VG Studio MAX zum Teil in der Größe überschätzt werden.

Poren, die im Vergleich zur Voxelgröße klein sind, werden ebenso wenig zuverlässig detektiert wie Poren in Bereichen mit geringen Grauwertunterschieden.

Als wesentliche Einflussgrößen für eine zuverlässige Porendetektion können somit die Porengröße im Vergleich zur Voxelgröße sowie der Grauwertkontrast des Datensatzes, der durch die Aufnahmeparameter bestimmt wird, identifiziert werden.

Somit stellt sich die zentrale Frage dieser Arbeit: Für welche Aufnahmeparameter (Auflösung, Grauwertkontrast) können welche Fehlergrößen zuverlässig detektiert werden?

In anderen Worten: Wie lässt sich die Genauigkeit einer Porositätsdetektion hinsichtlich dieser Größen zuverlässig bewerten?

### **3 Methode für die Bewertung automatischer Porositätsanalysen**

Das tatsächliche Volumen von Porositäten in einem Bauteil ist in den üblichen Anwendungsgebieten der Computertomographie nicht bekannt. Da die Genauigkeit einer Porositätsanalyse von einer Reihe von Einflussgrößen abhängt (Voxelgröße, Grauwertkontrast, Schwellwertsetzung), kann im Allgemeinen die Abweichung der Detektion von der tatsächlichen Größe nur grob abgeschätzt werden.

Um den hohen Qualitätsanforderungen, die heutzutage an Bauteile aus den unterschiedlichsten Industriesektoren gestellt werden zu entsprechen, muss die Porosität jedoch nicht nur quantitativ sondern auch qualitativ sehr genau bestimmt werden.

Eine einfache Möglichkeit die Exaktheit einer automatischen Porositätsanalyse überprüfen zu können ist – wie bei vielen anderen Messmethoden eingesetzt – der Vergleich mit einer wohldefinierten Referenz.

Im vorliegenden Fall wurde ein Referenzkörper entwickelt, der nicht nur für runde Gasporen anwendbar ist sondern im Speziellen auch für andere, unregelmäßige Volumendefizite (etwa Lunker), die speziell in der Gießerei-Industrie von großem Interesse sind.

Dieser Referenzkörper besteht aus sieben Kugeln, die in einen Ring eingelegt sind und sich gerade berühren. Das Volumen des Referenzkörpers und damit die Zwischenräume, die die Volumendefizite repräsentieren, können mathematisch exakt berechnet werden.

Damit können die automatischen Porendetektionen der entsprechenden CT-Datensätze mit einer genauen Referenz verglichen und so die idealen Parameter für die Porendetektionen einerseits und die Aufnahme der CT-Datensätze andererseits gefunden werden.

Der Referenzkörper bietet die Möglichkeit, eine Aussage zu treffen, bei welcher Voxelgröße Defekte einer bestimmten Größe zuverlässig detektiert werden können. Damit kann für ein gegebenes Prüfsystem schon im Vorfeld einer CT-Untersuchung abgeschätzt werden, welche Porositäten bei einer gegebenen Bauteilgröße oberhalb der Detektionsgrenze liegen.

Für die vorliegende Untersuchung wurde der Referenzkörper zunächst mit variierenden Parametern (Voxelgröße, Grauwertkontrast) untersucht.

Insgesamt wurden 12 CT-Scans aufgenommen, je drei mit unterschiedlichen Grauwertkontrasten für Voxelgrößen von 50 µm, 70 µm, 100 µm und 200 µm.

---

### 3.1 Schichtweise Auswertung und Vergleich mit der Metallographie

Die Auswertung mit VG Studio MAX erfolgte im ersten Schritt auf einzelnen Schichten im CT-Volumen, um die zunächst „zweidimensionale“ Porendetektion mit den Ergebnissen der Metallographie und den exakten, berechneten Werten vergleichen zu können (Abbildung 3).

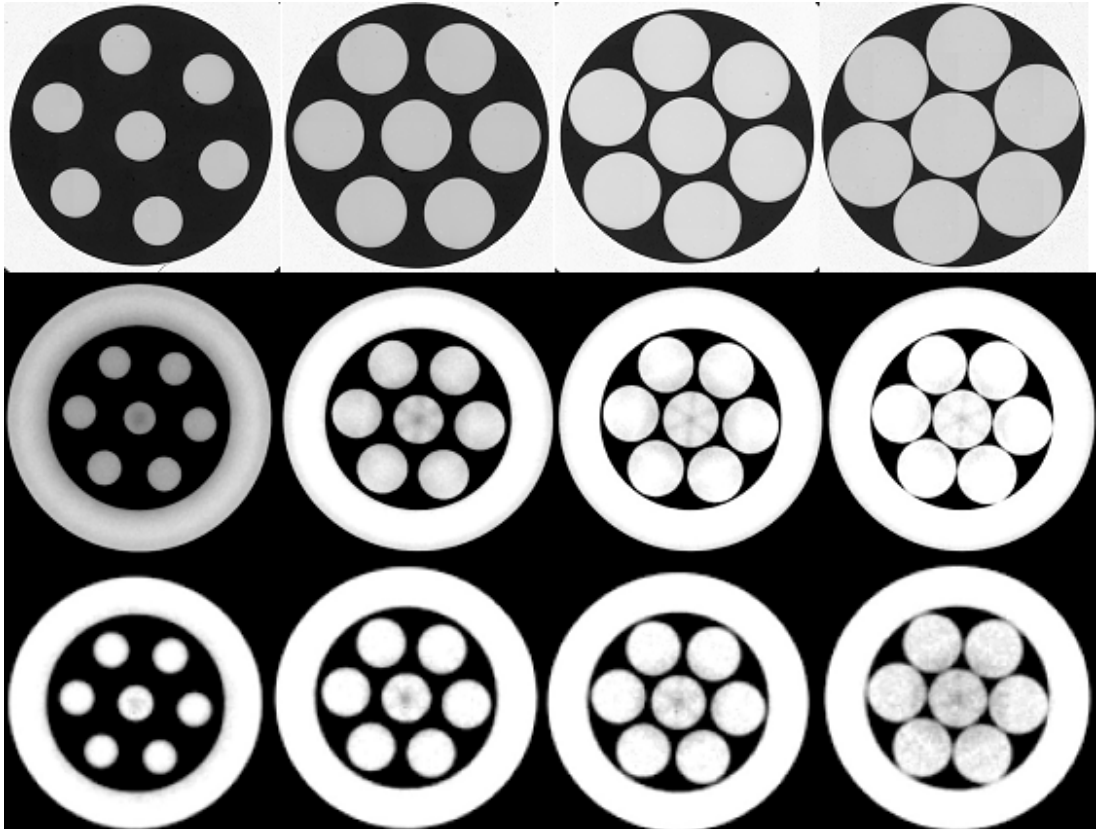


Abbildung 3: Darstellung der vier Ebenen für die Porositätsanalyse. Oberste Reihe: metallographischer Schliff, mittlere Reihe: CT-Daten (Voxelgröße 50 µm), unterste Reihe: CT-Daten (Voxelgröße 200 µm)

Die Ergebnisse der metallographischen Auswertung stimmen sehr gut mit den exakten Werten überein. Die Computertomographie liefert bei geringer Voxelgröße Ergebnisse, die vergleichbar sind mit denen der Metallographie, allerdings ergeben sich bei höherer Voxelgröße und geringerem Grauwertkontrast deutlich größere Abweichungen von den errechneten Porositätswerten (siehe Abbildung 4).

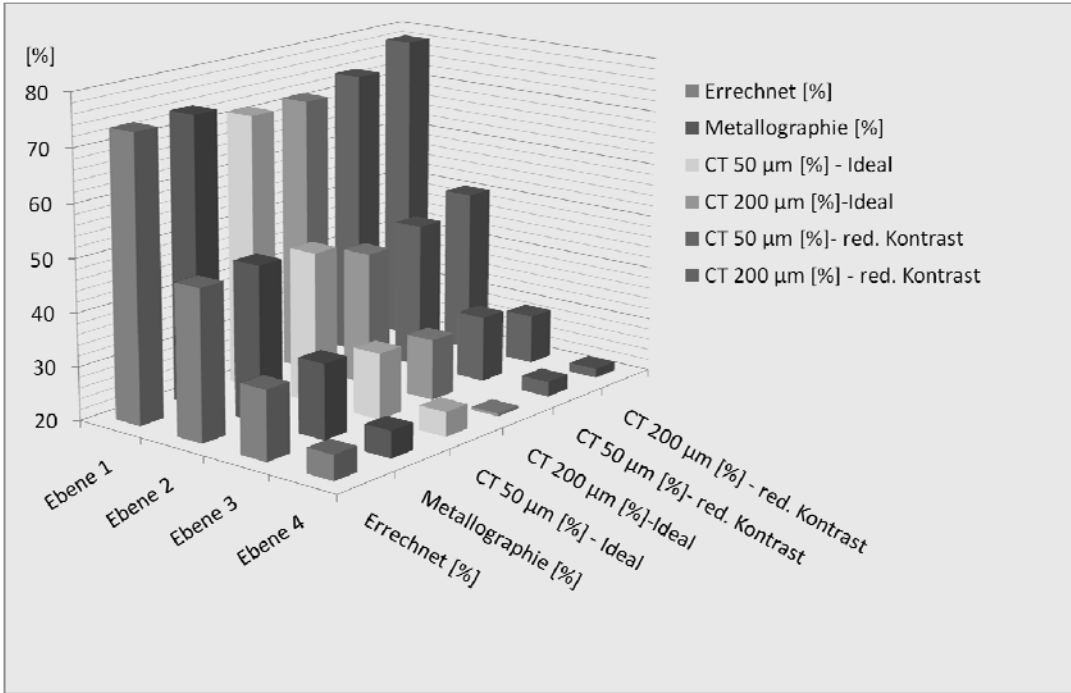


Abbildung 4: Vergleich der Porendetektionen aus Metallographie und Computertomographie mit den exakten, errechneten Werten.

### 3.2 Auswertung der Volumsporosität

Im zweiten Schritt wurde die Volumsporosität für die unterschiedlichen Parameter untersucht und wiederum mit dem berechneten, also exakten Porositätswert verglichen. Die Berechnung ergab einen Porositätswert von etwa 53 %.

$$V_{\text{Poren}} = V_{\text{Zylinder}} - 7 \cdot V_{\text{Kugel}} = r_{\text{Zyl}}^2 \pi h - 7 \cdot \frac{4 r_{\text{Kugel}}^3 \pi}{3}$$

$$P = 1 - \frac{V_{\text{Poren}}}{V_{\text{Zylinder}}} \cdot 100 \% \cong 53 \%$$

Mit optimalen Parametern (Voxelgröße und Grauwertkontrast) beträgt die Abweichung der Porositätsanalyse vom errechneten Wert P etwa 2 %. Bei einer Voxelgröße von 200 µm – dies entspricht in etwa einem Hundertstel des Gesamtdurchmessers des Referenzkörpers – weicht die detektierte Porosität im bei optimalen Kontrastverhältnissen um etwa 10 % ab, bei minimalem Kontrast sogar um mehr als 16 % (siehe Abbildung 5).

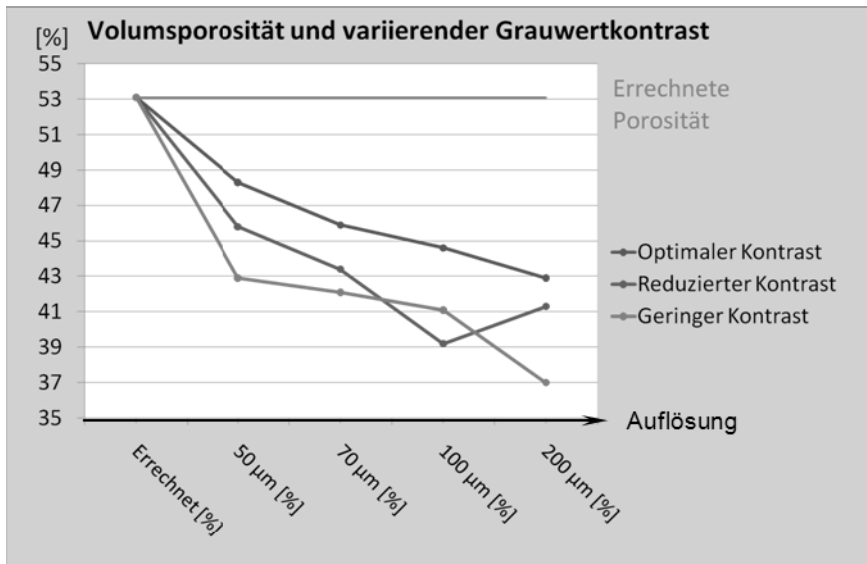


Abbildung 5: Vergleich der Porendetektionen an Datensätzen mit unterschiedlichen Auflösungen und Kontrastverhältnissen mit dem errechneten, exakten Porositätswert.

#### 4 Zusammenfassung

Im Rahmen der vorliegenden Untersuchungen wurde ein Referenzkörper zur Verifizierung der Ergebnisse von automatischen Porositätsanalysen entwickelt.

Es konnte gezeigt werden, dass der Referenzkörper geeignet ist, um automatische Porendetektionen an CT-Daten hinsichtlich deren Genauigkeit zu bewerten.

Es wurden zwei Parameter – Voxelgröße und Grauwertkontrast - als wesentliche Einflussgrößen für die Detektionsgrenzen kleiner Volumendefizite identifiziert. Außerdem ist mit den bisher gewonnenen Daten im Vorfeld einer CT-Untersuchung eine Abschätzung der Detektionsgrenzen möglich.

