



Slutrapport

MDD – Udvikling af modulær dark field detektor

Projektperiode: januar 2017 til og med december 2019

25. november 2019

Proj.nr. 2004816

Version: 0.9

Init. LBC/mt

Baggrund

Slutrapport – til publicering

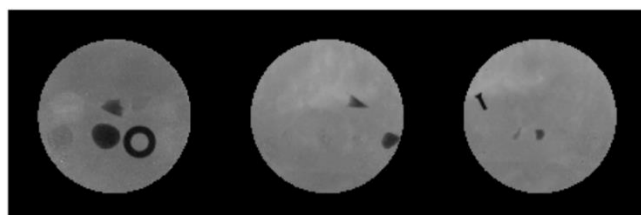
NEXIM er et strategisk forskningsprojekt, der blev bevilget til Københavns Universitet (Niels Bohr Institutet) i 2011. I dette projekt blev afsøgt en række røntgenteknologiske landvindinger i forhold til anvendelser i den danske fødevarerindustri. Delta-gerne i dette projekt var vigtige aktører inden for brød, mejeri, frugt, fisk, konfekture samt kød og kødprodukter. Projektaktiviteterne blev for en stor dels vedkommende afviklet i ph.d.-projekter, men var målrettet anvendelser i fødevarerbranchen. Konkrete anvendelser af to-energi røntgen, multispektral røntgen og dark field røntgen-detektion blev sammenlignet med hensyn til radiografisk måling af vigtige fødevarer-kvaliteter som homogenitet, sammensætning og forekomst af fremmedlegemer.

Foruden de radiografiske målinger blev der også afprøvet tomografiske opstillinger til nogle få forskningsmæssigt interessante anvendelser som bestemmelse af vævsforandringer i fisk og kylling samt frugt og fersk kød. Disse anvendelser er dog på grund af den tomografiske tekniks kompleksitet et stykke fra at kunne implementeres i en fødevarerproduktion.

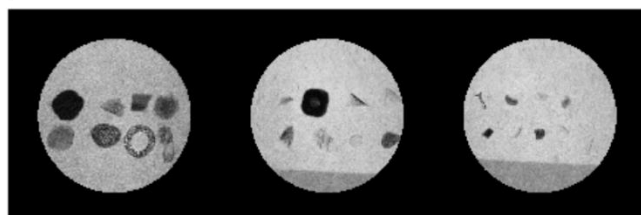
Derfor blev det mest realiserbare potentiale konkretiseret i et IFD-projektforslag om udvikling af en modulær røntgendetektor til forbedring af detektion af lette, fiberholdige materialer, når de optræder som fremmedlegemer i forskellige fødevarer, herunder kødprodukter.



Absorption



Dark-Field



Overordnet projektmål Udvikling af et detektormodul til indbygning i eksisterende røntgenudstyr, så dettes detektionsevne forbedres, specielt i forhold til lette, fiberholdige fremmedlegemer. Projektets overordnede formål er at udvikle en robust røntgendetektor, der kan forbedre detektionen af fremmedlegemer af lette fiberholdige materialer som fx papir og træ i fødevarer.

Målgruppen Fødevarereproduktionen og leverandører af detektionsudstyr til denne.

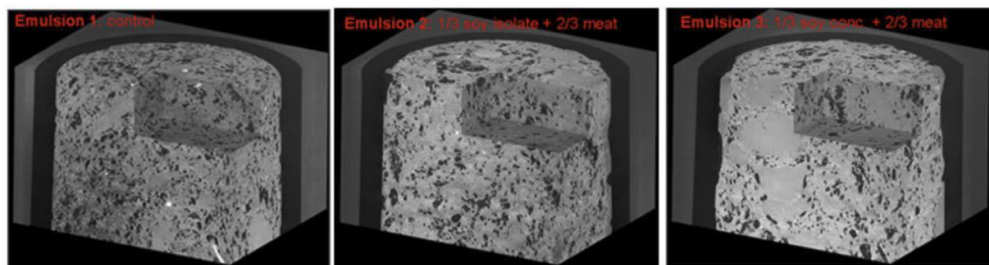
Værdiskabelsen Et succesfuldt udkomme af projektet vil udvide fødevarereproducenternes muligheder for at nedsætte frekvensen af tilbagekald begrundet i forekomst af fremmedlegemer. Udstyrsleverandørerne vil kunne udvide deres markedsadgang ved at tilbyde en højere detektionsevne over for fiberholdige fremmedlegemer.

Overvejelser i analyse- og idéfasen I løbet af NEXIM-projektet viste laboratorieresultater og erfaringer, at de fasefølsomme metoder (fasekontrast og dark field) stiller meget store krav til den mekaniske stabilitet af opstillingerne. Krav, som ikke umiddelbart kan honoreres med kommercielt tilgængelige komponenter. Derfor er der formuleret, søgt og bevilget et udviklingsprojekt, som skal sammenbygge de væsentligste komponenter til en kompakt modulært opbygget enhed, der efter projektet kan give den nødvendige stabilitet og robusthed (6150-00032B fra IFD).

I nærværende projekt er der afprøvet en energifølsom detektor i et forsøgsudstyr, som har været benyttet til at detektere fremmedlegemer og andre kvalitetsafvigelser i forskellige fødevarer. En bred vifte af danske fødevarerivirksomheder har været tilknyttet projektet. Tilknytningen har været i form af workshops/temadage og 33 nyhedsbreve med forskellige korte brugerfokuserede nyheder fra projektets aktiviteter. Nyhedsbrevene dannede baggrund for diskussioner på de omtalte temamøder. Diskussionerne tog derfor afsæt i brugerrelevante problemstillinger, som kunne inspirere universitetsforsøgene til et relevant indhold for dansk fødevarereproduktion. Langt de fleste af disse diskussioner omhandlede detektion af fremmedlegemer og de stigende krav fra kunder og myndigheder på området.

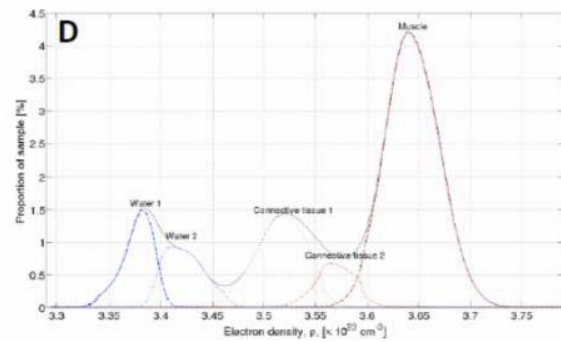
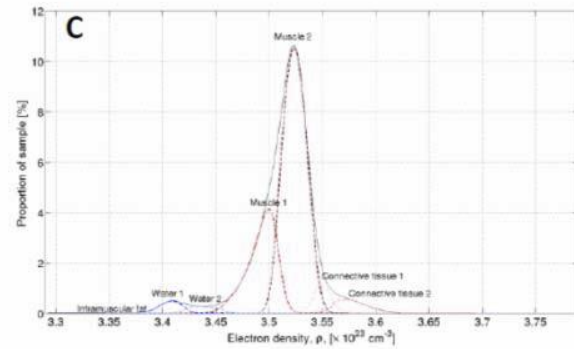
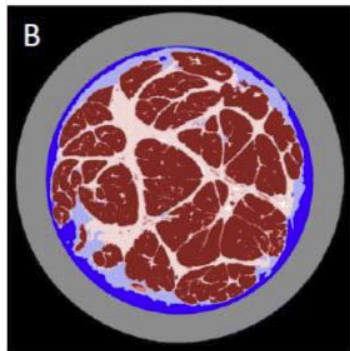
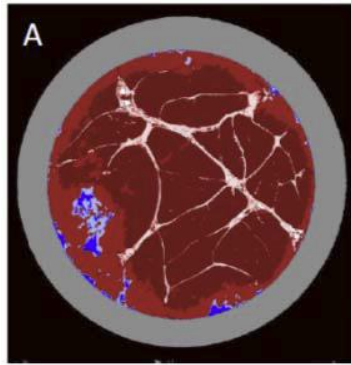
Kødemulsioner er den teknologiske term for det, vi som forbrugere kender som frankfurtere, kødpølse og andre finthakkede kødprodukter. Strukturelt består disse produkter af et proteinnetværk, der kan karakteriseres som en gel. Geldannelsen og stabiliteten afhænger primært af protein- og fedtegenskaberne. På Paul Scherrer Instituttet i Schweiz blev der lavet en række målinger på to typer pølseemulsion; den ene med svinefedt og den anden med solsikkeolie som fedtkilder. Røntgenmetoderne giver mulighed for at beskrive fordelingen af de indgående komponenter før og efter varmebehandlingen. Analysearbejdet har givet nye metoder til at beskrive funktionalitet mere udførligt end de konventionelle; metoder, som meget detaljeret kan beskrive de ændringer, der sker som følge af opvarmning af emulsionerne. Ved at måle på samme prøve før og efter et procestrin giver røntgenmetoderne et unikt indblik i, hvad de enkelte komponenter i en opskrift bidrager med i de samlede funktionelle egenskaber. Det var muligt at få en meget detaljeret beskrivelse af fordelingen af protein og fedt før og efter opvarmningen, som vil kunne bruges til en optimal planlægning af varmebehandlingsprocessen. Det var også muligt at bestemme kogetabet i de to recepter; ikke kun den kvantitative (volumen-)

forskel, men også selve karakteriseringen af kogetabet, som i den olieholdige recept var mindre proteinholdig, end i tilfældet hvor svinefedt var den primære fedtkilde. Der blev lavet en anden måling af kødemulsioner, hvor formålet var at undersøge, hvordan strukturen af kødemulsioner påvirkes, når kødprotein substitueres med sojaprotein. I forsøget indgik to forskellige typer af sojaprodukter: isolat og koncentrat. Disse har forskellige funktionelle egenskaber, hvor isolat forventes at gelere, mens koncentrat forventes at aggregere og virke som filler-partikler. De to produkter blev tilsat i to forskellige mængder, således at enten en tredjedel eller halvdelen af kødproteinet blev erstattet med sojaprotein. På figur 1 herunder ses 3D-renderinger af henholdsvis en kontrolemlusion (1) fremstillet uden soja samt to emulsioner, hvor en tredjedel af kødproteinet er substitueret med sojaisolat (2) og sojakoncentrat (3). Som man kan se af forskellene i størrelsen på fedtpartiklerne (de mørke pletter), er der en indikation af, at sojaproteinet ikke emulgerer fedtet så godt som kødprotein. Endvidere fremstår proteinfasen som forventet mere heterogen i sojaemulsionerne.



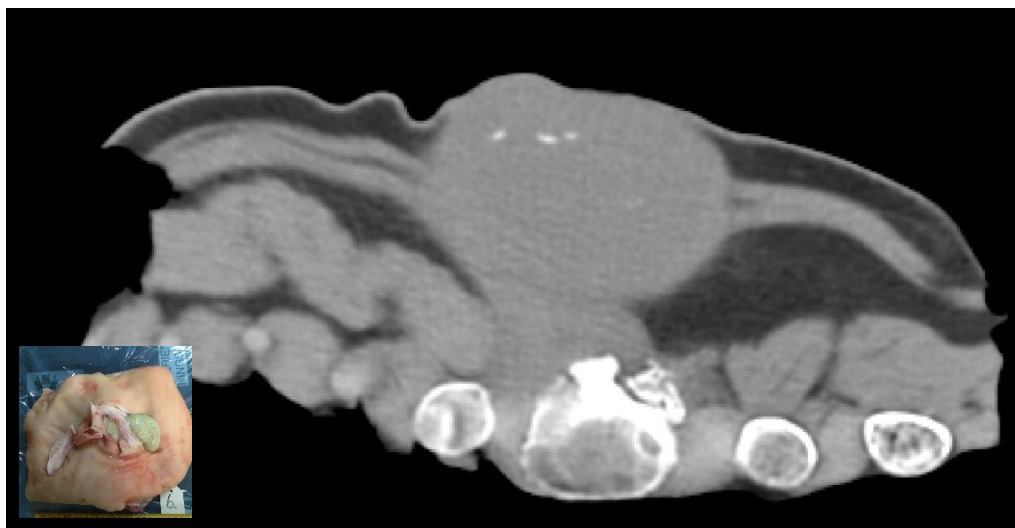
Figur 1. 3D-renderinger af fasekontrasttomografi af kødemulsioner. Emulsion 1 er produceret som en kontrolemlusion uden soja. I emulsion 2 og 3 er en tredjedel af kødproteinet erstattet med henholdsvis sojaisolat (2) og sojakoncentrat (3).

Den temperaturprofil, som bliver brugt til opvarmning af kød, har stor betydning for teksturen og saftigheden af det færdige produkt. Under opvarmningen vil kødproteinerne denaturere og medføre en sammentrækning af muskelfibrene, samtidigt vil der ske en gelering af bindevævsproteinerne. På Paul Scherrer Institutet i Schweiz blev der lavet fasekontrasttomografi på oksekød før og efter opvarmning. Det gav mulighed for at følge, hvordan fiberbundterne denaturerer ved opvarmning. På billedet nedenfor er vist et enkelt tværsnit af prøven før og efter opvarmning (figuren herunder, A&B). I de to tværsnit er det ret let at genfinde de enkelte bundter af muskelfibre, ligesom lagene af bindevæv også kan genfindes i begge målinger. I nedenstående figur C&D er densiteten af de forskellige segmenter vist. Det er tydeligt, at der er stor effekt af opvarmningen, og det ses, at fiberbundterne får en højere elektrontæthed af kogningen, hvor det modsatte gør sig gældende for bindevævet ind imellem. Målingerne viser også, at der udskilles væske under kogningen, det såkaldte kogesvind (mørkeblå).

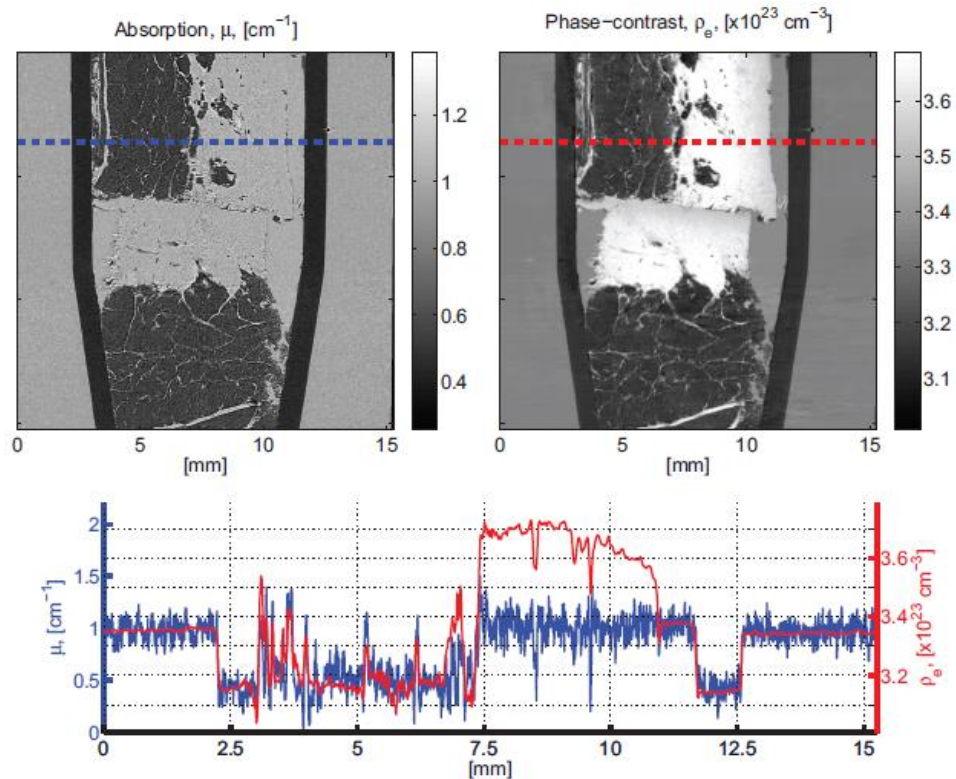


Analyse- og idéfassen blev dækket af aktiviteterne i NEXIM-projektet. De radiografiske anvendelser var fokuseret på detektion af fremmedlegemer, bestående af meget lette og fiberholdige materialer, fx træ, papir og insekter; materialer, som i litteraturen ofte er benyttet som dokumentation af potentialet i dark field-teknologien. Aktiviteterne i NEXIM indenfor denne anvendelse er beskrevet i en ph.d.-rapport "Image analysis for X-ray imaging of food", som bekræfter potentialet sammenlignet med konventionelle røntgenskannere baseret på absorption alene.

De tomografiske aktiviteter omfattede bl.a. et forsøg på at detektere skjulte bylder ved hjælp af absorptionstomografi (almindelig CT), men uden held. Bylderne vil i visse tilfælde være synlige, men er særdeles vanskelige at adskille fra muskeltvæv. Det vurderes derfor ikke at være muligt at kunne lave en automatisk detektion af skjulte bylder med CT.



For at kunne øge specificiteten af forskellige vævstyper er der i NEXIM også undersøgt muligheden for at kunne lave fasekontrasttomografi. Dette er undersøgt med et stykke svær oven på et stykke subkutant fedt.

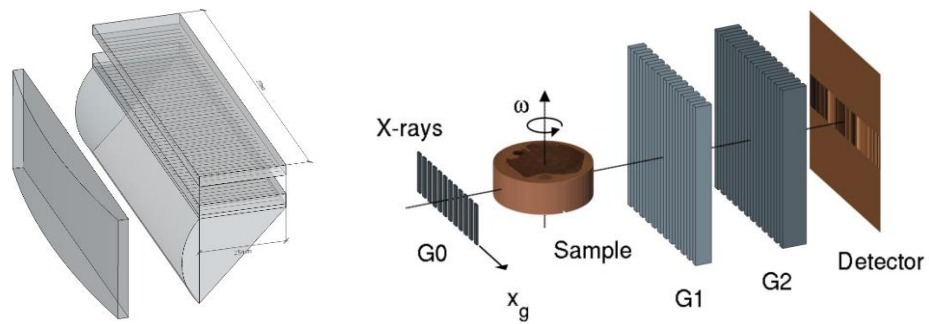


Med anvendelse af en synkrotronkilde til målingerne på sværstykkerne er denne teknik, på trods af et meget lovende udfald af forsøget, et meget langt stykke fra anvendelse i produktionspraksis.

Et fremtidigt projekt, som fastlægger denne tekniks detektionsevne af skjulte bylder, vil derfor være interessant og relevant at gennemføre.

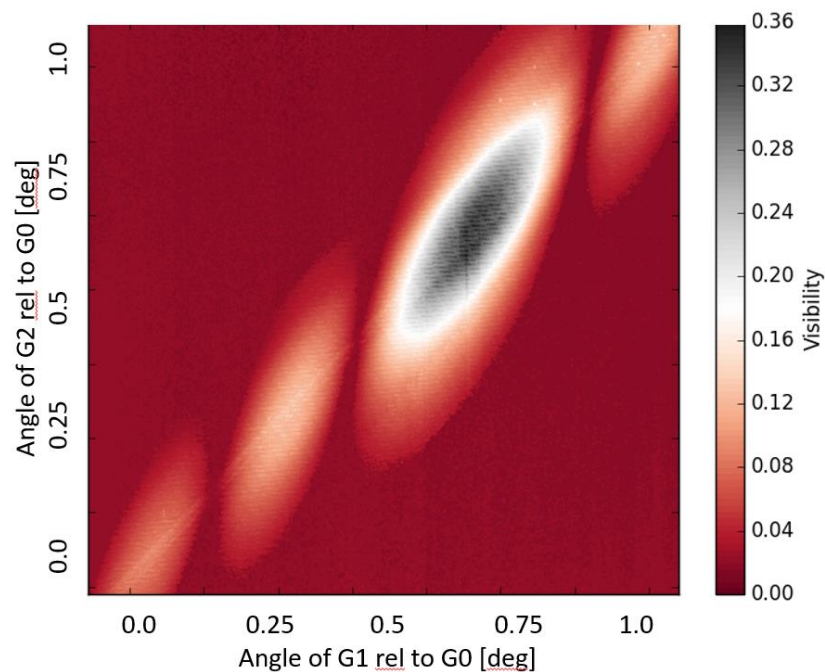
Indenfor de radiologiske anvendelser er dark field-teknikken noget tættere på, om end denne stiller store krav til udstyrets produktionstolerancer, så er de indgående komponenter alle ganske velkendte og kan bestilles fra flere high end-leverandører. I NEXIM-projektet blev der benyttet flere forskellige opstillinger til at dokumentere bl.a. detektionsevnen af dark field-teknikken sammenholdt med absorptionsradiografi. Det blev derfor besluttet at starte et mere applikationsnært projekt om udvikling af et dark field detektormodul, som kunne klare produktionskapaciteten i kødproduktionen med en positiv cost-benefit til fx produktion af brystflæsk til baconproduktion. Projektet blev ansøgt hos Innovationsfonden og opnåede støtte jf. journal nr. 6150-00032B.

Metodeudvikling Gitterinterferometeret blev bygget op på optisk bord for at sikre mod utilsigtede vibrationer. De tre gitre, som indgår i opstillingen, er fremstillet hos MicroWorks GmbH til en røntgenenergi på 40 keV, et kompromis mellem gitterperiode og gennemtrængning i biologisk væv. Sideløbende med anvendelse af dette referencegittersæt startede DanChip på DTU, gennem projektpartneren Nanotech, fremstilling af et tilsvarende sæt gitre, dog med henblik på at erstatte guld med det meget billigere materiale wolfram.



De tre gitters indbyrdes orientering skal være meget nøjagtigt tilpasset for at kunne generere det nødvendige interferensmønster på detektoren. Indstillingen af den optimale orientering har vist sig at være endog særdeles tidskrævende. Til formålet anbringes gitterne på styrbare manipulatorer (translatorer og goniometre), således at afsøgningen af den optimale placering til en vis grad kan automatiseres. Men da placeringen giver anledning til et stort antal frihedsgrader (4 pr. gitter) er denne indstilling også en central problemstilling i produktionen af et færdigt udstyr.

En illustration af denne optimeringsprocedure er vist her, hvor de to gitter G1 og G2 roteres i forhold til hinanden, mens G0 fastholdes.

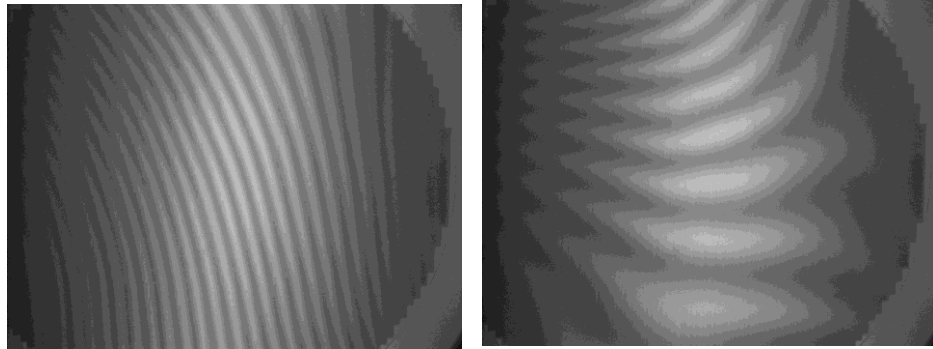


Af størrelsesangivelsen på de to akser ses, at indstillingen er særdeles kritisk, idet områderne med interferensstriber er ganske små i udstrækning. Når gitterorienteringen nærmer sig et optimum, stiger kontrasten (visibiliteten), mens stribeperioden falder; størst visibilitet med laveste stribefrekvens eller størst periode.

Her er visibiliteten af interferensstriberne anvendt som et mål for indstillingsoptimeringen: jo højere visibilitet, jo bedre interferensmønster. En antagelse, som er bekræftet i et af projekterne under NEXIM. Den største optimeringsudfordring er,

når gitrenes placering befinder sig i det ensfarvede røde område af diagrammet, hvor der absolut ingen interferensstriber er til stede.

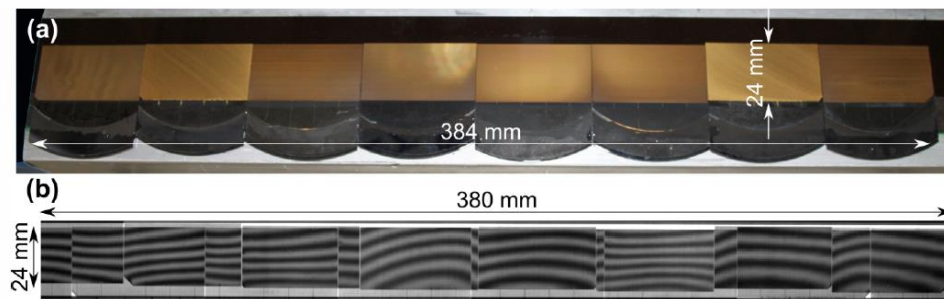
Interferensvisibiliteten er dog ikke den eneste optimeringsparameter, da interferensstribernes orientering og periode ligeledes skal afpasses til at optage geometrien.



Da interferensmønsteret skal afpasses efter objektbevægelsen, således at objektet passerer gennem interferensstriberne, skal disse være orienteret fortrinsvist vinkelret på objektets bevægelsesretning. Interferensmønsteret styres også gennem den indbyrdes placering af gitrene.

Løsning

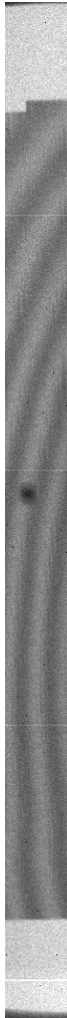
Et løsningsforslag til en modulær løsning er bygget på det Tekniske Universitet i München (TUM) til human-medicinske anvendelser.



Den realiserede detektor giver en afbildningsbredde på næsten 40 cm og vilkårlig længde, fx som til et transportbånd. Moduldesignet kan dog benyttes til den detektorbredde, som røntgenkilden kan belyse.

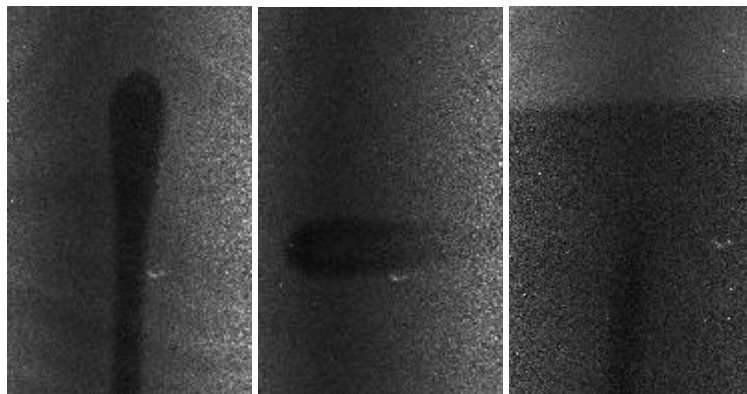
Af cost-hensyn er der i projektet benyttet en scintillator-baseret detektor, som er kombineret med et konventionelt visionkamera. Selv med køling er der dog ikke opnået en tilstrækkelig følsomhed med den benyttede røntgenkilde til at kunne opnå den krævede målekapacitet på 20 m/min ved en pixelstørrelse på $\frac{1}{2}$ mm.

Derfor er der afprøvet et andet kamera, X-Counter TDI500 fra Direct Conversion, som laver en direkte konvertering af røntgenbelysningen til billedinformation, dvs. uden scintillator. Kameraet har et beskedent antal pixels i den ene retning, men et tilstrækkeligt antal af samme størrelse (0,1 mm) til at dække den ønskede detektorbredde, fx 5120 pixels for at passe til et 500 mm bredt transportbånd.



Kameraet er velegnet til at dække et bredt skanningsområde, og den større følsomhed giver tilstrækkelig kapacitet til at præstere en båndhastighed på 20 m/min eller mere, selv med en pixelstørrelse på ned til 0,1 mm. Billedet viser en lille 1 mm stålkugle under passage af interferensstriberne i detektionsområdet.

Måling på fiberholdigt materiale er gennemført med den oprindelige detektor.



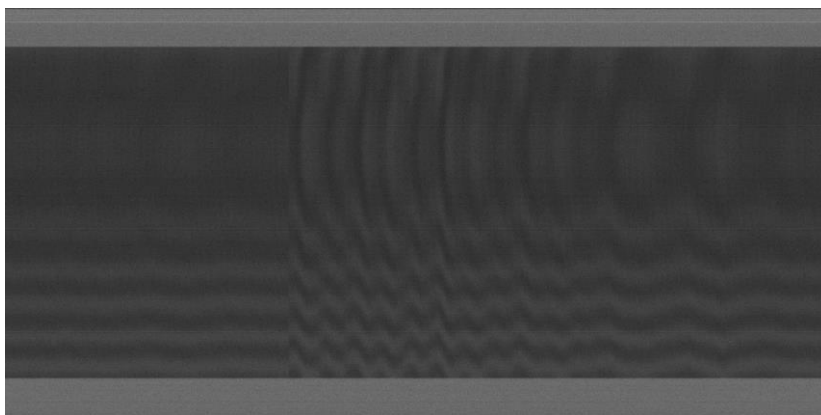
Til venstre vises måling af en vatpind fremstillet af bomuld viklet om en træpind. Dark field-billedet viser den forventede aftegning af såvel træ som bomuld, da begge er fiberholdige. I midten vises den samme vatpind, men nu orienteret vinkelret på gitrenes orientering. Nu ses, at dark field-signalet fra træpinden er væk, mens bomulden stadig giver fin aftegning i dark field-signalet. Til højre vises samme vatpind, men nu nedsænket i vand under målingen. Nu er bomuldsfibrene ikke synlige længere, mens træpinden igen kan ses. Det må dog forventes, at træpinden også bliver mindre synlig, i takt med at den optager vand.

Det kan konkluderes, at hvis fiberretningen er vinkelret på gitrene, bliver dark field-signalet voldsomt reduceret. Det samme sker, hvis bomulden, selv med sine vilkårlige fiberretninger, nedsænkes i vand.

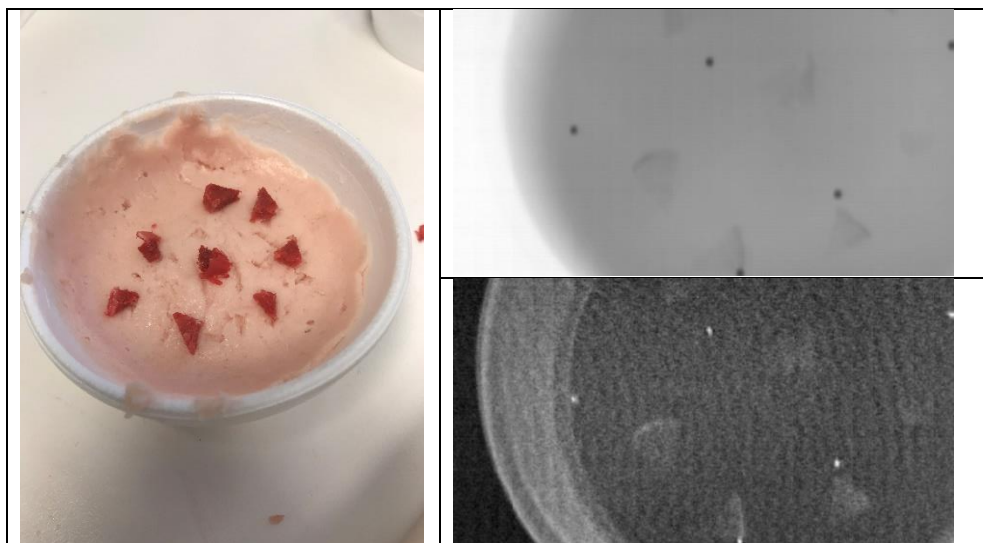
I projektføreløbet har styregruppen anbefalet at undersøge detektionsevnen af plaststykker. Der er derfor målt på Polyamid og POM tillige med brus, knogle og knoglemineralet Hydroxyapatit indlejret i en polymer. Sidstnævnte er medtaget i forsøget med henblik på at kunne fremstille ensartede knoglefantomer med velkendt densitet og størrelse.

Det hurtige TSI500-kamera har illustreret dark field-opstillingens vibrationsfølsomhed. Det scintillator-baserede kamera kan primært detektere langsomme termiske forstyrrelser, mens små, hurtige vibrationer midles ud af kameraets lange integrations-tid.

Vibrationsfølsomheden kan illustreres ved nedenstående tidsmåling, hvor en række fra detektoren udlæses som funktion af tiden. Det genererede interferensmønster ses som stabile striber, som efter en tid forstyrres af den påførte vibrationsamplitude. Da interferensmønsteret opstår som resultat af den indbyrdes position af alle gitrene, er der ikke en entydig sammenhæng mellem vibrationsamplitude og interferensstabilitet, men en grov måling viser påførte amplituder af størrelsesordenen 10-12 μm , dvs. nogle få gitterperioder af de indgående gitre. Men hvor vibrationen påvirker mest, er ikke klarlagt, da den samlede mekaniske opstilling er ganske omfattende.



En detaljeret beskrivelse af validering af detektionsevnen er medtaget som bilag til denne rapport. Her skal alene gives et summarisk resumé.



Validering af detektionsevne Der er fremstillet en række prøver på relevante fremmedlegemer i forskellig størrelse, som placeres inde i en standardiseret farsvare.

Farsvaren fremstilles med ca. 50% fedtindhold for at opnå en densitet på ca. 0 HU til at udgøre den produktbaggrund, som fremmedlegemerne skal detekteres i. Efter fremmedlegemerne er placeret, dækkes de til med produkt, og den samlede beholder vakuumeres for at mindske luftindhold.

	± 0.04	± 0.02	± 0.02	± 0.01	± 0.01	± 0.02	± 0.02	± 0.04	± 0.02	
Absorption	0.83	0.87	0.90	0.83	0.81	0.97	0.99	0.98	0.94	
Darkfield	0.51	0.56	0.87	0.80	0.77	0.94	0.98	0.97	0.95	
Darkfield/Transmission	0.54	0.60	0.88	0.80	0.75	0.96	0.98	0.97	0.95	
Mahalanobis	0.52	0.45	0.73	0.56	0.52	0.88	0.93	0.91	0.83	
Darkfield \cap Trans.	0.66	0.69	0.90	0.82	0.77	0.96	0.99	0.98	0.95	
Darkfield \cup Trans.	0.78	0.84	0.90	0.83	0.80	0.97	0.99	0.98	0.95	
	Cartilage 8 mm	POM	1/8 Bone 2 mm	1/3 Bone 2 mm	1/2 one 4 mm	Bone 1/8 2 mm, OTB	Bone 1/2 2 mm, OTB	Bone 1/2 4 mm, OTB	HA	$\Delta V/\sigma$

Område under detektionskurven (ROC) for hvert datasæt og kontrastmodel.

Farveskalaen viser forskellen i ROC-score mellem hver af kontrastmodellerne udtrykt i forhold til konventionel absorption. Forskellen normaliseres med usikkerheden i ROC. Usikkerheden estimeres ved at vurdere fejlen i det gennemsnitlige ROC-område på tværs af alle målinger (billeder) i et datasæt. OTB står for den kortikale del af knoglerne og beskriver situationen, hvor kun den tætte del af den (kortikale) knogle er inkluderet, og de tynde (trabekulære) dele maskeres.

Det ses, at detektionsevnen kun forbedres i visse situationer (nederste række), mens den er uændret i de fleste situationer. I situationerne med POM og bruske er der en decideret forringelse af detektionsevnen ved at inkludere dark field-billedet i analysen.

Konklusion/dis- *kussion*

Det er lykkedes at lave en dark field-opstilling og dokumentere dens detektions-
evne over for en række relevante materialer, når disse utilsigtet optræder i et kød-
produkt eller i fersk kød. Ud fra erfaringerne i projektet vurderes det, at teknologien
og dens indgående komponenter er tilstrækkeligt robuste til at kunne indbygges i
et udstyr, som skal kunne fungere under produktionsvilkår i en fødevarevirksom-
hed. Og dermed naturligvis også under laboratorieforhold.

Utilsigtet er det demonstreret, at dark field-detektion af flamingo er et uopdyrket
potentiale. Materialet er dog kun sjældent relevant for animalske fødevareprodu-
center, da det ikke tilbyder tilstrækkelig robusthed under praktiske produktionsfor-
hold.

For den potentielle slutbruger af en dark field-detektor baseret på røntgengitre kan
det være afgørende, om systemet giver "value for money". Derfor er der lavet en
komponentberegning af et system, som kan leve op til kravspecifikationen på 50
cm skanningsbredde, en båndhastighed på 20 m/min, en detektorpixelstørrelse på
½ mm og gennemlysningseffekt nok til at skanne 15 cm produkttykkelse. Kompo-
nentomkostningerne vurderes til 411 t.kr. med et konservativt skøn (enkeltstykpro-
duktion). Dertil kommer samle- og indstillingstiden, som ikke er medtaget eller vur-
deret. Årsagen er, at der ikke er fundet en optimal metode til at finde den relative
indbyrdes orientering af gitrene, for at interferensstribernes frekvens ($4-5 \text{ cm}^{-1}$) og
orientering (vinkelret på objektets bevægelsesretning) bliver som ønsket.

Med de erfaringer, der er indhentet i projektforløbet, er det vanskeligt at vurdere,
om de detektionsfordele, der er påvist for visse typer af fremmedlegemer, vil være
tilstrækkelige til at begrunde et indkøb til en produktion af animalske fødevarer,
sammenlignet med konventionelle røntgenskannere til detektion af fremmedlege-
mer.

Andre fødevaretyper, som fx ekstrudater, konfekturer (chokolade) og lignende, som
enten skal være meget spredende eller meget homogene, kunne være en undersø-
gelse værd.

Kontaktinforma- *tion*

Lars Bager Christensen, 72202657; lbc@dti.dk