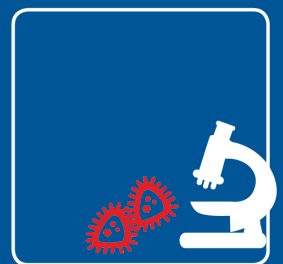


Marianne Hammershøj:  
Forbedret funktionalitet af mejeriprodukter  
ved anvendelse af nye procesteknologier  
gennem forståelse af molekylære ændringer  
ved hydrodynamisk og akustisk kavitation

Improved functional properties of dairy products by  
new process technologies through understanding  
the molecular mechanisms caused by hydrodynamic  
and acoustic cavitation



# Slutrapport

## for samarbejdsprojekter under Mejeribrugets ForskningsFond (MFF)

### 1. Projektets titel

Forbedret funktionalitet af mejeriprodukter ved anvendelse af nye procesteknologier gennem forståelse af molekylære ændringer ved hydrodynamisk og akustisk kavitation (CAVI)

Improved functional properties of dairy products by new process technologies through understanding the molecular mechanisms caused by hydrodynamic and acoustic cavitation (CAVI)

### 2. Projektleder

Lektor, Marianne Hammershøj  
Institut for Fødevarer (FOOD)  
Faculty of Technical Sciences  
Aarhus Universitet (AU)  
Agro Food Park 48  
8200 Aarhus N  
Tlf. 22 16 92 59  
Fax 87 15 48 91  
E-mail: [marianne.hammershoj@food.au.dk](mailto:marianne.hammershoj@food.au.dk)

### 3. Øvrige medarbejdere

Sandra Beyer Gregersen, FOOD, AU, [sandrab.gregersen@food.au.dk](mailto:sandrab.gregersen@food.au.dk)  
Lars Wiking, FOOD, AU, [lars.wiking@food.au.dk](mailto:lars.wiking@food.au.dk)  
Zachary Glover, Institut for Fysik, Kemi og Farmaci, Syddansk Universitet (SDU), [glover@memphys.sdu.dk](mailto:glover@memphys.sdu.dk)  
Adam Cohen, Institut for Fysik, Kemi og Farmaci, SDU, [adam@memphys.sdu.dk](mailto:adam@memphys.sdu.dk)  
Karina Bertelsen, SPX Flow Technology A/S (SPX), [karina.bertelsen@spxflow.com](mailto:karina.bertelsen@spxflow.com)  
Bent Pedersen, SPX, [bent.pedersen@spxflow.com](mailto:bent.pedersen@spxflow.com)  
Kristian Raaby Poulsen, Arla Foods Ingredients Group P/S (AFI), [kristian.raaby.poulsen@arlafoods.com](mailto:kristian.raaby.poulsen@arlafoods.com)  
Ulf Andersen, Arla Foods amba, [ulf.andersen@arlafoods.com](mailto:ulf.andersen@arlafoods.com)

### 4. Finansieringskilder

Mælkeafgiftsfonden  
Future Food Innovation, Region Midtjylland  
SPX Flow Technology (In-kind)  
Arla Foods (In-kind)

### 5. Projektperiode

Projektperiode med MFF-finansiering:

01/2016 – 12/2019

## 6. Projektresumé

**Dansk sammendrag:** Hovedformålet er at klarlægge, hvordan kavitationsbaserede procesteknologier påvirker proteiner og fedt i mælk og mejeriprodukter ved at studere effekterne af akustisk kavitation (ultralyd) og hydrodynamisk kavitation (kavitator) i forhold til eksisterende mejeriteknologier til homogenisering og pasteurisering. Projektets mål er – gennem grundlæggende forståelse af interaktioner mellem mælkefedtkuglens overflade og mælkeproteiner – at forbedre processering og opnå bedre produktkvalitet for mælk, mælkepulvere og yoghurt.

Projektets hypotese om, at kavitationsbehandlinger kan anvendes til at forbedre tekturen af yoghurt blev bekræftet for akustisk kavitation, men blev ikke observeret for hydrodynamisk kavitation.

Det konkluderes, at ved behandling af mælk kan en reduktion i fedtkuglestørrelse opnås, og hvis udgangspunktet er rå mælk kan en samtidig reduktion i mikrobiologisk totalkim også opnås, selvom dette primært relateres til en procesafledt temperaturstigning. Reduktion i fedtkuglestørrelse ved hydrodynamisk kavitation er dog ikke sammenlignelig med en standard homogenisering, hvilket er tilfældet ved akustisk kavitationsbehandling. Ultralydsbehandling (akustisk kavitation) kan potentielt give en forbedret tekstur og mindre synerese i yoghurt, mens den samme effekt ikke blev påvist for hydrodynamisk kavitation.

Desuden peger nyeste resultater på, at hydrodynamisk kavitation potentielt kan anvendes til at opnå en hurtigere/forbedret hydrering af mælkepulver inklusiv nogle proteinpulvertyper, hvor hydrering normalt kan være en udfordring. Der er derfor et potentiale for udnyttelsesmuligheder af hydrodynamisk kavitation ift. hydrering af mælkepulver, hvilket dog kræver flere undersøgelser og mere grundlæggende viden omkring processen.

Et større potentiale ses i anvendelse af hydrodynamisk kavitation til reduktion af viskositeten af koncentreter med højt proteinindhold, som i pulverproduktioner fører til muligheder for en mere fleksibel produktion eller opnåelse af øget tørstofindhold inden spraytørring, og dermed en økonomisk gevinst.

**English summary:** In this project, the main purpose was to evaluate how cavitation-based process technologies affect proteins and fats in milk and the impact on the quality of dairy products. Acoustic cavitation (ultrasound) and hydrodynamic cavitation (cavitator) were studied in relation to conventional dairy technologies for homogenization and pasteurization. The aim was to improve processing and to achieve better product quality for milk, milk powders and yoghurt through a basic understanding of interactions between the surface of the milk fat globules and milk proteins.

The project's hypothesis that cavitation treatments improve the texture of yogurts was confirmed for acoustic cavitation, but this was not obtained with hydrodynamic cavitation.

By hydrodynamic cavitation treatment of milk, a reduction in the fat globule mean size can be achieved, and if the starting point is raw milk, a simultaneous reduction in microbiological count can also be achieved, although this was primarily related to a temperature increase during treatment. The reduction in fat globule size by hydrodynamic cavitation was not comparable to a standard homogenization, as is the case with acoustic cavitation treatment. Ultrasonic treatment (acoustic cavitation) can potentially also provide an improved texture and less syneresis in yoghurt, while the same effect was not demonstrated for hydrodynamic cavitation.

The results obtained indicate that hydrodynamic cavitation can provide a faster, i.e. improved, hydration of milk powder, also in the case of protein powders, where hydration usually is difficult. However, the potential for utilization of hydrodynamic cavitation in relation to milk powder hydration requires more research in terms of the processes.

A great potential is also in the use of hydrodynamic cavitation to reduce the viscosity of high protein concentrates. This can provide the possibilities for a more flexible milk powder production or provide a tool to achieve increased dry matter content before spray drying, and thus an economic gain.

## 7. Projektets formål

**Dansk:** Projektets mål er – gennem grundlæggende forståelse af interaktioner mellem mælkefedtkuglens overflade og mælkeproteiner – at opnå bedre og kortere processering, og bedre produktkvalitet for hhv. mælkepulver ved hurtigere hydrering, reduceret råvareforbrug og forbedret yoghurtkvalitet; mindre synerese og højere viskositet. Hovedformålet er at klarlægge, hvordan kavitationsbaserede processteknologier påvirker proteiner og fedt i mælk og mejeriprodukter ved at studere effekterne af akustisk kavitation (ultralyd) og hydrodynamisk kavitation (kavitator) i forhold til eksisterende mejeriteknologier til homogenisering og pasteurisering.

**English:** The project goals are through basic understanding of the associations between the milk fat globule surface and milk protein to improve processing and reduce process time, improve the product quality of dairy powder by faster hydration, use less raw material and improve the quality of yoghurt, i.e. less syneresis and higher viscosity. The main aim is to elucidate, how cavitation based process technologies affect the proteins and the fat in milk and dairy products by studying the effects of acoustic cavitation (high intensity ultrasound) in comparison with hydrodynamic cavitation (cavitator) in relation to existing dairy technologies for homogenization and pasteurization.

## 8. Projektets baggrund

Der har gennem de senere år været stor opmærksomhed på ultralyd som proces teknologi til fødevarer, herunder også studier af effekten på mejeriprodukter (Chemat et al., 2011; Mohammadi et al., 2014). Fokus har været på forbedring af fødevarekvalitet, øget proceseffektivitet og mikrobiologisk kontrol. En af mekanismerne i ultralyds-processen er, ud over lydbølger, som resulterer i vibration af molekylerne i mediet, akustisk kavitation (kollaps) af små luftbobler i mediet, hvilket genererer store fysiske kræfter med lokalt meget høje temperaturer (op til 5000 K) og højt tryk (op til 100 MPa) (Knorr et al., 2004; Capote & de Castro, 2007).

Det er vist, at høj intensiv ultralydsbehandling af mejeriprodukter har en effekt på homogenisering af fedtkuglerne og på fedtkrystallisation (Frydenberg et al., 2013), valleproteiners denatureringsenthalpier af betydning for WPI's geldannelse og teksturegenskaber (Frydenberg et al., 2016). I andre applikationer er det vist, at ultralydsbehandling påvirker yoghurts fermenteringsforløb og efterfølgende synerese og tekstur (Wu et al., 2001). Hvorvidt de observerede effekter af høj intensiv ultralydsbehandling alene skyldes kavitation (akustisk), eller der er en bidragende effekt af ultralydsbehandling, er ikke klarlagt. Derfor er der behov for at kunne studere kavitationsprocessen alene og effekten heraf på mælkeproteiner og mælkefedt.

Kavitation alene kan også skabes i en kavitator, som i princippet er en teknologi med en rotor, der med et højt omdrejningstal i en væske skaber hydrodynamisk kavitation (SPX, 2015). Der er meget få videnskabelige studier af netop denne teknologis anvendelse i mejeriindustrien. Et nyligt pilotstudie på frisk mælk, som blev behandlet med hhv. hydrodynamisk kavitation og akustisk kavitation med henblik på mikrobiel inaktivering og homogenisering, viste, at begge teknologier kan inaktivere CFU med ~90% og homogenisere mælkefedtet (Crudo et al., 2014). Dog kræver akustisk kavitation højere energi, hvorfor opskalering af hydrodynamisk kavitation synes mere realistisk og interessant for procesindustrien.

Det antages, at når mælkefedtkugler aktivt vekselvirker med kaseinnetværket, sker der en styrkelse af kaseingelen, mens fedtkugler uden affinitet til netværket ikke bidrager til gelens stivhed. Corredig et al. (2011) har vist, at homogeniserede fedtkugler bindes til kaseinnetværket og dermed bidrager til gelstyrken. Denne binding kan fjernes med Tween 20, som er en surfaktant, der med høj affinitet for den hydrofobe fedtfase 'udkonkurrerer' proteinerne fra fedtkugleoverfladen, hvorved effekten på gelstyrken ligeledes forsvinder, både ved løbe- og syreinducerede geler (Ticapiccolo et al., 2011).

Det er velkendt, at homogenisering medfører proteinadsorption til fedtkugleoverfladen, og mindst 40 % af fedtkugleoverfladen skal være dækket af protein, før en effekt på gelstyrke i både løbe- og syrefældede geler opnås (Michalski et al., 2002). Proteinadsorption til fedtkugleoverfladen er domineret af kaseinmiceller ved lav temperatur, men ved

temperaturer over 60 grader adsorberes en betydelig andel denatureret valleprotein på bekostning af kasein (Corredig & Dalgleish, 1996; Michalski et al., 2002). Denne associering er vigtig for bl.a. yoghurts egenskaber, hvor homogenisering er en vigtig proces, som forebygger creaming under fermentering og lagring, reducerer synerese og øger yoghurts tekstur (Lee & Lucey, 2010).

I dette projekt fokuseres på yoghurt som applikation af flere grunde. Dels er yoghurtmarkedet vigtigt og stadig stigende med +30% i verdensproduktionen de seneste 5 år (Winther, 2013), og dels er en lav synereseegrad og høj cremethed (høj viskositet) af yoghurt vigtige kvalitetsparametre. Da størstedelen af yoghurt globalt set fremstilles ud fra pulver, er pulverets hydreringsegenskaber (og tid) essentiel i produktionen af yoghurt. Det er i pilotforsøg observeret, at behandling med hydrodynamisk kavitation af pulversuspensioner reducerer hydreringstiden af pulveret og forbedrer homogeniciteten heraf (SPX, 2015). De bagvedliggende mekanismer på pulverets struktur og proteinmolekylernes eventuelle ændringer kendes ikke.

## Referencer

- Capote, F. P., & M. D. L. de Castro. 2007. Ultrasound in analytical chemistry. *Anal. Bioanal. Chem.* 387: 249-257.
- Chemat, F., H. Zill e, & M. K. Khan. 2011. Applications of ultrasound in food technology: Processing, preservation and extraction. *Ultrason. Sonochem.* 18: 813-835.
- Corredig, M., & D. G. Dalgleish. 1996. Effect of different heat treatments on the strong binding interactions between whey proteins and milk fat globules in whole milk. *Journal of Dairy Research* 63: 441-449.
- Corredig, M., G. I. Titapiccolo, Z. Gaygadhiev, & M. Alexander. 2011. Rennet-induced aggregation of milk containing homogenized fat globules. Effect of interacting and non-interacting fat globules observed using diffusing wave spectroscopy. *International Dairy Journal* 21: 679-684.
- Crudo, D. et al. 2014. Process intensification in the food industry: hydrodynamic and acoustic cavitation in fresh milk treatment. *Agro Food Ind. Hi-Tech* 25: 55-59.
- Frydenberg, R. P., M. Hammershoj, U. Andersen, M. T. Greve, & L. Wiking. 2016. Protein denaturation of whey protein isolates (WPIs) induced by high intensity ultrasound during heat gelation. *Food Chemistry* 192: 415-423.
- Frydenberg, R. P., M. Hammershoj, U. Andersen & L. Wiking. 2013. Ultrasonication Affects Crystallization Mechanisms and Kinetics of Anhydrous Milk Fat. *Cryst. Growth Des.* 13: 5375-5382.
- Knorr, D., M. Zenker, V. Heinz & D. U. Lee. 2004. Applications and ultrasonics in food potential of processing. *Trends in Food Science & Technology* 15: 261-266.
- Lee, W. J. & J. A. Lucey. 2010. Formation and Physical Properties of Yogurt. *Asian Australas. J. Anim. Sci.* 23: 1127-1136.
- Michalski, M. C., R. Cariou, F. Michel, and C. Garnier. 2002. Native vs. damaged milk fat globules: Membrane properties affect the viscoelasticity of milk gels. *Journal of Dairy Science* 85: 2451-2461.
- Mohammadi, V., M. Ghasemi-Varnamkhasti, R. Ebrahimi, and M. Abbasvali. 2014. Ultrasonic techniques for the milk production industry. *Measurement* 58: 93-102.
- SPX. 2015. Personlig kommunikation.
- Titapiccolo, G. I., M. Corredig, and M. Alexander. 2011. Acid coagulation behavior of homogenized milk: effect of interacting and non-interacting droplets observed by rheology and diffusing wave spectroscopy. *Dairy Science & Technology* 91: 185-201.
- Winther, L. 2013. Verden vil have mere yoghurt. [www.mejeri.lf.dk/Nyheder\\_og\\_baggrund/Marked/](http://www.mejeri.lf.dk/Nyheder_og_baggrund/Marked/): 1-3.
- Wu, H., G. J. Hulbert, and J. R. Mount. 2001. Effects of ultrasound on milk homogenization and fermentation with yogurt starter. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*: 211.

## 9. Projektets delaktiviteter i hele projektperioden

Projektet var inddelt i tre arbejdsopgaver:

### **AP1: Forståelse af betydningen af forskellige procesparametre på effekten af kavitationsbehandling af mælk**

En lang række forsøg blev udført for at opnå en grundlæggende forståelse for, hvordan forskellige procesparametre har betydning for effekten af kavitationsbehandling af mælk.

Ultralyd: Her blev effekten af temperatur og ultralydeffekt undersøgt. Alle forsøg blev lavet på pasteuriseret mælk og blev udført i laboratorieskala.

Hydrodynamisk kavitation: En række forskellige set-up blev gennemført for at forstå betydning af temperatur, rotor-design og flowhastighed. Disse blev udført på enten pasteuriseret mælk eller med rå mælk som udgangspunkt. Alle forsøg blev udført i pilotskala ved SPX flow innovationscenter.

Analysér: Fokus var på evaluering af effekter på valleproteindenaturering og fedtkuglestørrelse. For udvalgte prøver blev effekt på kaseinmicellestørrelse, calciumbalancen, ledningsevne, pH, total kim og frie fedtsyrer undersøgt.

### **AP2: Evaluering af hvordan kavitation påvirker associering af skummetmælksproteiner med fedtkuglemembranen. Og hvordan dette kan påvirke interaktionen i proteinnetværket**

For prøver fra tests gennemført i AP1, blev det undersøgt, hvordan kavitationsbehandling påvirker associering af proteiner med fedtkuglen. Effekten af behandling på syregeldannelse i forhold af kinetik og gelstyrke, blev også undersøgt for at forstå, hvordan ændringen påvirker interaktionen mellem fedtkugler og proteinnetværket. Desuden blev en række høj-resolutions mikroskopistudier udført for at visualisere ændring i sådanne interaktioner og kvantificere disse ved hjælp af avanceret billedbehandling.

### **AP3: Applikationstest**

En række applikationstests blev udført for at evaluere potentialet i kavitationsteknologier i mejeriindustrien. Her blev ultralydsteknologien evalueret i laboratorieskala ved AU FOOD og hydrodynamisk kavitation blev evalueret i pilotskala ved SPX. Applikationstests blev udført med tre forskellige fokus:

1. Forbehandling af mælk til yoghurt: For at forstå om kavitationsteknologier kan erstatte/understøtte nuværende forbehandling af mælk til yoghurtproduktion og bidrage til øget tekstur/mindre synerese blev en testserie udført (et set-up i pilotskala).
2. Reduktion af viskositet: For at evaluere potentialet i kavitation til at sænke viskositet blev en række tests udført med forskellige vallefraktioner (to set-up i pilotskala med hver en række tests af forskellige materialer/settings)
3. Pulverrehydrering: For at evaluere potentialet i kavitation til at give en hurtigere/bedre rehydrering af mælkepulver blev forskellige tests udført (to set-up i pilotskala med hver en række tests af forskellige materialer/settings).

## 10. Afvigelser

Faglige: Fokus i AP3 (applikationstest) blev skiftet fra kun at være på yoghurt-applikation til at være mere bredt på anvendelse af kavitationsteknologier i mejeriindustrien. Dette skyldes, at resultater fra AP2 på syregeler og første set-up med yoghurter i AP3 viste mindre lovende resultater end forventet.

Tid og økonomi: I forhold til den indsendte interessetilkendegivelse til MFF har der været barselsorlov for projektets postdoc AA ved AU-FOOD indtil april 2017, hvorefter hun opsagde sin stilling. Medfinansieringen af projektet via Future Food Innovation (FFI) med postdoc-midler er herefter godkendt pr. 6. april 2017 af FFI overført til post doc BB start 1. juni 2017. Det har ikke givet økonomiske eller tidsmæssige afvigelser fra projektets oprindelige planer.

## 11. Projektets resultater

### Homogeniserende effekt

De kræfter, der introduceres ved kavitation, kan påvirke både proteiner og fedt i mælk. Både akustisk kavitation og hydrodynamisk kavitation kan give mindre fedtkugler – altså har en homogeniserende effekt – og påvirke sammensætningen af fedtkuglemembranen. Desuden har tidligere studier vist en bakteriedræbende effekt ved kavitationsbehandling af forskellige fødevarer. Kavitation er derfor foreslået som en mulighed for at kunne kombinere pasteurisering og homogenisering i ét procestrin. Resultaterne fra vores studie viste dog, at mens ultralydsbehandling kunne give en reduktion i fedtkuglestørrelse sammenlignelig med en standard homogenisering (150 bar), så var reduktion i fedtkuglestørrelse ved hydrodynamisk kavitation mindre. For både ultralydsbehandling og hydrodynamisk kavitationsbehandling var temperaturen og kavitationseffekten vigtigt for reduktionen er fedtkuglestørrelse.

Det skal nævnes, at ultralydsbehandling resulterer i en meget bred partikelstørrelsesfordeling. Ultralydsbehandling resulterer også i en stigning i valleprotein-denatureringsgraden, selv ved temperaturer under denatureringstemperaturen, hvilket ikke var tilfældet ved hydrodynamisk kavitation.

I dette projekt blev den mikrobiologiske reduktion under behandling også undersøgt for hydrodynamisk kavitation (bestemmelse af totalalkim). Vores resultater er ikke entydige, men peger på, at det observerede fald i antal bakterier hovedsageligt skyldes varmestigning under behandling og ikke selve kavitationen, hvilket er i modsætning til, hvad andre studier har vist. Disse forskelle kan skyldes, at det er svært at adskille effekter af temperaturstigning og kavitation.

*Effekter af ultralydsbehandling af mælk er publiceret: Gregersen, S. B., Wiking, L., & Hammershøj, M. (2019). Acceleration of acid gel formation by high intensity ultrasound is linked to whey protein denaturation and formation of functional milk fat globule-protein complexes. Journal of Food Engineering, 254, 17-24. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2019.03.004>*

*Effekter af hydrodynamisk kavitation behandling af mælk er publiceret i følgende: Gregersen, S.B., Wiking, L. Metto, D.J., Bertelsen, K., Pedersen, B., Poulsen, K.P., Andersen, U., & Hammershøj, M. (2020). Hydrodynamic cavitation of raw milk: Effects on microbial inactivation, physical and functional properties, International Dairy Journal, 104790. <https://doi.org/10.1016/j.idairyj.2020.104790>*

### Tekstur af yoghurt

Udgangspunktet var, at tidligere studier, bl.a. på AU-FOOD Institut for Fødevarer ved Aarhus universitet, har vist, at en forbedring af yoghurts tekstur og synereseegrad kan opnås ved forbehandling af mælken med ultralyd. Disse effekter blev også påvist i dette projekt. Dette kunne hovedsageligt relateres til graden af valleprotein-denaturering, og desuden blev det vist, at ændringer i proteinsammensætningen af fedtkuglemembranen også spiller en rolle. Det blev påvist, at der sker en ændring i hvilke proteiner, der er associeret med fedtkuglemembranen under ultralydsbehandling i form af en øget associering af kasein og i mindre grad valleproteiner. Denne associering kan facilitere interaktioner mellem fedtkugler og proteinnetværket i syrnede mælkegeler/yoghurt, og kan derved bidrage til en forbedring af tekturen/syneresegraden. Dette blev understøttet af et mikroskopistudier, der påviste en reduktion i afstanden mellem fedtkugler og proteinnetværket efter ultralydsbehandling. Sådanne effekter er ikke tidligere blevet kvantitativ bestemt – hverken for ultralydsbehandling eller almindelig homogenisering. Det åbner derfor for en bedre forståelse af, hvordan ændringer i proteinsammensætningen af mælkefedtkuglemembranen under processering af mælk forbedrer tekturen i yoghurt i en mere bred sammenhæng.

*Resultaterne fra ultralydsbehandling på syregeldannelse og fedtkuglemembranens proteinsammensætning er publiceret: Gregersen, S. B., Wiking, L., & Hammershøj, M. (2019). Acceleration of acid gel formation by high intensity ultrasound is linked to whey protein denaturation and formation of functional milk fat globule-protein complexes. Journal of Food Engineering, 254, 17-24. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2019.03.004>*

Hydrodynamisk kavitationsbehandling af mælken resulterede ikke i tilsvarende ændringer i yoghurts tekstur, som vist for ultralyd. Her kunne effekten på yoghurttekturen primært relateres til frigivelse af varme under behandling og den derved inducerede valleproteindenaturering. En lang række tests blev udført med forskellige indgangstemperaturer,

flowhastighed og kavitationseffekt (ændring i rotordesign). Dette blev desuden understøttet af en række forsøg, hvor kavitatoren blev udstyret med en rotor, der sikrede lignende mekanisk påvirkning men uden selve kavitationen. Ligeledes blev forsøg udført med en kølekappe, der sikrede at temperaturen blev holdt nede. Effekter på associering af mælkefedtkuglemembranen varierede efter den termiske historik af mælken (rå mælk versus pasteuriseret mælk), med meget få ændringer for rå mælk, hvorimod associering af kasein og valle blev observeret for behandling af pasteuriseret mælk. Dette var ikke entydigt og afhang også af behandlingsbetingelserne. Dette antyder dog, at vi stadig ikke har den fulde forståelse af mekanismerne bag, hvordan kaseiner associerer med fedtkuglemembranen.

*Resultaterne fra kavitationsbehandling på syregeldannelse og fedtkuglemembranens proteinsammensætning er publiceret: Gregersen, S.B., Wiking, L. Metto, D.J., Bertelsen, K., Pedersen, B., Poulsen, K.P., Andersen, U., & Hammershøj, M. (2020). Hydrodynamic cavitation of raw milk: Effects on microbial inactivation, physical and functional properties, International Dairy Journal, 104790. <https://doi.org/10.1016/j.idairyj.2020.104790>*

*Resultaterne fra effekt på yoghurt tekstur er publiceret: Gregersen, S. B., Glover Z., Wiking, L., Simonsen A.C., Bertelsen, K. B., Pedersen, B., Poulsen, K. R., Andersen U., & Hammershøj, M. (2020). Microstructure and rheology of acid milk gels and stirred yoghurts – Quantification of process-induced changes by auto- and cross correlation image analysis. Food Hydrocolloids, 111, 106269. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2020.106269>*

### **Lavere viskositet af høj-protein koncentreter**

Under fremstilling af forskellige mælkepulvere sker der en opkoncentrering inden spraytørring for at fjerne så meget vand som muligt. Herved fås et produkt med en høj viskositet, hvilket giver begrænsninger under produktionen. En viskositetssænkning efter kavitationsbehandling er tidligere påvist i andre nogle enkelte andre tidligere studier, og vi ønskede at undersøge potentialet for dette i forhold til mælkeproteinkoncentreter. Som modelsystem blev en række vallefraktioner udtaget fra Arla Foods Ingredients' produktion i Videbæk inden spraytørring. De forskellige fraktioner havde forskellig proteinrenhed og koncentrationer af laktose og fedt. Potentiale i anvendelse af kavitation til sænkning af viskositet er mere aktuelt i andre sammenhænge end vallepulverproduktion, men i og med at det er et simpelt system, hvor vi kunne udtage flere fraktioner med forskellige karakteristika, blev dette valgt.

Resultaterne viste, at kavitation resulterede i en reduktion i viskositet på > 20 %, men effekten var meget afhængig af sammensætningen af koncentratet. Det samme var tilfældet for effekten under lagring. I nogle tilfælde var effekten blivende over en 14 dages periode, mens den var midlertidig i andre. Partikelstørrelsesmålinger indikerer, at forskelle i effekten af behandling på viskositet kan kobles til mængden af aggregater, og reduktion i størrelse af disse under behandling, men resultaterne er dog ikke entydige. Desuden blev der lavet et mikroskopistudie, der ikke understøttede denne antagelse, men det kan delvist forklares med problemer med visualisering af aggregaterne.

*Resultater fra indledende forsøg er publiceret i: Gregersen, S. B., Wiking, L., Bertelsen, K. B., Tangsanthakun, J., Pedersen, B., Poulsen, K. R., Andersen U., & Hammershøj, M., 2019. Viscosity reduction in concentrated protein solutions by hydrodynamic cavitation. International dairy journal, 97, 1-4. <https://doi.org/10.1016/j.idairyj.2019.04.015>*

### **Pulverrehydrering**

Hydrodynamisk kavitation kan potentielt give en bedre og hurtige hydrering af mælkepulver. Dette blev undersøgt for mælkepulvertyper, hvor hydrering er en udfordring; Mælkeproteinkoncentrat (MPC) og micellært kaseinisolat (MCI). Resultaterne indikerer, at for nogle typer af mælkepulver kan kavitationsbehandling være en metode til at accelerere hydreringsprocessen. Forsøg med forskellige rotordesign antyder dog, at det primært er en effekt af shear-kræfter introduceret under behandling og i mindre grad kan relateres til selve kavitationen. Dette kræver dog flere test for at kunne sige noget konkluderende.

Det er desuden relevant at kigge på optimering af en række parametre, ligesom det kan være relevant at se på mulighederne for anvendelse af hydrodynamisk kavitation til kold hydrering, i tilfælde hvor en opvarmning i dag er nødvendigt, men hvor varme påvirker pulverets egenskaber og kvalitet.

### **Konklusion**



Resultaterne fra dette projekt giver en overordnet forståelse af de forskellige muligheder for anvendelse af kavitati- onsteknologier i mejeriindustrien. Resultaterne viste, at ved behandling af mælk kan en reduktion i fedtkuglestørrelse opnås, og hvis udgangspunktet er rå mælk kan en samtidig reduktion i mikrobiologisk totalkim også opnås, selvom dette primært var relateret til temperaturstigningen. Reduktion i fedtkuglestørrelse ved hydrodynamisk kavitation var dog ikke sammenlignelig med en standard homogenisering, hvilket var tilfældet ved akustisk kavitationsbehandling. Resultaterne understøtter også tidligere undersøgelser, der viste, at ultralydsbehandling (akustik kavitation) potentielt kan give en forbedret tekstur og mindre synerese i yoghurt, mens den samme effekt blev ikke blev påvist for hydrody- namisk kavitation.

Et større potentiale ses i anvendelse af hydrodynamisk kavitation til reduktion af viskositeten af koncentreter med højt proteinindhold. Det kan i pulverproduktioner åbne op for en mere fleksibel produktion eller opnåelse af øget tør- stofindhold inden spraytørring, hvilket giver en økonomisk gevinst. Det kan også være relevant i andre sammen- hænge, hvor en sænkning i viskositet er ønsket; eksempelvis i nogle syrnede produkttyper. Et andet område med et stort potentiale for udnyttelsesmuligheder for af hydrodynamisk kavitation er ift. hydrering af mælkepulver, men det kræver flere undersøgelser og mere grundlæggende viden omkring processen.

## **12. Resultaternes betydning, herunder for mejeribruget**

Resultaterne retter sig primært mod mejerierne, der producerer drikkemælk, pulver og yoghurt, og dette vil derfor kræve en teknologiinvestering. Af den grund vil en 1-årig effekt næppe være realistisk, men det vurderes at efter 5 år kan denne teknologi være implementeret, hvis mejerierne ønsker det. Teknologisk set er hydrodynamisk kavitation på et stadie, hvor teknologien er klar til at blive koblet direkte ind i en produktionslinje, og der er andre anvendelser, hvor teknologien allerede bruges industrielt, hvorimod der er større udfordringer forbundet med opskalering af ultralyds- processer.

De primære gevinster forventes at være optimering af tid og ressourcer ved anvendelse af hydrodynamisk kavitation til at forbedre råvareudnyttelsen eksempelvis øget kapacitet på spraytårne i mælkepulverproduktion eller forkortet hydreringsproces for mælkepulvere.

Projektets resultater understøtter også et potentiale i at anvende kavitationen for at opnå stabilisering af økologisk mælk eller som varmeenhed, der kan give en simultan pasteurisering og reduktion i fedtkuglestørrelse (evt. forbe- handling til trykhomogenisering).

Effekten på yoghurttekstur var begrænset for hydrodynamisk kavitation, mens der er et potentiale i ultralydsteknolo- gien i forhold til at opnå en forbedret tekstur af yoghurt/samme tekstur ved lavere tørstofindhold, især for lav-fedt- holdig yoghurt. Her er der dog en begrænsning pga. sensorisk afsmag ved fuldfed yoghurt i forhold til implementering af teknologien, hvorfor dette ikke forventes relevant inden for en kortere tidshorisont.

Projektet har ikke direkte en samfundsmæssig effekt, men det vurderes, at ved succesfuld implementering på mejeri- erne kan der forventes en øget konkurrenceevne for danske mejerier med evt. øget beskæftigelse. Beskæftigelsen i procesindustrien, der producerer hydrodynamisk udstyr, kan forventes øget ved succesfulde resultater.

### 13. Formidling og vidensdeling vedr. projektet

#### Artikler i internationale tidsskrifter:

- Gregersen, S. B., Glover Z., Wiking, L., Simonsen A.C., Bertelsen, K. B., Pedersen, B., Poulsen, K. R., Andersen U., & Hammershøj, M. (2020). **Microstructure and rheology of acid milk gels and stirred yoghurts – Quantification of process-induced changes by auto- and cross correlation image analysis.** *Food Hydrocolloids*, 111, 106269. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2020.106269>
- Gregersen, S.B., Wiking, L. Metto, D.J., Bertelsen, K., Pedersen, B., Poulsen, K.P., Andersen, U., & Hammershøj, M. (2020) **Hydrodynamic cavitation of raw milk: Effects on microbial inactivation, physical and functional properties,** *International Dairy Journal*, 104790. <https://doi.org/10.1016/j.idairyj.2020.104790>
- Gregersen, S. B., Wiking, L., Bertelsen, K. B., Tongsanthatkun, J., Pedersen, B., Poulsen, K. R., Andersen U., & Hammershøj, M., 2019. **Viscosity reduction in concentrated protein solutions by hydrodynamic cavitation.** *International Dairy Journal*, 97, 1-4. <https://doi.org/10.1016/j.idairyj.2019.04.015>
- Gregersen, S. B., Wiking, L., & Hammershøj, M. (2019). **Acceleration of acid gel formation by high intensity ultrasound is linked to whey protein denaturation and formation of functional milk fat globule-protein complexes.** *Journal of Food Engineering*, 254, 17-24. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2019.03.004>

#### Under udarbejdning:

**How ultrasound impact the integration of fat globules in protein network – microscopy study** (expected published in 2021)

**Mechanism of cavitation-induced viscosity reduction – the role of aggregates** (expected published in 2021)

#### Populærvidenskabelige artikler:

Gregersen, S.B., Hammershøj, M., Wiking, L., Glover, Z., Simonsen, A.C., Poulsen, K.R., Bertelsen, K., Pedersen, B. & Andersen, U. 2018. **Forbedret funktionalitet ved anvendelse af hydrodynamisk og akustisk kavitation.** [Mælkeritidende, 131, 3, 10-11.](#)

**CAVI: Improved functional properties of dairy products by new process technologies – understanding the molecular mechanisms caused by hydrodynamic and acoustic cavitation.** [Danish Dairy & Food Industry Worldwide, vol. 29, February 2020, page 12.](#)

Gregersen, S.B., Hammershøj, M., Wiking, L., Glover, Z., Simonsen, A.C., Poulsen, K.R., Bertelsen, K., Pedersen, B. & Andersen, U. 2021. **Potentiale for kavitationsteknologier i mejeriindustrien.** [Mælkeritidende 133, 3, 12-13.](#)

#### Studenteropgaver:

Cathrine Grarup. 2020. **Optimeret yoghurttekstur ved ultralydsbehandling – betydning af mælkens forbehandling.** Master Thesis, Kemi og Bioteknologi, AU.

#### Indlæg ved faglige kongresser, symposier etc.:

**Process-induced changes in the association of proteins with the milk fat globule membrane.** Mundtlig præsentation. 17th Euro Fed Lipid Congress and Expo, 20.-23. oktober 2019. Seville, Spanien.

**Acoustic and hydrodynamic cavitation of milk: Effects on fat globule membrane proteins, protein denaturation and gel formation.** Poster præsentation, 17th Food Colloids Conference: Application of Soft Matter Concepts, The University of Leeds, United Kingdom, 8.-11. april 2018.

Oplæg ved Mejeriteknisk Selskabs seminar, 9. december 2019: Nye teknologier – nye mulighed for mælken

**The food science focus on raw material quality and impact of processing on food functional properties.** 13th Latin American Food Science Symposium, 10.-12. november 2019, Campinas, Brasilien.

**Mødeindlæg:**

Projektet er præsenteret ved MFF Styregruppemøder/Koordinationsgruppemøder "Technology & Safety" igennem projektperioden.

**14. Bidrag til kandidat- og forskeruddannelse**

Kandidatuddannelse i Kemi og Bioteknologi, Cathrine Grarup, AU.


**15. Nye kontakter/projekter**

Ingen specifikke – udbygget kontakt til SPX Flow Technologis amerikanske afdeling.

**16. Underskrift og dato**

Projektet er formelt afsluttet, når projektleder og MFF-repræsentant (fx styregruppeformanden for den respektive styregruppe) har underskrevet slutrapporten.

Dato: 4. marts 2021 Projektleders underskrift:



Dato: 19. marts 2021 MFF-repræsentants underskrift:

