

# IPARI CT HOSSZMÉRÉSI FOLYAMATÁNAK ELEMZÉSE

## ANALYSIS OF DIMENSIONAL INDUSTRIAL CT MEASUREMENT PROCESS

*Drégelyi-Kiss Ágota, PhD, Óbudai Egyetem, Bánki Donát Gépész és Biztonságtechnikai Mérnöki Kar*

**ÖSSZEFOGLALÁS.** Az ipari gyakorlatban egyre elterjedtebben használják az ún. ipari CT berendezéseket roncsolásmentes anyagvizsgálatok mellett dimenzionális mérésekre. A CT-vel történő három dimenziós, optikai elven történő hosszúságmérések népszerűek, mivel a mérések ideje a 3D mérőgépekkel történő méret-meghatározáshoz képest lényegesen kisebb, valamint belső méretek is meghatározhatók roncsolásmentesen, amelyekre egyéb hosszmérőeszközök elérhetőség hiányában nem adtak megoldást. Cikkemben egy alumíniumból készült tesztarab dimenzionális mérésének tervezését, folyamatát mutatom be ipari CT-vel történő meghatározás során.

**ABSTRACT.** More recently, the industrial CT equipment is used not only for non-destructive analysis but to perform geometrical evaluations. The three dimensional, optical dimensional measurements made by CT are popular because the measurement time is much more less than in case of traditional 3D measurement machines, furthermore the inner geometries can be determined by non-destructive manner. In this article the design of an aluminum test cube by industrial CT are described and the evaluation of the measurement data are shown.

### 1. BEVEZETÉS

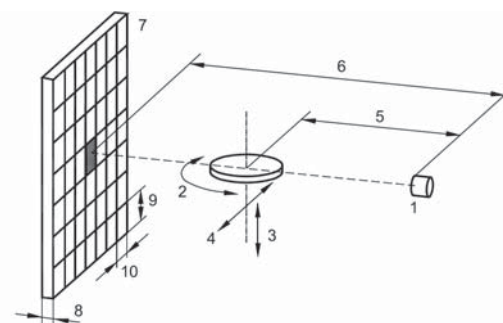
A computer tomográf (CT) egyre elterjedtebben használt mérőeszköz az ipari gyakorlatban. Először anyagvizsgálati feladatokat végzetek rajta, mind öntési hibák, levegő zárványok és nagyobb méretű szennyező anyagok mennyisége az alkatrészekben, majd 2000-es évek második felében a technológiai fejlődés következtében hosszúságok mérésére is elkezdték használni. Számos olyan gépelem van, amelynek méretei roncsolásmentesen nem mérhetőek meg, mint például a nagyon mély és szűk furatok átmérője, beszúrások méretei. Az ipari CT-k alkalmazásával lehetővé vált, hogy ezen méretek roncsolásmentesen meghatározhatók legyenek. Ma a CT-vel történő hosszúság mérések 0,01 mm felbontást érnek el, mert

a bonyolult mérési eljárás nem teszi lehetővé a pontosabb méret meghatározást [1].

A CT rendszer röntgen sugárforrásból, forgóasztalból, egy röntgen detektorból és egy adatfeldolgozó egységből áll, amely számításokat végez, vizualizál és elemzi a mérési adatokat. A CT berendezés felépítése az 1. ábrán látható. A CT lényegileg a röntgensugárforrásból, a detektorból és a vizsgálati tárgyat mozgató egységből áll. A mozgóegységnek van translációs (3,4) és transzformációs tengelye (2). A translációs tengelyek a vizsgálati tárgy pozícionálására szolgálnak, míg a forgó tengely a mérések alatt forgó tengelyként működik. A translációs vagy segédtengelyeken történő mozgatással érhető el, hogy a tárgy geometriai nagyítását a detektorsíkon beállítsuk. A nagyítás mértéke a következőképpen határozható meg:

$$M = \frac{SDD}{SOD}$$

ahol *SDD*: a sugárforrás és detektor távolság (6), *SOD*: a sugárforrás és a vizsgálati tárgy távolsága (5).



1. ábra: Ipari CT-vel történő mérés elve [1]  
(1: sugárforrás, 2: forgó tengely, 3: z-tengely, 4: y tengely, 5: sugárforrás - tárgy távolság (SOD), 6: sugárforrás - detektor távolság (SDD), 7: detektor; 8: sugárforrás - detektor távolság (SDD), 9: pixel magasság, 10: pixel szélesség)

A mérés végrehajtásához a vizsgálati tárgyat általában 360°-ban megforgatjuk a röntgensugárban, és nagy számú egy vagy kétdimenziós képfelvételt készítünk, attól függően, hogy milyen a detektor ill. a sugárforrás.

A CT berendezéssel elkészült 2D képek feldolgozásának első lépése a 3D rekonstrukció, amelynek során a kétdimenziós képekből matematikai algoritmusokkal három dimenziós térfogatot állítunk elő. A rekonstruált 3D képek voxelekből állnak össze. A voxel a 3D képek elemi része, hasonlóképpen, ahogy a pixel a 2D képek elemi része. A voxelméret függ a 2D képek pixelméretétől, és a  $SOD$ ,  $SDD$  távolságoktól. A voxel mérete meghatározó a hosszmerések pontosságának az elérésében.

A rekonstrukció során kapott térfogati modellben minden voxelnek lesz egy szűrkeségi értéke, amely attól függ, hogy ebben a térfogatelemben mennyi röntgensugárzás nyelődött el. Ezután meg kell határozni, hogy hol található a határvonal, mely voxelek tartoznak a tárgyhoz és melyek tartoznak a háttérhez, a levegőhöz. A küszöbérték (threshold) azt határozza meg, hogy mely szűrkeségi értéket tekintjük az egyik vagy a másik anyaghoz tartozónak. A küszöbérték kritikus paraméter a felület határának a meghatározásához, tehát nagy jelentőségű a későbbi geometriai mérések pontosságát illetően.

A küszöbérték meghatározása után a felület előállítás a következő lépés. A számítógéppel történő felület-meghatározással előállt modellen 3D mérés technikai módszerekkel méréseket tudunk végezni.

## 2. ETALONOK A CT-VEL TÖRTÉNŐ DIMENZIONÁLIS MÉRÉSTECHNIKÁBAN

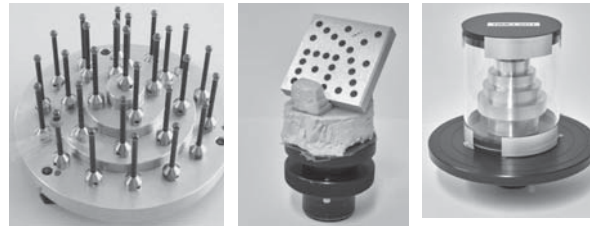
Az ipari CT-vel történő dimenzionális mérések alapja, hogy a mérés eredménye visszavezethetősége adott legyen. A mérések visszavezethetősége egy mérési eredménynek az a tulajdonsága, hogy dokumentált, mérési bizonytalansággal ellátott kalibrálások megszakítatlan láncolatán keresztül kapcsolódik megadott referenciákhoz [2]. Hosszmerések esetén ez azt jelenti, hogy kalibrált etalonokon keresztül a mérési eredménynek a méter definíciójáig kell visszavezetett legyen.

A CT-vel történő mérések során a mérési folyamat nagyon összetett, a szabványok és előírások még nem kidolgozottak, így a mérés visszavezetettsége nem teljesen megoldott [3]. A CT gépek gyártói és a nemzetközi mérésügyi szervezetek a legkülönbözőbb etalonokat és vizsgálati darabokat találták ki saját gépeik ellenőrzésére, kalibrálására (2. ábra, [4]):

a) 27 rubin gömböt tartalmazó „torta” (Zeiss)

b) 28 db 4 mm-es átmérőjű furattal ellátott sík (48 mm x 48 mm x 8 mm)(PTB)

c) lépcsős tengely (NMIJ)

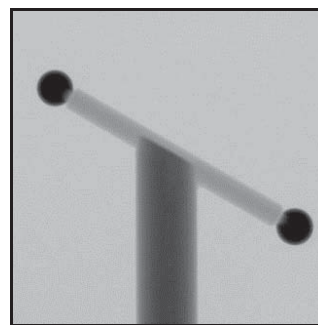


2. ábra: CT mérésben használatos etalonok

Az etalonok nagyon pontosan megmunkált elemeket tartalmaznak, a méreteiket kalibrált tapintós koordináta mérőgépekkel nagy pontossággal határozzák meg, így a referenciaértékeket az etalonok kalibrálási bizonyítványából ismerjük.

A CT-vel történő hosszmeréseknél tehát az etalonnal történő mérés az első lépés, és a kapott mérési eredményeket összevetjük az etalon kalibrálási bizonyítványában szereplő értékkel. Amennyiben ez eltérő, akkor a CT-vel történő mérési folyamat felület meghatározási fázisában korrekciót hajtunk végre, hogy a kapott 3D modellen a kalibrálási jegyzőkönyvben szereplő érték jelenjen meg a CT mérés végeredményeként.

Ezt az adat vagy skála korrekciót általában golyós rúd (ball bar, 3. ábra) vagy furatos rúd (hole bar) felhasználásával végezzük el.



3. ábra: CT felvétel a golyós rúdról

Itt ismert a két gömb vagy a két furat középpontjának a referencia távolsága, és skála korrekció során a voxel méretet változtatjuk meg a következő szerint:

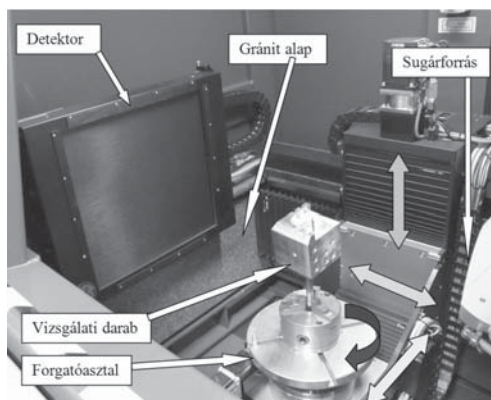
$$s = s_0 \cdot \frac{d_{Ref.}}{d_{mért}}$$

ahol  $s_0$  az eredeti voxelméret,  $s$  az új voxelméret,  $d_{Ref.}$  a referencia méret,  $d_{mért}$  a mért méret.

A skálakorrekciót minden esetben ajánlott elvégezni, ha a vizsgálati tárgy sugárforrástól való távolsága megváltozik (SOD változik), és célszerű a referencia etalont a vizsgálati tárggyal egy időben mérni, amennyiben ez megoldható [5].

### 3. CT-VEL TÖRTÉNŐ MÉRÉSI FOLYAMAT BIZONYTALANSÁGI ÖSSZETEVŐI

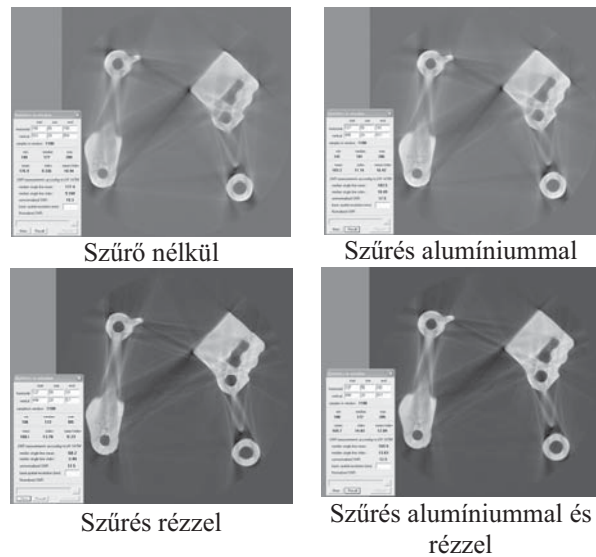
Az ipari CT-vel történő hosszmeréseket befolyásoló tényezők a mérési folyamat összetettsége miatt számos okra vezethető vissza [3]. A mérésre hatással van a CT berendezés típusa és felépítése (röntgen sugárforrás, tengelyek, detektor és burkolat, 4. ábra); a vizsgálati tárgy és a mérési paraméterek; az elemzési folyamat (rekonstrukciós szoftver és a voxel adatok alapján végzett adatelemzések); a környezeti körülmények (hőmérséklet, páratartalom, rezgések, por); valamint a mérési stratégia és ennek alkalmazása.



4. ábra: A CT berendezés munkaterének elemi és mozgásviszonyai

#### 3.1. CT berendezésre visszavezethető hatások

Az ipari CT berendezésben található sugárforrás működéséhez be kell állítani a kívánt feszültséget, áramerősséget. E két paraméter meghatározza a teljesítményt, a sugárnyaláb intenzitását. A feszültségben és áramerősségben fellépő ingadozások a projekciók képi minőségében okoznak eltéréseket. A sugárzás spektrumát változtatja meg a szűrésre szolgáló anyagok jelenléte (rézlemez, ón lemez), e szűrők anyagvastagságának változása és az anyag inhomogenitása a keletkező kép minőségét befolyásolja (5. ábra).



5. ábra: A szűrés változtatásának hatása a CT kép minőségére [6]

A röntgencső működése közben felmelegszik, ez a mérési folyamatba hibát visz bele. A vizsgálati tárgyat körülforratjuk, és 720-1440 db projekció készül a tárgyról, amely képek elkészülési ideje alatt a kezdeti 20 °C-os hőmérséklet megemelkedhet akár 5 °C-kal is a vizsgálat idejétől függően. A hosszmerések során, különösen a mikrométeres méretek meghatározása során nagyon fontos, hogy a hőtágulásból származó méretváltozást ki tudjuk küszöbölni. Ez jelenleg még nem megoldott technológiailag, ez is okozza azt, hogy kis méretek mérésére nem alkalmas ez a mérési eljárás.

A CT berendezés fizikai felépítésében fontosak a tengelyek, ezek helyzete egymáshoz képest és a detektorhoz képest. A tengelyek nem tökéletesen merőlegesek egymásra, amely mérési bizonytalanságot okoz. A vizsgálati darab súlya megváltoztatja a forgó tengely jellemzőit, gondosan kell eljárni, hogy hogyan helyezzük el a vizsgálati tárgyat a forgótengelyhez rögzítve.

A detektor kialakítása, jellemzői, minősége és működése nagy hatással van a keletkező 2D-s felvétel minőségére, és az azt követő hosszmerés pontosságának az alakulására. A detektornak olyan kialakítása van, hogy a külső és belső szórt sugárzásokat lehetőleg csökkentett mértékben detektálja. A detektor nem megfelelő hűtése az állapotát instabillá teheti, amely befolyásolja a mérés eredményét. A detektor pixelmérete és pixel száma fontos, mivel a mérés felbontóképességét meghatározza a nagyítás mellett. A minél magasabb

pixelszám azért előnyös, mert azonos sugárzási körülmények között egy jobb jel/zaj viszonyt eredményez.

A detektor minősége az időben változhat. A magas pixelszámú detektorok esetén gyakrabban előfordulnak különböző típusú pixelhibák, amelyeket a rekonstrukciós folyamat során rögzíteni kell, hogy ezen értékeket ne vegyük figyelembe a kiértékeléskor.

A CT berendezés környezete is befolyásolja a hosszmerések eredményét. Léghőmérséklet szükséges, hogy stabil hőmérsékletet biztosítsunk, amely elengedhetetlen feltétele a stabil geometriai elemek eléréséhez. A hőmérsékleti gradienseket figyelembe kell venni, és – mintától függően – figyelni kell a környezet páratartalmának közel állandó értéken tartására is. A mérés során fellépő rezgések és zajhatások befolyásolhatják a mérés eredményét. A 2D projekciók képi minőségét erősen befolyásolják a berendezésből vagy a gép nem sugárzó komponenseiből származó szórt sugárzás mértéke. Minél több ilyen jellegű, nem a mérésből eredő szórt sugárzást detektálunk, annál gyengébb kontrasztú és minőségű projekciókat kapunk eredményül [6].

### *3.2. A vizsgálati tárgyval és a mérési paraméterekkel kapcsolatos hatások*

A vizsgálati tárgyat megfelelően kell rögzíteni, hogy a CT felvétel készítése közben a forgatás során ne mozduljon el. A tárgy elmozdulása asszimmetrikus szkennelést eredményez, amely rekonstrukciós hibát okoz. A vizsgálati tárgy elhelyezését a forgatóasztalon úgy kell elvégezni, hogy lehetőleg a forgatási tengellyel merőleges síkok ne legyenek, mert ez esetben homályos felvételeket kapunk erről a síkról.

A vizsgálati tárgy anyaga a röntgensugárzás abszorpciójának mértékében fontos tényező. A magas abszorbeáló képességű anyagok (pl. a magasabb rendszámú elemek) gyengébb jelű projekciókat eredményeznek.

A mérési paraméterek közül a kép minőségét jelentősen befolyásolja az elő-szűrés. Ez megvalósítható például különböző vastagságú alumínium, réz, ón lapka használatával. Szűrő nélkül és a csak alumíniummal történő szűrés esetén homályosabb felvételt kapunk, mint a másik két típus esetén.

A forgatás során be kell állítani, hány képet kívánunk készíteni egy körülforgatás alatt. A forgási szög beállításának pontossága miatt

célszerű, hogy a felvett képek száma lehetőleg a 180 többszöröse legyen (pl. 720; 1080; 1440). Folyamatos forgatás a detektor típusától függően lehetséges. Minél nagyobb számú röntgenfelvételt készítünk, annál jobb lesz a felbontás, de annál hosszabbá válik a rekonstrukciós idő is. Ha a forgatás során nem tudunk minden szögben felvételeket készíteni, az rekonstrukciós hibákhoz vezethet.

A tárgy pozíciója a detektor és a sugárforrás között meghatározza a nagyítás mértékét. Ennek beállítása fontos az elérhető legnagyobb mérési pontossághoz.

### *3.3. Az elemzési folyamat hatása*

Az elemzési fázis akkor kezdődik el, amikor a nagy számú 2D röntgenfelvétel elkészül. Ennek első lépése a rekonstrukció, amikor a 2D adatokból voxel adatokat állítunk elő. A különböző ipari CT berendezésekhez tartozó rekonstrukciós szoftverek egymástól eltérő algoritmusok használatával végeznek számításokat, és a kapott eredmények nem abszolút mértékűek, az algoritmustól függően eltérhetnek egymástól, amelyek hatással vannak a mérés eredményére.

Az elemzési folyamat második lépése a már rekonstruált modellen történő tulajdonképpen 3D mérések elvégzése. Hasonlóan a 3D méréstechnikai szoftverekhez az ipari CT berendezéshez tartozó szoftverek a voxel adatokra különféle algoritmusok szerint felületmodellt hoznak létre. A felületmodell készítése során a voxel modell pontjaira illeszthetünk geometriai elemeket, mint például hengereket, síkokat, éleket. Az illesztés során az alkalmazott matematikai algoritmus befolyással van a kapott eredményre, a hossz mérés bizonytalanságára.

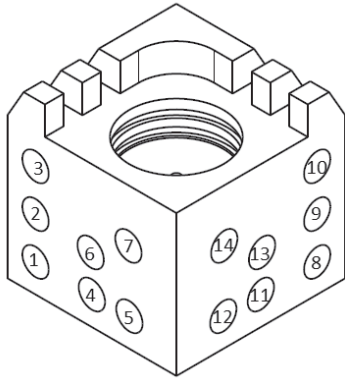
### *3.4. Egyéb hatások*

Az ipari CT berendezéssel történő hosszmeréseket erősen befolyásolja az alkalmazott mérési stratégia. A mérési stratégia meghatározásánál körültekintően kell eljárni az etalonok használatával. Lehetőség szerint a vizsgálati tárgyval együtt kell az etalont is mérni, hogy a mérés visszavezethetősége megfelelő legyen. Így az etalon méretét ismerve a vizsgálati tárgy méretei is megfelelő pontosságúak lesznek. A mérés körülményeit, a paraméterek beállított értékeit gondosan rögzíteni kell, hogy az eredmények reprodukálhatóak legyenek.

## 4. ANYAGOK ÉS MÓDSZEREK

### 4.1. Vizsgálati munkadarab tervezése

Az ipari CT berendezés metrológiai tulajdonságainak vizsgálatára terveztem egy teszt munkadarabot, amely anyaga AlMgSi1, befoglaló mérete 90mm x 90mm x 90mm (6. ábra).



6. ábra: Alumínium vizsgálati tesztadarab a furatok sorszámaival

### 4.2. Mérés körülményei

A dimenzionális mérésekhez GE phoenix v|tome|x m mikro-CT berendezést használtam. 2024x2024 pixeles detektorral, max. 320 W, 320 kV-os röntgenső. A mérés során használt beállítások: 250 kV, 360  $\mu$ A, 330 ms-os képfelvétel, binning 1x1, szűrők: 0,5 mm Sn és 0,5 mm Cu, felvett képek száma 1440. Az így elért voxelméret 73,44  $\mu$ m. A rekonstrukcióhoz használt szoftver a VGStudio Max 2.2.2. volt.

## 5. MÉRÉSEK ÉS ÉRTÉKEKELÉSÜK

### 5.1. Etalon mérése és korrekció

Az alumínium tömb átvilágítása és az 1440 projekció elkészítése közel másfél órát vett igénybe. A rekonstrukció után elsőként meghatároztam az etalonon szereplő két rubingömb távolságát. Eredményként 15,908 mm-t kaptam. Következő lépésben korrekciót kellett alkalmazni, mivel a kapott méret nem egyezett az etalon kalibrált méretével.

$$d_{m\acute{e}rt}=15,908 \text{ mm}; \quad d_{Re\acute{f}}=15,9329 \text{ mm}; \\ s_o=0,07344 \text{ mm}.$$

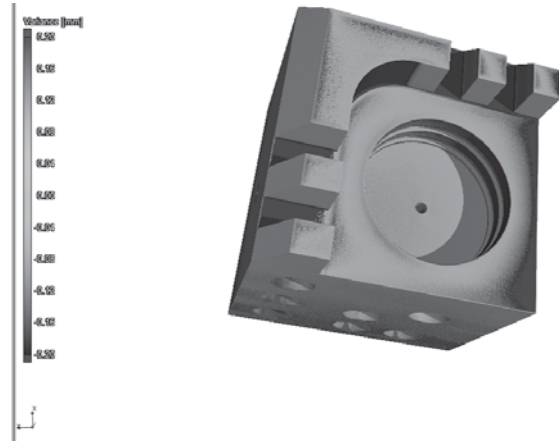
Az új voxelméret tehát:

$$s = 0,07344 \cdot \frac{15,9329}{15,908} = 0,07356 \text{ mm}$$

### 5.2. Alumínium teszt darab mérése

A felületmodell elkészítésével elérhetővé válik, hogy a vizsgálati darab méreteit

összehasonlítsuk akár a névleges CAD-moddellel, akár a vizsgálati darab méreteinek helyes értékeivel. Jelen munkában a mérés során kapott felületmodellt a munkadarab névleges CAD modelljével vetettem össze (7. ábra).



7. ábra: 3D rekonstrukció illesztése CAD modellhez

Az illesztés során automatikus beállítást alkalmazva a szoftver a legnagyobb pozitív eltérést vörös színnel, míg a legnagyobb negatív eltérést lila színnel jelölte meg. A zöld színű területek ezek legközelebb a névleges mérethez. A baloldali skáláról leolvasott értékek alapján az eltérés + 0,2 és - 0,2 mm között van.

## 6. ÖSSZEGZÉS

Egy vizsgálati darab megtervezése egy CT berendezésre komplex feladat. Figyelembe kell venni, hogy mit szeretnék mérni, milyen gépen szeretnék mérni és nem utolsó sorban a gyárthatóságot.

A kutatás további célja, hogy a későbbiek során a vizsgálati darab pontos méretét meghatározzuk tapintós, 3D mérés technika segítségével, majd az így előállt mérési adatokon alapuló CAD modellt hasonlítsuk össze az ipari CT berendezéssel kapott eredményekkel. A pontos mérettel történő összehasonlítással elérhetővé válik, hogy az ipari CT hosszmerések bizonytalanságát meghatározzuk a CT mérés paramétereinek a függvényében forgácsolt alkatrész esetén.

## KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS

A kutatás az Emberi Erőforrások Minisztériuma ÚNKP-17-IV-6 kódszámú Új Nemzeti Kiválóság Programjának támogatásával készült.

## IRODALOM

[1] VDI/VDE 2630 Part 1.1: Computed tomography in dimensional measurement - Fundamentals and definitions, 2014.

[2] International Vocabulary of Metrology – Basic and General Concepts and Associated Terms (VIM 3rd edition), JCGM 200:2012 (JCGM 200:2008 with minor corrections)

[3] VDI/VDE 2630 Part 1.2: Computed tomography in dimensional measurement -

Influencing variables on measurement results and recommendations for computed-tomography dimensional measurements, 2010.

[4] Cantatore, A., & Müller, P. (2011). Introduction to computed tomography. Kgs.Lyngby: DTU Mechanical Engineering.

[5] Bartscher, M., Illemann, J., & Neuschaefer-Rube, U. (2016). ISO test survey on material influence in dimensional computed tomography. Case Studies in Nondestructive Testing and Evaluation.

[6] Lifton, J. J. (2015). The influence of scatter and beam hardening in X-ray computed tomography for dimensional metrology (Doctoral dissertation, University of Southampton).