

# Kan et hammerslag afsløre, om en vindmølle er i fare for at styrte i havet?

*En vindmølle bliver holdt sammen af titusindvis af bolte. Kan man spare tid og ressourcer ved at lytte sig frem til, om de er stramme nok?*

Marie Brøns, maribr@mek.dtu.dk

Vindmøller holdes sammen af tusindvis af bolte, og det er vigtigt, de er strammet korrekt. De må hverken være for løse eller for stramme. Begge dele kan lede til driftsvigt og i værste fald kollaps, som det [for eksempel skete i 2015 i Lemnhult vindmøllepark i Sverige](#). Her væltede en 129 meter høj landvindmølle efter kun tre års drift, fordi boltene ikke var stramme nok.

Løse bolte kan ikke holde vindmøllekomponenter ordentligt sammen, og for stramme bolte er i fare for at knække. Begge dele skal undgås. Vindmølleindustrien bruger derfor mange penge og ressourcer på at sikre korrekt boltspænding, så vindmøller ikke styrter i havet.

Ét af problemerne er, at boltspændingsværktøjer er tunge, besværlige at bruge og ikke mindst upræcise. Oftest er det kun et fåtal af bolte, som løsner sig, men fordi man ikke kan risikere ulykker, efterspænder man mange flere end nødvendigt. Hvad hvis man i stedet kunne bestemme boltspænding ved at give bolten et lille slag med en hammer?

Så kunne man nøjes med at efterspænde de bolte, der faktisk har brug for det. Ved kun at spænde de nødvendige bolte kan man nemlig spare dyrebar tid og ressourcer. Det er netop det, jeg forsøger at opnå med min forskning.

Men hvorfor skulle et lille slag med en hammer kunne bruges til noget? Det kan det, fordi en løs og en stram bolt simpelthen **lyder** forskelligt, når man slår direkte på dem. Når noget lyder forskelligt, så betyder det at noget har ændret sig. Den ændring har jeg undersøgt og udnyttet kvantitativt til at udvikle en vibrations-baseret metode til at bestemme boltspænding.

## Hver bolt har sine egne toner

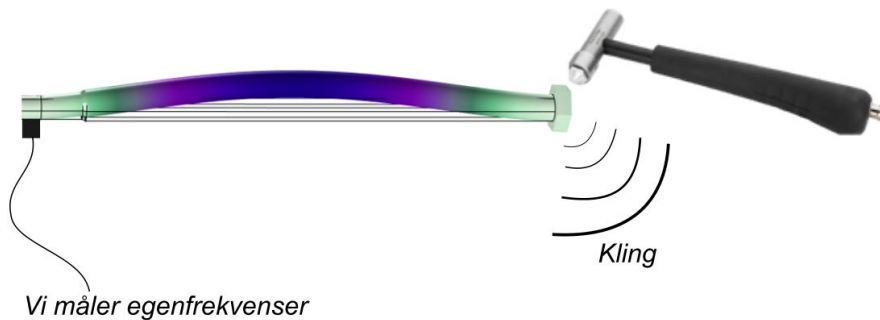
Når man slår direkte på en bolt, vil den vibrere, og det vil den gøre med sine **egenfrekvenser**. Egenfrekvenser er de toner, en bolt helst vil svinge ved. De afhænger af, hvor spændt bolten er, særligt de tværgående egenfrekvenser, hvor bolten svinger op og ned (se Figur 1).

Det svarer lidt til at slå en tone an på en guitarstreng. Alt efter hvor stram strengen er, vil tonen være forskellig. På lignende vis vil en bolts egenfrekvenser ændre sig når den strammes.

En bolts egenfrekvenser stiger nemlig systematisk, når bolten spændes, idet kontaktfladen mellem bolthovedet og den omkringliggende struktur gøres stivere, og fordi der trækkes i stålet.

Jeg har fundet ud af, at svingningerne i en stram bolt desuden vil vare i længere tid (de er mindre dæmpede), fordi kontaktfladen er fastspændt, så der er mindre friktion.

Figur 1: Svingende bolt



## En løs bolt giver en kort, flad lyd

Hvordan hænger det sammen med lyden, man hører? *Kling* eller *klonk* kan det eksempelvis lyde, når man slår med en hammer på en bolt. Lyden er faktisk summen af en hel masse forskellige svingninger, med forskellige egenfrekvenser, der er dæmpet forskelligt.

Generelt vil en løs bolt give en kort, flad lyd, fordi de fleste egenfrekvenser er meget dæmpede, hvorimod en stram bolt vil give en mere længerevarende ringende lyd, fordi dæmpningen er lavere. Lyden alene kan derfor indikere, at en bolt er meget løs, men den kan ikke afsløre, præcis hvor stram en bolt er.

Det har vi brug for tonerne (egenfrekvenserne) til. De stiger nemlig systematisk, når bolten spændes og er oplagte at bruge som mål for boltspænding.

## Løsningen ligger i at forstyrre egenfrekvenserne

Men det er desværre ikke nok. Vi er ikke i mål. En bolts egenfrekvenser er nemlig afhængige af boltens dimensioner og materialeegenskaber. Det er et problem.

Vi ville derfor have brug for referenceværdier for samtlige typer af bolte (vi taler tusindevis) for at estimere boltspænding kun ved hjælp af boltens egenfrekvenser.

Det er upraktisk og ikke gangbart i virkeligheden.

Jeg har derfor fået den idé at slå **to** gange på bolten. Ved det andet slag tilføjer jeg en lille ekstra vægt for enden af bolten. Den ekstra vægt kan blot være en ekstra møtrik skruet fast for enden af bolten. Ved at tilføje ekstra vægt på bolten, forstyrrer jeg boltsystemet udefra. Det vil påvirke egenfrekvenserne. På den måde kan man måle en **ændring** i egenfrekvensen. Det gør referenceværdier unødvendige.

Man kan forestille sig effekten af vægten sådan: En stram bolt sidder godt fast, og det er kun boltens skaft, imellem bolthoved og møtrik, der svinger. Tilføjes der en ekstra lille møtrik for enden af bolten, ændrer det ikke noget. I en løs bolt derimod, svinger møtrikken og bolthovedet med, når man slår på den.

Tilføjes der yderligere vægt for enden af den løse bolt, vil den påsatte vægt også svinge med. Det sænker egenfrekvensen, [og nu kan vi måle en ændring.](#)

## Matematik kan hjælpe os i mål

Jeg har brug for et værktøj til at oversætte de målte ændringer i egenfrekvenser til boltspænding. Til det har jeg tilpasset en matematisk model, så den kan forudsige en bolts egenfrekvenser, med og uden en tilføjet ekstra vægt. For at være nøjagtig nok, styres modellen af flere ting. Boltspændingen er en af tingene, men det er også nødvendigt at vide hvordan kontaktfladen mellem bolthovedet og den fastspændte struktur opfører sig. Kontaktfladens opførsel afhænger både af geometri og materialer, og er derfor, lige som boltspændingen, noget vi ikke kender størrelsen af.

Det er her mine målinger kommer i spil. Jeg regner 'baglæns' og skruer på alle modellens knapper, indtil den forudsiger de samme egenfrekvenser, og særligt ændringer i egenfrekvenser, som jeg har målt. Når model og målinger stemmer overens, vil modellens bud på boltspændingen være meget nøjagtigt.

## Fra laboratoriet ud i virkeligheden?

På nuværende tidspunkt er teknologien ikke i brug i industrien. Indtil nu har jeg testet den i et laboratorium under kontrollerede forhold, samt undersøgt hvordan man bedst og billigst kan måle disse egenfrekvenser.

Det har vist sig, at man med fordel kan bruge en keramisk plade (også kaldet en piezoelektrisk aktuator) til at sætte svingninger i gang, i stedet for en hammer. Disse keramiske plader er billigere og tillader større kontrol over vibrationerne end en hammer.

Det har jeg udnyttet: Jeg har designet en prototype, som består af to keramiske plader, sat fast i en mekanisme, som kan monteres for enden af en bolt. Den ene plade sætter svingninger i gang i bolten, den anden måler egenfrekvenserne. I samspil med matematisk modellering, kan jeg bestemme hvor stram bolten er, ud fra prototypens målinger.

Før min teknologi kan anvendes i virkeligheden, skal måleteknik og den matematiske algoritme testes på rigtige vindmøller og tilpasses virkelighedens mange

udfordringer, såsom hvordan man skalerer konceptet op til store bolte, eller hvordan man håndterer påvirkning fra vindmøllestøj i målingerne.

Ikke desto mindre er der nu et videnskabeligt grundlag for at bruge en bolts **toner** i samspil med matematisk modellering til at estimere boltspænding med høj præcision. Mine resultater er lovende, og de er blevet modtaget med interesse fra flere brancher. Det giver mig tro på, at denne teknologi har potentiale til at blive et meget vigtigt fremtidigt værktøj for industrier der har kritiske boltsamlinger. Jeg arbejder derfor lige nu på at føre mine forskningsresultater ud i livet, og ud i industrien, hvor de kan gøre nytte.

*Mit ph.d.-projekt var støttet af Danmarks Frie Forskningsfond (DFF-6111-00385), og jeg har udført arbejdet på DTU Mekanik under hovedvejledning af lektor, dr. techn., Jon Juel Thomsen, og med medvejlederne PhD Dmitri Tcherniak (Hottinger Brüel & Kjær), og prof. Dr.Ing.habil Alexander Fidlin (Karlsruhe Institute of Technology).*