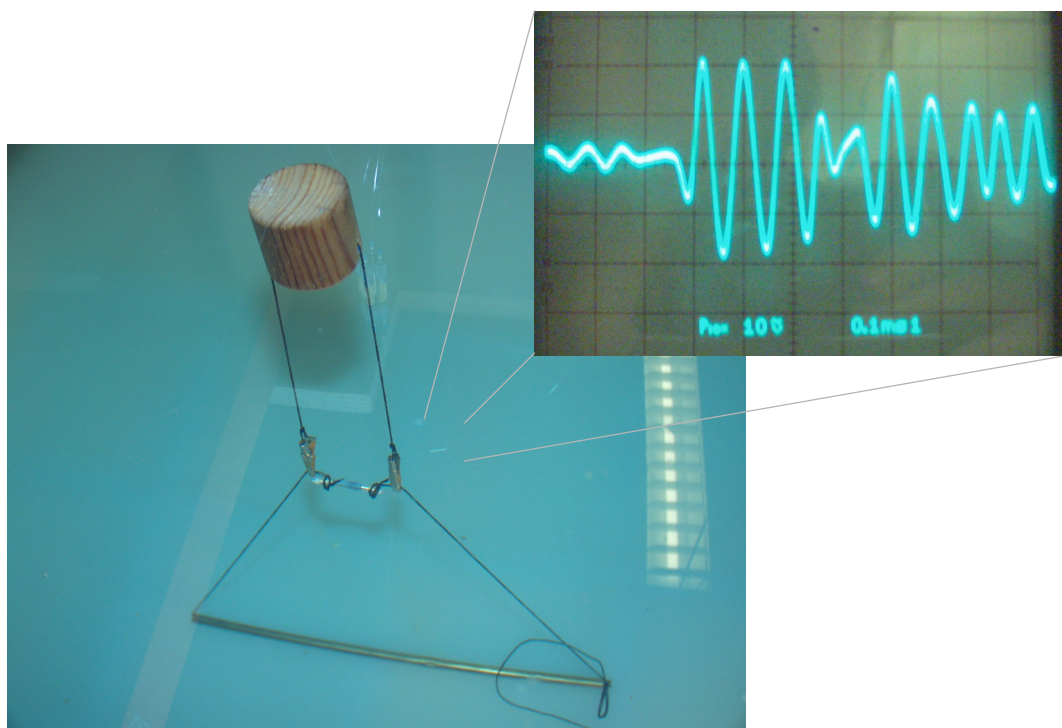


Andreas Olsson, Fredrik Kullander

Akustisk utprovning av ingjutningsmaterial för fiberoptiska hydrofoner



Andreas Olsson, Fredrik Kullander

Akustisk utprovning av ingjutningsmaterial för fiberoptiska hydrofoner

Utgivare Totalförsvarets Forskningsinstitut-FOI Avdelningen för Sensorteknik Box 1165 SE-581 11 Linköping	Rapportnummer, ISRN FOI-R--0314--SE	Klassificering Teknisk rapport
	Forskningsområde 4. Spaning och ledning	
	Månad, år December 2001	Projektnummer. E 3026
	Verksamhetsgren 5. Uppdragsfinansierad verksamhet	
	Delområde 43. Undervattenssensorer	
Författare/redaktör Andreas Olsson, Fredrik Kullander	Projektledare Fredrik Kullander	
	Godkänd av Ove Steinvall	
	Uppdragsgivare/kundbeteckning Försvarsmakten	
	Tekniskt och/eller vetenskapligt ansvarig Fredrik Kullander	
Rapportens titel Akustisk utprovning av ingjutningsmaterial för fiberoptiska hydrofoner		
Sammanfattning (högst 200 ord) Fiberoptiska hydrofoner, i det här fallet fiberlaserhydrofoner samt plana hydrofoner, har ett flertal militära tillämpningar såsom hydroakustiska släpande arrayer efter en undervattensfarkost eller som en stor sensor belagd längs ett helt ubåtsskrov. Beläggingsmaterialet inverkar på hydrofonernas akustiska karaktäristik och avsikten är att åstadkomma extremt akustiskt tryckkänsliga gränssnitt genom ingjutning av optisk fiber. Även andra innovativa gränssnittslösningar har utvecklats med goda resultat. Konstruktion och materialval för plana element har studerats tidigare liksom konfigurationslösningar för fiberlasersensorer. Denna vidareutveckling har nu lett fram till att frekvenskaraktäristiken för ett antal fiberlaserhydrofoner och plana akustiska element kan fastställas.		
Nyckelord fiberlaserhydrofoner, plan sensor, fiberoptisk sensor, hydrofon, hydroakustik, interferometer		
Övriga bibliografiska uppgifter	Språk Svenska	
ISSN 1650-1942	Antal sidor: 32 s.	
Distribution enligt missiv	Pris: Enligt prislista Sekretess	

Issuing organization FOI-Swedish Defence Research Agency Division of Sensor Technology P.O. Box 1165 SE-581 11 Linköping	Report number, ISRN FOI-R--0314--SE	Report type Technical Report
	Research area code 4 C4ISR	
	Month, Year December 2001	Project no. E 3026
	Customers code 5. Commissioned Research	
	Sub area code 43 Underwater Sensors	
Authors/s (editor/s) Andreas Olsson, Fredrik Kullander	Project manager Fredrik Kullander	
	Approved by Ove Steinvall	
	Sponsoring agency Swedish Armed Forces	
	Scientifically and technically responsible Fredrik Kullander	
Report title Acoustic tests of embedding materials for fiber optic hydrophones		
Abstract (not more than 200 words) Fiber optic hydrophones, fiber laser hydrophones and planar hydrophones, have got several military applications for instance as towed array sonars for underwater surveillance or as sensors mounted on the hull of underwater vehicles. The optical fiber is embedded in a material which modifies the acoustical characteristics of the hydrophones. The purpose is to develop acoustic interfaces allowing for detection of low level signals ranging down to and below the so called Sea State Zero level. Various materials with proper characteristics were tested but also new and innovative interfaces have been investigated, some of them with promising results. Geometrical design and proper choice of materials have been studied in previous work. The focus in this work has been to determine the frequency characteristic for a number of fiber laser hydrophones and planar hydrophones.		
Keywords fiber laser hydrophones, planar sensor, fiber-optic sensor, hydrophone, hydroacoustics, interferometer		
Further bibliographic information	Language Swedish	
ISSN 1650-1942	Pages 32 p.	
		Price acc. to pricelist Security classification

1 Inledning	7
1.1 Syfte	7
1.2 Bakgrund	7
2 Sensortillverkning	8
2.1 Sensorprincip	8
2.2 Ingjutningsmetod	8
2.3 Fibersvetsning	10
3 Mätningar	11
3.1 Materialegenskaper	11
3.1.1 Elasticitetsmodul	12
3.1.2 Poissons tal	12
3.1.3 Densitet	13
3.2 Statiskt tryck	13
3.2.1 Resultat	15
3.3 Dynamiskt tryck	18
3.3.1 Resultat	26
3.3.2 Frekvenskaraktäristik	28
4 Diskussion	31
5 Referenser	32

1 Inledning

1.1 Syfte

Studera beläggingsmaterialens inverkan på fiberoptiska hydrofoners akustiska karaktäristik för både fiberlaserhydrofoner och plana akustiska element. Inbäddningsmaterial såväl som andra innovativa gränssnitt utvecklas och provas. Målsättningen är att åstadkomma material med god akustisk förstärkning i för tillämpningsområdet relevant frekvensband med slutligt syfte att fastställa frekvenskaraktäristiken för det optimala töjningsförstärkande gränssnittet.

1.2 Bakgrund

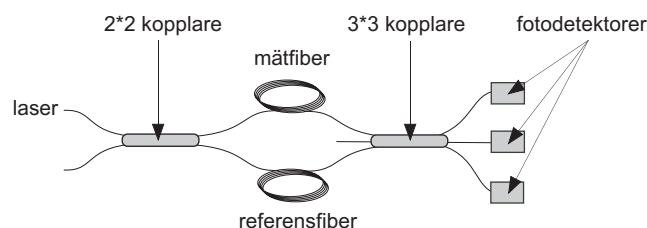
Plana fiberoptiska hydrofoner har tidigare konstruerats och lämpligt val av ingjutningsmaterial har utvärderats [1]. Denna typ av hydrofoner kan utnyttjas för att skilja ljud infallande från långt avstånd från buller och vibrationer i en nära omgivning. En typisk tillämpning är som del i sonararray belagd mot ett ubåtsskrov eller liknande.

Fiberlasersensorn karaktäriseras av en extremt hög töjningskänslighet och i kombination med sin ringa storlek har den stor potential i flertalet militära tillämpningar. Tunna, lätta, hydroakustiska arrayer som dras efter en undervattensfarkost (TAS - towed array sonar) nämns ofta som en intressant applikation i dessa sammanhang [2]. Här, liksom för de plana fiberoptiska hydrofonerna, behöver man åstadkomma fiberoptiska hydrofonelement med extremt hög känslighet och önskar således gjuta in fibern i ett akustiskt tryckkänsligt material med egenskaper som förstärker och förmedlar töjningar till fibern. Töjningarna registreras interferometriskt varmed mycket små signaler kan detekteras.

2 Sensortillverkning

2.1 Sensorprincip

En Mach-Zehnder interferometer används för att detektera de hydroakustiska tryckförändringarna. Laserljuset delas upp i två grenar med hjälp av en 2*2 kopplare som i sin tur leder ljuset vidare i en mät- och en referensfiber. Mätfibern med sitt töjningsförstärkande beläggningssmaterial påverkar den optiska väglängden genom att den fysiska längden och/eller brytningsindex för fibern ändras när den utsätts för mätsignalen. I den efterföljande 3*3 kopplaren blandas det fasförskjutna ljuset från mätfibern med referensfibers opåverkade ljus. Ljuset interfererar i kopplaren och denna interferens ger upphov till en intensitetsfördelning i tre stycken fotodetektorer med 120° inbördes fasförskjutning, se figur 1.



Figur 1. Principen för en Mach-Zehnder interferometer med 3*3 kopplare.

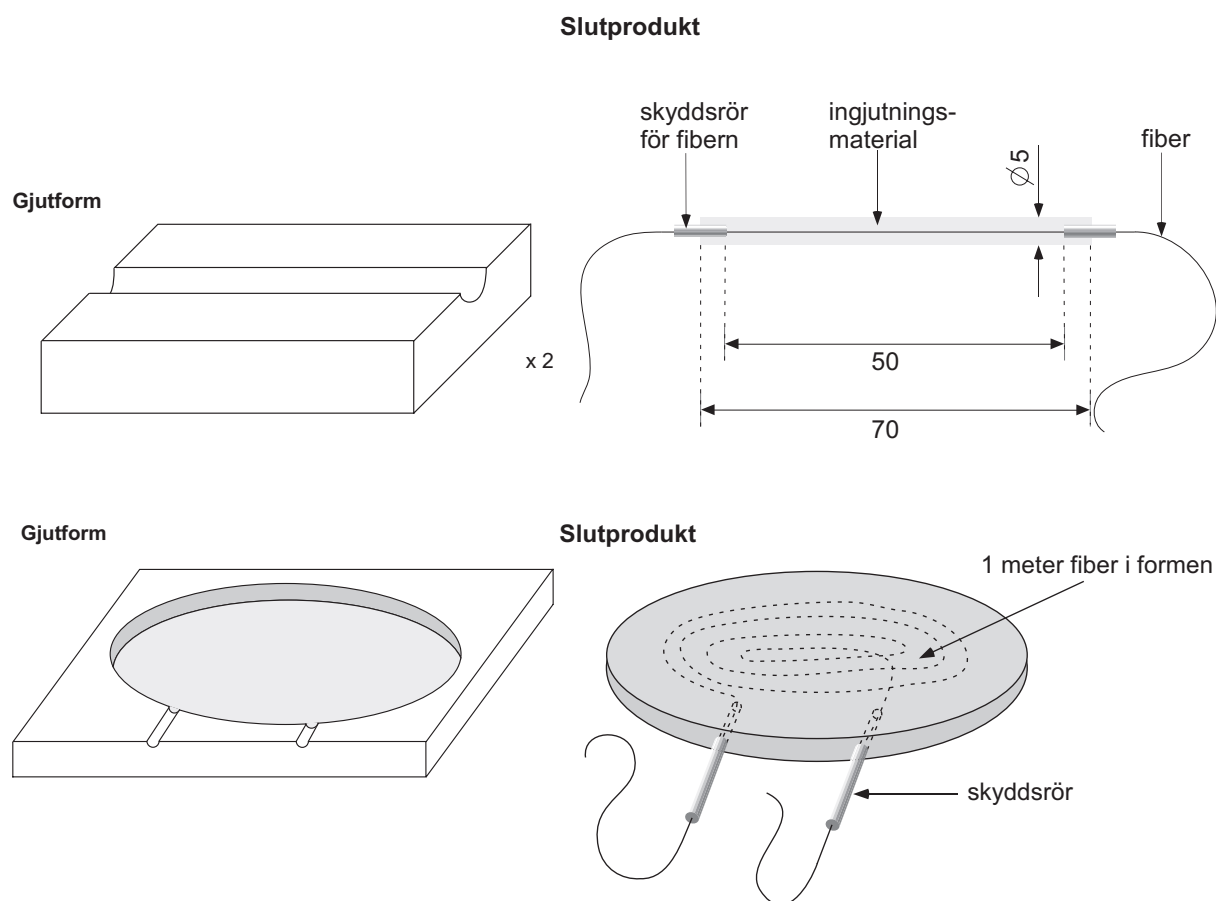
2.2 Ingjutningsmetod

Fyra olika kompositmaterial har utvärderats med avseende på deras förmåga att förstärka töjningen i en fiber under inverkan av akustiskt ljudtryck. ABIC Kemi i Norrköping har levererat de tre förstnämnda med ursprung från Ciba Specialty Chemicals i Cambridge, England. Det sista materialet är ett svart epoxy som kommer från MPE Microtech AB.

- Ureol 5212 B + 5212/16/19A (2-komponentlim)
- Araldit LY5138-2 med härdare HY5138
- Araldit CY221 med härdare 956
- EPO-TEK 353 ND

Endast Araldit LY5138-2 med härdare HY5138 är representerat bland stängerna, se figur 2, medan det finns uppsättningar för alla fyra kompositmaterial beträffande de plana elementen. Gemensamt för de två geometriska utformningarna är att gjutningarna med Araldit LY5138-2 har kombinerats med glasmikrosfärer;

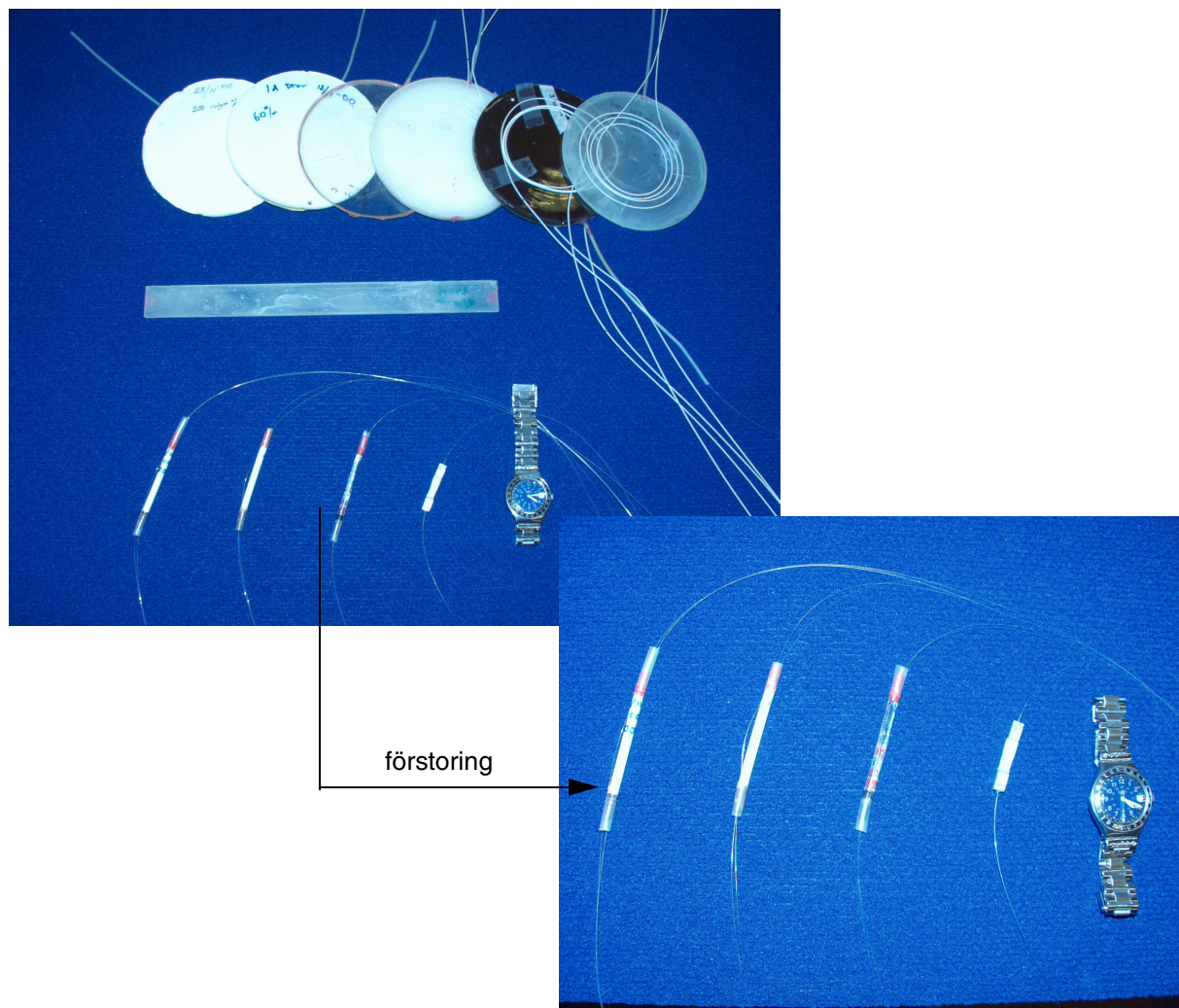
- 0 vol-%, dvs endast Araldit LY5138-2
- 60 vol-%, 5 delar Araldit och 3 delar mikrosfärer
- 100 vol-%, 1 del Araldit och 1 del mikrosfärer
- 200 vol-%, 1 delar Araldit och 2 del mikrosfärer



Figur 2. Överst t.v. visas halva gjutformen för stängerna. Den övre bilden t.h. illustrerar en färdig ingjutning av mätfibern. Mått i mm. Underst t.v. visas gjutformen för de plana elementen medan undre bilden t.h. presenterar ett plangjutet element.

För stängerna gäller att 50 mm av mätfibern beläggs med ett töjningsförstärkande material. En utanpåliggande referensfiber placeras parallellt med mätfibern. I de plana elementen ligger 1 meter fiber ingjuten och lindad i koncentriska cirklar i mitten av plattan. Referensfibern lindas på liknande sätt utanpå elementet, se figur 2.

I mätningarna ingår även 7 stycken specialkonstruerade stavar. Dessa stavar är endast 20 mm långa men har samma tvärsnittsytan som övriga stänger. Specialstavarna baseras inte på kompositmaterial överhuvudtaget och konstrueras på annat sätt än genom gjutning. Med anledning av att konstruktionerna är nya och innovativa kommer vi här ej att redogöra för deras detaljerade utföringsform.



Figur 3. Sex stycken plana hydrofonelement längst upp i övre bilden. I mitten av övre bilden syns en provstav för töjnings- och densitetsmätningar. Längst ner visas ingjutningar anpassade för fiberlasersensorer, se även förstoringen nere till höger i figuren.

2.3 Fibersvetsning

För att åstadkomma en god vidhäftningsförmåga mellan fiber och ingjutningsmaterial avlägsnas primärskyddet genom att kapa fibern, skala av ändarna för att till sist svetsa samman dem igen. En svets skarv orsakar en dämpning i fibern på 0,01-0,10 dB, vanligtvis kring 0,01 dB. Därefter är fibern klar att gjutas in.

Denna procedur föregår alla gjutningar med stängerna men däremot inte för de plana elementen. Det finns två anledningar till att man inte avlägsnar primärskyddet i de plana hydrofonerna. För det första är det svårt att skala av primärskyddet på 1 meter fiber och för det andra har de plana elementen en sådan geometrisk utformning att fibern är följsam med materialet när det är utsatt för ett akustiskt ljudtryck och riskerar inte lika lätt att släppa som fallet är med cylinderstavarna. Den cirkulära fiberlindningen bidrar också till ökad följsamhet. Det är mer kritiskt i cylinderstavarna där fibern ligger rakt utsträckt.

3 Mätningar

Mätningar på 5st provstavar (250 x 26,5 x 3,2 mm) i syfte att bestämma materialegenskaperna för plastkompositmaterialen med mikrobällor är utfört av CSM Materialteknik AB i Linköping [3]. De sex stavarna har samtliga Araldit som bas men med olika blandningsmängder av mikrobällor. Blandningsmängderna är 0, 60, 100, 160 samt 200 vol-% och refereras i tabell 1 till siffervärdena 1-5.

Känsligheten för statiskt tryck uppmättes i laboratorieförsök. För varje sensorelement genomfördes en mätserie där trycket varierades från normaltrycket 1 atm (0.1 MPa) upp till cirka 5 atm övertryck (0.6 MPa).

De dynamiska mätningarna syftar till att fastställa frekvenskaraktärstiken för elementen i området 5-20 kHz.

3.1 Materialegenskaper

Viktiga materialegenskaper för tryck- och töjningsförstärkning är elasticitetsmodulen, Y , och Poissons tal, σ .

Den vanliga metoden att fastställa materialegenskaperna är via hållfasthetstest. En alternativ metod att bestämma bl.a. E-modul och Poissons tal är m h a ultraljud. Ultraljudmetoden har fördelen av att kunna hantera dynamiska förlopp. Med ultraljud kan man inte komma lägre än ca 500 kHz och således långt ifrån det önskvärda dynamiska området 0-20 kHz. Dimensionerna på provstavarna duger dock alldeles utmärkt för dessa korta våglängder som kommer i fråga och mikrobällorna ställer inte till med några större problem, endast bidra till en frekvensdämpning. För att få reda på elasticitetsmodulens frekvensberoende kan man extrapolera det statiska E-värdet man får från dragprovet med ultraljudsmätningar i MHz-området och på så vis täcka in 0-20 kHz. Provstavarna skannas med en plan ultraljudsvåg vilket ger en tredimensionell homogenitetsbild. Mätningen ger också svar på hur stor frekvensdämpningen är samt om materialet är isotropt, allt genom att studera amplitudändring (kopplad till dämpningen) och tidsskillnad ("time-of-flight", kopplad till våghastighet) för yt- och bottenreflexerna. Det går även att få en uppfattning om lokala variationer av E-modul såväl som Poissons tal genom att utföra punktvisa ultraljudsmätningar. Efter att ha tagit del av de inledande hållfasthetstesterna togs beslut att avstå från ultraljudsmätningar då dessa provstavar endast anses vara en första provserie.

En sak som är värd att notera är att E-modulen ändras något då materialet utsätts för fukt under lång tid (dagar/veckor). Araldit uppskattas ha 2 % mätnadsgrad. Utmattningsförloppet påverkas så att man får ett snabbare förlopp fram till tiden för brott om materialet utsätts för vatten.

Töjningsmätningarna är utförda i längd- och tvärriktning under statisk belastning och registreras under både drag- och trycklast med hjälp av strain-gauge-givare av korsgivartyp. De korsvisa töjningsgivarna limmas fast med Epoxy centrerade på respektive stav, en på var sida. Dessa givare kan utsättas för upp till 2 % relativ töjning innan de går sönder vilket innebär att om provmaterialen är mer elastiska än så kommer givarna att brista innan brott uppstår på stavarna.

Dragbelastningen befinner sig inom det elastiska området och endast en spårbar plasticering förekommer för Araldit-provstavarna med 0 och 120 vol-% mikrosfärblandning. Vid draglast registreras relativt stora töjningsskillnader mellan motstående sidor på provstavarna vilket in-

dikerar att materialegenskaperna skiljer sig mellan provstavssidorna. Detta kan troligen förklaras av att mikroballengerna flyter upp till ytskiktet under härdningsprocessen. Tesen skulle kunna verifieras med ultraljudsmätning.

3.1.1 Elasticitetsmodul

Elasticitetsmodulen ska minimeras under randvillkoret att den optiska glasfibern ($Y = 73$ GPa) fortfarande skall kunna betraktas som en del av materialet. För att få en rimlig tjocklek på ingjutningsmaterialet och samtidigt uppfylla randvillkoret är ett lämpligt värde på Y i intervallet 0,7-7 GPa. De plana elementen får därmed en tjocklek på ca 5 mm och en diameter av 100 mm. Stavarna tillverkas med en diameter på 5 mm och längden 50 mm.

En spänning kan uttryckas som kraft per areaenhet och skrivs som

$$\sigma[N/mm^2] = \frac{F[N]}{A[mm^2]} \quad (1)$$

och i kombination med Hookes lag ($\sigma = E \cdot \epsilon$) erhålls

$$E[N/mm^2] = \frac{F[N]}{A[mm^2] \cdot \epsilon} \quad (2)$$

Eftersom töjningsvärdena kan skilja sig mellan de båda provstavssidorna skrivs ϵ om enligt

$$\epsilon = \frac{\epsilon_1 + \epsilon_2}{2} \quad (3)$$

och E-modulen blir slutligen

$$E[N/mm^2] = \frac{F[N] \cdot 2}{A[mm^2] \cdot (\epsilon_1 + \epsilon_2)} \quad (4)$$

där F är pålagd last och A provstavens tvärsnittarea.

3.1.2 Poissons tal

Med ett högt värde på Poissons tal, nära 0,5, beter sig materialet som en vätska i den meningen att volymförändringar motverkas. Om en stav utsätts för dragkrafter under denna förutsättning minskas dess midjemått signifikant. För att åstadkomma maximal påverkan på den ingjutna fibern är det dock önskvärt med ett litet Poissons tal eftersom detta ger en stor volym- och fiberlängdsändring.

Utvärderingen av Poissons tal utfördes enligt

$$\nu = \frac{\epsilon_{tvärs}}{\epsilon_{längs}} \quad (5)$$

där töjningarna från motstående sidor har sammanräknats [3].

3.1.3 Densitet

Densiteten bestämdes för två avkapade provbitar från respektive provstav. Den ena biten togs från änden och den andra provbiten är uttagen ca 50 mm från den ursprungliga provstavsändan. Provbitarna vägdes och eftersom tätheten för merparten av stavarna var mindre än 1 kunde inte volymbestämning ske genom nedsänkning i vatten utan beräknades via tvärsnittsdimensionsmätningar med mikrometer.

3.2 Statiskt tryck

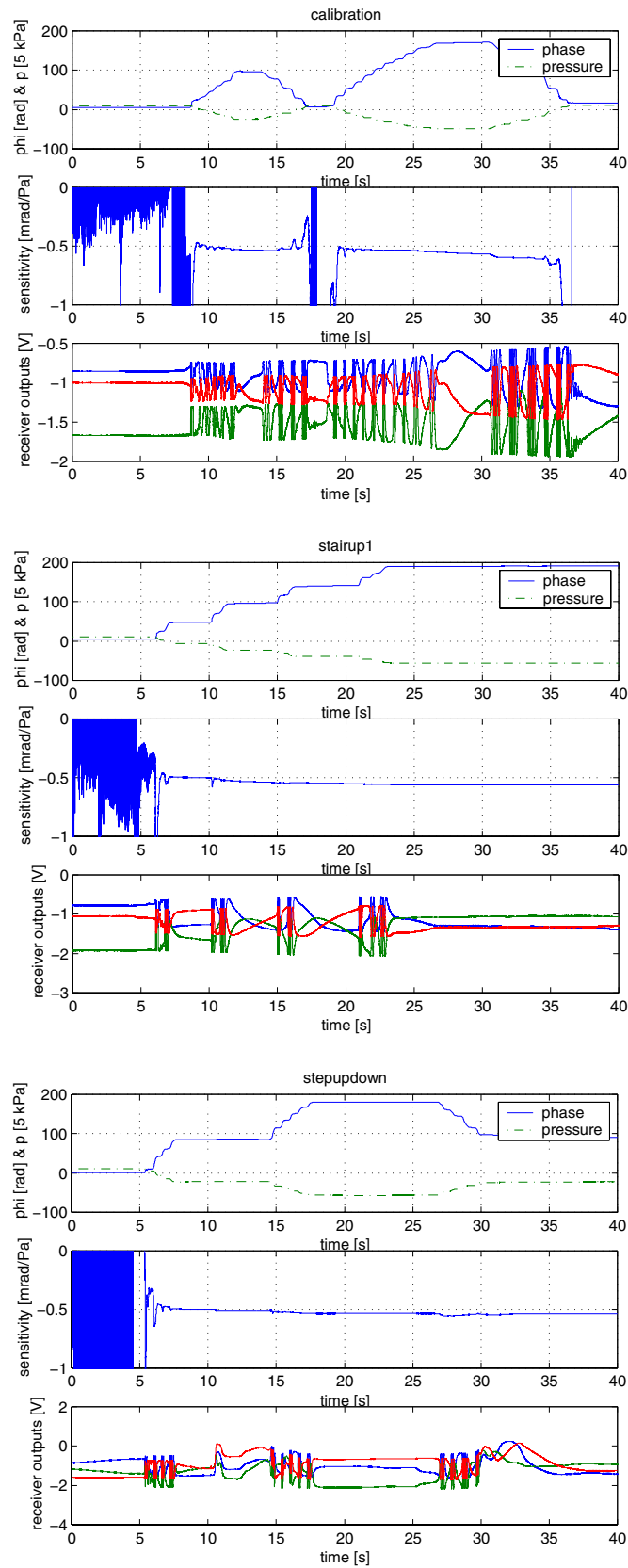
Mätupställningen bestod av en cylinderformad ståltank med dimensionerna, diameter 20 cm, höjd 40 cm som vattenfylldes vid mätningarna. Tankens ena ände var försedd med ett lock på vilket genomföringar för optiska fibrer och en anslutning för tryckreglering var monterade. Trycket i tanken reglerades med utnyttjande av tryckluft och en reglerventil. I mätserierna för varje sensorelement varierades det statiska trycket genom att skruva på reglerventilen. En referenstryckgivare var monterad mot tryckslangen som förband reglerventilen med tanken. I mätningarna registrerades trycket samtidigt med sensormätvärdena.

I princip är det möjligt att mäta känsligheten för statiskt tryck utan att vattenfylla tanken. Ett problem är dock att temperaturen i tanken ändras då lufttrycket ändras och eftersom sensorelementen visade sig reagera kraftfullt på temperaturändringar var det nödvändigt att genomföra dessa mätningar i vatten. För att undvika temperaturinverkan genomfördes mätningarna således i vatten. Sensorelementen med mätfibern monterades som en gren av två i en Mach-Zehnder interferometer. Den andra grenen utgjordes av en standard singelmodfiber avpassad i längd mot sensorfibern för att säkerställa koherens och god interferometervisibilitet. Interferometerns båda kopplare, 2x2 och 3x3 kopplare, var monterade i tanken. Anslutningarna ut från tanken utgjordes av den optiska fibern mellan laserljuskällan (DFB halvledarlaser 1300 nm) och de tre optiska fibrerna ut från 3x3 kopplaren. Samtliga optiska skarvar och kontakter var utförda på ett sånt sätt att reflexer undviks. Skarvarna var antingen svetsade eller av typ snabbskarvar med optiskt gel. Kontakterna mot de optiska detektorerna var av typ APC, en snedslipad kontakt för att minimera bakåreflektioner. Genom att minimera det reflekterade ljuset undviks oönskad interferens som kan leda till felsignaler.

Vår tidigare utvecklade demoduleringsalgoritm [4] användes för att demodulera interferometer-signaler och generera ett fasutslag. Interferometerfasutslaget jämfördes mot utslaget på referenstryckgivaren.

I figur 4 nedan visas några exempel på datatagningar för en av mätningarna (sensor benämnd special 5.1). Mätserierna påbörjades med en kalibreringsmätning som används för att justera demoduleringsalgoritmen för ändrade nivåer av de optiska effekterna på de tre detektorerna. Kalibreringsmätningen genererar dock ett riktigt resultat vad avser fasutslaget. För varje mätning presenteras diagram för de mottagna optiska effekterna, (receiver outputs). Här syns framförallt om något fel uppstår i det optiska systemet. Överst visas det uppmätta trycket och det uträknade fasutslaget. I mitten visas den beräknade känslighet i enheten [rad/mPa].

Varje mätning pågick i 40 sekunder, under loppet av vilket data samplades in i datorn med en samplingsfrekvens av 5 kHz. I början av varje mätning ses den beräknade känsligheten variera kraftigt. Detta är inget fel utan beror på att trycket och fasutslaget som används för att räkna ut



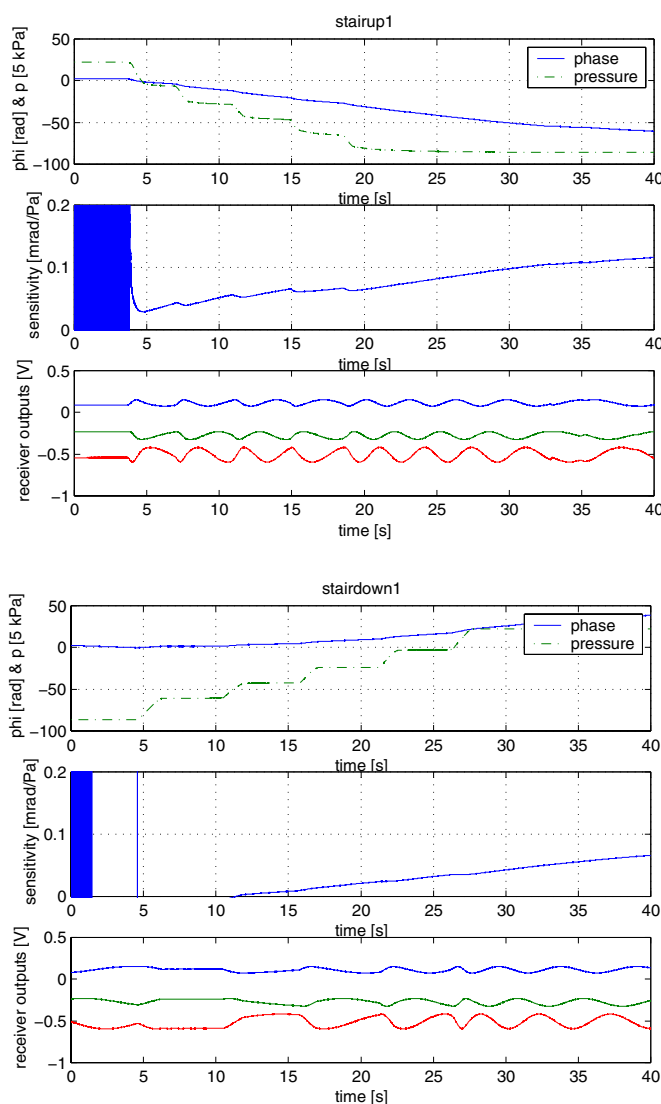
Figur 4. Data från mätningar av statisk tryckkänslighet. Överst: en första mätning som används för kalibrering av interferometern. Under den visas resultaten från två av mätningarna för sensor special 5.1.

känsligheten beräknas relativt de startvärden för respektive storhet som varje mätning börjar med. Nära dessa startvärden blir felen stora och beräkningen missvisande. Då känsligheten slutligen approximeras tas ingen hänsyn till dessa värden.

För varje mätserie bestående av olika tryckändringssekvenser, stegvis upp, stegvis ned, steg upp, steg ner, steg upp och ner, steg långsamt upp, steg långsamt ner, beräknas ett medelvärde för känsligheten och ett mätfel. Mätfelet uppskattas på basis av samtliga erhållna känslighetsvärden och innefattar ett eventuellt beroende av statiskt tryck. Mätningarna genomfördes olika dagar vartefter sensorerna blev färdiga.

3.2.1 Resultat

I tabell 1 redovisas resultaten från de statiska tryckmätningarna, kommentarer till mätningarna mm. För varje sensor beräknas en normaliserad känslighet som i princip uttrycker den relativa töjningen som funktion av trycket och gör känsligheten för olika fiberlängder jämförbar. Som synes ligger känsligheten för specialsensorn avsevärt högre än för de polymerbelagda sensorerna. Det skiljer nästan två storleksordningar, en faktor 100, mellan de senaste specialsensornerna och de belagda. Kommentarer till mätningarna återspeglar särskilda noteringar för



Figur 5. Data för sensor benämnd Special 3, 2001-05-23. Värdet för känsligheten driver långsamt mot ett värde.

Static pressure sensitivity

material ldnr	microspheres [%vol]	geometry	sensitivity [mrad/Pa]	error [mrad/Pa]	length [m]	norm. sens. [1/Pa]	comment	date	data folder
4	0	pla	0,39	0,05	1	5,38E-11	problems with air in pressure vessel. Limit of reference gauge	2001-04-11	data010411
1	60	pla	0,43	0,01	1	5,93E-11	may be air left in the vessel	2001-04-25	data20010425
2	100	pla	0,47	0,03	1	6,48E-11	first measurement, performed by LK	2001-01-13	data010411
5	160	pla	0,52	0,01	1	7,17E-11	well behaved	2001-04-20	data20010420
3	200	pla	0,57	0,03	1	7,86E-11	probably no air in vessel. Gauge limit affects some of the data	2001-04-12	data010412
4	0	cyl	0,005	0,005	0,05	1,38E-11	drift/slow response, low sensitivity	2001-05-18	data010518
1	60	cyl	0,018	0,005	0,05	4,97E-11	well behaved	2001-04-25	data010425.2
2	100	cyl	0,008	0,003	0,05	2,21E-11	drift/slow response?	2001-05-09	data010509
5	160	cyl	0,025	0,005	0,05	6,90E-11	some anomalies seen	2001-04-23	data20010423
3	200	cyl	0,03	0,005	0,05	8,28E-11	well behaved	2001-04-17	data20010417
<i>special devices</i>									
1		cyl, special1	0,07	0,03	0,02	4,83E-10	sensitivity higher at lower static pressures	2001-05-18	data010518.2
2		cyl, special2	0,1	0,1	0,02	6,90E-10	very slow response	2001-05-22	data010522
3		cyl, special3	0,1	0,1	0,02	6,90E-10	very slow response	2001-05-23	data010523
4		cyl, special4	0,4	0,1	0,02	2,76E-09	slow response, sensitivity increases during all datasets	2001-09-14	data010914
5		cyl, special5	0,65	0,05	0,02	4,48E-09	measured with bad interferometer visibility, only two valid data sets	2001-09-20	data010920
5		cyl, special5	0,7	0,05	0,02	4,83E-09	well behaved	2001-10-23	data011023
5.1		cyl, special5.1	0,55	0,05	0,02	3,79E-09	well behaved	2001-10-26	data011026

Tabell1. Statisk tryckkänslighet för sensorer provade 2001. De översta tio sensorerna är plana cirkelskivor och cylinderstavar med ingjuten fiber enligt ovan. De har ordnats i följd av ökande lufinblandning. Det nedersta sju är samtliga specialkonstruktioner applicerade över en fiberlängd på 2 cm.

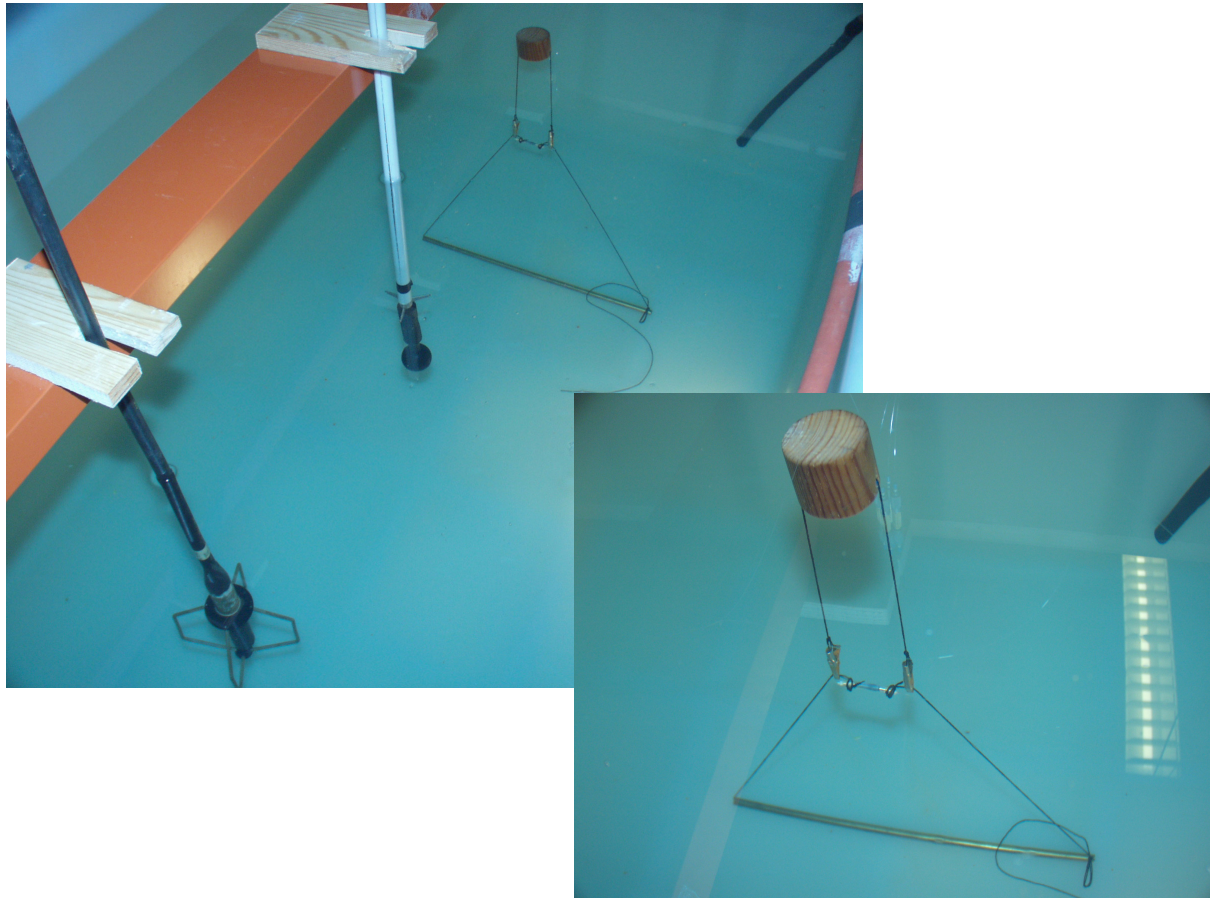
sensorerna. För flera av sensorerna noterades ett långsamt svar. Figur 5 visar ett exempel på detta. En eftersläpning i fasutslaget syns vilket kan vara ett tecken på flera saker. Vi är dock inte säkra på vad. En möjlighet kan vara att kopplingen till fibern är dålig. Fibern följer endast långsamt med i det omgivande materialets rörelser. För de flesta enheterna syntes dock inte detta fenomen. Sensor 5.1 till exempel följer väldigt väl referenstrycket.

Vad gäller luftinblandning är det osäkert huruvida det har gett effekt eller inte. De plana sensorerna uppvisar endast en liten ökning av känsligheten med mikrosfärhalt. För cylinderstavarna däremot ses en icke försumbar ökning av känsligheten med ökad mikrosfärhalt. En möjlig förklaring till skillnaden kan vara fördelningen av luftmikrosfärer i materialet. För cylinderstavarna var det troligtvis lättare att åstadkomma en homogen fördelning av luftmikrosfärerna medan gjutningen av plattorna skedde på ett sånt sätt att det finns risk för att en homogen fördelning ej åstadkommits.

Under alla omständigheter pekar resultaten av de statiska tryckmätningarna på att specialutföranden skall väljas för applikationen fiberlaserhydrofoner. För plana hydrofoner är det troligen inte nödvändigt att ha en hög relativ förstärkning och material utan luftinblandning är förmodligen att föredra på grund av materialegenskaperna.

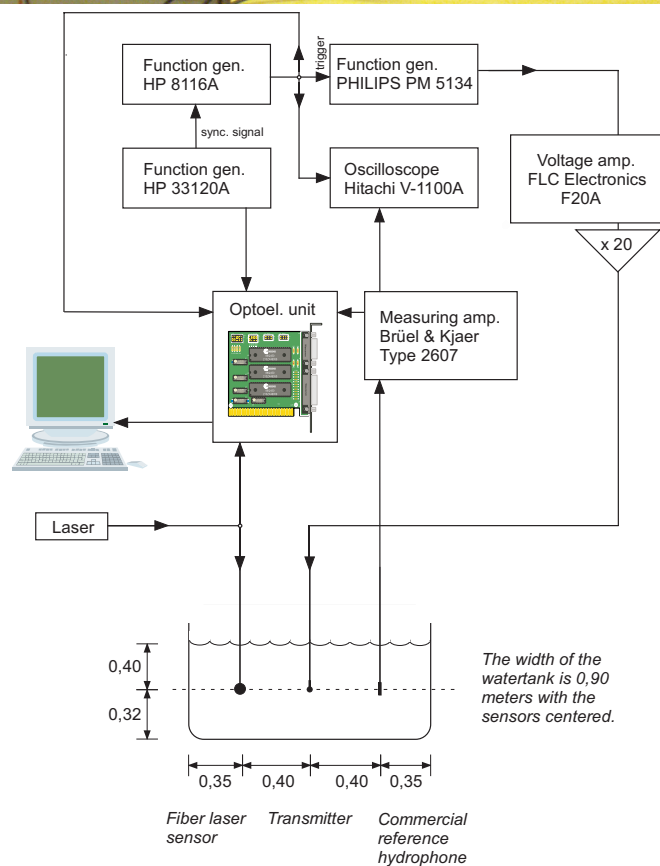
3.3 Dynamiskt tryck

En rumstempererad vattentank som rymmer 1,26 m³ användes till mätningarna. Referenshydrofon, sändarhydrofon samt fiberoptisk hydrofon hängde fritt och centrerat, både i sid- och höjled, i tanken på ekvidistanta avstånd. Tankens dimensioner (920 x 1520 x 900 mm) sätter en gräns för hur pass lågfrekventa pulser som kan studeras innan yt- och bottenreflexer når fram till fiberhydrofonen, i vårt fall > 5kHz.

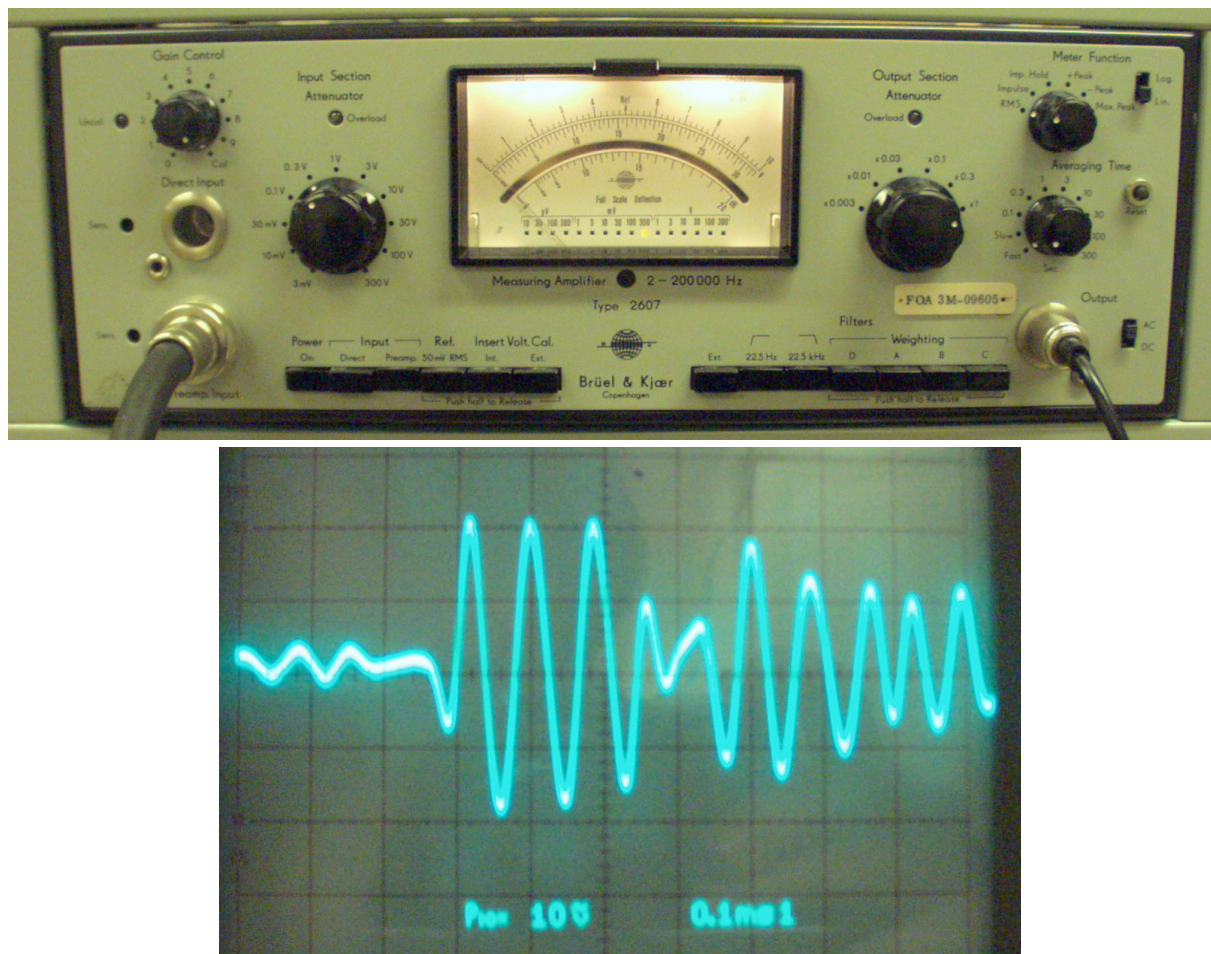


Figur 6. Övre bild: Vattentanken med referenshydrofon (nederst), sändare (mitten) samt fiberhydrofon (överst). Nedre bild: Förstoring av upphängningsanordning för fiberhydrofon.

Pulsade mätningar utfördes i intervallet 5-20 kHz med användande av en sändarhydrofon av typ ITC1001/288. Det ursprungliga insamlingsprogrammet, benämnt Quartet i tidigare rapporter [5], samlar data kontinuerligt. Quartet modifierades att endast spara data under korta tidsintervall synkroniserat med pulsrepetitionsfrekvensen. Genom att styra insamlingen med en fyrkantpuls av lämplig tidslängd tillåts programmet endast spara data när signalen går låg och på så sätt kan man klippa ut varje ny puls var för sig och slippa få med alla reflexer som uppstår då pulsen studsar i vattenytan och på väggarna i tanken. Tre signalgeneratorer användes för detta ändamål. Den första signalgeneratoren, HP 33120A, triggas igång insamlingssystemet samt nästa funktionsgenerator, HP 8116A, vilken i sin tur genererar en fyrkantpuls av längden 0,8 ms. Denna fyrkantpuls återkopplas till insamlingssystemet som samlar data så länge denna insignal är låg, dvs 0,8 ms. Den negativa flanken på fyrkantpulsen triggas den sista signalgeneratoren som genererar pulsen. Ett spänningsförstärkarsteg från FLC Electronics, F20A, förstärker pulsen 20 gånger innan den sänds ut i vattentanken.



Figur 7. Uppkoppling av sändar- och mottagarelektronik samt vattentank.



Figur 8. Överst; Referenshydrofonens förstärkare från Brüel&Kjaer, typ 2607. Nedre bilden visar en förstorad oscilloskopbild när en puls på 12 kHz registreras av referenshydrofonen. Man ser tydligt fördröjningen på ca. 0,30 ms innan ljudvågen når fram till hydrofonen samt de tre perioderna som pulsen innefattas av. Efter 0,60 ms uppstår interferens mellan pulsreflexerna. Varje ruta i x-led är 0,1 ms och 1 V per ruta i y-led.

En referenshydrofon, B&K typ 8101, kopplad till en mätförstärkare med beteckningen B&K 2607, se figur 8, verifierar till sist de uppmätta ljudtrycken. Det finns en fix inbyggd förstärkning i detta instrument och genom att dämpa denna förstärkning erhålls slutligen en lämplig nettoförstärkning. Antag att dämpningen är inställd på 80 dB, dvs

$10^{80/20} = 10^4$ ggr men på oscilloskopet avläses en signalstyrka på 5V RMS då insignalen är på 50 mV RMS. Det innebär en nettoförstärkning på

$\frac{5}{0,05} = 10^2$ ggr och således blir den fixa inbyggda förstärkningen $10^4 \cdot 10^2 = 10^6$ ggr.

I merparten av mätningarna användes dock 90 dB dämpning vilket ger

$$\frac{10^6}{10^{90/20}} = 10^{1,5} = 31,6 \text{ ggr nettoförstärkning som i sin tur motsvaras av}$$

$20 \cdot \log 10(31,6) = 30 \text{ dB}$. Efter kalibreringsmätning av referenshydrofonen visar det sig att nettoförstärkningen i verkligheten är 35,7 ggr, dvs 31 dB.

Antag att funktionsgeneratoren Philips PM5134 vid en mätning genererar en sinussignal på 5 kHz med 6 V_{pp} amplitud som förstärks 20 ggr så att den utsända spänningen är 120 V_{pp}.

Vad motsvarar 120 V_{pp} för ljudtryck och stämmer det med ljudtrycket som referenshydrofonen tar upp?

Karaktäristikkurvan för sändarhydrofonen anger ett sändartryck på 3 dB re μ Bar/Volt för 5 kHz vid ett avstånd på 1 meter, vilket även kan uttryckas som 3 dB re $10^5 \mu$ Pa/Volt eller 103 dB re 1 μ Pa/Volt.

I vattentanken är dock avståndet bara 0,4 meter och då blir ljudtrycket större, ty intensiteten skapas som

$$\left(\frac{0,4}{1}\right)^{-2} \text{ och uttryckt i dB blir det } 10 \cdot \log(1/(0,4))^2 = 20 \cdot \log(1/(0,4)) = 8 \text{ dB.} \quad (6)$$

Intensiteten vid 0,4 meter är alltså 8 dB större än vid 1 meter. Den utsända spänningen motsvarar $20 \cdot \log(120/(2 \cdot \sqrt{2})) = 32,6 \text{ dB re 1V}$, alltså blir ljudintensiteten vid 0,4 meter och 120 V_{pp} (42,4 V_{rms}) $103 + 8 + 32,6 = \mathbf{143,6 \text{ dB re 1 } \mu \text{ Pa}}$.

Känsligheten för referenshydrofonen anges i diagram för tekniska data till B&K typ 8101 vara -184 dB re 1 V/ μ Pa och med en förstärkning på 31 dB enligt ovan erhålls totalt $-184 + 31 = -153 \text{ dB re 1 V}/\mu \text{ Pa}$. Vid 5 kHz uppmäts ett värde på 0,75 V_{pp}, dvs 0,265 V_{rms} som motsvaras av $20 \cdot \log(0,265) = -11,5 \text{ dB re 1V}$. Det innebär ett ljudtryck på $-11,5 - (31 - 184) = \mathbf{141,5 \text{ dB re 1 } \mu \text{ Pa}}$. Det utsända ljudtrycket stämmer således väl med det ljudtryck som tas upp av referenshydrofonen.

Det akustiska ljudtrycket som mäts upp i fiberhydrofonen registreras i volt och behöver därför konverteras till rad/ μ Pa. Referenshydrofonen har en känslighet $S = -184 \text{ dB re 1 V}/\mu \text{ Pa}$, vilket uttryckt i V/ μ Pa blir

$$S[V/\mu Pa] = 10^{-184/20} = 6,3 \cdot 10^{-10} \text{ V}/\mu \text{ Pa} \quad (7)$$

Nu finns både känsligheten och utsignalen, $U_{ut}[V] = U_{in}[V] \cdot 35,7$, uttryckta i linjära måttenheter. Nästa steg blir att blanda in ljudtrycket, $P[\mu Pa]$.

$$P[\mu Pa] = \frac{U_{ut}[V]}{G_c[V/Pa]} = \frac{U_{ut}[V]}{S[V/\mu Pa] \cdot 35,7} = \frac{U_{ut}}{6,3 \cdot 10^{-10} \cdot 35,7}, \quad (8)$$

där G_c representerar omvandlingsförstärkningen (gain conversion). Sista steget blir att skapa ett uttryck i rad/ μ Pa. Datamängden från fiberhydrofonen finns redan i [rad] så det som återstår är en division med trycket P

$$\frac{FOH[rad]}{P[\mu Pa]} = \frac{FOH \cdot 35,7 \cdot 6,3 \cdot 10^{-10}}{U_{ut}} \text{ rad}/\mu \text{ Pa.} \quad (9)$$

Jämförelser mellan element av olika dimension möjliggörs genom att normera ekvation (9);

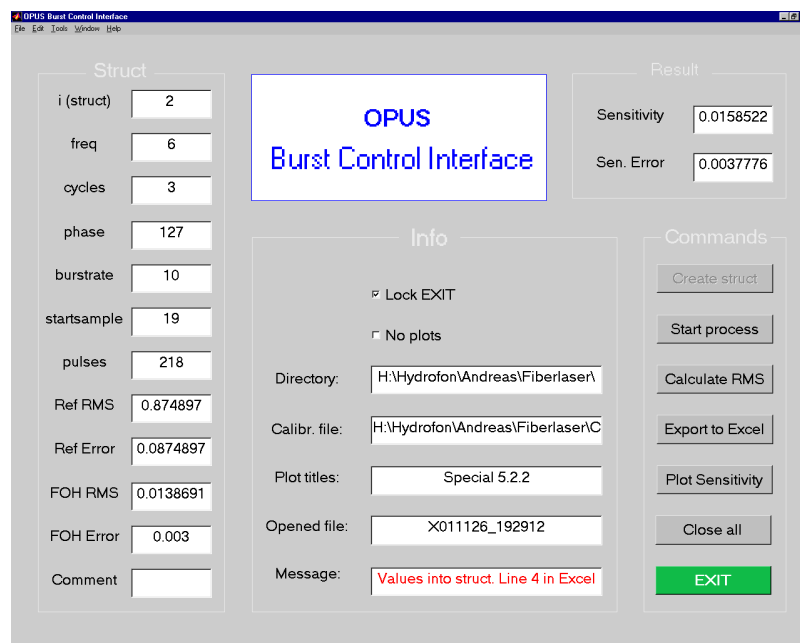
$$\phi[\text{rad}] = L[m] \cdot \frac{2\pi n}{\lambda[m]} \quad \text{där} \quad \begin{cases} L = \text{elementets längd} \\ n = 1,5, \text{ brytningsindex} \\ \lambda = 1,55 \cdot 10^{-6}, \text{ laservåglängd} \end{cases} \quad (10)$$

$$\frac{FOH[\text{rad}] \cdot 10^6 [\mu\text{Pa}/\text{Pa}]}{P[\mu\text{Pa}] \cdot \phi[\text{rad}]} = \frac{FOH \cdot 10^6}{P \cdot \phi} = \frac{FOH \cdot 35,7 \cdot 6,3 \cdot 10^{-10} \cdot 10^6}{U_{ut} \cdot \phi} \text{ 1/Pa.} \quad (11)$$

Data från referenshydrofonen sparas av den modifierade versionen av Quartet. Vid de högre frekvenserna i intervallet 5-20 kHz börjar signalamplituden fluktuera, troligtvis p g a att spänningsförstärkningen är för stor för sändarhydrofonen, och därför avläses spänningsvärdena även manuellt via ett oscilloskop.

Databehandling

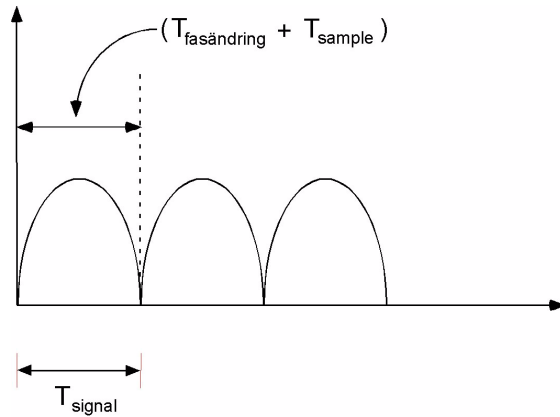
Innan datainsamling sker första gången på ett nytt hydrofonelement utförs en kalibreringsmätning. Vid efterföljande datainsamling samt i efterbehandling av data används denna kalibreringsfil för att vikta om signalen och tar därmed bl.a. hänsyn till de fiberoptiska snabbskarvarnas beskaffenhet, polarisation m.m. Mätdata efterbehandlas m h a ett grafiskt användargränssnitt utvecklat i MatLab, se figur 9. Rutiner finns även för att sammanställa tabell och di-



Figur 9. Grafiskt användargränssnitt utvecklat i MatLab för efterbehandling av mätdata. .

agram över parametervärden samt geometriskt normerad frekvenskaraktäristik för en specifik fiberhydrofon och mätning.

Fasgången för fiberhydrofonen är okänd och därmed måste fler än ett sample studeras. Man vet således inte exakt vid vilket fasläge som data kommer att sparas. Samplingsfrekvensen på 40 kHz inverkar också på osäkerheten i fasläget vid tidpunkten då samplet tas. För att vara säker



Figur 10. Absolutbeloppet av en sinusfunktion. För att inkludera samtliga faslägen räcker det att täcka in en halv period.

på att täcka in alla faslägen sveps faser, ϕ , manuellt mellan två ändlägen som bestäms av ekvationen

$$(T_{fasändring} + T_{sample}) = \frac{1}{2} \cdot T_{signal} \quad \text{som efter omskrivning uttrycker ändläget för faser vid en} \quad (12)$$

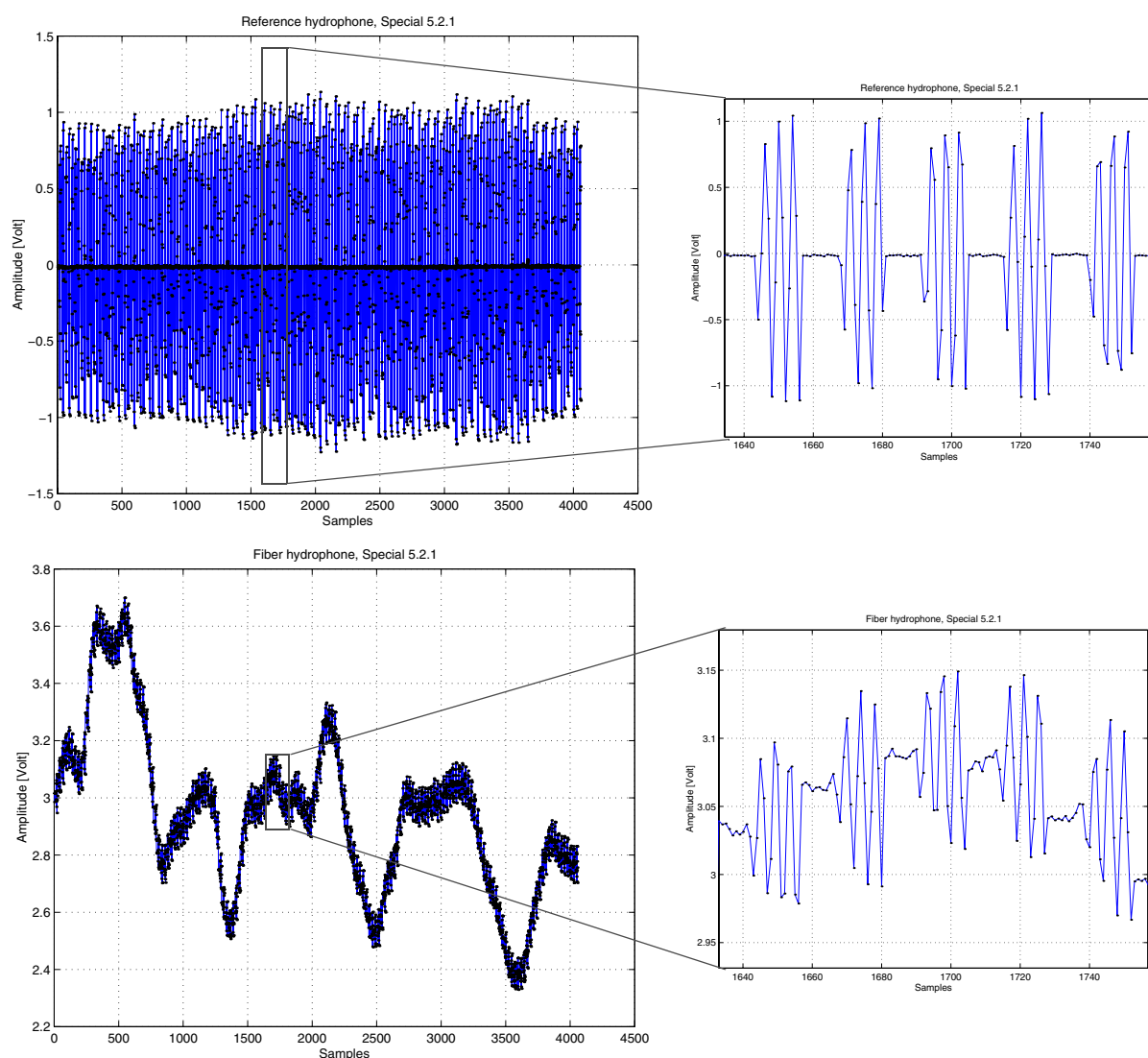
viss frekvens enligt

$$\frac{T_{fasändring}}{T_{signal}} = \left(\frac{1}{2} - \frac{T_{sample}}{T_{signal}} \right) \Leftrightarrow \frac{T_{fasändring}}{T_{signal}} = \left(\frac{1}{2} - \frac{f_{signal}}{f_s} \right) \quad (13)$$

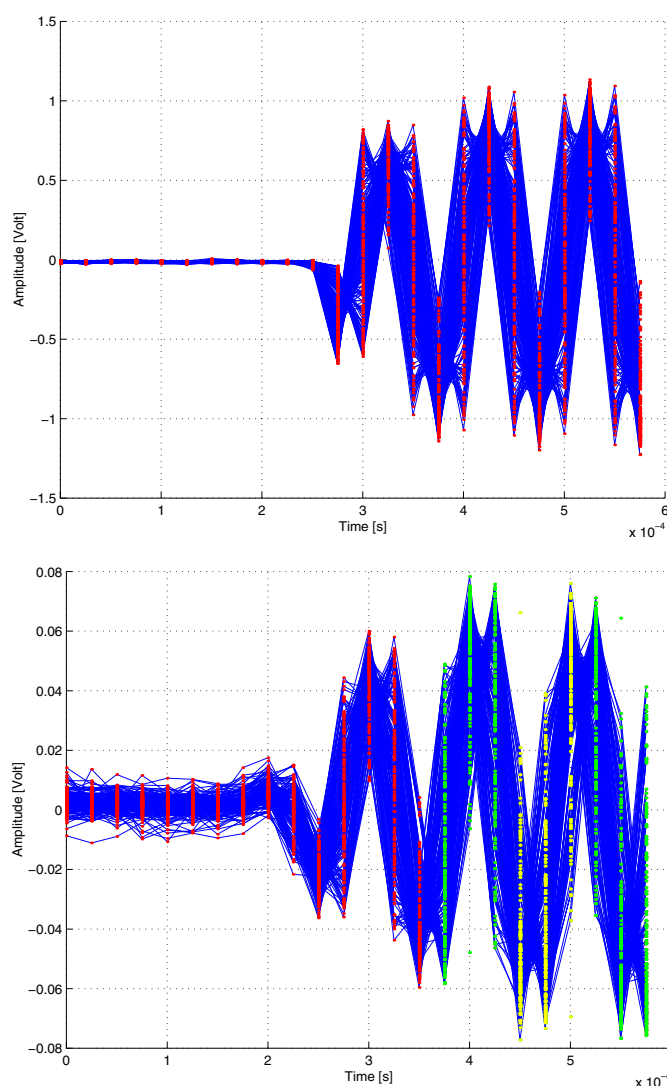
$$\Delta\phi = 360 \cdot \left(\frac{1}{2} - \frac{f_{signal}}{f_s} \right) \leq 180 \quad \text{där } f_s \text{ är samplingsfrekvensen (40 kHz).} \quad (14)$$

För en puls med frekvens 5 kHz sveps faser mellan $0-135^\circ$, medan samplingsfrekvensen självt bidrar med tillräcklig fasspridning vid 20 kHz. Tre närliggande samples har utnyttjats genomgående vid beräkning av RMS-värden.

Om man jämför de två bilderna i figur 11 ser man en variation av off-set nivån för respektive puls orsakad av temperaturdrift. Denna variation korrigeras av en egenutvecklad differentiellt överlagrad flersamples-metod. Korrektionen sker genom att skifta upp/ner enskild puls ett värde motsvarande skillnaden mellan amplitudmedelvärdet för totala antalet samples och medelvärdet för de sista 16 samples av 24 som ingår i aktuell puls, se grönmärkade samples i figur 12. Förfaringssättet upprepas för samtliga enskilda pulser. Anledningen till att denna egenutvecklade mätteknik används är att signalstyrkan är extremt svag.



Figur II. Överst: Pulser registrerade av referenshydrofonen. Nederst: Pulser registrerade av fiberhydrofonen. Temperaturdrift orsakar en slumpvis varierande off-set av pulsernas signalnivå. Resultatet härstammar från Special 5.2.1 vid 10 kHz.



Figur 12. Överst: Överlagrade pulser från ref. hydrofon. Nederst: Överlagrade pulser registrerade av fiberhydrofonen. Resultatet härstammar från Special 5.2.1 vid 10 kHz.

Avslutningsvis utförs en pulsöverlagring illustrerad i figur 12 från en av mätningarna. Teoretiskt tar det 0,27 ms innan pulsen når fram till fiberhydrofonen och därefter ytterligare 0,36 ms innan den första reflexen träffar hydrofonelementet, dvs totalt 0,63 ms. Små avvikelser i avstånden mellan sändare, referenshydrofon och fiberhydrofon gör att tidsluckan för datasamling sätts till 0,8 ms. Med en pulsrepetitionsfrekvens på 10 Hz, dvs 100 ms mellan varje ny puls, klipper man bort en stor del av de interfererande, avklingande reflexerna, i syfte att reducera datamängden. Därefter återstår att överlagra pulserna och beräkna RMS-värden på tre närliggande kollektioner av samples, typiskt sample 19-21 av 24 möjliga, se gulmarkerad del i figur 12.

Mätosäkerheter

Algoritmen utnyttjar tre kollektioner av samples vilket ger tre RMS-värden per puls i en mätning, vi kan kalla dem *RMS1*, *RMS2* och *RMS3*. Låt medelvärdet av dessa värden tillhörande fiber- och referenshydrofon betecknas x_1 respektive x_2 . Antag att en mätning innehåller 100

pulser då erhålls totalt 300 RMS-värden. Skillnaden mellan det största och minsta värdet för t.ex. de 100 RMSI-värdena blir ett spridningsmått för hydrofonen. Ingen hydrofon har större spridning än $\Delta x_1 = 3 \cdot 10^{-3}$ (s: sample kollektion) och sätts därför fixt för samtliga hydrofoner.

Det totala felet, $u(x_1)$, för fiberhydrofonen blir med $n = 3$ sample kollektioner

$$u(x_1) = \sqrt{\sum_{s=k}^{k+n-1} \frac{(\Delta x_1)^2}{n}} = 3 \cdot 10^{-3} \text{ där } k \text{ anger den första kollektionen} \quad (15)$$

av tre sammanhängande. Den statistiska variationen mellan mätningarna uppgår till 10% för x_2 och betecknas med $u(x_2)$. Dessa variationer kan t.ex. orsakas av potentiometrar eller värmeutveckling i kretsarna till signalgeneratorerna.

Känsligheten beräknas som kvoten mellan svaret från fiberhydrofonen och referenshydrofonen och det totala felet för känsligheten tar hänsyn till de två ingående felstorheterna $u(x_1)$ och $u(x_2)$ genom en differentieringsmetod [6].

$$\Delta \Phi = \sqrt{\sum_{i=1}^N \left(\frac{\partial}{\partial x_i} f \right)^2 u^2(x_i)} = \sqrt{\frac{1}{x_2^2} \cdot 9 \cdot 10^{-6} + \frac{x_1^2}{100}} \quad (16)$$

där $f = \frac{x_1}{x_2}$ och $N=2$.

Vid iläggning och praktisk hantering av såväl för luften fritt exponerade fibrer som själva fiberhydrofonelementet utsätts dessa delar för kroppsvärme i form av handberöring. Det tar tid innan termisk jämvikt har uppnåtts mellan det rumstempererade vattnet i tanken och fiberhydrofonen. När elementet sänks ner i vattentanken uppstår även turbulens som kan ha viss inverkan på resultatet om mätningen påbörjas för tidigt. För att reducera eventuella effekter av dessa störkällor startades mätningarna 15-30 min efter iläggning.

En annan viktig källa till systematisk avvikelse är att mätningen sker under en insvängningsfas då hydrofonerna ännu inte uppnått ett stationärt tillstånd. För att komma runt denna osäkerhet skulle en större mättank som medger ökad mättid krävas. Vi bedömde dock att mätresultaten pga denna omständighet ej avviker avsevärt från den sanna känsligheten. Dessutom ger avvikelsen i så fall upphov till en underskattning av den akustiska känsligheten.

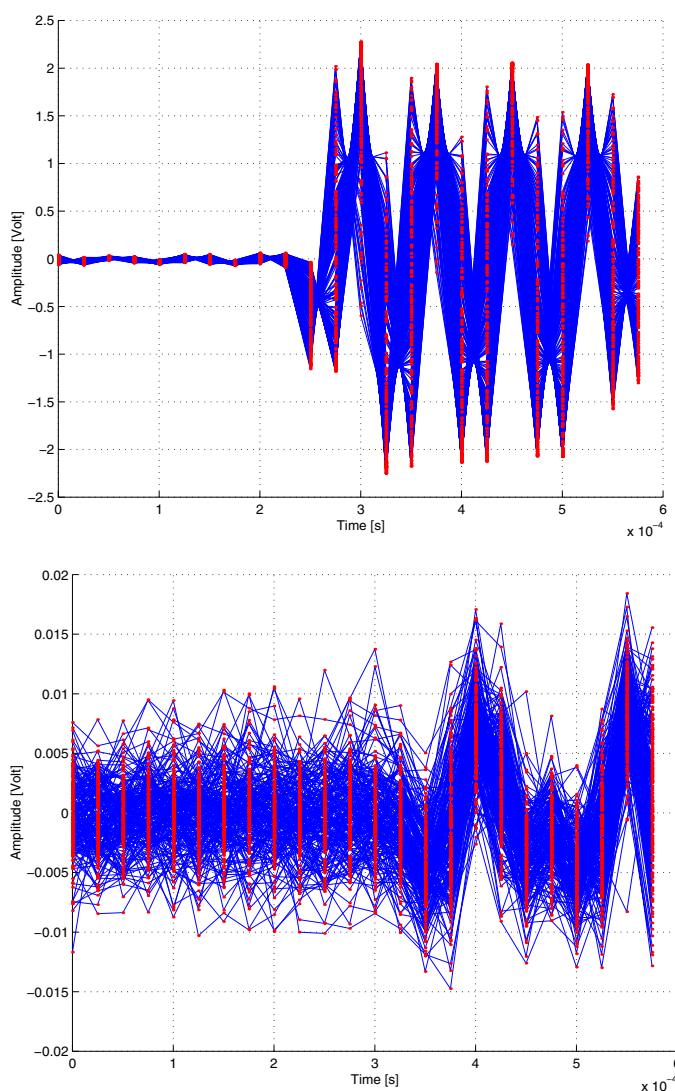
3.3.1 Resultat

Känsligheten för de plana elementen varierar måttligt för de olika mikrosfärblandningshalterna i kombination med Araldit. De övriga kompositmaterialen har likartad karaktäristik där inget material har väsentligt högre förstärkningsförmåga än någon annan. För de plana elementen kan inga resonansfenomen konstateras.

För att utreda huruvida en bar respektive en plasthöljebeklädd referensfiber har inverkan på karaktäristiken samt om dess placering framför eller bakom elementet är av betydelse utfördes mätningar på ett och samma element (Araldit, 60 vol-% mikrosfärer) med alla kombinationsmöjligheter. Mätningar med elementets ytskikt riktat från sändaren respektive mot sändaren utfördes också. Om det är så att mikrosfärerna flyter upp till ytan under härdningsprocessen och inte blandar sig jämnt i gjutformen skulle detta kunna ha inverkan på mätresultatet. Inga enty-

diga resultat på att så är fallet har kunnat påvisats, därigenom inte sagt att mikrosfärerna fördelar sig jämnt i materialet utan troligtvis är de plana elementen inhomogena i den aspekten medan blandningen i stängerna är mer homogen p g a att de har en annan geometri och mindre volym.

För flertalet av stängerna uppstod egenresonans, se figur 13. Denna resonansfrekvens är samma oavsett vilken resonansbenägen stång man studerar och uppskattas till 6-8 kHz. Även specialstavarna påvisar resonansfenomen dock vid en något högre frekvens 10-12 kHz, vilket möjligen kan förklaras med att de är något kortare.



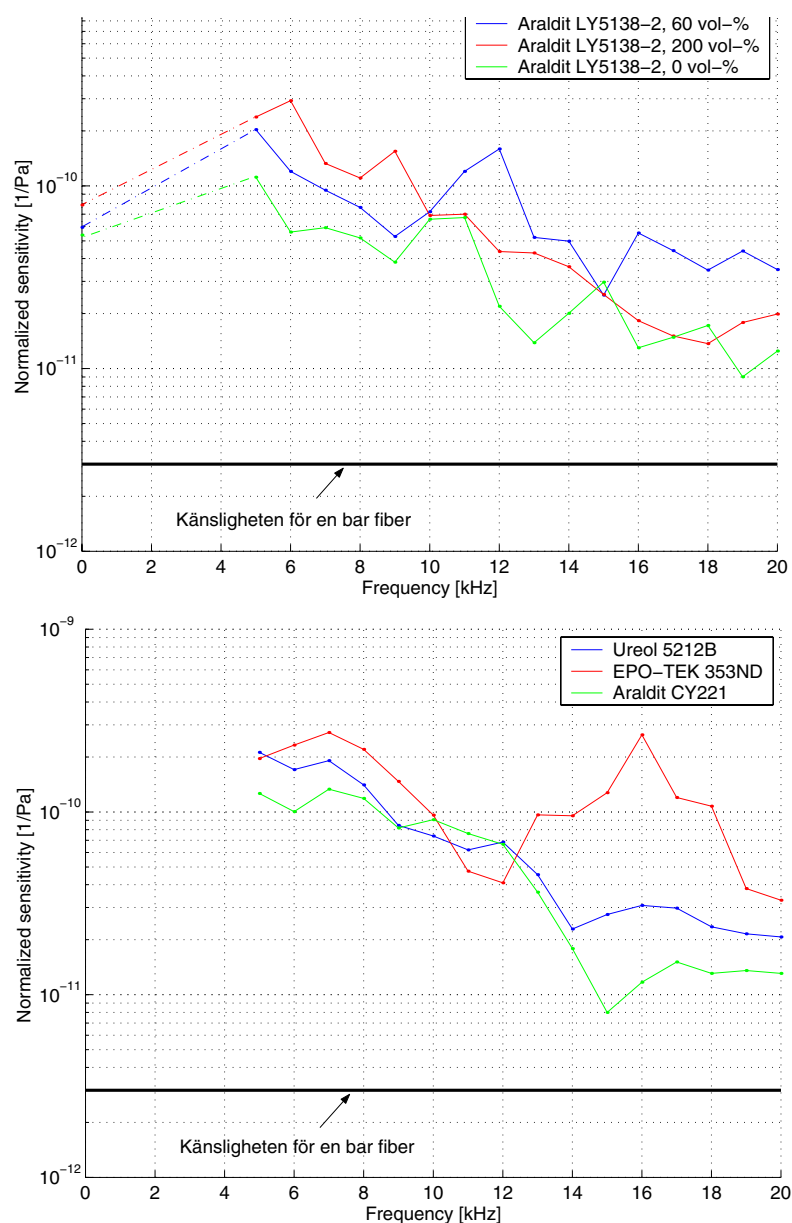
Figur 13. Överst: Referenshydrofon med samtliga pulser överlagrade. Nederst: Fiberhydrofonen med pulsöverlagring. Här interfererar resonansfrekvensen med signalen (Special 4, 14 kHz).

3.3.2 Frekvenskaraktäristik

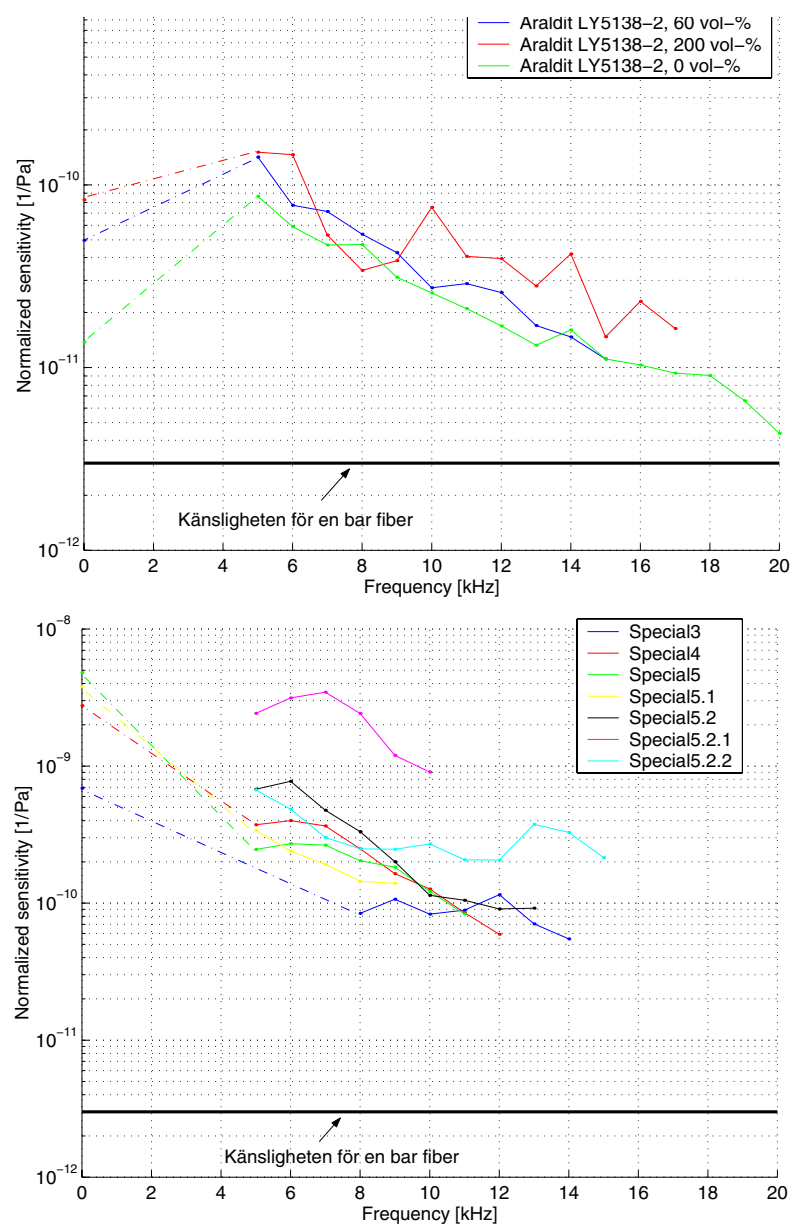
Frekvenskaraktäristiken för plana element och cylinderformade geometrier anpassade för fiberlaser har fastställts för frekvensbandet 5-20 kHz med vissa undantag. En del av stängerna påvisade självresonans för högre frekvenser, generellt >14 kHz, och därför presenteras bara tillförlitliga delintervall för dessa stänger. De plana elementen påvisar ingen resonans vilket däremot merparten av stängerna gör. Den nedre gränsen för de dynamiska mätningarna är 5 kHz och i de fall där även statiska mätningar förekommer indikeras detta med en punktstreckad interpolation ner till DC-nivån, se figur 14.

Känsligheten för en bar fiber utan akustiskt förstärkande material är $3 \cdot 10^{-12}$ Pa och med det som utgångspunkt åstadkommer ingjutningsmaterialen i de plana elementen generellt sett en förstärkning i storleksordningen 20 ggr. En hög blandningsmängd av mikrosfärer höjer känsligheten en aning för frekvenser mellan 5-10 kHz. Känsligheten för övriga tre material står dock i paritet med 200 vol-% mikrosfärblandningens nivå och entydiga resultat som skulle kunna förespråka ett enskilt ämne saknas.

När det gäller cylinderstavarna är materialvalet mer avgörande. Araldit LY5138-2 med och utan mikrosfärer förstärker töjningarna i fibern i storleksordningen 10 ggr medan specialstavarna åstadkommer en förstärkning på upp till 100 ggr. Special 5.2.1 är känsligast med ytterligare nästan en faktor 10 och står i en klass för sig. I skrivande stund har ännu inga resultat från statiska mätningar på Special 5.2.1 kunnat presenteras men om DC-nivån också hamnar kring $3 \cdot 10^{-9}$ Pa kan denna lösning vara ett tänkbart alternativ att applicera på en fiberlaser, se figur 15.



Figur 14. Frekvenskaraktäristik för plana element där den övre bilden med mikrosfärblandning även innehåller DC-värden från de statiska mätningarna.



Figur 15. Frekvenskaraktäristik för cylinderstavarna. Notera särskilt den höga känsligheten för Special 5.2.1.

4 Diskussion

De luftfyllda glasmikrosfärerna kan ha benägenhet att flyta upp till ytskiktet under härdningsprocessen och dessutom fördelas förmodligen mikrosfärerna ojämnt i Aralditen. Ingjutningarna utfördes inte i vakuum och det finns därför en möjlighet att elementen innehåller luftbubblor.

En annan osäkerhet gäller RMS-värdena från referenshydrofonen. Det finns två sätt att behandla informationen från referenshydrofonen, dels låta algoritmen beräkna referensvärden på samma sätt som för fiberhydrofonen med tre närliggande medelvärdesbildade kollektioner av samples och dels använda manuellt avlästa oscilloskopvärden. Om dessa RMS-värden underskattas kommer känsligheten att öka eftersom man utför en division mellan svaret från fiber- och referenshydrofonen, med referenshydrofonen i nämnaren.

Stickprovskontroller på en del mätningar, där avvikelserna mellan de två förfaringssätten jämförs, visar att algoritmens beräknade värden är något högre vid höga frekvenser (>15 kHz) än de avlästa. Känsligheten för de plana elementen har uteslutande baserats på algoritmens beräknade värden eftersom vi i det tidiga skedet av mätningarna inte hade någon anledning att misstro den utsända signaleffekten. Orsaken till det är att signalen *inte* förstärktes 20 ggr under dessa mätningar, se figur 7 sidan 19. Cylinderstavarna utsattes dock för 20 ggr högre signalstyrkor och då kunde variationer av signalamplituden observeras. Sändarhydrofonen blev troligen överbelastad med påföljd att signalstyrkan inte längre ökade linjärt.

Ett sätt att öka töjningsförstärkningen hos materialen är att blanda in mikrosfärer för att få ett porösare material och justera E-modulen och Poissons tal på önskvärt sätt. Effekterna av denna inblandning är dock något under förväntan och för de plana hydrofonerna kan man diskutera om det lönar sig att tillsätta mikrosfärer. Visserligen ökar förstärkningen men ser man till syftet att ytbeklä ett ubåtsskrov med denna typ av sensor är det troligtvis inte nödvändigt.

För applikationen fiberlasersensor ställs högre krav på töjningsförstärkning. Detta uppnås inte av en kombination av Araldit och mikrosfärer vilket föranledde en helt ny typ av gränssnitt mellan det akustiska ljudtrycket i vattnet och fibern. Utvecklingen av specialstavarna började med Special 3 som skiljer sig markant från övriga specialare i både konstruktion och utseende. Därefter följde Special 4 osv i stigande ordning till Special 5.2.2. De sista versionerna ser ut att ha önskvärda egenskaper.

Nästa steg är att mäta på en fiberlasersensor i vatten utan töjningsförstärkande gränssnitt, för att därefter beklä sensorn, troligtvis med en av de senaste specialstavarna. Om förstärkning m.m. visar sig vara tillfredsställande har vi för avsikt att studera en array av fyra likadana fiberlasrar med den senaste gränssnittslösningen.

Vattentankens dimensioner satte en nedre begränsning av det mätbara frekvensområdet till 5 kHz och vidare mätningar kommer även att inbegripa en större vattentank för att kunna mäta vid lägre frekvenser.

5 Referenser

- [1] P. E. Martinsson, F. Kullander, B. Knuthammar, *Construction and evaluation of a planar fiber-optic hydrophone for military applications*, Linköping: FOA 2000, 50 sidor, FOA-R--00-01481-409--SE
- [2] F. Kullander, B. Knuthammar, *Fiber laser hydrophones, an introductory survey*, Linköping: FOA 2000, 32 sidor, FOA-R--00-01779-409--SE
- [3] CSM Materialteknik AB, *Mätning av E-modul hos plastprovstavar*, Teknisk rapport, 2001, TEK01-0178
- [4] F. Kullander, S. Gruffman, C. Laurent, S. Zyra, *Ny metod för demodulering och linjärisering av utsignalen från en fiberoptisk interferometer*, Linköping: FOA 1996, 48 sidor, FOA-R--96-00305-3.1--SE
- [5] F. Kullander, M. Andersson, A. Olsson, *Demonstration of a four element fiber optic hydrophone cable*, Linköping: FOA 2000. 81 sidor. FOA-R--00-01778-409--SE
- [6] J. Lindskog, *Mätvärdesbehandling*, Sandtorp Consult AB, 1996, ISBN 91-972122-8-8