



**FLYGTEKNISKA  
FÖRSÖKSANSTALTEN**

The Aeronautical Research  
Institute of Sweden

**STUDIER AV VINDBRUSSETS MASKERING  
AV BULLER FRÅN VINDKRAFTVERK**

Temporal integration vid detektion av närvaro  
respektive frånvaro av periodisk amplitudmodulering

av

S Arlinger, B Larsby, H-Å Gustafsson och B Leander

## STUDIER AV VINDBRUSETS MASKERING AV BULLER FRÅN VINDKRAFTVERK

### Temporal integration vid detektion av närvaro respektive frånvaro av periodisk amplitudmodulering

av

Stig Arlinger, Birgitta Larsby, Hans-Åke Gustafsson,  
och Björn Leander \*)

### SAMMANFATTNING

Experiment 1 har visat att

- detektionströskeln för amplitudmodulation har ett minimum vid ca 1 Hz modulationsfrekvens,
- detektionströskeln för amplitudmodulation påverkas av modulationsfrekvens i kombination antal perioder av modulation alternativt det modulerade avsnittets varaktighet,
- buller från vindkraftverk kan förväntas behöva höras över vindbruset i avsnitt av ca. 1.5-4 s längd för att uppfattas.

Experiment 2 har visat att

- Ju högre grad av oregelbunden modulation desto kortare tid behövs för att detektera frånvaro av modulation,
- om amplitudmodulationen i simulerat vindbrus uppgår till  $\pm$  4-5 dB eller mer krävs att vindbruset är svagare än vindkraftverksbullret under minst 2 sekunder långa avsnitt för att dessa ska kunna uppfattas.

\*) Universitetet i Linköping, teknisk audiologi

---

Beställare: Flygtekniska försöksanstalten, (FFA)  
Stockholm

## INNEHÅLLSFÖRTECKNING

		Sid
1	INLEDNING	3
2	MÅLSÄTTNING	4
3	METODER	4
4	RESULTAT	8
5	DISKUSSION	10
6	REFERENSER	12

## 1 INLEDNING

En förutsättning för att man överhuvudtaget skall störas av bullret från ett vindkraftverk är att man hör det. Vad är det då som gör att vindkraftsbullret hörs över det naturliga vindbruset? Bullret från ett vindkraftverk innehåller en periodisk, lågfrekvent styrkevariation, en amplitudmodulation. Det naturliga vindbruset innehåller också långsamma styrkevariationer men utan något periodiskt mönster. Det är när de periodiska styrkevariationerna från vindkraftverket inte maskeras av vindbruset som vindkraftsbullret kan höras och därmed är potentiellt störande. Risken att vindkraftsbullret är hörbart bestäms således av dess ljudnivå i förhållande till det maskerande vindbrusets ljudnivå. Men eftersom vindbruset i realiteten inte är konstant utan varierar i nivå på ett oregelbundet sätt kan också tidsmönstret förväntas ha betydelse: Ju längre avsnitt av vindkraftsbullret som dyker upp ur vindbrusets maskerande bakgrund desto större torde risken vara att de uppfattas och kan störa.

I en tidigare undersökning (Arlinger & Gustafsson, 1988) har vi studerat detektion av periodiskt amplitudmodulerat brus i en bakgrund av stationärt brus. Vi varierade då ljudnivån hos det periodiskt amplitudmodulerade bruset i en bakgrund av brus med konstant styrka och fann att genomsnittslyssnaren upptäckte det amplitudmodulerade brusets närvaro när dess maximalnivåer under modulationscykeln låg 1-2 dB under det stationära brusets ljudnivå. I den undersökningen var såväl det modulerade bruset som bruset med konstant styrka av mycket lång varaktighet. I verkligheten är ju som nämnts ovan det maskerande vindbruset inte konstant utan varierar i styrka på ett oregelbundet sätt. När vindbrusnivån är hög maskeras vindkraftverkets buller helt. Men nu och då uppstår tystare fönster i vindbruset som möjliggör att det rytmiskt varierande bruset från vindkraftverket kan uppfattas. Det finns skäl att tro, att om bara ett fåtal perioder av det modulerade bruset är hörbara p.g.a. det tystare fönstrets begränsade varaktighet, krävs större styrkevariationer för att man ska hinna med att uppfatta dem, en form av temporal integration. Storleken av den minsta detekterbara styrkevariationen beror sannolikt på hur lång tid eller hur många perioder som modulationen pågår (inte är maskerad) och på modulationsfrekvensen. Minsta hörbara amplitudmodulation som funktion av dessa parametrar har därför undersökts i det nu aktuella projektet.

På långt avstånd från vindkraftverket är de periodiska styrkevariationerna i bullret mycket små och därför ej hörbara. Här kan man tänka sig en motsatt hypotes för hur man upptäcker vindkraftsbuller: I vindbrusets tystare intervall blir bruset från vindkraftverket hörbart och kan identifieras genom frånvaron av amplitudmodulationer. Den konkreta frågeställningen är här: hur långt tidsfönster utan amplitudmodulation behövs för att lyssnaren ska kunna uppfatta frånvaron av amplitudmodulation hos ett annars oregelbundet amplitudmodulerat brusljud? Denna fråga har undersökts i föreliggande projekts andra del.

## 2 MÅLSÄTTNING

Projektets målsättning var följande:

**Experiment 1:** Att bestämma lyssnarens förmåga att detektera närvaro av amplitudmodulation i brusljud i form av minsta detekterbara grad av sinusformig amplitudmodulation som funktion av modulationsfrekvens (0,5-5Hz) och antal modulationsperioder (1-10 perioder).

**Experiment 2:** Att bestämma lyssnarens förmåga att detektera frånvaro av amplitudmodulation i brusljud i form varaktigheten hos kortast detekterbara omodulerade brusavsnitt som funktion av modulationsgrad.

## 3 METODER

**Försökspersoner:** Sexton försökspersoner i åldern 17 - 40 år deltog i undersökningen.

Medelåldern var 27 år med en standardavvikelse på  $\pm 8$  år. Tio personer var män och sex kvinnor. Samtliga försökspersoner hade normala (bättre än eller lika med 20 dB HL) hörrösklar i frekvensområdet från 125 Hz till 4 kHz.

**Testsignal:** Som testsignal användes ett bredbandigt brus som lågpasfilterats vid gränshänsfrekvensen 1 kHz med lutningen 6 dB/oktav. Frekvenser över 6 kHz dämpades av ett hårdvarufilter med lutningen 18 dB/oktav. Detta spektrum överensstämmer ungefär med långtidsspektrum hos vindgenererat brus men också för mänskligt tal.

**Mätutrustning:** Maskeringsbruset genererades i en utrustning som innehåller en signalprocessor från Texas Instrument, en TMS 32010. Denna utrustning, som också innehåller AD/DA-omvandlare samt dämpsatser, styrs från en dator (Luxor ABC806). Modulationen utförs i

signalprocessorn. Brussignalen från processorn kopplades till en klinisk audiometer (Madsen OB822). Utgången från audiometern var kopplad till hörtelefoner av typ Telephonics TDH 39 (Fig.1).

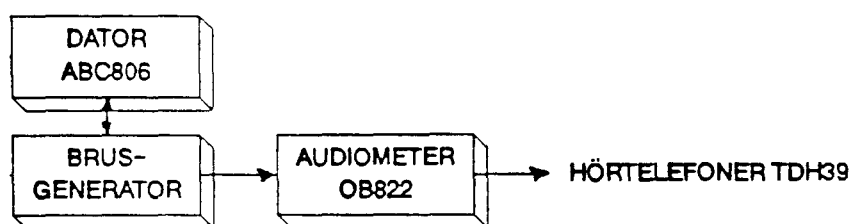


Fig. 1. Blockdiagram av försöksutrustningen

**Testprocedur generellt:** Försökspersonen placerades i ett ljudisolerat mättrum och försågs med hörtelefoner. Testsignalen presenterades monoauralt. Först bestämdes lyssnarens hörtröskel för det omodulerade bruset. I de efterföljande undersökningarna presenterades bruset på nivån 40 dB SL dvs 40 dB över denna hörtröskelnivå.

**Procedur vid experiment 1:** Försökspersonen lyssnade till testbruset som presenterades kontinuerligt och utan modulation. Vid en viss tidpunkt  $t_0$  amplitudmodulerades bruset under ett tidsfönster som motsvarade ett visst antal hela perioder av modulationen och med början och slut i en nollgenomgång för den modulerande signalen (fig.2). Modulationen var sinusformad och logaritmisk. Brusnivån varierade således sinusformigt upp och ner ett visst antal dB relativt den omodulerade nivån  $P_0$ . Det amplitudmodulerade fönstret upprepades med oregelbundna intervall av storleksordningen några sekunder. Lyssnarens uppgift var att signalera genom tryckning på en strömbrytare när han ansåg sig ha uppfattat ett brusavsnitt med amplitudmodulation.

Fyra modulationsfrekvenser testades: 0.5, 1, 2 och 5 Hz. För varje frekvens presenterades 1, 2, 5 eller 10 perioder av modulation med undantag för de kombinationer av frekvens och antal perioder som gav en stimulerings-tid längre än 5 sekunder. Denna begränsning infördes p.g.a.

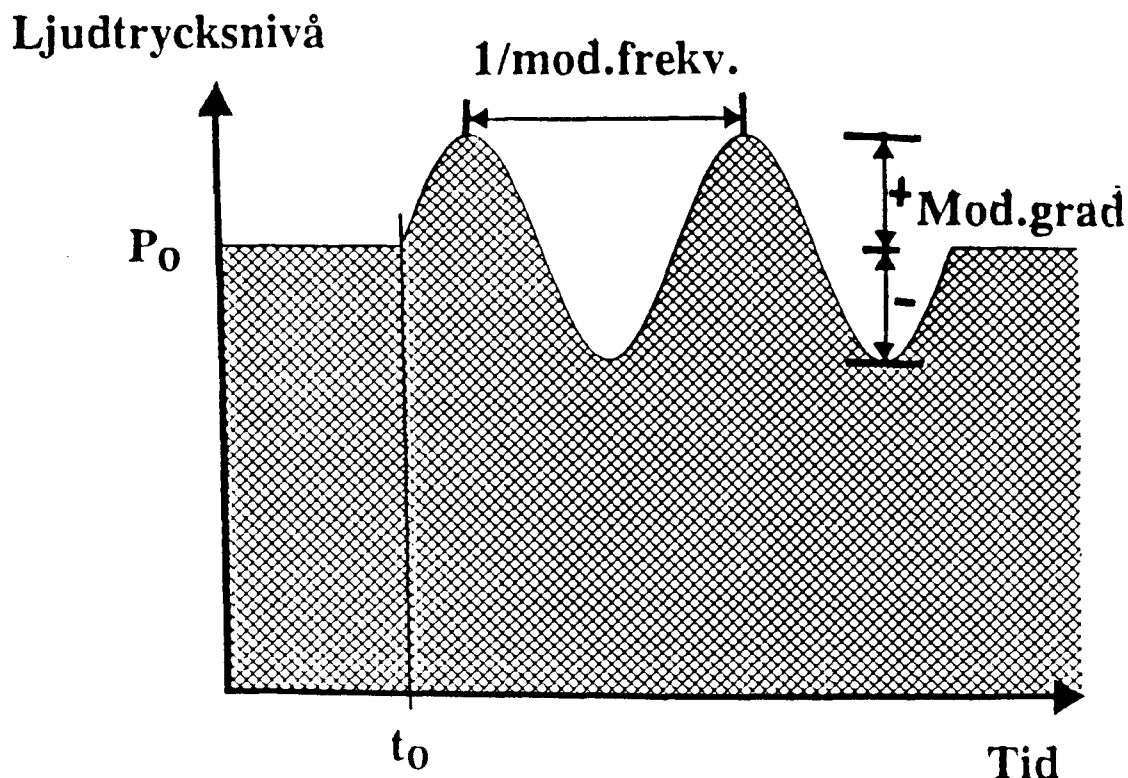


Fig. 2. Principskiss av försöksparametrar i experiment 1.

stor osäkerhet vid bestämning av modulationsdetektionströskel för signal av lång varaktighet. Detta medför att 13 kombinationer av frekvens och periodantal testades.

För att eliminera eventuella ordningseffekter slumpades ordningen för presentationen av de 13 försöksvarianterna. Hörtröskeln för modulation bestämdes genom följande procedur: För var och en av de 13 kombinationerna presenterades först ett avsnitt med klart och tydligt hörbar modulation ( $\pm 12$  dB). Därefter sänktes modulationsgraden först i stora steg ( $+3$  dB) sedan i mindre tills lyssnaren ej längre uppfattade modulationen d.v.s. tills tröskeln passerats. Därpå ökades modulationsgraden i  $\pm 0.3$  dB steg. Vid svar minskades modulationen med  $\pm 0.6$  dB så att man åter hamnade under tröskeln, varefter modulationen åter ökades i  $\pm 0.3$  dB steg tills svar erhöles osv. Den modulationsgrad där man först fick tre korrekta svar definierades som detektionströskel.

**Procedur vid experiment 2:** Den oregelbundna amplitudmodulationen åstadkoms genom summation av tre sinusformiga signaler av lika amplitud och frekvenserna 0.1, 0.3 och 0.5 Hz i slumpmässigt fasförhållande. Detta ger styrkevariationerna ungefär samma karaktär som vindbrus. Det oregelbundet modulerade bruset avbröts med varierende intervall av ett tidsfönster som saknade amplitudmodulation (fig.3). Durationen av det omodulerade bruset som erfordras för att lyssnaren ska uppfatta frånvaron av modulation bestämdes för viss given modulationsgrad. Fyra modulationsgrader,  $\pm 2$ ,  $\pm 3$ ,  $\pm 5$  och  $\pm 10$  dB, undersöktes för varje

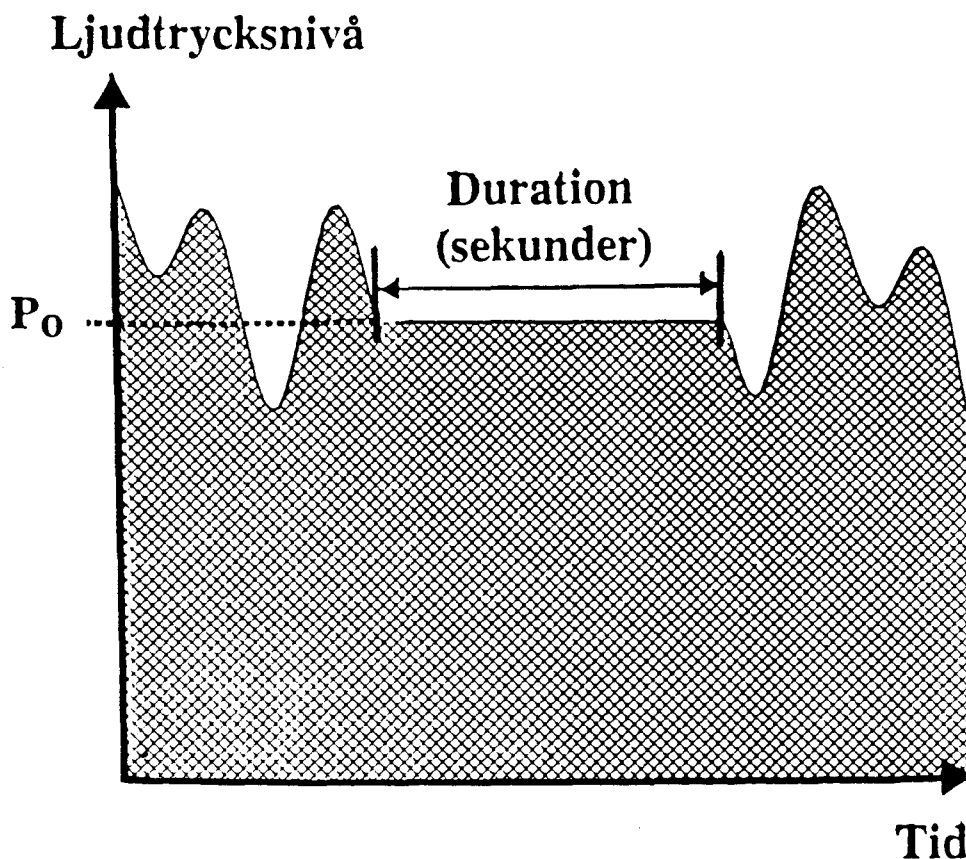


Fig.3. Principskiss av försöksparametrar i experiment 2.

försöksperson. Försökspersonen instruerades att trycka på en knapp då han/hon upptäckte ett avsnitt av bruset som saknade modulation.

Det omodulerade avsnittets längd kunde anta följande värden: 5, 4, 3, 2, 1.5, 1 och 0.5 sekunder. För varje modulationsgrad presenterades först ett 5 sekunder långt omodulerat intervall. Om lyssnaren svarade minskades fönstrets längd två steg till 3 sekunder. Vid svar där minskades ytterligare två steg till 1,5 sekunder. När svar ej erhöles ökades längden av det omodulerade fönstret ett steg. Denna procedur upprepades så att man vid svar minskade fönsterdurationen två steg och vid avsaknad av svar ökade ett steg. Detektionströskeln för frånvaro av modulation definierades som den duration vid vilken man först erhöil tre korrekta svar. För att minimera ordnings- och inlärningseffekter utbalanserades försöksordningen för de fyra modulationsgraderna.

**Statistisk bearbetning:** Medelvärden och standardavvikelser för de 16 försökspersonerna beräknades för de olika delexperimenten. I experiment 1 utfördes en variansanalys där modulationsgraden var beroende variabel och modulationsfrekvens och antal perioder av modulation var oberoende faktorer. I experiment 2 användes Student's t-test för att verifiera skillnader i duration mellan de olika modulationsgraderna. Signifikansnivåer under 5 % betraktades som statistiskt säkerställda.

## 4 RESULTAT

**Experiment 1:** Resultatet från mätningarna sammanfattas i tabell 1 och fig. 4 och 5. En jämförelse av fig. 4 och 5 visar att varken antalet modulationsperioder eller längden av det modulerade avsnittet ensamt är tillräckligt underlag för att förutsäga detektionströskeln.

Antal perioder	Frekvens			
	0.5 Hz	1 Hz	2 Hz	5 Hz
1	m = 1.20 sd = 0.39	m = 1.12 sd = 0.43	m = 1.22 sd = 0.32	m = 1.46 sd = 0.22
2	m = 0.99 sd = 0.28	m = 0.86 sd = 0.24	m = 0.86 sd = 0.22	m = 0.94 sd = 0.24
5	mätning ej utförd	m = 0.62 sd = 0.17	m = 0.69 sd = 0.14	m = 0.73 sd = 0.15
10	mätning ej utförd	mätning ej utförd	m = 0.53 sd = 0.13	m = 0.62 sd = 0.17

Tabell 1. Modulationsgradens storlek då den nätt och jämnt är hörbar för de olika kombinationer av modulationsfrekvens och periodantal som testats. m = medelvärde, sd = standarddeviation.

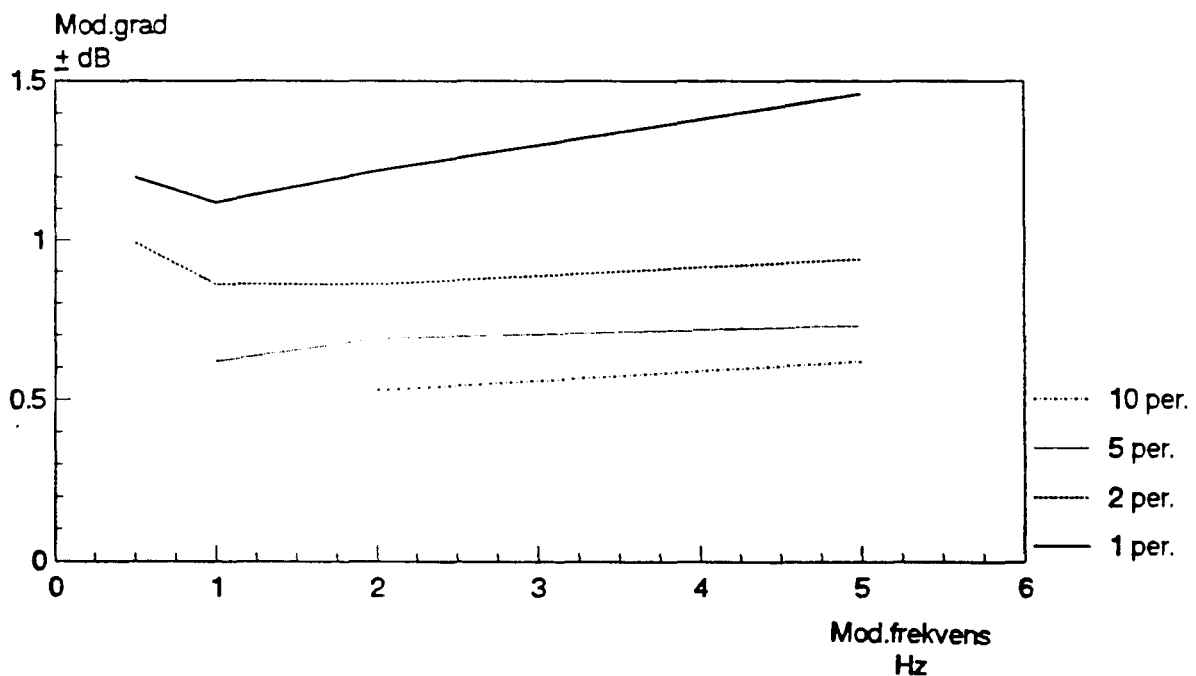


Fig. 4. Medelvärdet av modulationens storlek vid detektionströskeln som funktion av modulationsfrekvens med antal perioder av modulation som parameter.

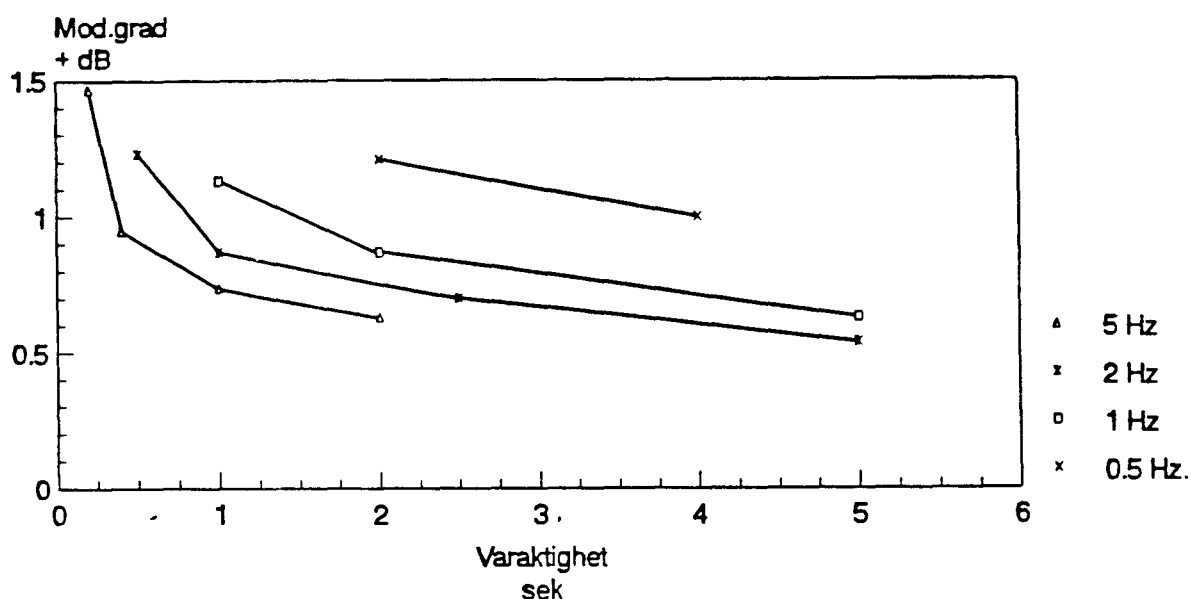


Fig 5. Medelvärde av modulationens storlek vid detektionströskeln som funktion av det modulerade avsnittets varaktighet med modulationsfrekvens som parameter.

Variationsanalysen visade en statistiskt säkerställd generell effekt av antal perioder så att ett ökat antal perioder av modulation ger en sänkning av detektionströskeln för amplitudmodulation. En generell, statistiskt säkerställd effekt av modulationsfrekvens på tröskeln för detektion kan också konstateras. Detektionströskeln antar ett minimum vid 1 Hz och ökar vid lägre (0.5 Hz) och högre (2 och 5 Hz) frekvenser.

Bland de undersökta kombinationerna av modulationsfrekvens och antal perioder av modulation varierar tröskeln för detektion från  $\pm 0.53$  dB för 2 Hz och 10 perioder (5 sekunders varaktighet) till  $\pm 1.46$  dB för 5 Hz och 1 period (0,2 sekunders varaktighet).

**Experiment 2:** Resultatet från mätningarna sammanfattas i fig. 6. Vid den lägsta modulationsgraden,  $\pm 2$  dB krävs ett omodulerat avsnitt på i genomsnitt 3.4 sekunder för att detta nätt och jämnt skall uppfattas. Vid denna grad av modulation var det dock 6 av de 16 försökspersonerna som ej kunde uppfatta den oregelbundna modulationen som de sedan skulle detektera frånvaro av. När modulationsgraden ökas minskar den för detektion erforderliga

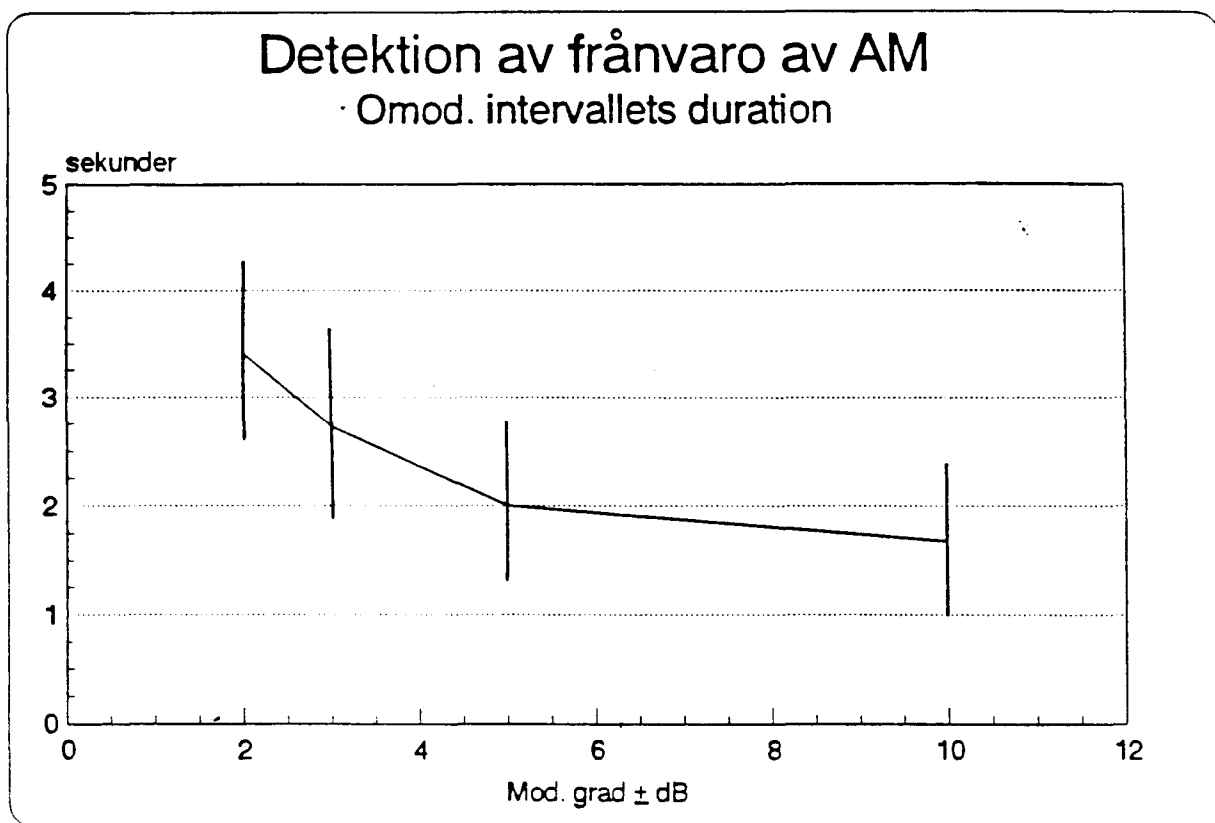


Fig. 6. Medelvärde  $\pm 1$  standardavvikelse för durationen hos det omodulerade intervallet vid detektionströskeln. durationen hos det omodulerade intervallet. Vid modulationsgraden  $\pm 10$  dB krävs en duration av 1.7 sekunder hos det omodulerade avsnittet för att det skall kunna detekteras. Skillnaden i duration mellan modulationsgraden  $\pm 2$  dB och  $\pm 3$  dB samt mellan  $\pm 3$  dB och  $\pm 5$  dB är statistiskt signifikant. Däremot är skillnaden mellan  $\pm 5$  och  $\pm 10$  dB ej statistiskt säkerställd.

## 5

## DISKUSSION

**Experiment 1:** I undersökningen av förmågan att detektera närvaro av amplitudmodulation hos bredbandigt brus fann vi detektionströsklar i registret  $\pm 0.5$  till  $\pm 1.5$  dB. Tröskeln påverkades emellertid av såväl modulationsfrekvens som duration alternativt antal presenterade modulationsperioder. Det är således inte en enkel tidsintegration med fast tidskonstant som beskriver förutsättningen för detektion utan en mera komplex interaktion mellan modulationsfrekvens och varaktighet eller antal perioder av modulationssignalen. Resultaten bekräftar den intuitivt rimliga hypotesen att kort varaktighet väsentligt försvårar detektionen av

amplitud-modulation. Ur fig.5 kan vi utläsa att ett bredbandigt brus som amplitudmoduleras med modulations-frekvens 0.5 resp. 1 Hz och med modulationsgraden  $\pm 1$  dB behöver en varaktighet i modulationen på ca 4 resp. ca. 1.5 sekunder för att modulationen ska kunna uppfattas. Dessa värden för modulationsfrekvens och modulationsgrad kan antas vara representativa för ljudet från vindkraftverk.

Viemeister (1979) rapporterade en mycket detaljerad studie av förmågan att detektera amplitudmodulation i brus. Ett av hans deexperiment påminde om vårt experiment 1. Han testade dock endast två försökspersoner och hans resultat är därför svåra att tolka med generell giltighet i större detalj, men beroendet av den modulerade avsnittets längd uppvisar ungefär samma mönster. Hans genomsnittliga detektionströsklar för 2 Hz modulationsfrekvens varierade mellan  $\pm 0.4$  och  $\pm 0.7$  dB, monotont avtagande vid ökande duration från 0.25 till 1.5 sekund. Att hans detektionströsklar var ungefär hälften av våra för 2 Hz kan bero på att hans försökspersoner hade en avsevärt större träning än våra.

Amplitudmodulationer i vindkraftverksbuller ligger företrädesvis med modulationsfrekvens i området 0.5-2 Hz. Här är detektionströskeln i intervallet  $\pm 0.5$  till  $\pm 1.2$  dB. Ju fler perioder eller ju längre tidsfönster av modulation som föreligger desto lägre är detektionströskeln. Detta gäller modulation av det brus som vi använt i denna undersökning nämligen bredbandigt lågpasfilterat brus. Detta brus kan antas relativt väl simulera det spektrum som vindkraftbuller uppvisar. Viemeister (1979) studerade också inverkan av olika spektrum hos det amplitudmodulerade bruset på detektionströsklarna. Bandpassfilterat brus med bandbredd något mindre än en oktav och mitterfrekvenser 0.2, 1 resp. 10 kHz testades på två försökspersoner. Resultatet för vitt brus låg ungefär mitt emellan resultaten vid mitterfrekvenserna 1 och 10 kHz, vilka gav detektionströsklar på 0.5 resp. 0.65 dB medan 200 Hz gav en genomsnittlig detektionströskel på ca 1.15 dB, allt vid 2 Hz modulationsfrekvens.

Också Zwicker och Feldtkeller (1967) har presenterat data avseende inverkan av bandbredden hos amplitudmodulerat brus på tröskeln för detektion av modulation. Detektionströskeln stiger d.v.s. lyssnaren kräver större modulationsgrad för att detektera amplitudmodulationen vid avtagande bandbredd - enligt deras data ökar tröskeln från  $\pm 0.6$  dB till ca  $\pm 0.9$  dB när bandbredden minskas från 5 till 1 kHz. Denna påverkan är onekligen mycket måttlig. Dessa resultat tyder på att de avvikelser som kan föreligga i spektrum mellan i vårt experiment använt brus och verkligt brus från ett vindkraftverk knappast kan förväntas ha någon väsentlig inverkan på förutsättningarna att detektera amplitudmodulation.

I vårt experiment 1 har sinusformad logaritmisk modulation använts, d.v.s. brusets momentana ljudnivå uttryckt i dB har varierat i ett regelbundet sinusformat mönster. Realistiskt

vindkraftsbuller kan antas uppvisa en mindre regelbunden form för amplitudmodulation än den sinusformade. Vår tidigare studie (Arlinger och Gustafsson, 1988) visade dock att det är primärt de periodiskt återkommande starka maxima i styrkevariationsmönstret som är förutsättningen för detektion. Såväl Viemeister (1979) som Zwicker och Feldtkeller (1967) presenterar jämförelse mellan amplitudmodulation med sinusvåg resp. fyrkantvåg. Fyrkantvåg innebär något bättre detektningsströsklar än sinusformad modulation - typiskt  $\pm 0.4$  resp  $0.5$  dB enligt Viemeisters resultat för modulationsfrekvenser från 2 Hz och uppåt. Skillnaderna är således ganska små och återigen kan vi dra slutsatsen att de resultat som erhållits i experiment bör ha rimligt god validitet.

**Experiment 2:** Vid detektion av frånvaro av modulation minskar den tid som behövs för att notera det omodulerade intervallet när modulationsgraden ökar. Minskningen är dock väldigt liten vid de högre modulations-graderna. Erforderlig varaktighet i det omodulerade avsnittet för detektion planar ut kring 1.5 - 2 sekunder. Detta motsvarar periodtiden för den högsta av de tre frekvenser som summerade utgjorde modulationssignalen. Fluruvida detta är ett generellt samband - d.v.s. att om den högsta modulationsfrekvensen varit 1 Hz skulle 1 sekunds duration varit tillräckligt för detektion - går ej att bedöma ur föreliggande data.

Resultatet från detta experiment är inte enkelt jämförbart med resultaten från experiment 1 dels därför att den modulerande signalen inte var enkelt sinusformad utan komplex, utformad som en summa av tre långsamma sinussignaler med frekvenserna 0.1, 0.3 och 0.5 Hz i slumpmässigt fasförhållande, dels därför att detektionsuppgiften avsåg frånvaro av modulation i motsats till närvaro av modulation i experiment 1. Oss veterligen finns ej resultat publicerade från tidigare studier av liknande slag.

## 6 REFERENSER

- [1] Arlinger, S. och Gustafsson, H.Å. 1988. Hur ett brusband med konstant ljudnivå maskerar ett brusband med periodiskt varierande ljudnivå. Rapport till Vindkraftutredningen.
- [2] Viemeister N.F. 1979. Temporal modulation transfer functions based upon modulation thresholds. J. Acoust. Soc. Am. 66, 1364-1380.
- [3] Zwicker, E. & Feldtkeller, R. 1967. Das Ohr als Nachrichtenempfänger. S. Hirzel Verlag, Stuttgart, sid. 97-101.

**PROJEKTSTÖD**

**Projektet har genomförts med anslag från Flygtekniska Försöksanstalten "FFA - Baskunskap vindkraft". Utrustning och erfarenhet hämtad ur vårt tidigare projekt "Taluppfattbarhet i amplitudvarierande buller för normalhörande och hörselskadade" med anslag från Statens Naturvårdsverk har varit av väsentlig betydelse för genomförandet.**

Utgivare FLYGTEKNISKA FÖRSÖKSANSTALTEN Aerodynamiska avdelningen Box 11021 (FFA) STOCKHOLM	Beteckning FFA TN 1991-2		
	Datum Januari 1991		Sekretess Öppen
	Dnr 59/91	Ex nr	Antal sidor 13
Uppdragsgivare Flygtekniska försöksanstalten (FFA), Bromma STOCKHOLM	Uppdragsnummer AU-3519	Beställning 506 266-5  Provprogram	
Fdok			
Rapportens titel <b>STUDIER AV VINDBRUSETS MASKERING AV BULLER FRÅN VINDKRAFTVERK</b> Temporal integration vid detektion av närvaro respektive frånvaro av periodisk amplitudmodulering			
Författare Stig Arlinger, Birgitta Larsby, Hans-Åke Gustafsson och Björn Leander *)		Arbetet utfört av	
Granskad av <i>S-E Thor</i> S-E Thor	Godkänd av <i>Ingemar Lind</i> Ingemar Lind Chef, Aerodynamiska avd		
Sammanfattning  <b>SAMMANFATTNING</b>  <b>Experiment 1 har visat att</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>- detektionströskeln för amplitudmodulation har ett minimum vid ca 1 Hz modulationsfrekvens,</li> <li>- detektionströskeln för amplitudmodulation påverkas av modulationsfrekvens i kombination antal perioder av modulation alternativt det modulerade avsnittets varaktighet,</li> <li>- buller från vindkraftverk kan förväntas behöva höras över vindbruset i avsnitt av ca. 1.5-4 s längd för att uppfattas.</li> </ul> <b>Experiment 2 har visat att</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>- ju högre grad av oregelbunden modulation desto kortare tid behövs för att detektera frånvaro av modulation,</li> <li>- om amplitudmodulationen i simulerat vindbrus uppgår till <math>\pm 4-5</math> dB eller mer krävs att vindbruset är svagare än vindkraftverksbullret under minst 2 sekunder långa avsnitt för att dessa ska kunna uppfattas.</li> </ul> *) Universitetet i Linköping, teknisk audiologi			
Nyckelord  Vindkraftverk, Vindkraft, Buller, Maskering			
			Godkänd för publicering
Distribution			
Ex nr:	STEV 1-10	Linköpings Universitet 11-20	FFA 21-60