

Forskning i fødevareproduktionsteknologi:

# Fysiske principper bag kunsten at lave god mad i stor skala

Tilberedningen af faste fødevarer ved koge-, stege- og bageprocesser er et centralt trin i størstedelen af al madlavning, både i lille og stor skala. En mekanistisk forståelse af de fysiske og kemiske processer, som følger af opvarmningen, er grundlaget for at kunne lave realistiske, prædiktive matematiske modeller af disse processer. Sådanne modeller kan lette meget af arbejdet ved opskalering til industriproduktion.

Af Jens Adler-Nissen og Aberham Hailu Feyissa, Forskergruppen for Fødevareproduktionsteknologi, Fødevareinstituttet, Danmarks Tekniske Universitet

Forskningen i fødevareproduktionsteknologi ved DTU har helt overordnet det formål at forstå og videreudvikle de videnskabelige principper, som ligger til grund for forarbejdning af fødevarer i industriel skala. Allerede denne brede formulering antyder, at *skalering* af processerne er et centralt emne. Fødevareindustrien, herunder catering-industrien, har brug for pålideligt og driftsøkonomisk forsvarligt at kunne opskalere forarbejdningen af *nyudviklede produkter* fra forsøgskøkken-skala til industri-skala og stadig opnå den ønskede kvalitet og sikkerhed. En gennemgående udfordring er her, at skaleringens effekt på produktkvalitet, produktsikkerhed og produktivitet kun i et vist omfang kan prædikerer gennem matematisk modellering, og der er derfor et betydeligt element af heuristik forbundet med opskaleringen og optimeringen af en ny produktionsproces i fødevareindustrien.

## Termiske processer er centrale i madlavning

Ovenstående abstrakte formulering vil vi konkretisere med eksempler fra vores forskning i *termisk processering* af faste fødevarer. Det dækker i korthed over koge-, stege- og bageprocesser, som er centrale processer i størstedelen af al madlavning, hvad enten den foregår i husholdningen, i storkøkkener eller i industriel skala. I den klassiske udformning af disse processer transporteres varmen henover grænsefladen mellem omgivelserne og den faste fødevare og fordeles derefter gennem ledning til det indre af fødevaren. Varmeroverførslen kan her ske ved tre forskellige fysiske principper: Ved *kontaktledning*, som f.eks. stegning på pande, ved *konvektion*, som f.eks. kogning i vand eller stegning og bagning i en konvektionsovn og ved *stråling*, som når man griller kød. I senere tid er de klassiske varmeoverførselsprocesser blevet suppleret med

forskellige *volumetriske opvarmningsprincipper*, hvor energien afsættes inde i fødevaren og her omdannes til varme, således at opvarmningen ikke begrænses af ledningen gennem produktet. Mikrobølgeopvarmning er et velkendt eksempel fra husholdningen, men også andre former for volumetrisk opvarmning af faste fødevarer er ved at vinde indpas i industrien. Her arbejder vi i den fødevareproduktionsteknologiske forskergruppe med *ohmsk opvarmning* af faste fødevarer, hvor opvarmningen sker ved at lade en vekselstrøm passere gennem produktet [1].

Den termiske processering medfører en lang række kemiske og fysisk-kemiske ændringer i fødevaren, hvor især denaturering af proteiner, forklistring af stivelse, blødgøring af plantecellevægge og bruningsreaktioner som Maillard-reaktioner og karamellisering, har afgørende betydning for et gastronomisk tilfredsstillende resultat. Det er velkendt for læsere af *Dansk Kemi* med de traditionsrige essays om køkkenkemi, og det vil i øvrigt være uoverkommeligt at henvise til faglitteraturen her. Opvarmningen af den faste fødevare inducerer også vigtige transportprocesser, hvor især transporten af vand i flydende form og/eller på dampform er central (i brødbagning er også transporten af CO<sub>2</sub> vigtig). Tillige medfører opvarmningen en hel eller delvis inaktivering af tilstedeværende mikroorganismer, hvilket er ønskværdigt og i mange tilfælde også et hovedformål med termisk processering.

Vores forskning i termisk processering af faste fødevarer sigter på en sammenfattende *mekanistisk forståelse* af den rent fysiske opvarmningsproces og dens kobling med vand- og gas-transporten og de nævnte ledsagende kemiske og fysisk-kemiske ændringer. En dækkende mekanistisk forståelse er grundlaget for at kunne lave en troværdig *prædiktiv modellering* af processen med henblik på blandt andet at kunne foretage en pålidelig ekstrapolation fra lille til stor skala. En sådan model kan imidlertid ikke opstilles på teoretisk grundlag alene - der skal *kontrollerede eksperimenter* til for at bestemme forskellige parameterværdier i modellen og for i øvrigt at validere model-

lens gyldighed. Disse eksperimenter bør ikke bare foretages på forenkede fødevaremodeller, men også på de rigtige fødevarer for at fange kompleksiteten i den mekanistiske forståelse.

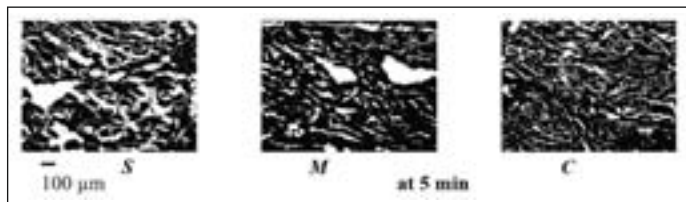
### Mekanistisk forståelse og fysisk modellering

Tilberedning af hele kødstykker i en ovn illustrerer på glimrende vis de ret komplekse mekanismer, som gør sig gældende ved en tilsyneladende simpel proces: Et stykke kød med kendte termo-fysiske egenskaber og kendte dimensioner anbringes i et ovnkammer med cirkulerende luft. Lufttemperaturen antages at være konstant =  $T_f$  [°C], og varmeovergangstallet mellem luft og kød er eksperimentelt bestemt til  $h$  [W/(m<sup>2</sup>·K)]. Hvis kødet var kemisk upåvirket af temperaturstigningen, ville temperaturen  $T$  som funktion af tiden  $t$  i de tre dimensioner ( $x$ ,  $y$ ,  $z$ ) i kødet da kunne beskrives udtømmende ved en partiel differenttialligning af Fourier-typen [2]:

$$\frac{\partial T(x,y,z)}{\partial t} = \frac{k}{c_p \cdot \rho} \cdot \left( \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) \quad (1)$$

hvor  $k$  er kødets termiske ledningsevne, [W/(m·K)],  $c_p$  er kødets varmekapacitet [J/(kg·K)] og  $\rho$  er kødets densitet [kg/m<sup>3</sup>].

De forskellige kemiske og fysisk-kemiske ændringer i kødet som følger af den stigende temperatur i kødets indre, får imidlertid hurtigt indflydelse, så ligning (1) er kun gældende i det allertidligste forløb af processen. Denatureringen af muskelproteinerne og bindevævet får kødstykket til at trække sig sammen, og samtidig ændres dets mekaniske (visko-elastiske) egenskaber. Elasticitetskoefficienten stiger med en faktor ca. 7, så kødet bliver stivere [3], og det er faktisk det, man udnytter, når man trykker på en bøf under stegningen for at mærke, om den er tilpas stegt. Sammentrækningen bevirker, at der dannes porer og kanaler i de ydre og mest denaturerede dele af kødet, som vist på figur 1. Sammentrækningen og den øgede stivhed skaber også et betydeligt mekanisk overtryk i kødet, og det medfører en trykdrivet transport af vandet i kødet, ligesom når

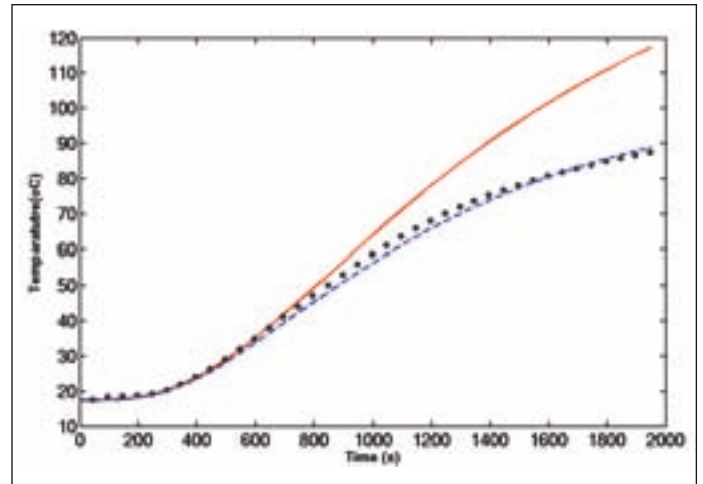


Figur 1. Mikrostruktur af kød efter fem min. stegning ved 175°C [3]. S: nær overfladen, M: halvvejs fra centrum, C: centrum.

man trykker en våd svamp sammen [3]. Da rå kød stort set er impermeabelt over for vand, så er vandet nødt til at bevæge sig ud mod overfladen, hvor permeabiliteten er højere på grund af poredannelsen. Her forlader det kødet som dryp, der helt eller delvist fordampes [3].

Vandtransporten i det indre af kødet kan udtrykkes som en differenttialligning, hvori der indgår en række kødspecifikke, temperaturafhængige parametre: vandbindingsevnen,  $C$  [-], elasticitetsmodul,  $E$  [N/m<sup>2</sup>] og vandpermeabiliteten,  $K$  [m<sup>2</sup>] [3]. Værdier for disse parametre har vi hentet fra litteraturen. Da vandet bevæger sig fra den kolde midte til de varmere ydre dele, bidrager vandtransporten også med et ekstra led i (1). Løsningen af disse to koblede differenttialligninger kan ikke gøres analytisk, men må gøres numerisk, hvor vi i forskningsgruppen har valgt det vidt udbredte program COMSOL Multiphysics.

Denne mekanistiske beskrivelse af stegeprocessen kan man måske nok nikke genkendende til, men faktisk har den ikke



Figur 2. Temperaturforløb (centrum) under stegning af kød ved 175°C [4, p. 85]. Den røde kurve viser temperaturen (beregnet), hvis der ingen fordampning var; den blå kurve, når vandtransporten medregnes i modellen. De blå cirkler viser de målte temperaturer. Kødstykket har dimensionerne 40 x 40 x 54 mm.

før været formuleret i alle disse detaljer i den videnskabelige litteratur, og de tidligere prædiktive modeller har haft begrænset gyldighed. Et bemærkelsesværdigt resultat af vores arbejde er påvisningen af, hvor stor betydning vandtransporten har for temperaturfordelingen i kødet under stegningen og dermed for det gastronomiske resultat, se figur 2. Arbejdet har yderligere ført til et samarbejdsprojekt med en af verdens førende producenter af konvektionsovne til storkøkkenbrug.

### Særlige eksperimentelle platforme

Det at udføre kontrollerede eksperimenter er ikke altid en simpel opgave, når det gælder termisk processering af faste fødevarer. Forsøgene skal nemlig udføres under betingelser, som realistisk afspejler procesbetingelserne i den industrielle proces - ellers kan man ikke opnå den ønskede kvalitet. Der er tale om et ofte udfordrende arbejde med at designe og konstruere en sådan eksperimentel platform, hvor man kan få adgang til både at kunne variere procesbetingelserne reproducerbart og foretage de relevante målinger på produktet, inklusive fotografering og billedanalyse. Det kan illustreres med det forsknings-samarbejde, som gruppen har haft med en af verdens førende producenter af tunnelovne, Haas-Meincke A/S. Det eksplicitte formål var at opnå en bedre fysisk forståelse af bageprocesser i kontinuerlige tunnelovne.

En industriel tunnelovn kan have en længde fra 20 til 100 m, og den er opdelt i zoner med hver sin styring af lufthastighed og -temperatur. Luften blæses ind gennem fordelersplader ovenover og nedenunder bagebåndet, og luften forlader ovnkammeret gennem siderne. Samtidig bevæger bagebåndet med produktet sig gennem ovnen med en jævn og kontrollerbar hastighed. Det er oplagt, at det er eksperimentelt overordentlig vanskeligt at måle på produkterne under passagen gennem ovnen, og reelt er en sådan ovn en black box.

Vi besluttede derfor i fællesskab med Haas-Meincke A/S at bygge en pilot plant-ovn, som skulle genskabe procesbetingelserne i den kontinuerlige ovn samtidig med, at vi visuelt kunne overvåge produktet og foretage kontinuerlige målinger af produkttemperatur og vægttab. For at genskabe den relative bevægelse mellem luftindblæsning og bagebånd lod vi fordelerspladerne bevæge sig frem og tilbage, mens produktet stod stille på en plade, som hvilede på en præcisionsvægt nedenunder ovnkammeret, se figur 3, side 4. Vi kunne gennem målinger og numerisk simulation (CFD, computational fluid dynamics)

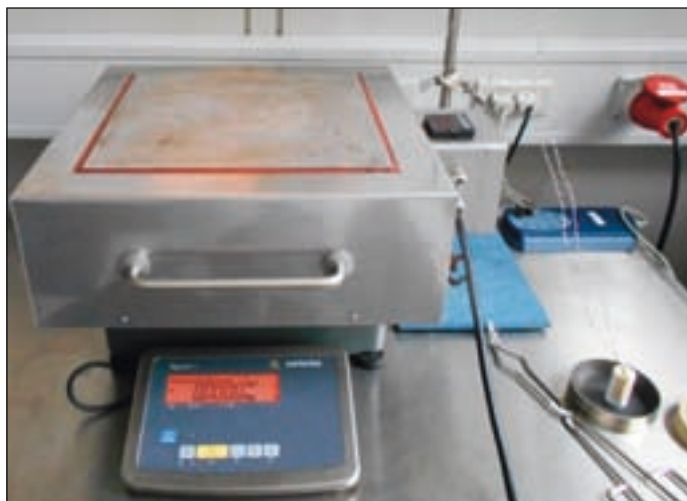


Figur 3. Pilot plant bageovn som simulerer en industriel tunnelovn (eget foto). Hulppladerne til luftfordeling kan skimtes gennem ruden. Bagepladen hviler på vægten nedenunder ovnen.

konstatere, at pilot plant-ovnen kunne genskabe det luftflow og de lokale varmeovergangstal, som hersker i en industriovn, og at bagningen var ensartet på tværs af pladen [5]. Pilot plant-ovnen blev valideret over for tunnelovnen ved sammenlignede bageforsøg, som viste, at man opnåede samme farve og vægttab ved de samme bagebetingelser (lufttemperatur og bagetid) [5].

## Kontaktbagning

Den fødevareteknologiske forskningsgruppe på DTU har gennem årene opbygget adskillige andre sådanne eksperimentelle platforme. Et eksempel er en platform til undersøgelse af kontaktstegning og kontaktbagning, figur 4. Her er det en



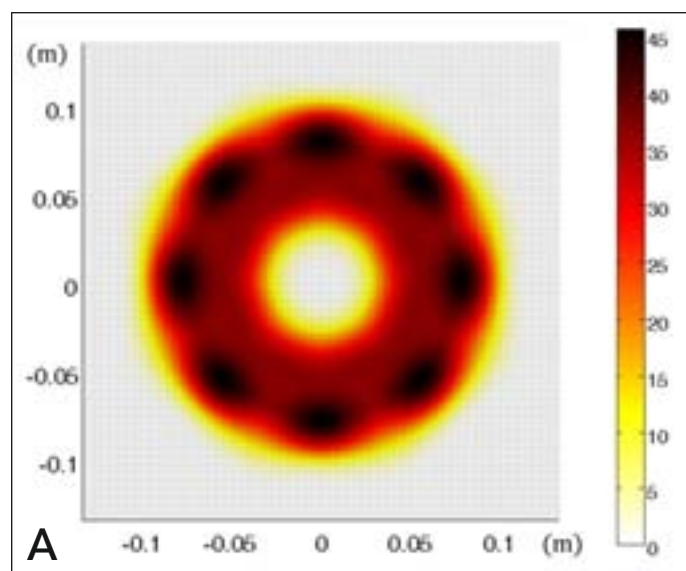
Figur 4. Eksperimentel platform (egen konstruktion) til undersøgelse af kontaktstegning og kontaktbagning (eget foto).

udfordring at kontrollere varmefluxen og kontakttemperaturen under processen, idet den indledende kontakt mellem hede-fladen og det kolde kød eller den kolde dej skaber en lokal, kraftig nedkøling og dermed et ukontrollabelt fald i kontakttemperaturen under processen. Det er et velkendt fænomen fra køkkenet, når man steger bøffer. Det har vi modvirket ved at tilføre varmen gennem en massiv blok af aluminium, som giver høj varmekapacitet og meget lav ledningsmodstand i kontaktarealet. Ligesom i pilot plant-ovnen kan vi kontinuerligt følge fordampningstab under processen.

Stegeplatformen har været benyttet i flere forskellige forskningsprojekter, blandt andet til test af nye typer rengøringsvenlige overfladebelægninger [6]. Som testprodukt anvender industrien generelt pandekager, idet bagning af pandekager kan standardiseres og vurderes gennem farvemålinger og adhæsion til stegefladen. Den pandekagemodel, som vi udviklede, har i anden sammenhæng givet en god mekanistisk forståelse af kontaktbagning generelt, hvilket også dækker andre meget store produkter, som fladbrød, pitabrød og chapati [7,8]. Denne viden har vi på det seneste kunne udnytte i et samarbejdsprojekt med en forskergruppe i elektrofysik på Universitetet i Zaragoza, som blandt andet arbejder med modellering af induktionsopvarmning.

## Induktionsopvarmning - en udfordrende proces

Induktionskomfurer giver en meget hurtig opvarmning, men i modsætning til hvad de fleste formodentlig forestiller sig, er opvarmningen af en pande på et induktionskomfur ikke særlig jævn, se figur 5A. Fabrikkerne af induktionskomfurer er nødt til at optimere designet af induktionsspolerne ved hjælp af gentagne bageforsøg, og her bruger man faktisk pandekager som model og trænede kokke til at udføre forsøgene. Det er et tidskrævende



Figur 5. Modellering af induktionsopvarmning [9].  
A: Simulering af temperaturfordelingen ved induktionsopvarmning af en tør pande.  
B: Simulering af farvedannelsen ved bagning af en pandekage på A.

arbejde, og der er et stort behov for at kunne foretage vejledende modelsimuleringer af sådanne forsøg. Den spanske forskergruppe kunne modellere selve induktionsopvarmningen af en tør pande uden produkt, men det afspejler ikke realistisk resultatet af et egentligt bageforsøg. Vi kobledes så vores mekanistiske forståelse og modellering af kontaktbagning med deres modelleringskompetence, og vores spanske gæsteforsker udførte også forsøg på stegeplatformen for at kunne opbygge en empirisk model, som prædikerede farvedannelsen som funktion af tid og temperatur [9]. Figur 5B viser resultatet af en sådan prædiktions, og det er tydeligt, at pandekagen bliver lysere i centrum i overensstemmelse med den ujævne temperaturfordeling vist i figur 5A.

Arbejdet er illustrativt for, hvordan vores forskning i termisk processering typisk hviler på:

- 1) en mekanistisk forståelse,
- 2) numerisk modellering af varme- og massetransport,
- 3) opbygningen af en pålidelig eksperimentel platform, og
- 4) kombination med en kinetisk model til at relatere kvalitetsparametre (her farve) med resultatet af den numeriske modellering.

Man er simpelthen nødt til i gruppen at beherske fysik, teknik og fødevarevidenskab, og det er ikke mindst den sidste disciplin, der berettiger gruppens placering på DTU Fødevareinstituttet.

E-mail:

Aberham Hailu Feyissa: [abhfe@food.dtu.dk](mailto:abhfe@food.dtu.dk)

#### Referencer

1. Pedersen, S.J., Feyissa, A.H., Brøknær Kavli, S.T., & Frosch, S. (2016). An investigation on the application of ohmic heating of cold water shrimp and brine mixtures. *Journal of Food Engineering* **179**: 28-35.
2. Mills, A.F. (1995). *Heat and Mass Transfer*, Chicago: Irwin, pp. 123-173.
3. Feyissa, A.H., Gerneay, K., Adler-Nissen, J. (2013). 3D modelling of coupled mass and heat transfer of a convection-oven roasting process. *Meat Science* **93**: 810-820.
4. Feyissa, A.H. (2011). *Robust Modelling of Heat and Mass Transfer in Processing of Solid Foods*. Ph.d.-afhandling, DTU Fødevareinstituttet. [http://orbit.dtu.dk/en/publications/robust-modelling-of-heat-and-mass-transfer-in-processing-of-solid-foods\(60d891d1-2e8a-4904-81e4-393c3b1e8f16\).html](http://orbit.dtu.dk/en/publications/robust-modelling-of-heat-and-mass-transfer-in-processing-of-solid-foods(60d891d1-2e8a-4904-81e4-393c3b1e8f16).html).
5. Stenby, M., Risum, J., Adler-Nissen, J. (2013). Design and Construction of a Batch Oven for Investigation of Industrial Continuous Baking Processes. *Journal of Food Process Engineering* **36**: 500-509.
6. Ashokkumar, S., Adler-Nissen, J. (2011). Evaluating non-stick properties of different surface materials for contact frying. *Journal of Food Engineering* **105**: 228-235.
7. Feyissa, A.H., Gerneay, K., Adler-Nissen, J. (2011). Modelling of coupled heat and mass transfer during a contact baking process. *Journal of Food Engineering* **106**: 228-235.
8. Feyissa, A.H., Gerneay, K., Adler-Nissen, J. (2012). Uncertainty and sensitivity analysis: Mathematical model of coupled heat and mass transfer during a contact baking process. *Journal of Food Engineering* **109**: 281-290.
9. Sanz-Serrano, F., Sagues, C., Feyissa, A.H., Adler-Nissen, J., Llorente, S. (2016). Modeling of pancake frying with non-uniform heating source applied to domestic cookers. *Journal of Food Engineering* **195**: 114-127.

## Ny viden om menneskets oprindelse

I en gammel mine i Marokko er fosiler og stenredskaber siden starten af 1960'erne blevet fundet i udgravningen Jebel Irhoud, der ligger cirka 100 km vest for Marrakesh. Fundene viste sig at være levn fra *Homo sapiens* og blev dengang vurderet til at have omkring 160.000 år på bagen, hvilket passede ind i den hidtidige teori om menneskets oprindelse i det østlige Afrika for ca. 200.000 år siden.

I 2004 genoptog forskere fra Max Planck Institutet de arkæologiske udgravninger i Marokko og fandt flere fosile levn. Fundene er sensationelle, fordi de afslører den hidtil ældste datering af *Homo sapiens* på intet mindre end 300.000 år. Også fossilerne fra tresserne har fået omskrevet deres historie og er efter nye analyser vurderet til at være 350.000-280.000 år gamle - altså en fordobling af den hidtil anslåede alder. Vi er som art med ét blevet 100.000 år ældre, og Marokkos geografiske koordinater udfordrer forestillingen om Østafrika som stedet, hvor mennesket er opstået og udvandret fra.

Den nye viden er opnået med en Risø TL/OSL-reader udviklet på DTU (TL: Thermoluminescence og OSL: Optically Stimulated Luminescence). Readeren måler materialers lysudsendelse. Når man kender et materiales luminescenssignal, er det muligt at beregne, hvornår f.eks.



en flintøkse blev begravet. Luminescens-datering er velegnet til kortlægning af menneskets udvikling, da metoden kan anvendes til aldersbestemmelse af op til ca. 500.000 år. Til sammenligning kan eksempelvis kulstof 14-datering kun anvendes ca. 50.000 år tilbage i tiden.

Den første Risø TL/OSL-reader

blev fremstillet i 1982, og indtil 2017 har DTU Nutech eksporteret over 400 instrumenter. Det årlige salg ligger på omkring 20 instrumenter, og Risø TL/OSL-readeren står i laboratorier i mere end 40 lande.

Kilde: [www.dtu.dk](http://www.dtu.dk)