



HVORDAN HAR DIN HAVVINDMØLLE DET?

Der er mange penge at spare, hvis man til enhver tid meget præcist kan sige, hvor lang levetid dyre konstruktioner som skibe og havvindmøller har tilbage. Smart brug af sensorer skal hjælpe med at gøre et sådant løbende "sundhedstjek" muligt.

Om forfatteren



Anders Brandt er lektor ved Institut for Teknologi og Innovation, SDU Mechanical Engineering abra@iti.sdu.dk

Omkostninger til at vedligeholde havvindmøller har i dag stor betydning for, hvad det koster at producere en kilowatt-time elektrisk strøm. Nøjagtig ligesom mange dele i for eksempel en flymotor må udskiftes i løbet af flyets levetid er der også en række komponenter, der løbende må udskiftes i en havvindmølle. Men mens vedligehold af et fly kan klares i værksteder i lufthavnen, skal personale fragtes ud til havvindmøllerne for at yde service, og det er dyrt. Samtidig kan det kun lade sig gøre, når vejret er godt.

For at holde udgifterne til vedligehold af havvindmøller så langt nede som muligt, er det således

meget vigtigt, at man kun udskifter dele, når det er strengt nødvendigt. På den anden side kan det lede til en katastrofe, hvis for eksempel et leje i en vindmølle ikke udskiftes, når det er slidt ned. Konsekvensen af et brud i et leje kan nemlig være, at såvel gearkassen som vingerne beskadiges ved det stop, som et ødelagt leje vil forårsage. Det kan lede til både et dyrt driftstop og til dyre reparationer.

At kunne forudse præcist, hvornår en given del skal udskiftes i en konstruktion er derfor en disciplin, der er stor økonomisk interesse i at mestre. Det gælder særligt konstruktioner, hvor omkostningerne til vedligehold udgør en stor del af driftsomkostningerne i den

samlede levetid, for eksempel havvindmøller eller olieplatforme. Og det gælder konstruktioner, hvor et havari kan være meget dyrt eller alvorligt, som for skibe og broer. På fagsproget kaldes dette felt for *structural health monitoring* (SHM), og ved SDU Mechanical Engineering arbejder vi med at udvikle sådanne monitoringsløsninger, der løbende kan give et præcist billede af en konstruktions sundhedstilstand.

Vibrationer og metaltræthed

Hvis man vil optimere udskiftningen af for eksempel et leje i en havvindmølle er det ikke nok at gøre det ud fra generelle betragtninger om et sådant lejes gennemsnitlige levetid. Nej, man

Metaltræthed

Hvis man bøjer et stykke metal (for eksempel en papirklips) frem og tilbage en masse gange, vil der opstå en revne i metallet som gradvist vokser indtil metallet til sidst brækker over i to stykker. Dette fænomen opstår i al metal – ofte også ved meget små bøjninger, men mange af dem. Fænomenet kaldes populært metaltræthed, mens vi forskere kalder det “udmattelse”.

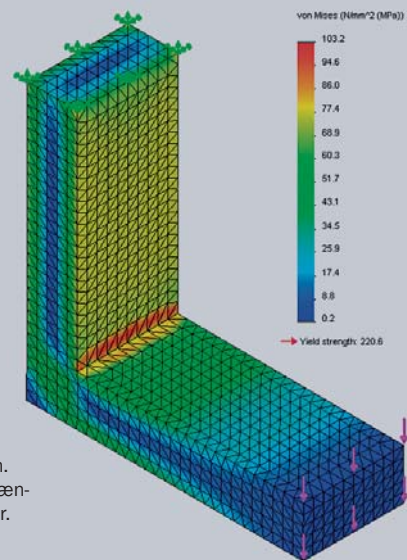
Når vi snakker om *vibrationer* betyder det i praksis “bøjninger frem og tilbage”. Så vibrationer leder til udmattelse. Er der for store vibrationer i for lang tid i en metalkonstruktion, vil der dannes revner, som til sidst, hvis de ikke opdages og repareres (eller komponenten udskiftes), leder til at konstruktionen går i stykker.

Lidt mere nøjagtigt udtrykt opstår udmattelse på grund af store spændinger i konstruktionen. Mekanisk spænding er et udtryk for, hvor meget kraft, der er per tværsnitsareal. I en typisk konstruktion er de største spændinger koncentreret i visse områder, og det er i disse områder, der vil opstå revner på grund af udmattelse. Med moderne computersoftware beregnet til at designe mekaniske konstruktioner, er der med ret stor nøjagtighed muligt at analysere, hvor disse spændingskoncentrationer vil opstå.



Nærbillede af et brud forårsaget af metaltræthed i en fjeder fra en bil. Der ses også flere mindre revner, som også er begyndende træthedsbrud.

Foto: colourbox



Udmattelse opstår på grund af store spændinger i konstruktionen. På denne "vinkel"-figur er store spændinger vist med gule og røde farver.

Kilde: <https://andrewelb.wordpress.com/2010/12/14/stress-singularities/>

må til enhver tid vide, hvordan det specifikke leje “har det”. Lejets tilstand kan overvåges ved hjælp af sensorer, idet der opstår vibrationer i et leje, som vokser i takt med, at lejet bliver mere og mere slidt. Af den grund har man længe monitoreret vibrationer i lejer og andre kritiske dele af vindmøller. Allerede i dag kan man derfor med nogenlunde nøjagtighed forudsige, hvornår lejer og andre komponenter skal udskiftes.

Der er dog tilfælde, hvor de anvendte metoder af ukendte grunde ikke virker, hvilket har ført til nedbrud. Og der er tilfælde, hvor overvågningen melder fejl, selvom lejet har det udmærket – eller i det mindste ikke har akut brug for at

blive skiftet ud. Af den grund er der brug for at udvikle og forbedre de metoder, man i dag bruger til overvågning af kritiske komponenter i mange forskellige konstruktioner.

Udover at vibrationer kan være tegn på, at en specifik komponent i en konstruktion er ved at være slidt, kan vibrationer også mere generelt give anledning til problemer. For når et materiale udsættes for vibrationer over lang tid, kan der opstå revner, og hvis de ikke opdages i tide, kan der opstå deciderede brud. Da Storstrømsbroen i 2013 blev lukket i en periode, var det fordi man havde fundet uventede revner i broen, der var opstået på grund af metaltræthed. Revner i en vindmølle ved Samsø

ledte også i 2015 til, at hele mølle-toppen med vinger faldt i vandet. Selv om så store havarier er meget sjældne, er revnedannelse i havvindmøller noget, som potentielt kan give problemer og som derfor studeres nøje. Men hvornår det er lige ved at gå galt, kan vi i dag ikke forudsige særlig nøjagtigt.

For tiden arbejder vi med at udvikle metoder til at måle den belastning, strukturen påvirkes af til enhver tid. Det betyder, at vi ved at summere disse belastninger ganske nøjagtigt vil kunne få at vide, hvor meget af levetiden af en given konstruktion, der er blevet brugt. Den viden kan lede til, at man i fremtidens konstruktioner vil kunne operere med en mindre

Metaltræthed og levetid

Størrelsen tøjning, som nævnes i artiklen, beskriver den relative forlængelse (deformation) af et materiale. Hvis vi tænker os en stang, som er 1 m lang, og som tøjer sig 1 mm, når vi trækker i den, så er tøjningen 1 mm/m. Forholdet mellem spænding og tøjning kaldes Hooke's lov. Den siger, at hvis S er spændingen, og T tøjningen, så er

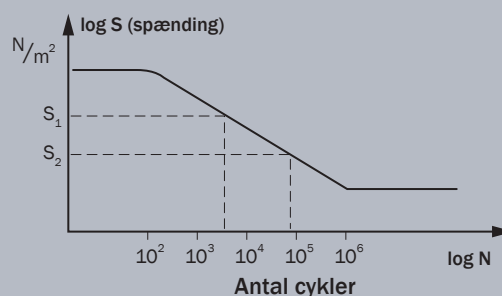
$$S = ET$$

hvor konstanten E kaldes E-modulen, eller Young's modul.

Ved ethvert spændingsniveau kan metallet holde til et vist antal cykler, før der begynder at dannes en revne. Dette bestemmes ved at trække i prøver af metallet med forskellige spændingsniveauer og tælle, hvor mange cykler, der skal til, for at danne en revne ved ethvert spændingsniveau. Dette beskrives i et diagram, som kaldes et S-N diagram, eller Wöhler-diagram efter den tyske jernbaneingeniør August Wöhler, som i 1800-tallet lavede en stor undersøgelse af metaludmattelse.

Men når vi har vibrationer, er spændingen jo ikke hele tiden af den samme størrelse. Derfor bruges en metode

S-N - diagram / Wöhler-diagram



kaldet Palmgren-Miners regel for at opsummere, hvor meget af levetiden, der bliver brugt. Den siger, at hvis vi for eksempel har to forskellige spændingsniveauer s_1 og s_2 , og vi har 1000 cykler ved s_1 og 10.000 ved s_2 , og S-N diagrammet siger, at vi kunne have 2.000 cykler ved s_1 og 100.000 cykler ved s_2 , så har vi totalt brugt

$$\frac{1000}{2000} + \frac{10000}{100000} = \frac{1}{2} + \frac{1}{10} = 50\% + 10\% = 60\%$$

Det vil altså sige, 60 procent af den totale levetid er blevet brugt.

sikkerhedsmargin for udskiftning af komponenter. Og det vil også lede til, at hele konstruktionen kan bygges med et mindre forbrug af materialer. Begge dele vil spare penge.

Svært at forudsige belastning

Når et produkt som en havvindmølle eller en olieplatform konstrueres i dag, går man ud fra, at produktet for eksempel skal kunne holde 25 år og udregner ud fra det, hvilken styrke konstruktionen så skal have. Men problemet er, at man ikke på forhånd kan sige, hvilken belastning konstruktionen bliver udsat for i løbet af de 25 år. Hvor mange orkaner vil en vindmølle for eksempel blive udsat for? De ekstreme vindbelastninger under en orkan forbruger nemlig meget mere af levetiden end mere beskedne vindforhold. I dag prøver man derfor at lave en så nøjagtig statistik over vind- og vejrforhold som muligt og bruge disse data til at beregne,

hvor stærk konstruktionen er nødt til at være. For havvindmøller gælder det, at vejr og bølgeforhold er meget lokale. Så derfor skal man som regel lave dyre målinger på den lokalitet, hvor vindmølleparken skal installeres, i et til to år, før vindmøllerne kan konstrueres.

Statistikker over sjældne hændelser som orkaner er dog ikke nemt at skaffe – hvis man eksempelvis måler over et år, er det ikke særlig sandsynligt, at en kraftig orkan vil finde sted netop det år. Derfor kan man heller ikke bare bruge eksempelvis DMI's statistikker over ekstreme vejrhændelser, da de ikke vil være sikre nok til dette brug. Desuden mangler vi ofte nødvendig statistik over bølger i områder, hvor der aktuelt er placeret havvindmølleparker. Alt i alt betyder det, at man bliver nødt til at bygge vindmøllerne med en forholdsvis stor sikkerhedsmargin, hvis designet skal baseres på dis-

se statistiske data.

Også når det gælder skibe er det besværligt at skaffe sig nok statistiske data til, at man kan optimere konstruktionerne. For skibe er belastningen jo meget afhængig af, hvor skibet sejler. Oceanernes enorme størrelse gør, at det er begrænset, hvor detaljeret statistik man kan få omkring vejr og bølgeforhold. Desuden har kaptajnens måde at fremføre skibet også betydning for, hvor store vibrationer der bliver og dermed for faren for, at der kan opstå revner som følge af metaltræthed.

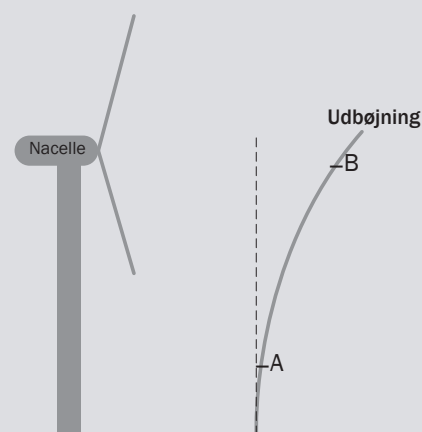
I dag er computerprogrammer til at beregne dimensionering af konstruktioner vidt udbredt både i vindmølle- og skibsdesign. Men disse programmer lider også under den begrænsning, jeg her har skitseret – nemlig at de skal bruge input om lige præcis de forhold, der hersker usikkerhed om: Hvor



Virtuelle sensorer

Virtuelle sensorer er et alment begreb indenfor for aktuel forskning, som betyder, at målinger foretages et eller flere steder, og at man ud fra disse målinger beregner et målesignal i et helt andet punkt. I tilfældet med vibrationsovervågning går vi faktisk yderligere et skridt: Vi beregner således en måleenhed (tøjninger) ud fra målinger af en helt anden måleenhed, nemlig acceleration. Det gør vi af flere grunde, men den vigtigste er, at sensorer til at måle tøjning, såkaldte strain gauges (strækmålere), ikke har så lang holdbarhed. De er også vanskelige at montere, og det er ofte umuligt at montere dem lige der, hvor spændingskoncentrationerne er størst. Til gengæld er accelerometre, der måler acceleration, både pålidelige og enkle at montere, hvorfor vi foretrækker den type sensorer til langtidsovervågning.

Selve teknikken bygger på, at vi ud fra en model af vindmøllen ved, hvordan møllen bøjer sig. Noget forenklet fungerer det således: Der er en direkte sammenhæng mellem bøjningen et sted, for eksempel oppe ved nacellen (vindmøllens "maskinhus"), og bøjningen der, hvor vi har de største spændinger – og vi er interesserede i at beregne tøjningen (deformationen) i dette punkt. Disse punkter er repræsenteret ved punkt A og B på figuren. Tøjning og udbøjning er nært koblete, så tøjningen kan beregnes ud fra udbøjningen. Og til at beregne udbøj-



$$\text{Acc}(B) \rightarrow U(B) \rightarrow U(A) \rightarrow T(A) \rightarrow S(A)$$

ningen kan vi udnytte målinger af acceleration. For acceleration er ændring af hastighed, som er ændring af position, som i princippet er det samme som udbøjning (til ethvert tidspunkt). Der er derfor en direkte sammenhæng mellem acceleration og udbøjning. Vi går således fra at måle accelerationer til at beregne udbøjning (der hvor accelerometeren sidder) til at beregne udbøjningen der, hvor vi gerne vil kende den. Vi beregner så tøjningen fra denne udbøjning, og til sidst får vi spændingen ud fra Hooke's lov og tøjningen.

↑ Den gamle Storestrømsbro blev lukket for togtrafik i en længere periode i efteråret 2011 pga. revnedannelser i den gamle metalkonstruktion. Foto: Colourbox

høje bølger, der er, hvor ofte kraftige storme opstår, mv. Derfor kan resultater fra softwaren heller ikke bruges uden at lægge en sikkerhedsmargin ind og på den måde gøre konstruktionen stærkere – og dermed dyrere – end den behøver at være.

Virtuelle sensorer

I stedet for at forsøge at forudsige belastningen ud fra statistik er den nye tilgang altså kontinuert at måle på belastningen, så man kan følge med i, hvad konstruktionen faktisk har været udsat for, og hvornår den på den baggrund nærmer sig slutningen af sin levetid.

Til det formål bruger vi som nævnt sensorer til at måle vibrationer i konstruktionen. En begrænsning ved monitorering af vibrationer er imidlertid, at en del af de sensorer, man normalt bruger til at måle vibrationer, ikke er særlig pålidelige. Desuden kan det være svært at montere en sensor lige der, hvor man er mest interesseret i at måle. Dette punkt ligger måske under

vandet eller et sted i konstruktionen, hvor der af forskellige grunde ikke kan monteres en sensor. Derfor forsøger vi i dag i at bruge sensorer, der sidder i ét punkt, til at måle i et andet punkt. Vi kalder det "virtuelle sensorer". Man kan selvfølgelig ikke uden videre anvende en måling et sted til at fortælle noget om et helt andet sted. Men for netop vibrationer kan det ofte godt lade sig gøre, da vibrationer på en struktur typisk er afhængige af hinanden. Ved at måle vibrationer i nogle få punkter kan det derfor lade sig gøre at beregne, hvad vibrationen er i et helt andet punkt. Man behøver blot at kende strukturens egenskaber, og den information kan nemt skaffes.

Penge i at forlænge levetiden

I dag designer man havvindmøller og andre konstruktioner ud fra det princip, at de skal være tilstrækkeligt stærke til at modstå de højeste belastninger, de kan tænkes at få under hele deres levetid. Med virtuelle sensorer og beregninger af den forbrugte levetid bevæ-

ger vi os nu i en retning, hvor vi ikke behøver overdimensionere sådanne konstruktioner. Hvis man måler, at levetiden er ved at "udløbe" for en havvindmølle, kan man således vælge helt at stoppe møllen eller at forstærke den og forlænge dens levetid. Samtidig vil man også kunne undgå, at man udskifter konstruktionerne, før det er nødvendigt.

Hvis en havvindmølle for eksempel er designet til at kunne holde i 25 år, og vi fordi vi har målt i hele møllens levetid, efter de 25 år med sikkerhed kan sige, at den vil kunne holde yderligere 2 år, vil det reelt betyde, at den elektricitet, der produceres i de to ekstra år, vil være meget billigere end i de første 25 år. Omkostningerne til installation og demontering af møllen er jo allerede betalt af elprisen over de 25 forventede leveår. Dermed er det kun driftsomkostninger, der skal dækkes i al tid derudover. Således er der mange penge på spil, når vi udvikler fremtidens monitoringsløsninger. ■

OPLÆG OG WORKSHOPS FRA INGENIØRUDDANNELSERNE

Savner du inspiration eller supplement til din undervisning? Prøv et af de mange oplæg og workshops fra Ingeniøruddannelserne på SDU – enten hos os eller hos jer.

Hør f.eks. vores ingeniørstuderende forklare, hvordan alger kan bruges til spildevandsrensning, dyk ned i øllets kemi og bioteknologi, eller lad dine elever bygge droner eller prøve at udvikle teknologi, som hjælper blinde med at se.

Udvalgte oplæg og workshops om:

- Spildevandsrensning med alger
- Ølbrygningens kemi og bioteknologi
- Sensorer
- Matematik i robotter
- Solceller
- Droner
- Elektricitet
- Arduino

Se Ingeniøruddannelsernes store udvalg af tilbud til gymnasieelever på:
www.sdu.dk/brobygning

Kontakt:
Tlf. 6550 7444 eller brobygning@tek.sdu.dk

