



Miljøministeriet
Miljøstyrelsen

Tonestøj fra vindmøller

Bo Søndergaard, Peter Henningsen og Rene S. Lützen
Grontmij A/S, Acoustica

Miljøstyrelsen vil, når lejligheden gives, offentliggøre rapporter og indlæg vedrørende forsknings- og udviklingsprojekter inden for miljøsektoren, finansieret af Miljøstyrelsens undersøgelsesbevilling.

Det skal bemærkes, at en sådan offentliggørelse ikke nødvendigvis betyder, at det pågældende indlæg giver udtryk for Miljøstyrelsens synspunkter.

Offentliggørelsen betyder imidlertid, at Miljøstyrelsen finder, at indholdet udgør et væsentligt indlæg i debatten omkring den danske miljøpolitik.

Indhold

FORORD	5
SAMMENFATNING OG KONKLUSIONER	7
SUMMARY AND CONCLUSIONS	9
1 INDLEDNING	11
2 VINDMØLLER	13
3 TONER I STØJEN	17
4 DE VÆSENTLIGSTE KOMPONENTER	19
4.1 GEAR	19
4.2 GENERATOR	20
4.3 EFFEKTELEKTRONIK	21
4.4 BLÆSERE	21
4.5 HYDRAULIKSTATIONER	21
4.6 NACELLEINDDÆKNING	22
5 ERFARINGER FRA MINDRE VINDMØLLER	25
6 VIDENINDHENTNING	29
6.1 LITTERATURSØGNING	29
6.2 KONTAKT TIL VINDMØLLEFABRIKANTER OG RÅDGIVERE	30
7 OVERSICHT OVER VÆRKTØJER OG TEKNIKKER	31
7.1 NUMERISKE VÆRKTØJER I DESIGNFASEN	31
7.1.1 <i>Finite Element Opdatering ud fra eksperimentelle data</i>	31
7.1.2 <i>Multibody Dynamics</i>	32
7.1.3 <i>Vibroakustisk Modelling</i>	33
7.2 SVINGNINGSDÆMPNING	33
7.2.1 <i>TMD – Tuned Mass Dampers</i>	34
7.2.2 <i>Alternative TMD-koncepter</i>	36
7.3 PROTOTYPE-TEST	37
7.4 LYDUDSTRÅLING FRA UDVENDIGE FLADER	37
7.5 ANVENDELSE AF AKTIV KONTROL TEKNIKKER	38
8 OPSUMMERING	43
9 REFERENCER	45
APPENDIX: BREV TIL FABRIKANTER M.FL.	47

Forord

Toner i støj forøger den oplevede gene af støjen og er derfor uønsket for støjsvagt design. Dette gælder naturligvis også for støj fra vindmøller. Tydeligt hørbare toner i støjen medfører et genetillæg på 5 dB ved beregning af støjen, hvilket for planlægning af vindmøller betyder, at afstanden til nærmeste nabo skal øges næsten til det dobbelte for at støjgrænserne ikke overskrides. Toner betragtes som en fejl i konstruktionen og udgangspunktet er derfor, at der ikke forekommer toner i støjen. Med udviklingen af vindmøller ikke bare med hensyn til størrelse, men også med hensyn til nye teknologier og kontrolrutiner er forebyggelsen af toner blevet mere kompleks og stiller store krav til vindmølleproducenterne.

Miljøstyrelsen har bedt Grontmij A/S lydafdeling Acoustica om at foretage en undersøgelse af de tekniske muligheder for at undgå tonestøj fra vindmøller i fremtiden. Ønsket er naturligvis, at tonestøj i nye vindmøller kan undgås fuldstændigt, eller i hvert fald nedbringes til et niveau, hvor de ikke øger genen af støjen. Udfordringerne ligger i at allerede de eksisterende nye vindmøller opererer med principper og under omstændigheder, der gør det vanskeligt at undgå tonestøj herunder også lavfrekvent tonestøj. Erfaringen er dog at de tiltag, der gøres allerede reducerer indholdet af toner i de fleste tilfælde.

Undersøgelsen er baseret på en gennemgang af artikler og indlæg i tidsskrifter og fra konferencer, der fokuserer på denne type af problemstillinger i andre sammenhænge. Viden og teknikker, der kan overføres og bruges i vindmøllekonstruktioner er også indsamlet og præsenteret i rapporteringen. Der har været taget kontakt til danske og udenlandske vindmølleproducenter og danske rådgivere med henblik på at kvalificere indsamling af viden. Denne kontakt er der i de fleste tilfælde ikke taget stilling til. Enkelte har valgt ikke at deltage i projektet med henvisning til konkurrencemæssige årsager. Suzlon Wind Energy A/S og DELTA har bidraget direkte til projektet.

De typiske kilder til tonestøj er gear og generator, samt hjælpeudstyr i form af kølesystemer og hydrauliksystemer. Desuden kan effektelektronik være årsag til generering af vibrationer og toner.

Der fokuseres specielt på de problemstillinger, der er relevante for de nyere konstruktioner af vindmøller med variabelt omløbstal, gearløse konstruktioner, frekvensomformere, vertikal aksel m.m. Det er nyt at skulle håndtere, at et stort antal egensvingninger (resonanser) i konstruktionen kan eksisteres og dermed kan give anledning til tonestøj. I prototyper vil denne type af problemer ofte blive løst med traditionelle virkemidler, som ekstra masse, afstivning, indkapsling o. lign. Men da disse typer af løsninger ofte tilfører mere masse eller optager uhensigtsmæssig plads vil produktudviklingen benytte sig af nye mere dedikerede løsninger eller nye design. Det er netop muligheden for sådanne nye tiltag undersøgelsen har til formål at afklare og beskrive. Hensigten er at forbedre muligheden for at designe nye vindmøller med minimalt indhold af toner i støjen, samt specielt at vurdere, om der er et konkret udviklingsbehov, der kan arbejdes videre på.

Sammenfatning og konklusioner

Toner i støj forøger den oplevede gene af støjen og er derfor uønsket for støjsvagt design. Dette gælder naturligvis også for støj fra vindmøller. Tydeligt hørbare toner i støjen medfører et genetillæg på 5 dB ved beregning af støjen, hvilket for planlægning af vindmøller betyder, at afstanden til nærmeste nabo skal øges næsten til det dobbelte for at støjgrænserne ikke overskrides. Med udviklingen af vindmøller ikke bare med hensyn til størrelse, men også med hensyn til nye teknologier og kontrolrutiner er forebyggelsen af toner blevet mere kompleks, og stiller store krav til vindmølleproducenterne.

Miljøstyrelsen har bedt Grontmij A/S lydafdeling Acoustica om at foretage en undersøgelse af de tekniske muligheder for at undgå tonestøj fra vindmøller i fremtiden. Ønsket er naturligvis, at tonestøj i nye vindmøller kan undgås fuldstændigt, eller i hvert fald nedbringes til et niveau, hvor de ikke øger genen af støjen. Undersøgelsen er baseret på et begrænset litteraturstudie, men kan alligevel pege på enkelte teknikker med stort potentiale.

I designfasen er Multibody Dynamics, hvor de dynamiske egenskaber af større samlede enheder som drivtoget fra generator til vinge eller til tårn modelleres samlet det mest lovende værktøj både med hensyn til lastvurderinger, men også til at forudsige og begrænse tonestøj. Vibroakustiske modelleringsværktøjer er et andet udviklingsområde med stort potentiale.

Når det drejer sig om afhjælpning af problemer i de færdige konstruktioner er anvendelsen af aktiv kontrol/adaptiv teknik et oplagt bud på løsning. Det vurderes, at de meste oplagte emner til yderligere undersøgelser og udvikling er TMD'er (Tuned Mass Dampers) samt aktive systemer i forskellige afskygninger.

Både når det drejer sig om Multibody Dynamics og adaptive teknikker er der er viden tilgængelig på forskningsenhederne i Danmark. Kombineret med den viden, der ligger i vindmøllebranchen samt dele af rådgivermiljøet kan det udnyttes til at give dansk vindmølleindustri et konkurrencemæssigt forspring samtidig med at det kan styrke Danmarks position som udviklingscenter for vindmølleteknologi.

Summary and conclusions

Tonal components in noise will increase the subjective annoyance caused by the noise and are hence unwanted for low noise design. This is in particular valid for wind turbine noise. When clearly audible tones are present in the noise from a wind turbine, a 5 dB penalty is to be added to the noise level, which will result in almost a doubling of the distance to neighbours to be able to keep the noise limits. The development of still larger wind turbines, using new technologies and control procedures has caused the prevention of tones to become more complex and demanding for the manufacturers.

The Danish Environmental Protection Agency has asked Grontmij A/S, Acoustica to investigate the technical possibilities to prevent tonal noise from wind turbines. The goal is to completely avoid tones in the noise, or at least to reduce the tones to a level where they do not increase the subjective annoyance due to the noise. The investigation is based on a limited literature survey, but is still able to indicate some potentially useful techniques.

The most promising tool for use in the design phase is Multibody Dynamics, enabling composite structures such as the drive train from generator to rotor blade or to the tower to be modelled. Hereby the loads can be evaluated, and the tonal noise can be predicted and reduced. Vibroacoustic modelling is another developing area with promising potentials.

Active or adaptive control is an evident technique to remedy problems. It seems that TMD (Tuned Mass Damper) and various types of active control systems also have a large potential for further investigations.

Both within Multibody Dynamics and adaptive techniques there is available knowledge in Danish research institutions. This knowledge can when combined with the experience of the wind turbine manufacturers and some of the consultants become a competitive advantage for the Danish wind turbine industry and improve the Danish position as a research centre for wind turbine technology.

1 Indledning

På bare 30 år har kommercielle el-producerende vindmøller udviklet sig fra simple konstruktioner, der kunne leveres af den lokale smed til avancerede kraftværker med specialfremstillede komponenter designet specifikke anvendelser. Dermed stilles der også større krav til underleverandører til vindmøller, når hyldevarer udviklet til andre og somme tider mindre støj- og vibrationskritiske anvendelser ikke længere kan anvendes.

Støjforholdene er også undergået en forandring idet maskinstøjen fra komponenterne i nacellen stort set er fjernet og den primære støj er den aerodynamisk genererede støj fra vingernes passage gennem luften. Denne del af støjen er bredbåndet i natur og normalt uden toner. Maskindelene kan dog stadig bidrage til støjen i form af toner. Selvom komponenterne er valgt støjsvage og selvom der er gjort meget ud af at begrænse støjens transmission til omgivelserne er der dog stadig ventilationsåbninger o. lign. i de fleste vindmøller hvor i gennem støjen kan udbredes. Designet forsøger bedst muligt at tage højde for, at støjniveauet i nacellen fra de forskellige komponenter er så lavt, at støj gennem åbninger ikke giver et væsentligt bidrag til støjen i omgivelserne. For nogle komponenter er det dog vanskeligt at reducere tonestøjen tilstrækkeligt og der kan derfor forekomme toner, som transmitteres ud i omgivelserne gennem åbningerne. Disse forhold er dog enkle at udbedre. De væsentligste bidragsydere til toner i støjen fra vindmøller er gearkasse og generator, hvor tonerne starter som vibrationer i komponenterne og transmitteres gennem strukturer til overflader, hvor de kan udstråles til omgivelserne. Blæsere, hydraulikstationer og effektelektronik kan også give væsentlige bidrag hvoraf noget transmitteres gennem luften og noget gennem strukturerne.

For at reducere energiindholdet i toner i støjen fra vindmøller er det oplagt at se på problemerne i 3 områder hver for sig:

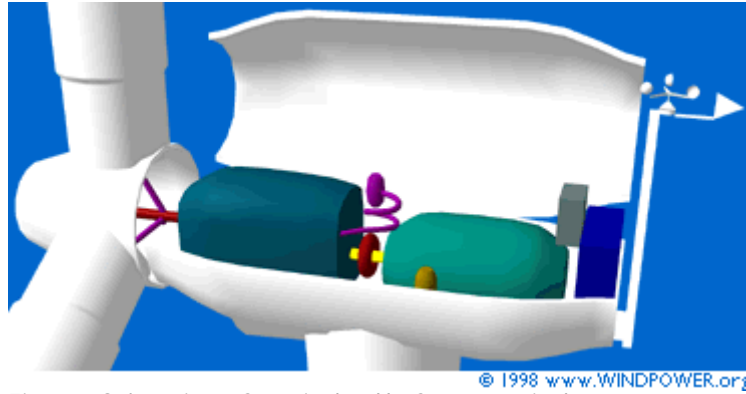
- Generering af toner (Kilden)
- Transmissionsveje (forplantning af toner)
- Udstråling (udbredelse til omgivelserne)

Det er naturligvis ønskeligt at kunne løse problemerne allerede i forbindelse med genereringen ved kilden, men specielt for de tunge komponenter med roterende dele som gear og generator og som er udsat for store og hurtigt varierende kræfter er det vanskeligt at fjerne tonerne fuldstændigt. Derfor skal der også arbejdes med transmission og udstråling for bedst muligt at undgå toner i det resulterende støjbillede.

Det er forskellige teknikker, der virker overfor de 3 dele, men alle har betydning for både støjniveau og støjens karakter. For kildedelen vil det typisk være valg eller design af komponenterne så kritiske vibrationer kan undgås. Da alt roterende maskineri har nogle indbyggede kritiske frekvenser gælder det i designfasen om at kende disse og designe de omgivende strukturer så resonanser og især sammenfald af resonanser kan undgås både med hensyn til transmission og udstråling.

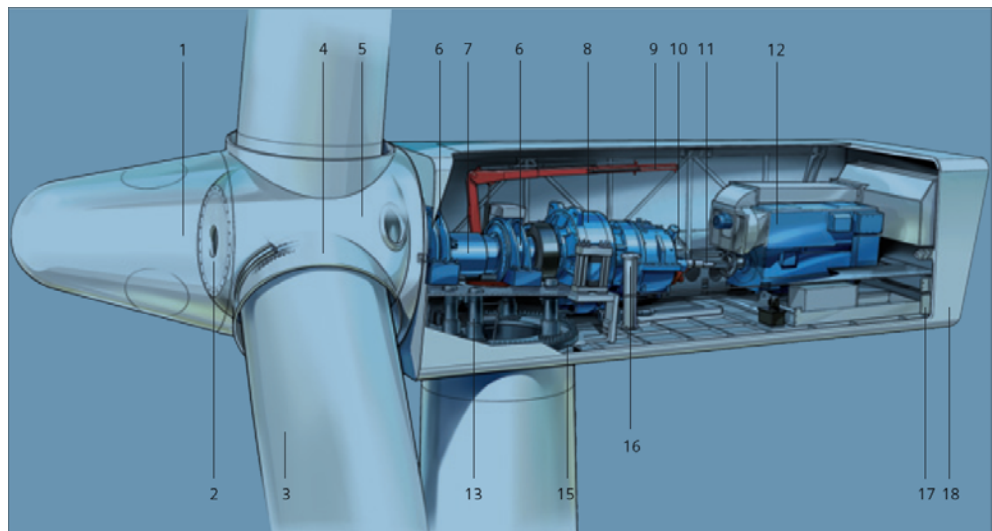
2 Vindmøller

I Danmark kender man primært til den type, der ofte kaldes den danske vindmølle model. Det er en 3 bladet vindmølle med rotoren placeret foran tårnet i retning mod vinden. Hovedkomponenterne i vindmøllen er rotor, gearkasse, generator. Eksempler på dette er vist i Figur 1 som lidt simpelt viser indholdet af en nacelle.



Figur 1. Opbygning af en vindmølle fra www.windpower.org

Den moderne vindmølle er naturligvis mere kompliceret i sin opbygning som det kan ses i Figur 2 fra en brochure på Siemens Wind Powers SWT-3.6-107 vindmølle. For nogle vindmølletyper er også transformeren placeret i nacellen, men i dette tilfælde står den i bunden af tårnet.

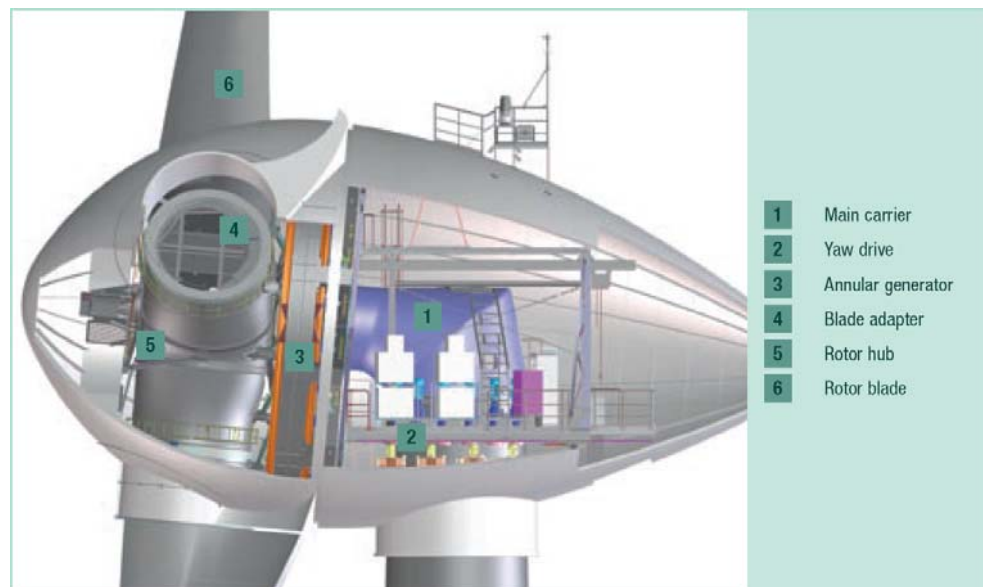


Figur 2. Design af moderne vindmølle fra Siemens Wind Powers brochure for SWT-36-107

Nacelle arrangement

- | | |
|--------------------|-------------------|
| 1. Spinner | 10. Brake disc |
| 2. Spinner bracket | 11. Coupling |
| 3. Blade | 12. Generator |
| 4. Pitch bearing | 13. Yaw gear |
| 5. Rotor hub | 14. Tower |
| 6. Main bearing | 15. Yaw ring |
| 7. Main shaft | 16. Oil filter |
| 8. Gearbox | 17. Generator fan |
| 9. Service crane | 18. Canopy |

Der findes andre versioner af denne type af vindmøller. Enercon i Tyskland har et design uden gearkasse, men med en anden type generator, se Figur 3, Også Siemens Wind Power fremstiller gearløse vindmøller.



Figur 3. Enercon E 126 7,5 MW vindmølle fra produktoversigt over Enercon vindmøller

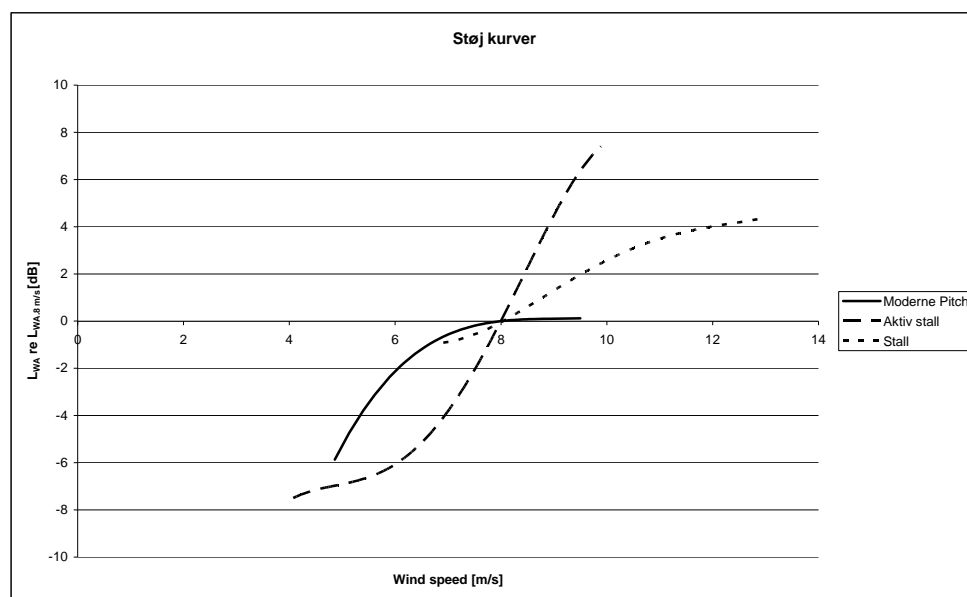
Der eksperimenteres også med vertikalakslede vindmøller som f.x. Vertical Wind's 200 kW prototype der er opstillet ved Falkenberg. Serieproducerede møller med lodret aksel er endnu ikke så store, men der er stor interesse for dette koncept da det giver mulighed for en række simplificeringer i styringen og mulighed for at bevare de tunge komponenter på jorden. Dermed er støjbegrænsning lettere at håndtere, både med hensyn til toner men også anden støj. Også denne type kan fremstilles uden gearkasse.

Vindmøller uden gearkasse har i stedet en multipolgenerator, der kan være udformet som ringgenerator.

Alle store, moderne vindmøller benytter muligheden for at variere rotoromdrejningstallet. Det kunne tidligere håndteres gennem slippet i en asynkron generator, men den store variation, der opereres med nu har medført at der indsættes en frekvensomformer mellem generatoren og elnettet. Dermed er generatoren ikke længere bundet til at producere strøm ved en fast frekvens, netfrekvensen. Det giver mulighed for bedre udnyttelse af den varierende vindhastighed og mindsker samtidig belastningen på konstruktionen. Støjmæssigt giver det dog større udfordringer idet der opstår en mere dynamisk struktur, hvor et stort antal resonanser kan komme i spil både med hensyn til generering, transmission og udstråling af toner.

Alle nye store vindmøller, over 2 MW, anvender pitchregulering som effektbegrænsning. Vestas har arbejdet med og udviklet på dette princip på næsten alle deres vindmøller, mens Siemens (BONUS) og NEG Micon tidligere har anvendt stall og aktiv stall regulering som effektbegrænsning. Dette skift i teknologi betyder at støjen har et maksimum, der optræder omkring reguleringpunktet, hvor vindmøllen begynder at producere maksimalt, hvorimod støjen ikke øges ved kraftigere vind. For stall regulerede

vindmøller stiger støjen yderligere og toppe først ved noget højere vindhastigheder, hvilket er illustreret i Figur 4.



Figur 4 Støjkurver for de 3 forskellige reguleringsprincipper, normeret til samme værdi ved 8 m/s for sammenligning. Det er tydeligt, at de høje støjniveauer, der kan opleves ved ældre vindmøller ved høje vindhastigheder ikke forekommer for de nye store pitch-regulerede vindmøller.

3 Toner i støjen

I forbindelse med arbejdet med begrænsning af toner i støjen fra en vindmølle betragtes emnerne Generering, Transmission og Udstråling hver for sig. De beskriver livsbetingelserne for en tone. I Tabel 1 er dette sat op i skematisk form, hvor de typiske forhold for vindmøller er vist.

	Type	Kilder	Frekvensområde	Virkemidler (simple)
Generering	Mekanisk (vibrationer)	Gear, Generator, Blæsere, Hydraulik	Lav - Mellem	Masse, Stivhed, Skråfortandede gearkasser, Design
	Aeroakustisk (flow)	Vinger, Blæsere	Mellem - Høj	Design Vortex generatorer
	Elektrisk	Effektelektronik Frekvensomformere Transformere	Netfrekvens + harmoniske, Høj	Indkapsling Design
Transmission	Luftbåret	Ventilationsåbninger Ventilatorer	Lav - Mellem	Lyddæmpere Absorbenter
	Strukturbåret		Lav - Mellem	Vibrationsisolering Masse Stivhed
Udstråling	Åbninger	Ventilationsåbninger Utætheder	Lav - Mellem	Lyddæmpere Absorbenter
	Plader/ overflader	Nacellecover, Tårn Vinger	Lav - Mellem	Masse Stivhed

Tabel 1. Sammenstilling af kilder til toner og transmissionsveje og frekvensområder

Toner i støj fra blæsere vil ikke blive behandlet i denne gennemgang, da der gennem tiden har været arbejdet meget med dette emne og der findes et stort materiale om at dæmpe blæserstøj tilgængeligt på internettet. Det er i princippet muligt at undgå toner i støjen fra blæsere allerede i design/indkøbs fasen, hvor balancen mellem økonomi og kvalitet skal findes.

Toner i den aerodynamiske rotorstøj i form af mellem- og højfrekvente toner og fløjtelyde genereret af luftstrømmen omkring vingerne betragtes i denne sammenhæng som en fejl i vingedesign eller i produktionen og vil heller ikke blive behandlet i denne sammenhæng.

Luftlydtransmitterede toner gennem de nødvendige åbninger til ind- og udsugning fra nacellen kan i princippet håndteres med simple lyddæmpere, men pladsforholdene kan stille ekstraordinære krav og mere avancerede lyddæmpere f.eks. aktive lyddæmpere kan være et bud på løsningen.

4 De væsentligste komponenter

Erfaringsmæssigt er de væsentligste kilder til toner i støjen fra vindmøller gear, generator, blæsere og hydraulikstationer. Støjen kan transmitteres til omgivelserne både i form af strukturlyd og som luftlyd, der udsendes fra maskinrummet i nacellen. Blæsere og hydraulikstationer er mindre enheder, som kan vibrationsisoleres fra strukturen og det vil oftest være lufttransmitteret lyd, der når frem til omgivelserne.

Effektelektronik i forbindelse med frekvensomformere og transformere kan give anledning til toner i støjen, men også her er det primært lufttransmitteret lyd. Netfrekvensen og harmoniske heraf fra transformeren kan dog transmitteres gennem strukturen.

I enkelte nyere konstruktioner findes der køleenheder på jorden eller i bunden af tårnet til køling af frekvensomformere, transformatorer eller lignende. Det drejer sig om klassiske kilder, der simpelt kan håndteres med traditionelle virkemidler.

4.1 Gear

Som beskrevet i Stiesdal 1993; [13] og Ødegaard & Danneskiold-Samsøe april 1995; [15] er gearet en hyppig kilde til toneholdig støj fra konventionelle vindmøller. Årsagen er de store fluktuerende kræfter, der optræder i gearet.

Støj fra gearet udbredes i høj grad som strukturlyd gennem bærerammer til tårnet og nacellens overflade og gennem hovedakslen til rotoren, hvorfra den udstråles. Det er vanskeligt at vibrationsisolere gearet fra de øvrige strukturer på grund af de store kræfter fra rotoren.

VTT 2008; [6] giver et overblik over de mange nutidige gear-udformninger til vindmøller, samt modellerings- og testtiltag. Blandt de interessante moderne geartyper er magnetiske gear, hvor støj fra tandindgreb er elimineret.

De fleste vindmøllegear består i dag, jfr. DNV/Risø 2002; [16] og brochure materiale fra hhv. Siemens og Vestas hjemmesider for Siemens SWT 3,6-107 og Vestas V112 3.0 MW, af et planetgear og et eller to parallelle trin med skråtfortandede tandhjul.

Egensvingninger i gearsystemet, herunder torsionssvingninger i hele drivtoget, kan forstærke vibrationsniveauet og potentialet for støjgenerering markant. Der er derfor stor fokus på korrekt modellering af svingningsegenskaber for drivtoget. Som beskrevet andetsteds i nærværende rapport er Multibody Dynamics-modellering et aktuelt, relevant værktøj.

I konventionelle gear er tonen, eller tonerne, typisk relateret til tandindgrebsfrekvenser. Dette skyldes de fluktuerende kræfter ved tandindgrebene i de enkelte geartrin. Erfaringsmæssigt Ødegaard & Danneskiold-Samsøe april 1995; [14] er det de hurtigstløbende geartrin, f.eks. udgangstrinnet, der er de almindeligste kilder til tonestøjen. Der er dog

eksempler på at andre trin kommer i spil og giver anledning til toner i det lavfrekvente område.

Der findes i dag flere forskellige geometriske udformninger af tandindgrebet. Denne geometri, i samspil med akselopretningen, er meget betydende for generering af støj og vibrationer fra gearet. Eksempler på specifikke målinger for forskellige gear typer findes i Ødegaard & Danneskiold-Samsøe marts 1995, april 1995; [14][15] og van der Linden 1995; [19]. En generel erfaring er jfr. Bies 1996; [16], at skråfortandede gear er mere støjsvage end ligefortandede gear.

Den grundlæggende fysik bag gearstøj er beskrevet i Heckl 1995; [17].

I Illgen 2007; [7] beskrives en aktiv dynamisk absorber (eller TMD, se andetsteds i denne rapport), som er udviklet med henblik på dæmpning af enkelt-toner fra vindmølle gear. Ligeledes beskriver Rebecchi 1999; [8] et aktivt vibrationsdæmnings-aggregat til en gearkasse.

Da lydudstrålingen af toner fra gearet kan ske både fra tårn, nacelle og/eller rotor er det vigtigt at vibrationsisolere gearet bedst muligt i forhold til omgivelserne. Dette gøres traditionelt ved at indskyde afstemte elastiske lejer mellem gearet og monteringsrammen, der udføres som en meget stiv konstruktion. I Ødegaard & Danneskiold-Samsøe april 1995; [14] er gennemgået en række traditionelle gearopstillinger og deres muligheder for vibrationsisolering.

I de gearløse konstruktioner undgås denne problematik. Samtidig bliver generatorkonstruktionen dog mere kompliceret.

4.2 Generator

I forhold til gearet er generatoren en mindre dominerende kilde både til vibrationer og støj.

I vindmøller med fast omløbstal, hvor generatoren er koblet til nettet og styres af netfrekvensen, optræder strømme og spændinger (stort set) "pænt" sinusformet uden kraftige transienter og stejle flanker. Det er sjældent dette giver ekstraordinære støjmæssige udfordringer. Generatoren giver selvfølgelig anledning til vibrationer, der kan overføres til bundrammen, men det er normalt muligt ved anvendelse af svingningsisolatorer at reducere dette til at være uden betydning. Ved uhensigtsmæssig kabelføring kan kabler komme til at fungere som en vibrationsmæssig 'kortslutning' mellem generatoren og resten af strukturen.

Hvis generatoren er forsynet med en integreret køleluftblæser, er denne sjældent optimeret til at give mindst mulig støj. Skulle støjen herfra vise sig at være et problem, kan det reduceres med almindelige virkemidler som afskærmning, lydsluger eller udskiftning af blæseren til en støjmæssigt mere optimal udgave.

Situationen er mere kompliceret i møller med variabelt omløbstal. I disse anvendes effektelektronik til at transformere fra en frekvens til en anden. Dette medfører kraftige transienter og det giver nye udfordringer. De tilhørende kraftige felter kan sætte metalstrukturer i svingninger, og dermed skabe nye støjkilder. F.eks. inddækninger af tynde plader. Transienterne kan virke tilbage på generatoren og helt tilbage til gearet, således at disse komponenter

ikke længere opererer optimalt. Det kan også give anledning til forøget generering af støj og vibrationer. Anvendelse af fuldt konverterede systemer, hvor den producerede strøm konverteres til DC og efterfølgende til AC ved netfrekvensen kan reducere disse problemer. Desuden undgås transienter fra nettet, der kan anslå tandindgrebsfrekvenserne i gearet.

Der er set eksempler på at netfrekvensen og specielt lige harmoniske heraf (100 Hz 200 Hz etc. for europæiske forhold) har været synlige i støjspektret fra vindmøller. Disse frekvenser kan både optræde som vibrationer i strukturen og som luftlyd. Frekvenserne er dog stationære og dermed forholdsvis enkle at håndtere med vibrationsisolering og dæmpning af overflader.

4.3 Effektelektronik

De dominerende toner fra gear ligger typisk i frekvensområdet 100 Hz – 600 Hz, men i enkelte tilfælde ses toner ved lidt lavere frekvenser, ned til omkring 40 Hz. Effektelektronikkens switchfrekvens ligger meget højere, typisk i kHz-området. Dette gør det lettere at reducere eller dæmpe vibrationer og støj fra elektronikken. Afskærmning, nacelleinddækning m.m. har bedre lydisolering, jo højere frekvensen er. Lydsluser kan være kortere for at opnå den samme dæmpning. Vibrationsdæmpere behøver ikke at være så bløde, og der skal ikke så meget ekstra dæmpemasse på paneler for at opnå en given dæmpning.

På den anden side giver effektelektronikken ikke bare en kraftig tone ved switchfrekvensen, men overtoner og evt. sidebånd kan også være kraftige. Med mange kraftige toner i spektret er der også mange resonanser, der kan anslås. Og resonanserne ligger tættere, jo højere frekvensen bliver. Problemet med at undgå at kraftige toner falder sammen med resonanser bliver derfor større. Effektive støj- og vibrationsdæmpningsmetoder, der håndterer én bestemt frekvens, kan næppe anvendes. Der skal bruges virkemidler, der er mere generelle og som fungerer over et bredt spektrum, men de er også mindre effektive.

4.4 Blæsere

Blæsere til køleluft er typisk 'standard-varer', som fabrikanten kan oplyse visse støjdata på. De almindelige støjdata angiver lydeffektniveau(-er) eller lydtrykniveau i en given afstand, enten som en samlet, A-vægtet værdi, eller opdelt på oktavbånd. Der findes normalt intet smalbandsfrekvensspektrum, og derfor kan der godt være tydelige toner i støjbilledet, som ikke kan udledes af databladene.

Støjniveauet fra blæsere er meget afhængig af omdrejningstallet. Ud fra et støjmæssigt synspunkt er det mere fordelagtigt at styre blæserens omdrejningstal og lade den være i drift hele tiden med en ydelse tilpasset kølebehovet, frem for at køre den i on/off-drift med max./ingen ydelse. Dermed kan det udnyttes, at blæseren støjer mest når vindmøllen i øvrigt støjer mest og der derved opnås en maskering af blæserstøjen.

4.5 Hydraulikstationer

Støj fra hydraulikstationer består typisk af et sæt af toner, der primært stammer fra pumpeenheten. Pumpen kører med variabel hastighed efter behovet for tryk på systemet og tonerne varierer derfor i frekvens. Tonerne er dog oftest kraftigst ved fuld belastning på systemet og det vil ofte være en

enkelt frekvens eller et lille frekvensområde der kan give problemer. Der optræder ofte et sæt af overtoner af grundfrekvensen. Tonerne udstråles direkte fra enheden, men kan også forplante sig gennem strukturen og udstråles fra andre dele af vindmøllen. Frekvensen ligger i mellem- og højfrekvensområdet og er således lettere at håndtere end de lavfrekvente toner, der kan optræde i forbindelse med gear. Det er muligt at vibrationsisolere hydraulikstationen med traditionelle midler, da frekvenserne er relativt højfrekvente, og der ikke er behov for stive forbindelser mellem enheden og maskinrammen. Det er i den forbindelse vigtigt også at vibrationsisolere rør og slanger fra strukturer og specielt fra nacelleinddækningen. Dermed er det udstråling af tonerne fra selve enheden, der bliver af betydning. Det handler således om at begrænse udstrålingen fx. med indkapsling eller dæmpning af de betydende flader, dæmpning i nacellen samt dæmpe lyden gennem åbninger med lyddæmpere.

4.6 Nacelleinddækning

Den del af møllens samlede støjudsendelse, der udsendes fra og gennem nacellens inddækning, bør og kan reduceres til at være ubetydelig i forhold til møllens øvrige del-støjkilder.

Nacelleinddækningen skal være helt tæt, bortset fra de åbninger, der er nødvendige af hensyn til indsugning/afkast af køleluft. Disse åbninger skal forsynes med lyddæmpere eller lydsluger. Lyddæmpere og lydsluger skal have en vis størrelse for at være effektive, specielt hvis de skal være effektive overfor lave frekvenser. De medfører også et uundgåeligt tryktab, hvilket der skal tages hensyn til ved dimensionering af blæsere. Det har hidtil ikke været almindeligt med aktive lyddæmpere, men det kan være en af løsningerne fremadrettet.

Konstruktionen af nacelleinddækningen skal have en tilstrækkelig luftlydisolation. En høj luftlydisolation kan opnås enten med en høj flademasse eller ved at opbygge en dobbeltkonstruktion (eventuelt som en sandwichkonstruktion). For en given masse pr. kvadratmeter kan der opnås en større luftlydisolation med en sandwichkonstruktion i forhold til en massiv enkeltkonstruktion.

For sandwichkonstruktioner giver en stor tykkelse af midterlaget en forbedret lydisolation, specielt ved lave frekvenser.

Dobbeltkonstruktioner har et 'dyk' i lydisolationen ved en bestemt frekvens - resonansfrekvensen, der typisk ligger ved mellem eller lave frekvenser. Desuden har alle konstruktioner et 'dyk' i lydisolationen ved koincidensfrekvensen, der ligger i det mellem- eller højfrekvente område. Det skal undgås at både konstruktionens resonansfrekvens og koincidensfrekvens falder i et frekvensområde med kraftige toner i nacellen. Dykket ved koincidensfrekvensen kan reduceres ved at vælge to forskellige elementer til inder- og yderside. Enten forskellige materialer (metal/glasfiber) eller samme materiale i forskellig tykkelse.

Luftlyden i nacellen kan dæmpes ved montering af absorberende materiale på indersiden af nacelleinddækningen. Dette kan reducere støjniveauet mærkbart, men det har sin begrænsning. Absorberende materiale har kun en beskeden virkning på luftlydisolationen af inddækningen. Absorberende materiale har ingen effekt overfor lavfrekvente toner.

For at undgå overførsel af strukturbåren støj fra bundrammen til nacelleinddækningen bør denne monteres ved hjælp af svingningsdæmpere.

Der skal monteres færrest mulige komponenter direkte på nacelleinddækningen for at undgå at svingningsdæmperne bliver kortsluttet.

5 Erfaringer fra mindre vindmøller

De første små vindmøller blev opbygget af komponenter, der ikke var konstrueret til anvendelse i vindmøller. Standardkomponenter som gear, generatorer og lejer beregnet til generel industriel anvendelse.

Det vigtigste var at få bygget en mølle der virkede og som kunne generere noget effekt. Der blev kun tænkt lidt – om overhovedet – på at støjudsendelse fra møllerne skulle kunne være et problem. Der var sjældent en lydteknisk ekspertise til stede hos fabrikanten.

Da det så efterhånden viste sig, at der faktisk blev udsendt støj, der generende naboerne, var fabrikanten typisk meget optimistiske mht. hvor meget støjen kunne dæmpes med simple ændringer på vindmøllen. Og myndighederne accepterede i nogle tilfælde dette. Dette kunne føre til langvarige tovtrækkerier, og førte i sidste ende til faste regler for maksimal støjbelastning fra vindmøller og krav til dokumentation af dette.

Toner fra gear var ofte meget tydelige i lydbilledet. Helt galt gik det, hvis gearet var boltet direkte på bundrammen. Det gør ingen veletablerede fabrikanten i dag, men det kan stadigvæk ses på helt små, nyudviklede husstandsmøller.

Standardgear vil i en typisk industriel anvendelse arbejde 'modsat' i forhold til anvendelsen som vindmøllegear, dvs. med en motor koblet på den hurtigt-roterende aksel og en belastning på den langsomt-roterende aksel. Hvis gearfabrikanten har optimeret gearet for den industrielle anvendelse, vil det ikke fungere optimalt som vindmøllegear.

På grund af den varierende vindhastighed og turbulens er belastningen af et vindmøllegear meget mere varierende og ujævn end i en typisk industrianvendelse. Det er hårdt for bl.a. lejerne, og kan give ekstra slid og forkortet levetid.

Efterhånden som produktionen af vindmøller steg, blev der udviklet gear direkte til anvendelse i vindmøller. Typisk med et planettrin og to parallelle trin. Hovedakslen med rotoren er koblet på planettrinet og der er et momentstag i hver side. Momentstagene er via cylinderformede, elastiske bøsninger forbundet med bundrammen. Bøsningerne skal dæmpe overførsel af vibrationer fra gearet til bundrammen, og var/er(?) ens i de to sider. De er udsat for både en statisk belastning fra gearets masse og en dynamisk belastning, der er afhængig af den kraft, der føres gennem gearet. Den dynamiske belastning virker i samme retning som tyngdekraften i den ene side og modsat i den anden side. Således er den samlede belastning af de to bøsninger er forskellig. Virkningen af denne type vibrationsisolatorer er afhængig af sammentrykningen. Så under drift er den ene bøsning ekstra hårdt sammenpresset og virker derfor godt som vibrationsisolator, hvorimod den anden bøsning er mindre sammentrykket og fungerer ikke lige så godt som vibrationsisolator. I uheldige tilfælde kan resonansfrekvensen for denne bøsning komme så højt op at den falder sammen med en tandindgrebsfrekvens, og så forstærkes vibrationerne.

Der gælder tilsvarende forhold for generatorens understøtning, men generatoren i møller med gear er udsat for et langt mindre moment end gearet.

Det er oftest tandindgrebenes grundfrekvens, der viser sig i vindmøllens lydbillede. Men også harmoniske til tandindgrebsfrekvenserne kan vise sig at være betydende, hvis de falder sammen med en resonans et sted i strukturen. Et eksempel er en resonans i en bundramme, der faldt sammen med den 9. harmoniske til en tandindgrebsfrekvens. Resonansen blev så kraftigt anslået, at tonen var kraftig nok til at udløse tonetillæg. Problemet blev afdækket med ODS-analyse (Operational Deflection Shape) og afhjulpet med en ekstra afstivning af bundrammen.

Den præcise udformning af tandhjulstænder har stor indflydelse på støjgenereringen. Det var ikke noget der blev ofret megen opmærksomhed i starten. Tænderne deformeres under belastning, og de kan slibes så de er 'mod-deformerede'. Således får tænderne under én bestemt belastning en udbøjning, der netop giver den optimale facon og dermed mindst støj. Dette skulle så gerne ende med at falde sammen med den drift af møllen, hvor støjudsendelse skulle måles og bedømmes – i Danmark i starten ved en vindhastighed på 8 m/s i 10 meters højde.

Toner fra gearet udsendes både som luftlyd til nacellen og som strukturlyd til bundrammen og hovedakslen. I princippet er det altid muligt at dæmpe luftlyden tilstrækkeligt. Der er imidlertid mange andre hensyn end de støjmæssige, der har indflydelse på udformningen af nacellen. Vægt, plads, åbninger til køling og pris. Erfaringerne viser, at hvis ikke lyddæmpningen tænkes med fra starten og hele tiden er i fokus i designfasen, kan det ende med en konstruktion, der ikke er optimal mht. lyddæmpning, og som ikke kan forbedres tilstrækkeligt med enkle midler.

Selve inddækningen kan i sin grundkonstruktion være for svag. Glasfiber eller metal med nogle få mm tykkelse er sjældent tilstrækkeligt. En sandwich-konstruktion er meget bedre, men fylder også mere og er dyrere.

Der skal ikke ret store åbninger eller spalter til, før inddækningens luftlydisolation forringes væsentligt. Simple ting som manglende tætningslister omkring luger kan gøre en lydmæssig forskel.

Varmeproduktionen fra maskineriet i nacellen kræver i de fleste tilfælde en tvungen luftkøling. Det betyder, at der skal være åbninger i nacellen til indsugning og afkast af køleluft, og at der skal monteres en eller flere blæsere. Gennem åbningerne udstråles den luftbårne støj fra nacellen, og blæseren/blæserne er i sig selv en ekstra støjkilde. Lyddæmpere og/eller lydsluger er nødvendige, men de kræver plads – en plads der ofte ikke er til rådighed.

Der kan også udvikles megen varme i bunden af tårnet. Varme som skal ventileres væk. Af styrkemæssige hensyn kan der sjældent laves ekstra åbninger i tårnet, og så er der kun adgangsdøren tilbage som en mulig vej for køleluften. En almindelig jalousirist giver ikke megen lyddæmpning, og helt galt går det, hvis der monteres en blæser. Der er set eksempler på møller, hvis målte støjudsendelse ændres adskillige dB, afhængig om der blev målt med

adgangsdøren vendende ud mod målepositionen, eller om den vendte væk fra målepositionen.

Toner i vindmøllestøjen kan også stamme fra andre kilder. Da der med voksende møllestørrelse viste sig behov for kraftige hydraulikpumper, blev disse i nogle tilfælde monteret uhensigtsmæssigt set fra et støjsynspunkt. De blev monteret direkte med stiv forbindelse til bundrammen, og så var der etableret en glimrende transmissionsvej for strukturbåret støj.

Generende toner i vindmøllestøjen behøver ikke være til stede hele tiden. Hylende bremses og krøjemotor/krøjegear har i nogle tilfælde været en plage.

Ikke-perfekte vinger kan i uheldige tilfælde give anledning til generende fløjtetoner. Et simpelt, boret drænhul yderst i vingetippen har vist sig at fungere fint som en fløjte.

Generelt set er erfaringerne med toner i støjen fra mindre vindmøller at hvis man ikke tænker støjen ind fra starten og derfor konstruerer møllen alene ud fra andre hensyn, så er det meget sandsynligt at der opstår tydelig tonestøj.

På den anden side er det ved udnyttelse af almindelig gængs viden og velkendte konstruktionsprincipper muligt at reducere tonestøjen så meget, at tonerne i det mindste ikke udløser ekstra tillæg til møllens samlede støj.

Det kan måske kort siges at de indhøstede erfaringer gennem tiden har været

- vibrationsisolering af nøglekomponenter
- Valg af støjsvage komponenter
- God isolation af luftlyd i form af sandwichelementer eller lignende samt lyddæmpere i åbningerne.

Derudover har det været nyttigt at hovedkomponenter som gear og generatorer er blevet nydesignet med henblik på anvendelse i vindmøller.

6 Videnindhentning

Videnindhentningen til projektet er primært baseret på en litteratursøgning. Litteratursøgningen er forsøgt opkvalificeret ved henvendelse til relevante virksomheder, herunder fabrikanter, rådgivere m.fl.

6.1 Litteratursøgning

Der er som udgangspunkt foretaget en litteratursøgning med udgangspunkt i søgeordene:

- Tone, Tones
- Pure tones
- Tonality
- Resonance
- Low frequency
- Vortex

I kombination med

- Wind Turbine
- Gear
- Generator
- Ventilation
- Hydraulics
- Reduction
- Fan

Primære kilder var fra starten valgt som tidsskrifterne:

- Journal of Sound and Vibration
- Journal of the Acoustical Society of America (JASA)
- Acta Acustica

Samt konference proceedings fra konferencerne

- IMAC
- IOMAC
- Internoise
- Wind Turbine Noise
- BNAM

I selve søgningen blev der derudover søgt i følgende databaser.

- Energy Science and Technology
- Inside Conferences
- Ei Compendex
- Inspec
- NTIS
- CSA Technology Research database
- ScienceDirect

Resultatet af søgningen gavede mere end 200 referencer hvoraf lige godt 30 blev udvalgt og bestilte til et nærmere studie. Disse blev suppleret med lærebøger, rapporter og lignende fra egne arkiver samt brochure materiale fra de forskellige vindmøllefabrikanter.

6.2 Kontakt til vindmøllefabrikanter og rådgivere

Der er ikke tvivl om, at der de mange år, hvor der har været arbejdet med støj og toner i støjen fra vindmøller, er oparbejdet en del erfaringer med hvordan toner i støjen kan reduceres hos vindmøllefabrikanterne. Rent historisk har der været en høj succesrate på denne type af problemer. Motivationen har været høj, da toner, der klassificeres som tydeligt hørbare, medfører et genetillæg på 5 dB på støjbelastningen. Dette svarer i runde tal til, at afstanden til nærmeste nabo skal øges til det dobbelte for at støjgrænserne kan overholdes.

På samme måde forventes det at akustikrådgivere med maskinakustik og maskinkonstruktioner som særligt interesseområde har en del erfaringer, der kan være af gavn for videnindhentningen.

Den indledende kontakt til vindmøllefabrikanter og rådgivere er foretaget i form af et brev, vedlagt i Appendix, hvor formålet med projektet er beskrevet og hvorledes de kan bidrage til projektet. Der blev gjort opmærksom på at det ikke forventes at der åbnes for forretningshemmeligheder eller konkurrencemæssige fordele, men i højere grad søges information om hvordan man arbejder med problemerne og hvor der indhentes viden. Brevet er udarbejdet på både dansk og engelsk og er sendt til de danske baserede vindmølleproducenter Siemens Wind Power og Vestas Wind Systems samt flere udenlandske Suzlon, GE og Enercon. Kontaktpersonerne i disse firmaer er identificeret gennem samarbejde i forskellige sammenhænge bl.a. inden for standardisering.

Der har også været rettet kontakt til danske rådgivere.

Reaktionerne har bestået i manglende tilbagemeldinger eller afvisning af at deltage begrundet i konkurrencemæssige årsager både hos fabrikanter og rådgivere. Samtidig er der dog fra enkelte givet udtryk for at de finder projektet relevant og ser frem til den færdige rapport.

Suzlon og DELTA har tilbudt i at lade sig interviewe til projektet og har bidraget med væsentlige input.

I forbindelse med Wind Turbine Noise 2011 konferencen i Rom har der været uformelle kontakter til udenlandske vindmøllefabrikanter og rådgivere.

7 Oversigt over værktøjer og teknikker

Der er helt naturligt sket en løbende udvikling af støjsvag konstruktion sammen med udviklingen af vindmøllerne. Støj er blevet en konkurrenceparameter og toner i støjen er underforstået som ikke værende til stede i en størrelsesorden så støjen virker mere generende. I de fleste af de lande, hvor vindenergi er en væsentlig del af energiforsyningen er netop støj og specifikke karakteristika ved støjen underlagt særlig opmærksomhed.

Derfor bliver vindmøllerne også designet, så støjen generelt reduceres bedst muligt og så toner i støjen specifikt undgås. Design med henblik på at undgå toner i støjen handler om at undgå sammenfald af resonanser i drivtoget bestående af generator, gear, hovedaksel, nav, vinger og de tilhørende koblinger mellem enhederne. Disse dele udgør kernen i en vindmøllekonstruktion. Sammenfald af resonanser i drivtoget er uhensigtsmæssig både af hensyn til toner i støjen men også af hensyn til lastpåvirkningen fra vindens kræfter på rotoren. De store kræfter vil i værste fald kunne forårsage havari, hvis der opstår sammenfald mellem resonanser i konstruktionen og kraftpåvirkningerne.

Ved nydesign af en vindmølle bygger man dels på erfaringerne fra tidligere konstruktioner og dels på modelleringer hvor man forsøger at designe uden om kritiske resonanser. Designværktøjerne udvikler sig hele tiden og gør det nu muligt at modellere vindmøllerne som integrerede enheder og ikke som en kobling mellem enkelte komponenter, hvor man ikke er sikker på hvordan overgangene opfører sig. Nedenfor er forsøgt beskrevet de væsentligste nyere værktøjer og principper, der anvendes - eller kan anvendes - i forbindelse med design, udvikling og afhjælpning. Der henvises til de væsentligste referencer fra litteratursøgningen.

7.1 Numeriske værktøjer i designfasen

7.1.1 Finite Element Opdatering ud fra eksperimentelle data

Strukturdynamiske beregninger med Finite Element Modellering (FEM) har været anvendt i industrien i et halvt hundrede år og skal ikke præsenteres i detaljer her. Metoden er baseret på numerisk, detaljeret beregning i en diskretiseret model af beregningsemnet. En detaljeret redegørelse ses f.eks. i Yang 1986; [1]. Metoden kan anvendes på særdeles komplekse geometrier og er bl.a. af denne grund et nøgle-værktøj i vindmølle-sammenhæng.

Imidlertid udgør FEM en "teoretisk" beregning på baggrund af bruger-angivne materiale- og geometrioplysninger etc. I praksis vil der oftest ses en afvigelse af de beregnede størrelser (f.eks. egenfrekvenser) i forhold til den fysiske strukturs faktiske egenskaber. Dette skyldes at modellen altid vil udgøre et vist niveau af idealisering, eksempelvis på følgende punkter:

- Linearisering af ikke-lineære mekanismer
- Upræcise materialedata (E-modul, poisson-forhold,...)
- Simplificeret geometri: F.eks. er "nabo-strukturers" indflydelse på den beregnede struktur ikke altid negligibel

Der har derfor, parallelt med udviklingen af FEM "altid" været interesse for dels sammenligning af beregnede og eksperimentelle resultater, dels korrigerende af FEM-modellen for at nærme sig de eksperimentelle resultater. Disse aktiviteter kaldes blandt andet hhv. Validering og Opdatering. Som følge af den stadigt stigende computer-kraft er opdatering af numeriske (typisk FEM)-modeller blevet en selvstændig forskningsdisciplin.

Der findes i dag flere dedikerede, kommercielle værktøjer og algoritmer til Opdatering, f.eks. FEMtools og VCUpdatE. I støjsammenhæng er opdateringen typisk baseret på modale parametre, primært egenfrekvenser og egensvingningsformer ("mode shapes"). Disse parametre kan bestemmes eksperimentelt ved en modaltest, og tilsvarende beregnes numerisk, hvorefter opdateringsalgoritmerne "fin-tuner" f.eks. udvalgte materiale- eller geometri-parametre indtil beregningen "ligner" måleresultatet.

Det er karakteristisk for opdateringsaktiviteten, at der er tale om en matematisk optimeringsproces, hvor udgangspunktet ofte er et begrænset antal måledata vs. et omfattende antal beregningsparametre. Optimeringen giver derfor typisk en ikke-unik løsning. Med andre ord: Der vil typisk være flere eller måske endda mange mulige inputdata til FE-modellen, der alle giver et "acceptabelt" resultat i forhold til måleresultaterne. Der indgår derfor et stort element af ingeniørmæssig vurdering ved udvælgelsen af den mest pålidelige. En artikel fra den tyske bilindustri Schedlinski 2004; [2] præsenterer disse problematikker ud fra en bil-sammenhæng.

For komplekse systemer som vindmøller vurderes, at på nuværende tidspunkt er FE-opdatering en disciplin i hastig udvikling. Det kan anvendes til højnelse af beregningsmodellernes kvalitet, men er et ekspert-værktøj, hvis brug kræver både tid og erfaring.

7.1.2 Multibody Dynamics

Idet FEM har været et almindeligt anvendt værktøj til numerisk beregning, eller simulering, af strukturers vibrationsegenskaber er svaghederne ved metoden også blevet kendte. Typisk har én model fokuseret på én eller ganske få komponenter ad gangen, f.eks. én vinge eller én vinge inklusive nav-montagen. Derfor er koblingen til andre værktøjer blevet mere almindeligt. Et eksempel på både FEM og analytiske modeller anvendt på en tårnstruktur kan ses i DiPaolo 2010; [2].

I de seneste år har computerens stadigt kraftigere regnekraft frembragt et værktøj, der er beslægtet med FEM: Multibody Dynamics. Dette simulerings-koncept tilstræber en samlet model af et helt sæt af koblede del-strukturer. Hensigten er at beregne (f.eks. vibrations-)egenskaberne af den koblede struktur, hvilket er mere realistisk end del-strukturernes individuelle egenskaber. Eksempelvis er der stor fokus på Multibody Dynamics-simulering af drivtoget (f.eks. generator-gear- hovedaksel-vinger). Se f.eks. IEA 2008; [6], der desuden præsenterer flere akademiske og kommercielle værktøjer. Motivationen for drivtogs-simulering er bla. knyttet til levetidsoptimering

samt "Virtual Prototyping". Men med en pålidelig drivtogs-model kan man desuden estimere bl.a. egenfrekvenser i de roterende dele og hermed designmæssigt undgå sammenfald mellem excitationfrekvenser og egenfrekvenser. Dette er støjmæssigt yderst relevant for at undgå toner. Eksempler på kommercielle systemer til denne type af modelleringer er: MSC-Adams, Simpack, Samtech med pakken Sam4WT, LMS og HAWC og HAWC2 fra Risø.

Svagheden er - som i alle modelleringsværktøjer - detaljeringen og den bagvedliggende viden i modelleringen og muligheden for koblingen fra vibrerende flader til luft.

Der foregår bl.a. en del arbejde indenfor Multibody Dynamics på Ålborg Universitet. Eksempel på dette er et eksamensarbejde [3] med de indledende modelleringer af toneudstråling fra tårne udført på Ålborg Universitet med professor S:V: Sorokin som vejleder og i samarbejde med Suzlon Wind Energy. Derudover kan henvises til Peeters 2005;[4] og Lee 2002;[5].

7.1.3 Vibroakustisk Modellering

I støjmæssig henseende er strukturdynamiske beregninger med Finite Element Modellering (FEM) kun "den halve sandhed". Med FEM opnås typisk beregningsresultater for:

- Strukturens egenfrekvenser, og for en given dynamisk kraftpåvirkning:
- Vibrationsmønsteret på strukturens overflader

For at beregne støjstrålingen mangler imidlertid den frekvensafhængige kobling mellem strukturen og luften, traditionelt udtrykt ved strålingsfaktoren.

I nyere tid er der fremkommet flere kommercielle beregningsværktøjer, der numerisk modellerer både strukturen, koblingen til den omgivende fluid, samt udbredelsen i fluiden. Ofte er der tale om traditionel FEM for strukturen, hvorfra vibrationsresultaterne føres videre i en Boundary Element Model (BEM) for fluiden. En sådan model er i princippet i stand til for en given dynamisk kraftpåvirkning (f.eks. fra tandindgreb) at beregne f.eks. lydtrykket i en fiktiv mikrofonposition væk fra møllen.

Denne form for værktøj har et stort potentiale, men rummer i sagens natur et antal udfordringer i støjmæssig henseende. Bølgelængder af støjmæssig interesse kræver en relativt høj detaljeringsgrad, hvilket giver relativt lange beregningstider – mere end et døgn er ikke usædvanligt. Man skal desuden være opmærksom på evt. "fejlophobning" fra "model-lag" til "model-lag": Inputdata til den grundlæggende FE-model vil i et eller andet omfang være idealiseret og give anledning til et vist mål af usikkerhed på FEM-resultaterne. Da disse videreføres i en ny (type) model (f.eks. BEM) med egne antagelser, er der en risiko for "forstærkning" af de oprindelige usikkerheder.

I vindmøllesammenhæng vurderes, at vibroakustisk modellering på nuværende tidspunkt primært er anvendeligt til relative sammenligninger af designs. Absolutte beregninger kræver en større indsats omkring præcise inputdata.

7.2 Svingningsdæmpning

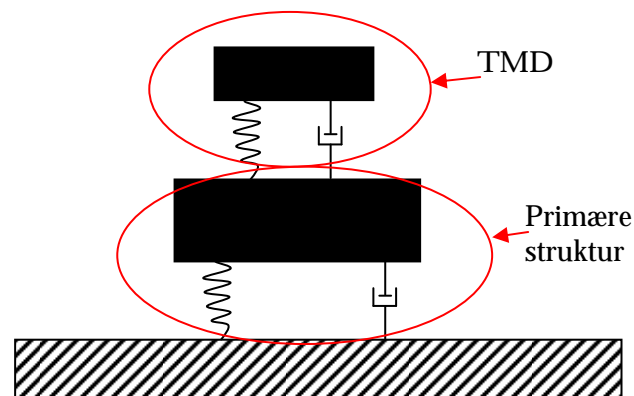
Lydustråling fra en overflade er proportional med fladens svingningshastighed. Hvis strukturen hørende til overfladen udsættes for en dynamisk kraft ved eller nær sine egenfrekvenser vil der optræde resonans, og

dermed et forstærket niveau af svingningshastighed på overfladen. Dette medfører et forhøjet tonestøjniveau. Hvor man tidligere forsøgte at begrænse overfladers og komponenters svingninger med øget masse og afstivning, er et mere effektivt værktøj til at dæmpe toner Tunede Masse Dæmpere (TMD), der kan optage vibrationerne. Ideen er ikke ny og er bl.a. beskrevet i Watkinson 1993 og 1994; [10] hvor der anvendes TMD-lignende "fliser" (engl.: "tiles") målrettet til påklæbning på mølletårnet. Der er her tale om en stålplade monteret på et polyurethan-materiale med høj tabsfaktor. Artiklen rapporterer en betydelig dæmpning af støjen udstrålet fra tårnet med et større antal påmonterede "fliser". Når metoden indgår her er det fordi det ikke er simpelt at designe og montere TMD'er korrekt. TMD'ere designs sjældent som en del af strukturen fra starten, men er ofte svaret på et problem der ikke blev forudset i modelleringerne.

7.2.1 TMD – Tuned Mass Dampers

En TMD eller vibration absorber er i princippet et sekundært, afstemt masse-fjeder-dæmper-system, der påsættes den primære struktur, f.eks. mølletårnet. Skematisk kan det samlede system opstilles som vist i Figur 5.

Den grundlæggende teori er velbeskrevet i talrige lærebøger, og en klassisk reference er f.eks. Den Hartog 1956;[9].



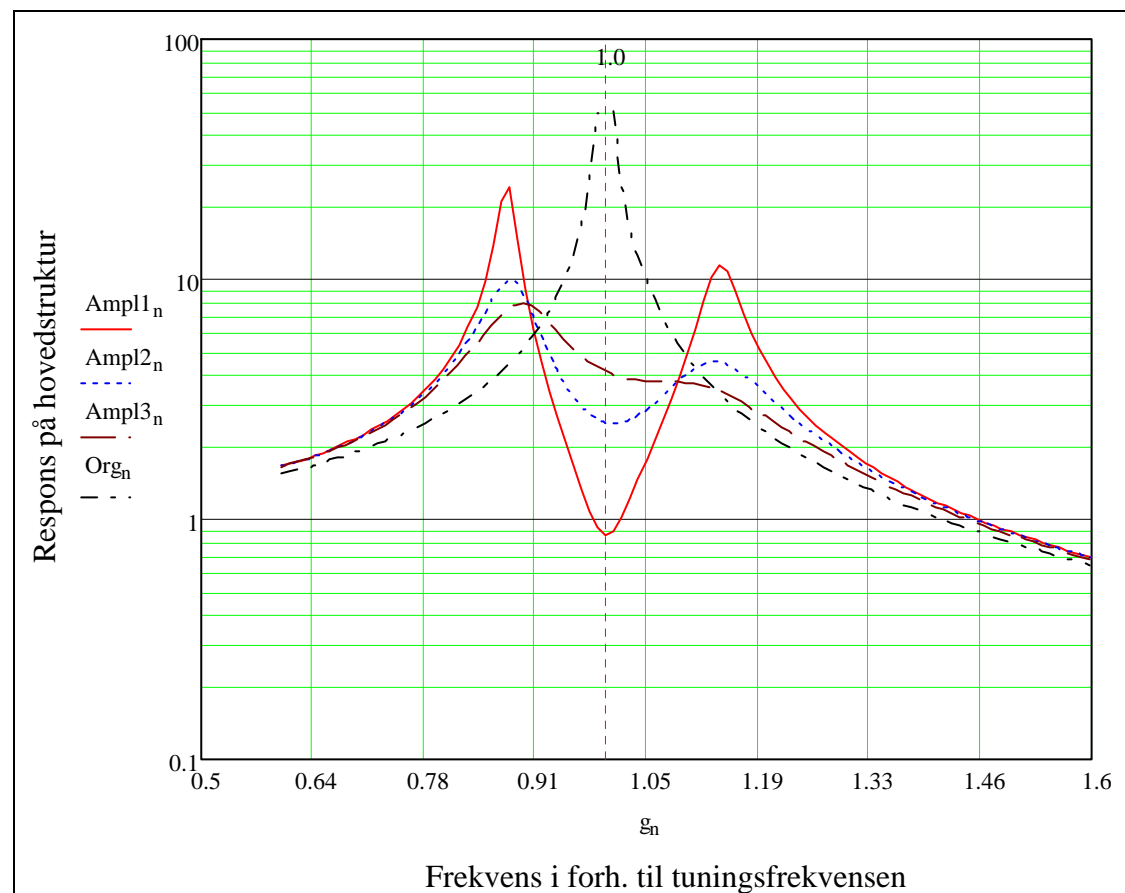
Figur 5. Dynamisk model af en struktur (f.eks. et mølletårn) med påsat TMD.

Grundlæggende fungerer en TMD ved, at dens masse/fjeder/dæmper-egenskaber afstemmes til en problematisk egenfrekvens i den primære struktur. Med andre ord opereres med en "tuningsfrekvens" for TMD-enheden, givet ved dens egne egenskaber. TMD'en "tunes" præcist til strukturens problemfrekvens. Når strukturen herefter udsættes for en dynamisk kraftpåvirkning/excitering ved problemfrekvensen, vil den primære struktur nu "stå stille", mens TMD'en bevæger sig i stedet. Hermed er vibrationsniveauet af den primære struktur kraftigt reduceret.

I Figur 6 viser den stiplede sorte kurve ("Org") et teoretisk beregnet vibrationsrespons for en sådan egenfrekvens, og det ses at der optræder en voldsom forstærkning (i størrelsesordenen faktor 100), når exciteringsfrekvensen falder sammen med egenfrekvensen (dvs. for $g=1$). Afhængigt af, hvordan TMD'ens parametre (masse, stivhed og dæmpningsforhold) er afstemt, eller "tunet" i forhold til den primære struktur, kan der opnås en markant reduktion af vibrationsresponsen og dermed lydudstrålingen ved problemfrekvensen.

Figur 6 illustrer desuden en vigtig konsekvens ved indføring af en TMD: Ved tuningsfrekvensen kan opnås en markant reduktion af responset, men der introduceres til gengæld to nye "forstærknings-zoner" i spektret, hhv. over og under tuningsfrekvensen. Beliggenheden og højden af disse er bestemt af TMD'ens designparametre i samspil med den primære strukturs parametre.

For moderne møller udgør det variable omdrejningstal, og dermed den variable exciteringsfrekvens, en særlig udfordring. Årsagen er de førnævnte nye "forstærknings-zoner", der uvægerligt vil falde sammen med exciteringsfrekvensen ved nogle omdrejningshastigheder, dvs. vindhastigheder. Som det fremgår af Figur 6 kan dette i nogen grad imødegås ved at vælge et passende dæmningsforhold af TMD'en, så de nye "forstærknings-zoner" holdes under et vist respons-niveau. Dette sker imidlertid på bekostning af en tilsvarende reduktion af responset ved tuningsfrekvensen ($g=1$ i Figur 6).



Figur 6. Eksempler på struktur-respons ved 3 forskellige TMD-løsninger: I Ampl1 har TMD'en dæmningsforholdet 3%, Ampl2 har dæmningsforholdet 9%, og Ampl3 har 15%. Kurven Org_n viser responset for den primære struktur uden påsat TMD.

Overordnet set er TMD ofte en effektiv løsning ved toneproblemer, der skyldes mekanisk/svingningsmæssig resonans i strukturen. Effektiviteten af en TMD-løsning er imidlertid meget følsom for valget af TMD-parametre, særligt "tuningsfrekvensen". Der ligger ligeledes en optimeringsopgave i placeringen af TMD'en, hvilket ofte kan undersøges ved hjælp af (eksperimentel eller beregningsmæssig) modalanalyse.

I praksis udføres TMD'ere ofte ud fra beregningsmæssige forudsætninger, hvorpå der ved installationen foretages "finjustering" af f.eks. TMD'ens masse og eller stivhed på baggrund af målinger.

I vindmøllesammenhæng er det ofte utilstrækkeligt med én TMD'enhed. Dette kan f.eks. skyldes komplicerede, eller ubestemte geometriske forhold, der gør det vanskeligt at fastlægge den optimale placering af TMD'en. I disse tilfælde benyttes ofte et sæt af TMD'ere, der er afstemt til opgaven. Igen gælder det effektiviteten af TMD-løsningen er betinget af den korrekte afstemning samt placering. Denne optimeringsopgave er ikke mindre kompliceret for et sæt af TMD'ere end for en enkelt. I begge tilfælde er det som regel nødvendigt med kombinerede numeriske beregninger (f.eks. Finite Element) og eksperimentelle modalanalyse- og/eller vibrationsmålinger.

Hvis TMD-enheden/enhederne placeres udvendigt på møllen skal man desuden være opmærksom på eventuel støjstråling fra den enkelte TMD. En til tider overset kilde til støjstråling fra TMD'enheder er resonans i TMD'ens fjedre.

7.2.2 Alternative TMD-koncepter

I det foregående afsnit er der taget udgangspunkt i et "klassisk" TMD-design, hvor TMD-enheden i princippet består af en masse, et fjederelement og et dæmper-element. I praksis kan dette principielle design udformes på flere måder, og leverandørerne har typisk egne erfaringer i hensigtsmæssige konstruktioner, der forhindrer TMD'en i f.eks. at "rokke" eller "vugge" i stedet for at udføre op/ned-bevægelser. Eksempler på leverandører er:

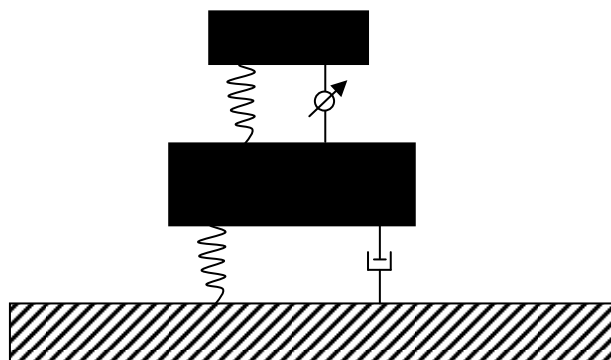
- ESM : http://esm-gmbh.de/eng/Products/Tuned_mass_dampers
- GERB: <http://www.gerb.com/en/arbeitsgebiete/arbeitsgebiete.php?ID=140&kategorie=15>
- Vibratec: http://www.vibratec.se/vibratec_v_2_0/products.html

Hvor den traditionelle TMD som nævnt er tunet til at virke ved én bestemt frekvens, har andre leverandører udviklet en xylofon-lignende TMD, hvor enheden består af et sæt af (dæmpede) indspændte bjælker, der således spænder over et vist frekvensområde. Dette produkt leveres af:

- Schrei & Veit: <http://sundv.gidt.info/rail.aspx>

Det er vor vurdering ud fra praktiske erfaringer at teorien bag xylofon-TMD'en ikke er fuldt beskrevet og at anvendelsen derfor endnu bør baseres på eksperimentelle undersøgelser.

Ved det tyske Fraunhofer Institut für Werkzeugmaschinen und Umformtechnik (Chemnitz/Dresden) forskes endvidere i adaptive, aktive TMD'ere Neugebauer 2010; [12]. Her er konceptet som illustreret i Figur 7.



Figur 7. Dynamisk model af en struktur med påsat aktiv TMD (efter [Neugebauer 2010]).

Idéen er her, at et par af vibrationstransducere på hhv. den primære struktur og TMD'enhed kontinuerligt registreres af et elektronisk system, der i real-tid korrigerer TMD'ens stivhed og dæmpningsforhold som tilpasning til exciteringsfrekvensen. Hermed opnås jfr. forfatteren Neugebauer 2010;[12] to ting:

- En tuningsfrekvens, der ikke længere er låst til én værdi, men indenfor et bredt spektrum løbende er optimeret til exciteringsfrekvensen
- En masse-mæssigt betydeligt lettere TMD-løsning end den klassiske udformning

7.3 Prototype-test

Det fremgår af de foregående afsnit, at mekanismerne for både generering, transmission og udstråling af tonestøj fra en vindmølle generelt er ganske komplicerede. I realiteten er det på nuværende tidspunkt kun i begrænset omfang muligt at foretage virkelighedstro "Virtual Prototyping" med henblik på præcis beregning af støjstråling med numeriske modeller. Som følge deraf må det anbefales i møllens udviklingsforløb at operere med hyppige støj- og vibrations-rettede prototypetests under kontrollerede laboratorieforhold, først af enkeltkomponenter, dernæst af samlede systemer af stigende kompleksitet.

Det er vor erfaring at støjmæssig fejlfinding og -retning på et samlet system er hurtigere og billigere, hvis de underliggende komponenter forinden er velbeskrevet ud fra særskilte tests.

7.4 Lydudstråling fra udvendige flader

Maskineriets bidrag til vindmøllens støjstråling er ofte toneholdigt Stiesdal 1993; [13] og Ødegaard & Danneskiold-Samsøe april 1995; [14]. I moderne vindmøller med lydabsorption i nacellen og højt reduktionstal af nacellévæggen er luftlydlyd-bidraget fra maskineriet sjældent betydende Ødegaard & Danneskiold-Samsøe april 1995; [14], forudsat eventuelle ventilationsåbninger er udført med passende lydsluger.

Maskinstøjen har derfor typisk karakter af toneholdig strukturlyd, hvilket vil sige, at vibrationerne fra f.eks. et gears tandindgreb eller en køleblæser forplanter sig til en stor udvendig flade, f.eks. tårnet eller vingerne, som herefter virker som en "højtaler". Grundige undersøgelser af tonestøj fra vindmøllegear findes i bl.a. Ødegaard & Danneskiold-Samsøe marts 1995 og april 1995; [14] og van der Linden 1995; [19]

I den tidlige artikel Skamris 1992; [20] præsenteres et tilfælde, hvor toner fra gearet blev udstrålet af rotoren. Forsøg på dæmpningstiltag ved at indskyde store spærremasser mellem nav og rotor, samt dæmpning af navet ved at øge massen med 1,3 tons sand viste sig uden effekt på tonestøjen. Løsningen blev først fundet ved at anvende en alternativ geartype med væsentligt lavere vibrations-kildestyrke. Denne pointe fra denne artikel illustrerer motivationen bag rapporterne fra Ødegaard & Danneskiold-Samsøe, nemlig væsentligheden af at reducere gearets vibrationskildestyrke mest muligt.

En vibrerende overflade (f.eks. en tårn- eller nacelle-væg) transmitterer lydbølger til den omgivende luft i et forhold, der er bestemt ud fra forholdet mellem hhv. strukturens og luftens impedanser (og dermed bølgeudbredelses-hastigheder). Dette beskrives typisk med en frekvensafhængig størrelse kaldet strålingsfaktoren SBI 1989; [21]. Groft sagt er strålingsfaktoren 1 (dvs. stor lydudstråling) ved frekvenser over den såkaldte koincidensfrekvens, og væsentligt lavere for frekvenser herunder. Koincidensfrekvensen er den frekvens, hvor bøjningsbølgéhastigheden i strukturen (som er proportional med strukturens bøjningsstivhed delt med fladevægten) er lig lydhastigheden i luften. Materialer med ringe lydudstrålingssegenskaber er derfor ofte karakteriseret ved at være "bløde" og "tunge". Denne form for betragtning kan anvendes ved for eksempel design af indkapslinger (nacelle, indkapsling af ringgenerator mm.) og kan naturligvis underbygges med detaljerede beregninger, se afsnittet om vibroakustisk modellering. En detaljeret gennemgang af lydudstråling fra vibrerende flader (herunder strålingsfaktor-beregning) findes i Fahy 1998; [22]. Det skal i øvrigt bemærkes jfr. denne litteraturkilde, at strålingsfaktoren af cylindre særligt for lave frekvenser afviger meget fra tilsvarende plane plader.

Et særligt tiltag til mindskning af fladers lydudstråling er såkaldt Constrained Layer Damping (CLD). Et referenceværk omkring denne teknik er Cremer 1988; [23], samt Crocker 1998; [24]. Metoden har til formål at tilføre betydelig strukturel dæmpning til pladen ved at påføre (i sin simpleste form) et viskoelastisk lag og på dette en "modplade" af metal. Ved optimeret dimensionering af lagtykkelser og materialeegenskaber vil pladevibrationer føres op i CLD-konstruktionen og omdannes til tab i form af varmeafgivelse i det viskoelastiske lag. Afhængigt desuden af den rumlige fordeling og placering af CLD-konstruktionen kan der opnås en effekt over et ganske bredt frekvensspektrum. Dæmpningseffekten optræder primært ved egenfrekvenser i pladestrukturen, og er dermed ofte relevant ved strukturlydtransmitteret tonestøj.

De ovennævnte litteratureksempler indeholder ganske detaljeret teori og formelapparater til beregning af CLD. Der er imidlertid efter vore erfaringer store begrænsninger i anvendelsen af sådanne beregninger på grund af et meget utilstrækkeligt materialedatagrundlag for kommercielle viskoelastiske materialer. Disse er i CLD-sammenhæng i høj grad temperaturafhængige. Acousticas erfaring er derfor, at CLD kan være et meget effektivt tiltag mod tonestøj, men at tilgangen ofte vil være meget eksperimentelt præget.

7.5 Anvendelse af aktiv kontrol teknikker

I vindmølle-design indgår en lang række overvejelser om at styre belastningen på hele konstruktionen, herunder drivtoget, samt optimere produktionen samtidig med at massen af de enkelte komponenter holdes så lav som muligt. Der er således allerede en del avanceret monitorering og styring i vindmøllerne og det må forventes at bliver endnu mere fremover efterhånden

som konstruktionerne optimeres. Som et modsvar til de komplicerede driftsforhold som denne styring medfører, kan anvendelse af aktiv kontrol/adaptiv teknik være et egnet værktøj.

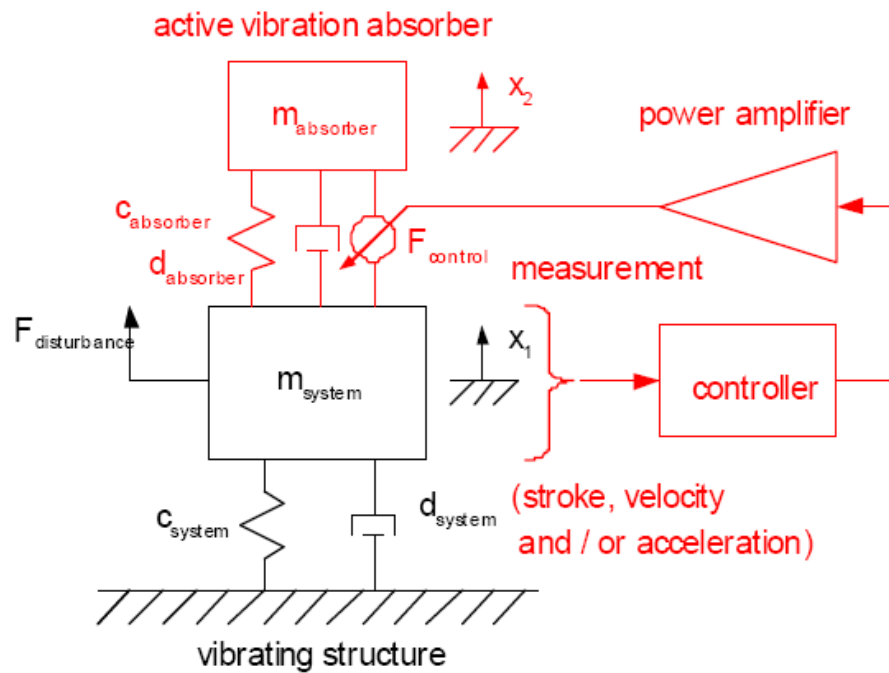
Aktiv kontrol er en efterhånden velbeskrevet teknik som har taget fart sammen med digital signalbehandling og udviklingen af elektroniske komponenter. Teknikken går populært sagt ud på at man via en sensor måler på et signal (støj, vibrationer, elektroniske signaler) og via en transducer introducerer en påvirkning af systemet, der modvirker det oprindelige signal så det samlede signal minimeres.

Teknikken har vist sig anvendelig i en række dagligdags produkter som hovedtelefoner, telefoner og i biler, hvor det er muligt at reducere omgivelsernes indflydelse på lyden og dermed forbedre lyd kvaliteten af musikken eller kommunikationen. I kanalsystemer som ventilationsanlæg med simple lydforhold er teknikken særligt velegnet til at dæmpe lyden fra blæserne. I visse bilmærker er der introduceret aktiv affjedring, som ændrer på stivheden af affjedringen i sving og øger sikkerheden under kørslen. Teknikken er særligt velegnet til at reducere diskrete komponenter som toner i lyd eller resonansfrekvenser i vibrationer. En introduktion til teknikken og dens anvendelser kan findes i C. Hansen & S. Snyder 1997; [25].

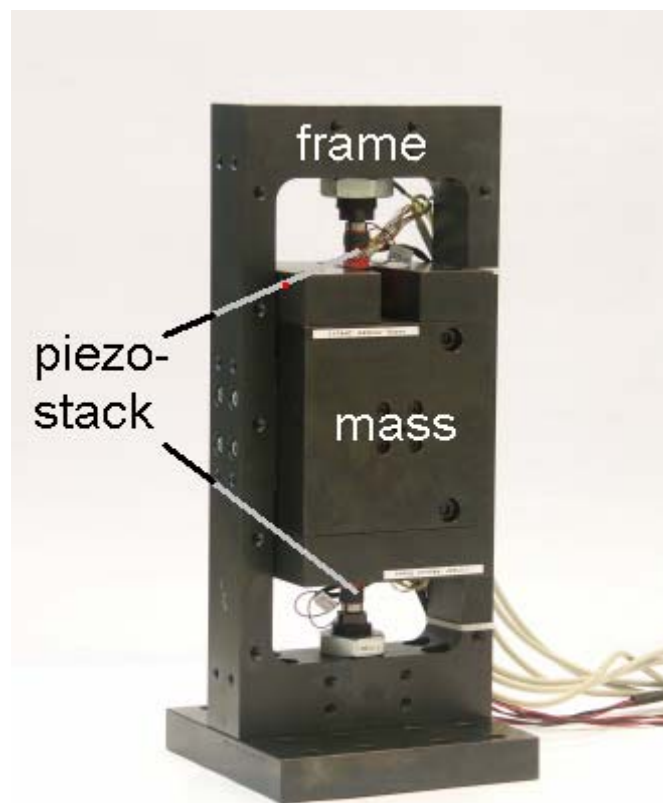
Kim 2001; [26] giver en gennemgang af hvordan et system til aktiv vibrations isolering, hvor de 4 understøtninger styres individuelt, kan opbygges samt problemerne relateret til denne type af styring. Det er testet på et meget lille system med begrænset masse. Der er ikke fundet eksempler på aktiv vibrationsisolering af så tunge emner som vindmølle gearkasser i forbindelse med litteratursøgningen, men den aktive del vil typisk være baseret på hydrauliske aktuatorer. Dette kan kombineres med at vindmøllens styresystem hele tiden vurderer på om omdrejningshastigheden skal gå op eller ned så det er muligt at holde det aktive system opdateret. Dermed fås et system, der hurtigere tilpasser sig situationen.

I 1999 publicerede Rebecchi 1999; [8] resultater af forsøg med at anvende aktiv vibrationskontrol til reduktion af vibrationer på en gearkasse. Der er tale om laboratorieforsøg under kontrollerede forhold, men med lovende resultater.

Ilgen 2007; [7] beskriver dels hvordan en svingningsdæmper, TMD, anvendt på bundrammen i en 1,5 MW vindmølle kan fjerne tonestøj ved ca. 160 Hz og dels hvordan en aktiv svingningsdæmper efter samme princip kan designes med udgangspunkt i en 2 MW vindmølle med variabelt omdrejningstal. Principdiagrammet er vist i Figur 8. Den aktive svingningsdæmper består dels af en sensor, der registrerer bevægelserne af systemet, en controller, der leverer input til svingningsdæmperen, en forstærker samt selve svingningsdæmperen. Svingningsdæmperen består af en masse ophængt eller opspændt mellem 2 sæt af piezo keramiske enheder som vist i Figur 9.



Figur 8 Principdiagram for en aktiv justerbar svingningsdæmper fra [7]



Figur 9 Aktiv svingningsdæmper fra [7]

Dæmpningen i systemet og dermed resonansfrekvensen af absorbereren varierer gennem de 2 sæt af piezokeramiske enheder. Disse enheder ændrer egenskaber når der påtrykkes en spænding og det er således muligt aktivt at tune svingningsdæmperen efter behov, når gearfrekvenserne ændres.

I det pågældende tilfælde bevæger gearfrekvensen sig i området 120 Hz til 144 Hz for vindmøllens operation fra cut-in til fuld produktion. Dette er et typisk variationsområde og det er muligt at designe en vibrations absorber, der kan dække hele området. Som ved en traditionel TMD er det nødvendigt at lave en grundig analyse af hvor den mest optimale placering vil være samt hvilke kræfter der er nødvendige.

I Neugebauer 2010; [12] beskrives en videreudvikling af den aktive svingningsdæmper samt resultater af laboratorietest på en 1 ton tung stålblok, vibrationsisoleret fra underlaget. Selvom det ikke var muligt at variere svingningsdæmperens virkning i hele det ønskede frekvensområdet fra 120 Hz til 145 Hz af på grund af controllerens stabilitet, kunne der konstateres god virkning i hele frekvensområdet. Ifølge Neugebauer vil en aktiv svingningsdæmper masse-mæssigt være en lettere løsning end en traditionel TMD.

Et tilsvarende problem er beskrevet i Daley 2004; [27] hvor vibrationer fra maskineri i ubåde ønskes vibrationsisoleret fra skroget for at undgå at tonale komponenter forplanter sig til omgivelserne. Også her er man nødt til at se på hele transmissionsvejen fra kilde til udstrålende flade. Her er valgt en lidt anderledes indgang til situationen idet man forsøger at sikre at den samlede kraftpåvirkning af skroget får karakter af en højere orden multipol, hvorved strålingsfaktoren begrænses. Maskineri vibrationsisoleres med en adaptivt styret elektromagnet parallelt med et traditionelt dæmpersystem. Derudover anvendes også et aktivt svingningsdæmpersystem for at håndtere effekten af andet udstyr samt signaler, der transmitteres via sekundære transmissionsveje.

Udover muligheden for aktiv vibrationsisolering og aktiv svingningsdæmpning vil det være muligt at anvende teknikken til at forbedre lyddæmperne i nacelleinddækningens åbninger. Teknikken er velkendt fra ventilationssystemer og det drejer sig om at designe udformingen af lyddæmperen så teknikken vil være mest effektiv. Det kan bl.a. dreje sig om underopdeling af lyddæmperen i mindre kanaler så forholdet mellem længde, bredde og frekvensområde optimeres.

8 Opsummering

Der anvendes i udstrakt avancerede matematiske modeller i designfasen af vindmøller. Det har der efterhånden været gjort i mange år og modellerne bliver mere og mere detaljerede. Det primære formål med disse modelleringer har været i forbindelse med lastberegninger, men også til dette formål er det hensigtsmæssigt at undgå sammenfald af resonanser. I de mest almindelige FEM modeller er modellerne opbygget af individuelle komponenter og grænsefladerne modelleres særskilt på baggrund af erfaringer.

Når det gælder tonestøj er det mest lovende værktøj Multibody Dynamics, hvor de dynamiske egenskaber af større samlede enheder som drivtoget fra generator til vinge eller til tårn modelleres samlet. Dette gør det enklere at undgå gennemgående resonanser for det samlede system og dermed begrænse tonernes muligheder for at vandre fra kilde til udstrålende flade. Kombineret med grundige testforløb vurderes det, at denne type af værktøjer vil kunne forbedre designfasen så behovet for større modifikationer på prototyperne kan begrænses.

Målet med vibroakustiske modelleringsværktøjer er på sigt at repræsentere både den vibrerende struktur og den endelige lydudstråling i luften i samme model. Dette har potentiale til at blive et vigtigt værktøj i designfasen, analogt med Multibody Dynamics.

Både Multibody Dynamics og vibroakustiske modelleringsteknikker udvikles løbende i samspillet mellem brugerne, universiteter og de kommercielle udbydere af systemerne.

Når det drejer sig om afhjælpning af problemer i de færdige konstruktioner er anvendelsen af aktiv kontrol/adaptiv teknik et oplagt bud på løsning.

Teknikken er i princippet veludviklet og meget fleksibel, idet der er udviklet robuste signalbehandlingsalgoritmer til en række forskellige anvendelser, der bl.a. håndterer de problemer der opstår ved feed-back systemer. Flexibiliteten og de mange anvendelsesmuligheder betyder at der ofte designes specifikke løsninger i højere grad end generelle løsninger. Dette betyder at der til anvendelse på problemstillingerne for vindmøller også skal designes nye specifikke løsninger. Det vurderes at teknikken kan anvendes både til vibrationsisolering, svingningsdæmpning med TMD-princippet, og også til forbedring af lyddæmpere.

Der er behov for at udvikle de specielle komponenter, der vil kunne anvendes i vindmøller med de store masser, der skal håndteres og de pladskrav der gælder i en nacelle. I vindmøller er der i forvejen et avanceret kontrol/styringssystem, som hele tiden holder styr på om omdrejningstallet skal gå op eller ned. Dermed kan de aktive systemer muligvis kontrolleres som feed-forward systemer, idet man kender konsekvenserne inden de opstår, og dermed opnås langt mere stabile løsninger.

Det vurderes at de meste oplagte emner til yderligere undersøgelser og udvikling er TMD'er samt aktive systemer i forskellige afskygninger. Der er

viden tilgængelig om signalbehandling på forskningsenhederne i Danmark og naturligvis i udlandet samt en del viden om de tilknyttede fysiske systemer i vindmøllebranchen og rådgiverne som arbejder for branchen. Det vil være nyttigt at bringe de 3 grupper sammen i en udvikling af teknikken. Det vil give dansk vindmølleindustri mulighed for et konkurrencemæssigt forspring samtidig med at der kan opstå nye udviklingsaktiviteter i Danmark og styrke Danmarks position som udviklingscenter for vindmølleteknologi.

9 Referencer

- [1] Finite Element Structural Analysis , T.Y Yang, Prentice-Hall, Inc, Englewood, NJ, 1986
- [2] C. Schedlinski et al “Test-Based Computational Model Updating of a Car Body in White” Sound and Vibration, September 2005
- [3] F. Di Paolo “Reduction of tonality in a wind turbine noise” Aalborg Universitet 2010.
- [4] J. L. M. Peeters, D. Vandepitte and P. Sas “Analysis of Internal Drive Train Dynamics in a Wind Turbine” Wind Energy (January 2006), 9 (1-2), pg. 141-161
- [5] D. Lee, D. H. Hodges and M. J. Patil “Multi-flexible-body Dynamic Analysis” of Horizontal Axis Wind Turbines” Wind Energy. 2002; 5:281–300 (DOI: 10.1002/we.66)
- [6] Proceedings from 57th IEA Topical Expert Meeting “Wind turbine drive train dynamics and reliability” Jyväskylä, Finland, September 2008 Editor: Sven-Erik Thor
- [7] A. Ilgen “Passive and Active Dynamic Vibration Absorbers in Gearbox Noise Reduction in Wind Turbines” Second International Meeting on Wind Turbine Noise. Proceedings 2007
- [8] B. Rebbechi, C. Howard, C. Hansen “Active control of gearbox vibration” Active 99, Proceedings 1999.
- [9] ”Mechanical Vibrations”, J.P. Den Hartog, Dover Publications, New York 1956, 4. edition.
- [10] P.S. Watkinson “Machinery Investigations and reduction on wind turbine generators” Wind energy conversion 1993. Proceedings
- [11] P.S. Watkinson “The reduction of tonal noise radiated from tubular wind turbine generators” Wind energy conversion 1994. Proceedings
- [12] R. Neugebauer, M. Linke, H. Kunze, M. Ullrich ” Active absorber for damping audio-frequency noise emissions at wind power plants. Active vibration damping; Aktiver Tilger zur Unterdrueckung tonaler Schallemissionen an Windenergieanlagen” Verein Deutscher Ingenieure VDI, Duesseldorf (Germany). Schwingungstechnik, Tagung: Schwingungen von Windenergieanlagen, Hannover (Germany), 3-4 Feb 2010
- [13] H. Stiesdal, E. Kristensen ”Noise control on the 300 kW BONUS wind turbine” Wind energy conversion 1993. Proceedings
- [14] Ødegaard & Danneskiold-Samsøe, Rapport ”Gearstøj fra vindmøller – strukturlydkilde for gear” april 1995
- [15] Ødegaard & Danneskiold-Samsøe, Rapport ”Vibration analysis of gearbox for NTK 500/37 wind turbine” marts 1995
- [16] D. Bies “Engineering Noise Control” 2nd edition 1996 E&FN Spon, London.
- [17] M. Heckl “Taschenbuch der Technischen Akustik 2. edition 1995 Springer Berlin.
- [18] DNV/Risø ”Guidelines for Design of Wind Turbines. Second edition 2002.

- [19] P.J.G van der Linden "Geräuschreduzierung an einem CVT-getriebe durch einsetz von experimentellen Techniken, VDI Berichte NR 1220 1995
- [20] C. Skamris Structural noise at Kyndby windfarm European Wind Energy Association (EWEA) 1992
- [21] SBI-anvisning 166 Bygningsakustisk Teori og Praksis 1989.
- [22] F. Fahy "Sound and Structural Vibration - Radiation, Transmission and Response" 1. udgave 1987 Academic Press
- [23] L. Cremer, M. Heckl, E. Ungar "Structure-borne sound" 2nd ed. 1988, Springer, New York
- [24] M. Crocker "Handbook of Acoustics", 1998, Wiley
- [25] C. Hansen, S. Snyder "Active Control of Noise and Vibration" E & FN Spon 1997
- [26] S. Kim, S.J. Elliot, M. J. Brennan "Decentralized Control for Multichannel Active Vibration Isolation" IEEE Transactions on control systems technology Vol 9, No 1, January 2001
- [27] S. Daley F.A. Johnson, J.B. Pearson, R. Dixon "Active vibration control for marine applications" Control Engineering Practice 12 (2004) 465-474.

Appendix: Brev til fabrikanter m.fl.



Grontmij | Carl Bro A/S
Dusager 12
8200 Århus N
Danmark
T +45 8210 5100
F
www.grontmij-carlbro.dk
CVR-nr. 48233511

NN

27. januar 2011
Projekt: 35.6355.01

MST-projekt tonestøj Tonestøj i nye vindmøller

Miljøstyrelsen har bedt Acoustica Grontmij Carl Bro om at foretage en undersøgelse af de tekniske muligheder for at undgå tonestøj fra vindmøller i fremtiden. Ønsket er naturligvis, at tonestøj i nye vindmøller kan undgås fuldstændigt, eller i hvert fald nedbringes til et niveau, hvor de ikke øger genen af støjen. Udfordringerne ligger i, at allerede de eksisterende nye vindmøller opererer med principper og under omstændigheder, der gør det vanskeligt at undgå tonestøj og specielt lavfrekvent tonestøj.

Der fokuseres specielt på de problemstillinger, der er relevante for de nyere konstruktioner af vindmøller med variabelt omløbstal, gearløse konstruktioner, frekvensomformere, vertikal akse m.m. Det er nyt at skulle håndtere, at et stort antal egensvingninger (resonanser) i konstruktionen kan eksiteres og dermed kan give anledning til tonestøj. I de første versioner vil denne type af problemer ofte blive løst med traditionelle virkemidler, som ekstra masse, afstivning, indkapsling o. lign. Men da disse typer af løsninger ofte tilfører mere masse eller optager uhensigtsmæssig plads vil det på langt sigt være nødvendigt med nye mere dedikerede løsninger eller nye design. Det er netop muligheden for sådanne nye tiltag undersøgelsen har til formål at afklare og beskrive. Hensigten er at forbedre muligheden for at designe nye vindmøller med minimalt indhold af toner i støjen.

Undersøgelsen er tænkt baseret på en gennemgang af artikler og indlæg i tidsskrifter og fra konferencer, der fokuserer på denne type af problemstillinger i andre sammenhænge. Viden og teknikker, der kan overføres og bruges i vindmølle konstruktioner vil blive indsamlet og præsenteret i rapporteringen..

Typiske kilder til tonestøj er gear og generator, hjælpeudstyr i form af kølesystemer og hydrauliksystemer samt effektelektronik, hvor de elektromagnetiske felter kan være den direkte årsag til generering af vibrationer og toner.

For at resultatet af dette arbejde kan blive så anvendeligt som muligt, har vi brug for input fra dem, der arbejder med problematikken og dermed har første hånds kendskab til vanskeligheder og muligheder.

Vi vil derfor gerne spørge om I kunne tænke jer at bidrage til undersøgelsen ved at lade jer interviewe. Interviewets hovedpunkter vil være:

- Hvilke problemstillinger har I mødt med toner over de seneste år?
- Har det kunnet håndteres med traditionelle virkemidler?

- Er der anvendt mere avancerede teknikker til at løse problemerne? Hvilke?
- Hvor opsøger I viden til at løse problemerne både med hensyn til traditionelle teknikker og mere avancerede løsninger?

Det er klart, at der kan være emner I ikke ønsker at komme ind på af konkurrencemæssige årsager. Det vil dog være af stor værdi, hvis I kan hjælpe med input om hvor I søger viden og informationer.

Såfremt I ikke har lyst til at bidrage til undersøgelsen må I gerne begrunde hvorfor.

Med venlig hilsen
Grontmij | Carl Bro A/S

Bo Søndergaard