



## VSR næste generation- Slutrapport

**ELFORSK projektnummer:**  
351-035

**Projektleder:**  
Charlotte Frølund Ilvig, DAMRC

**Projektansvarlig virksomhed:**  
DAMRC F.M.B.A.  
Sandagervej 10  
7400 Herning

**Titel:**  
VSR – næste generation

**Projektleders e-mail:**  
[chi@damrc.com](mailto:chi@damrc.com)

**Projektpartnere:**  
Aarhus Universitet,  
Institut for Bio- og Kemiteknologi  
Gustav Wieds Vej 10  
8000 Aarhus C

Mercantec  
H.C. Andersensvej 9  
8800 Viborg

**Projektperioden:**  
21. marts 2019 – 15. januar 2022

**Version:**  
1.0 (30.november 2021)



## En stor tak til...

- ELFORSK-fonden, der med sin økonomiske og formidlingsmæssige støtte til dette projekt er med til at skabe rammerne for at yderligere energi- og miljøoptimeringer kan finde sted i den danske bearbejdningsindustri.
- Tak til Aarhus Universitet – Jens Vinge Nygaard og Lars Vabbersgaard for deres sparring og gode input.
- Tak til Mercantec for al hjælp med programmering, automation og installation i forbindelse med projektet.
- Tak til alle partnere der hjælper med at viderebringe projektets resultater til den danske bearbejdningsindustri.
- Teamet hos DAMRC for at være med til at få projektets tekniske, administrative og formidlingsmæssige opgaver udført på fornemste vis.

## Indholdsfortegnelse

1.	1	Projektets formål .....	4
	1.1	Dansk resume af projektets proces, anvendt metode og opnåede resultater .....	5
	1.2	Engelsk resume af formål, resultater og videre anvendelse af resultater .....	5
2.	2	Konklusion af projektets resultater, herunder en beskrivelse af den opnåede energibesparelse .....	6
	2.1	Projektledelse og administration (WP1) .....	6
3.	3	Identifikation af relevante projektpartnere og industrielle projektdeltagere (WP2) .....	6
4.	4	Dokumentation af VSR-teknologiens effekt (WP 3) .....	8
	4.1	Dokumentations-metoder .....	8
	4.1.1	Beskrivelse af akustisk emissionsudstyr: .....	8
	4.1.2	Røntgen diffraktion .....	10
	4.2	Feedback fra virksomheder .....	11
	4.2.1	Virksomhed nr. 3 – Akustisk emission .....	11
	4.2.2	Virksomhed nr. 1 – Røntgenstrålediffraktion .....	11
	4.2.3	Virksomhed nr. 2 – Modal Analyse .....	12
	4.2.4	Virksomhed nr. 7 .....	12
	4.2.5	Virksomhed nr. 6 .....	14
	4.2.6	Virksomhed nr. 8 .....	16
	4.3	Aarhus Universitet .....	17
	4.3.1	FEA-studie .....	17
	4.4	Eksperimentel modal analyse .....	18
	4.4.1	Analyse ved hjælp af eksperimentel Modal analyse .....	18
5.	5	Industrialisering af VSR-teknologien (WP4) .....	28
	5.1	Forsøg med multiple systemer .....	28
	5.1.1	Automationsalgoritmer .....	29
	5.2	Multibel behandling .....	31
	5.2.1	Virksomhed nr. 6 .....	31
6.	6	Tilpasning af industrityperne emnestørrelser (WP5) .....	37
	6.1.1	Forsøg med Pneumatisk motor .....	38
	6.1.2	Højfrekvent motor .....	41
	6.1.3	Instruktioner til brug af nyt VSR-udstyr .....	43
	6.1.4	Multipel behandling .....	44

6.1.5	Behandling af emner fra Virksomhed nr. 10 .....	46
6.1.6	Beregning af el-forbrug .....	49
6.1.7	VSR/TSR omkostninger .....	49
7.	7 Perspektivering og videre anvendelse af resultater .....	50
8.	8 Konklusion .....	51
9.	9 Oversigt over gennemførte formidlingsaktiviteter i projektperioden .....	51

# 1 Projektets formål

Helt overordnet skal projektet imødegå industrielle barrierer og sikre en udrulning af VSR-teknologien til den danske bearbejdningsindustri for at realisere så stor en energibesparelse som overhovedet muligt. Det involverer:

- 1) at teknologien dokumenteres gennem udvikling af et monitoreringssystem
- 2) at teknologien industrialiseres og gøres mindre manuel, således at flere emner kan behandles samtidigt med reduceret behov for arbejdskraftintensiv procesovervågning
- 3) at teknologien tilpasses de typiske emnestørrelser i den danske bearbejdningsindustri således bearbejdningsindustrien kan få fuldt udbytte af teknologien og tage den til sig, idet den både løfter virksomhedernes produktivitet og globale konkurrenceevne samt bidrager til at øge sektorens samlede energieffektivitet betragteligt.

Det tidligere ELFORSK-projekt 'Energy efficient Material Normalisation with Vibratory Stress Relief' har vist, at der, ved anvendelse af den nuværende VSR-teknologi, spares mellem 72 og 99% af den energi, der bruges på traditionel varmebehandling (TSR) – den største reduktion ses ved behandling af store emner. Derudover har projektet i flere konkrete behandlinger vist en markant reduktion af bearbejdningsstid, hvor bearbejdningsstiden af et specifikt emne kunne reduceres fra 12 til 5 timer. Projektet har derudover vist, at det nuværende set-up egner sig bedst for emner med egenvægt på 75 kg eller derover. Formålet med dette nye projekt er bl.a. at forøge effektiviteten af VSR-behandlingen, samt dokumentere at emner ned til 7,5 kg kan behandles effektivt. Såfremt projektet er succesfuldt, er det sandsynligt at VSR-behandling kan gøres 10 gange billigere.

Først skal projektet adressere den manglende dokumentation af VSR-metoden, for videnskaben har kun præsenteret fænomenologiske beskrivelser af hvordan teknologien virker. Der mangler fortsat en detaljeret forståelse af hvordan komplekse vibrationsmønstre kan reducere materialernes indre spændinger ved at inducere forandringer i krystalstrukturens organisering. Derudover er der endnu ikke fundet effektive, ikke-destruktive metoder til måling af materialespændinger i løbende produktion. Denne barriere søger denne del af projektet at eliminere og skaber dermed mulighed for, at industriens energiforbrug mindskes og konkurrencekraften øges. Det skal ske ved at arbejde med akustisk emission, hvor lyd udsendes ved frekvenser over det hørbare område. Ved ændringer i metaller, eksempelvis revnedannelse i et kugleleje, udsendes der lyd med en frekvens på omkring 700-900.000 Hz. Det samme ventes at ske ved normalisering af metaller, hvor en ændring i metalgitteret forventes at udsende lyd i samme frekvensområde. Denne antagelse bakkes op af en række eksperter fra SDU, AAU, Kistler og Swerea KIMAB. Kistler har tidligere udviklet løsninger til levetidsovervågning af kuglelejer i vindmølleindustrien baseret på akustisk emission. Det er lignende udstyr samt metoden Barkhaus Noise, DAMRC vil anvende til at monitorere og dokumentere effektiv normalisering af komponenten og dokumentere VSR teknologiens effekt på materialet. Projektets mål om at industrialisere VSR-teknologien sigter dels mod at reducere omkostningerne for den enkelte, behandlede komponent og dels mod udvikling af en reproducerbar proces med ensartet resultat på tværs af de samtidigt behandlede emner og reduceret behov for manuel overvågning. Denne del af projektet, der indbefatter videreudvikling af fysisk udstyr,

gennemføres i samarbejde med en række virksomheder, der stiller emner til rådighed for test og evaluering. Projektet inkluderer bl.a. 1) udvikling af emnespecifikke fiksturer, 2) systemer for procesovervågning med multiple sensorer samt 3) softwarebaserede resultatudlæsningsfunktioner. Projektets mål om at tilpasse VSR-teknologien til de typiske emnestørrelser i den danske bearbejdningsindustri skal nås ved at udvikle udstyr til højfrekvent VSR-behandling. Dette involverer både teknologi- og metodeudvikling samt udvikling af instruktionsmateriale til industrien.

## 1.1 Dansk resume af projektets proces, anvendt metode og opnåede resultater

Projektet er bygget op omkring identifikation af virksomheder, som har emner i en størrelse der er egnet til at udvikle og teste VSR-teknologien af frem mod en anvendelsesform der er økonomisk fordelagtig ved anvendelse til mindre emnestørrelser - herunder dokumentation af VSR-behandlingens effekt. For at kunne opnå dette bringes forskellige tekniske systemer og udstyr i brug. DAMRC har bl.a. undersøgt og anvendt akustisk emission og Røntgen Diffraction til at kortlægge spændinger i emnerne, for derved at undersøge om disse metoder kan anvendes til dokumentation af spændingerne. Der er anvendt Modal Analyse (Taptest) – udstyr og software til at dokumentere egenfrekvensen på emnerne. Det har ikke været muligt med akustisk emission eller Røntgen Diffraction at opnå svar der giver mulighed for at koble VSR-behandlingen direkte med spændingsforandringer. Derudover er der blevet dokumenteret hvilke fejlkilder der kan være i forbindelse med udførelsen af VSR. Dette kan være både tilspænding, opstilling, og emnets egenfrekvens. Dette er gjort med henblik på at skabe reproducerbarhed, ved de tests der er lavet til fordel for kommende projekter.

Efter undersøgelsen af forskellige dokumentations metoder og parametre der gør sig gældende for en succesfuld VSR-behandling, er effekten af VSR blevet dokumenteret, ved succesfuldt at behandle for residuals pændinger.

For at reducere omkostninger i forbindelse med behandling af mindre emner, er der gennem konkrete forsøg i samarbejde med bearbejdningsvirksomheder, udviklet fikstur-løsninger og behandlingsmetoder. Dette gør det muligt at opnå et ensartet resultat for samtidig behandlede emner. Der blev eftervist at en enkelt tekniker har kunnet styre 2 sæt udstyr ad gangen og derved opnå dobbelt så mange behandlinger. Endvidere blev der testet for muligheder for multipel behandling ved at skabe ensartethed omkring de faktorer der blev fundet vigtige i WP3. Der blev ligeledes set på muligheden for behandling af mindre og mere industritypiske emner. Samtidig er det bekræftet, at endnu mindre emner har højere egenfrekvens og dermed ofte også er udenfor eksisterende VSR-udstyrs rækkevidde på 133 Hz.

I WP5 er der som det første afprøvet en pneumatisk motor, som har kunne køre op mod 208 Hz. Samtidig har DAMRC designet, tegnet og fremstillet en ny VSR vibrationsenhed hvor målet var at kunne opnå 333 Hz. Denne enhed er med DAMRC's viden den eneste der findes og det forventes at den kan muliggøre behandling af mindre emner. Vibrationsenheden har indtil videre opnået vibrationer med 192 Hz målt på vibrationsenheden med den nuværende indkøbte motor. DAMRC er overbeviste om, at der vil være mulighed for at nå højere hvis større motor og frekvensomformerer tilkøbes og installeres.

## 1.2 Engelsk resume af formål, resultater og videre anvendelse af resultater

The project is built around identification of companies that have workpieces in a size suitable for developing and testing of the VSR technology, and push VSR application to be economically feasible for smaller item sizes – this includes documentation of the effect of VSR treatment. To achieve this, various technical systems and equipment are put to work. DAMRC has among others investigated and used acoustic emission and X-ray Diffraction to map residual stress in the workpieces and investigated whether these systems could be used to document the residual stress. Modal Analysis (Taptest) equipment and software have been used to document the natural frequency of the items. It has been concluded that both technologies acoustic emission and X-ray diffraction could not provide a clear coherence between the VSR treatment and the residual stresses. In addition, it has been documented which sources

cause errors in connection with the execution of VSR. This can be both tightening, setting up, and the subject's natural frequency.

To reduce costs for each workpiece in the treatment of smaller items, experiments in collaboration with processing companies that have provided specific items have been executed. Experiments have involved fixture solutions and treatment methods that make it possible to achieve a uniform result for simultaneously treated items. It was proven that a single technician can control 2 sets of equipment at a time and thereby achieve twice as many treatments. Furthermore, possibilities for multiple treatment were tested by creating uniformity around the factors that were found important in WP3. The possibility of dealing with smaller and more industry-typical issues was also looked at. At the same time, it has been confirmed that smaller workpieces have a higher natural frequency and thus are often also outside the range of existing VSR equipment at 133Hz.

In WP5, a pneumatic motor was first tested, which has been able to run up to 208Hz. At the same time, DAMRC designed, drew, and manufactured a new VSR vibration unit where the goal was to be able to achieve 333Hz. This device is the only one that exists – as far as we know - and is expected to be able to put us a big step forward in dealing with small parts. The vibration unit has so far reached 192Hz on the vibration unit with the currently purchased motor. DAMRC is convinced that it will be possible to reach higher if a larger motor and frequency converter is purchased and installed.

## 2 Konklusion af projektets resultater, herunder en beskrivelse af den opnåede energibesparelse

### 2.1 Projektledelse og administration (WP1)

Projektet har 3 deltagende partnere; DAMRC som er projektleder og gennemgående udførende, såvel som kontakt til virksomheder samt analyser og alle fysiske tests og rapportering. Aarhus Universitet har bistået med sparring omkring fri-fri behandlinger samt bidrag i form af en FEA-analyse (Finite Element Analyse), samt deltaget i udvalgte projektmøder og sparring i forbindelse med slutrapportering. Mercantec har bidraget med timer fra elever omkring programmering, automation og installation. Vejleder og leder har bidraget med sparring i forhold til indkøb af motor. Alle partnere har deltaget i projektmøder og seminar. Projektledelse og administration for hele projektets periode – inkl. involvering af skiftende deltagere fra såvel DAMRC som Mercantec's elever, samt ændringer undervejs er varetaget af Charlotte Frølund Ilvig, Senior Project Manager fra DAMRC.

## 3 Identifikation af relevante projektpartnere og industrielle projektdeltagere (WP2)

Identifikationen forestås af DAMRC på baggrund af nærværende projektbeskrivelse, og min. 3-5 virksomheder ventes at skulle bidrage med konkrete emner til test-forsøg og afprøvninger.

Fra starten identificeredes 11 virksomheder, hvoraf 5 virksomheder har leveret emner. Et uddrag af de virksomheder der har leveret emner til WP3 og WP4 ses herunder. Yderligere 5 virksomheder er blevet tilføjet i løbet af projektet.

Tabel 1: Virksomheder som leverede emner det første halvår.

Virksomhed:	1	2	3	4	5
Antal emner:	4	13	15	1	8
Antal behandlede emner:	6	4	15	1	2
Emnetype:	Støbejernsemner	Aluminiumsemner	Valsede stangemner i 2 dimensioner	Svejsepart	Rør

Emnestørrelse	15,5/49/85/196k g	75kg	50kg/75kg	100kg	45kg
Resultat	X	X		X	

Felterne markeret med et X er udførte og dokumenterede opgaver.

Yderligere virksomheder har stillet emner til rådighed. Disse emner er følgende:

*Tabel 2: Virksomheder som leverede emner efter første del af projektet.*

Virksomhed:	6	7	8	9	10
Antal emner:	20	14	100	50	7
Antal behandlede emner:	13	8	100	50	7
Emnetype:	Støbejernsemner EN-GJS-500-7	Aluminiumsemner 6082-T6	Støbejernsemner	Støbejernsemner	Svejst Jern
Emnestørrelse	60kg	100kg	45kg	2,5-30kg	3-15kg
Resultat	X	X	X	X	X

## 4 Dokumentation af VSR-teknologiens effekt (WP 3)

Analyse af hvilke emnestørrelser og geometriske udformninger, der er bedst at anvende, er gennemført og det er besluttet, at gå efter emnestørrelse på max 120 kg. Tidligere forsøg har påvist, at det originale, oprindelige udstyr kan anvendes og give resultater på store emner (500 kg – 20 tons) men har de største udfordringer omkring emnestørrelser på 120 kg og derunder – ligeledes er der flest industriypiske emner i denne størrelseskategori.

### 4.1 Dokumentations-metoder

En beskrivelse af udstyr til akustisk emission er gennemført med henblik på udvælgelse og indkøb af udstyr. Der er valgt at anvende akustisk emission, idet dette skønnes at være mest validt, da den akustiske emission kan komme fra hele emnet – også indefra.

DAMRC har fået mulighed for at få gennemført en gratis test hos DTI med røntgenudstyr (StressTech) hvorved der også er mulighed for at få evalueret om denne testmetode kan anvendes.

På workshop med AU blev det aftalt, at AU bidrager med følgende 2 punkter:

1. At der opnås kontinuitet i forhold til tidligere resultater fra det tidligere VSR-projekt støttet af Elforsk (349-036) til dette nuværende VSR-projekt ved at eksperimentelle metoder og finite element analyser er koordineret.
2. Der søges at etablere de eksperimentelle resultater, der skal til for at kunne dokumentere effekterne af VSR-behandling. Konkret i forhold til finite element modellering er det målet, at der på sigt bliver etableret en visco-elastisk konstitutiv sammenhæng, der er i stand til at fange effekterne af VSR-behandlinger.

#### 4.1.1 Beskrivelse af akustisk emissionsudstyr:

Udstyret blev indkøbt fra Kistler Nordic DK, og består af en akustisk emissions (AE) sensor, hvilken er baseret på *piezo*-teknologi, sensoren hedder Piezotron® 8152C. Til optagelse af data fra sensor 8152C er der indkøbt en Piezotron® Coupler (PC) 5125C, hvilken konverterer og forstærker *IEPE* signalet fra sensor 8152C til et analogt signal der kan opsamles. PC 5125C har indbygget *highpass* filter på 50kHz og *lowpass* filter på 1MHz, mens der kan justeres på output amplituden med et *jumper gain set*, der kan sættes til 10x, 100x eller 1000x amplitude forstærkning af signal. Til strømforsyning blev brugt en almindelig laboratoriestrømforsyning fra Velleman med en outputspænding 0-30 V og strøm 0-3 A.

Til dataoptagelse er brugt et digitalt oscilloskop, Picoscope 2406B 4 channel, fra Picotech. Output fra PC 5125C sensoren bliver sendt til Picoscope gennem en coaxial BNC-stik for optimal bevarelse af signal integritet, og til hurtig overførsel da der bliver optaget med 1-5 MSa/s (millioner målinger i sekunder. Det samlede setup kan ses i Figur 1 a)

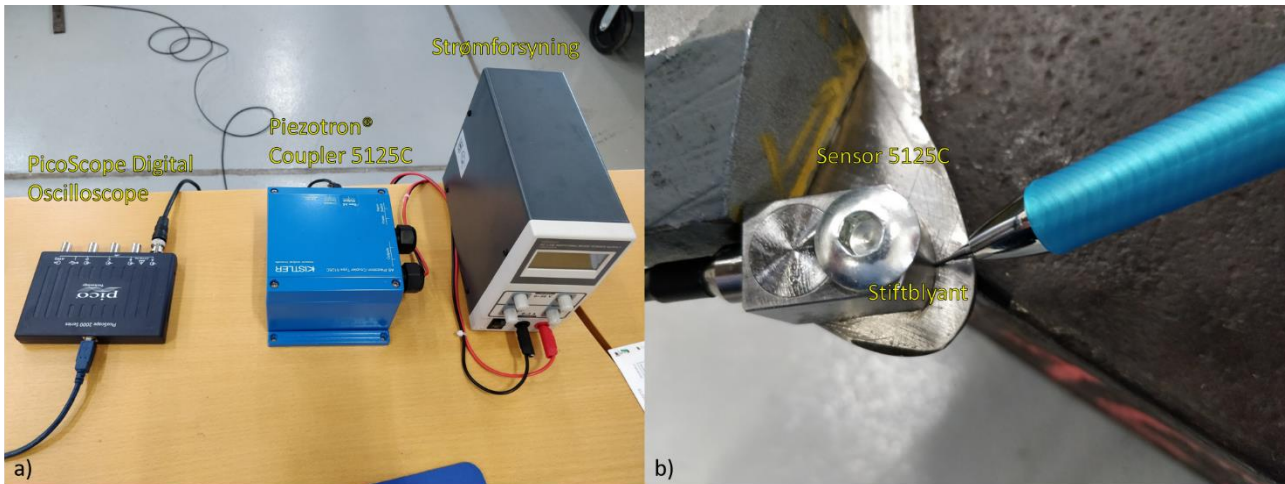
Til verificering og kalibrering af sensor, PC og digitalt oscilloskop blev der lavet en *pencil-test*. Denne metode er en standard metode til test og kalibrering af akustisk emissions udstyr<sup>1,2</sup>. En blyantstift knækkes på et emne uden for AE-sensor, for at simulere AE signaler i det rette frekvensleje.

Til *pencil-test* blev sensor 5125C monteret med en bolt og møtrik på en stålplade, under sensoren blev der sprøjtet silikone fedt til optimal mediering af vibrationer, da luft ikke kan bære vibrationer så godt som et medie som for eksempel silikonefedt, desuden er silikonefedt anbefalet af Kistler. Montage af sensor kan ses i Figur 1 b).

<sup>1</sup> Calibration of Acoustic Emission System for Materials Characterizaion S.V. Ranganayakulu et al, *Universal Journal of Materials Science* 3(4): 62-69, 2015. DOI: 10.13189/ujms.2015.030402

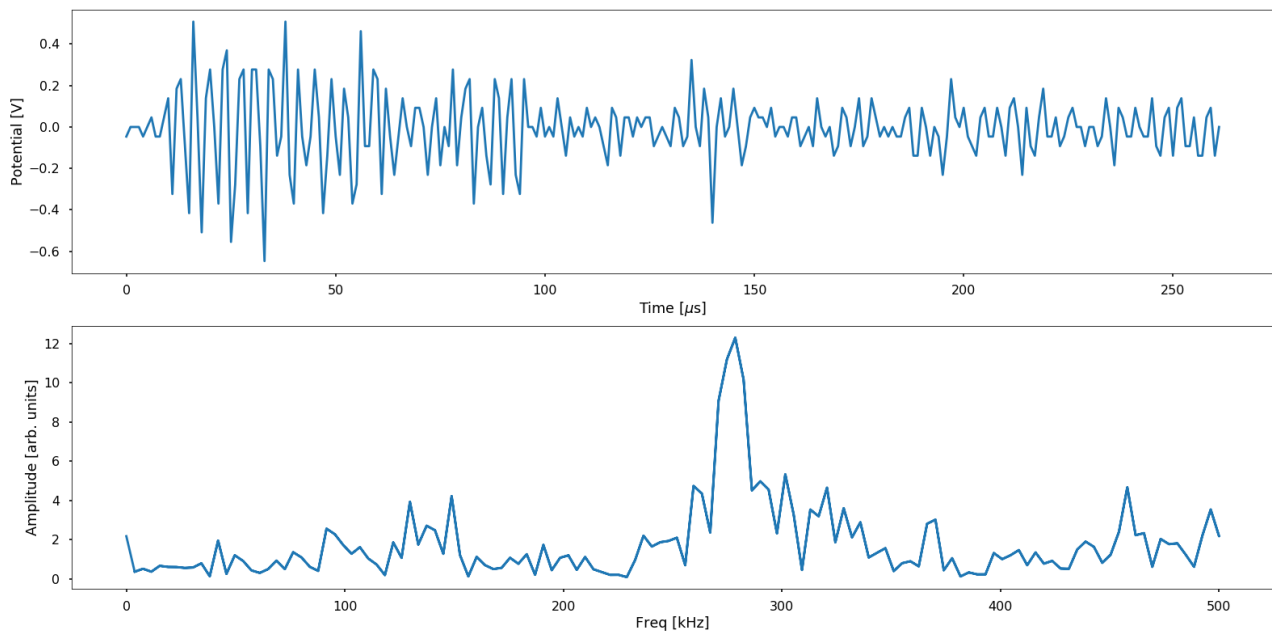
<sup>2</sup> Investigation of Pencil-Lead Breaks as Acoustic Emission Sources, M. Sause, *Journal of Acoustic Emission*, 29 (2011)





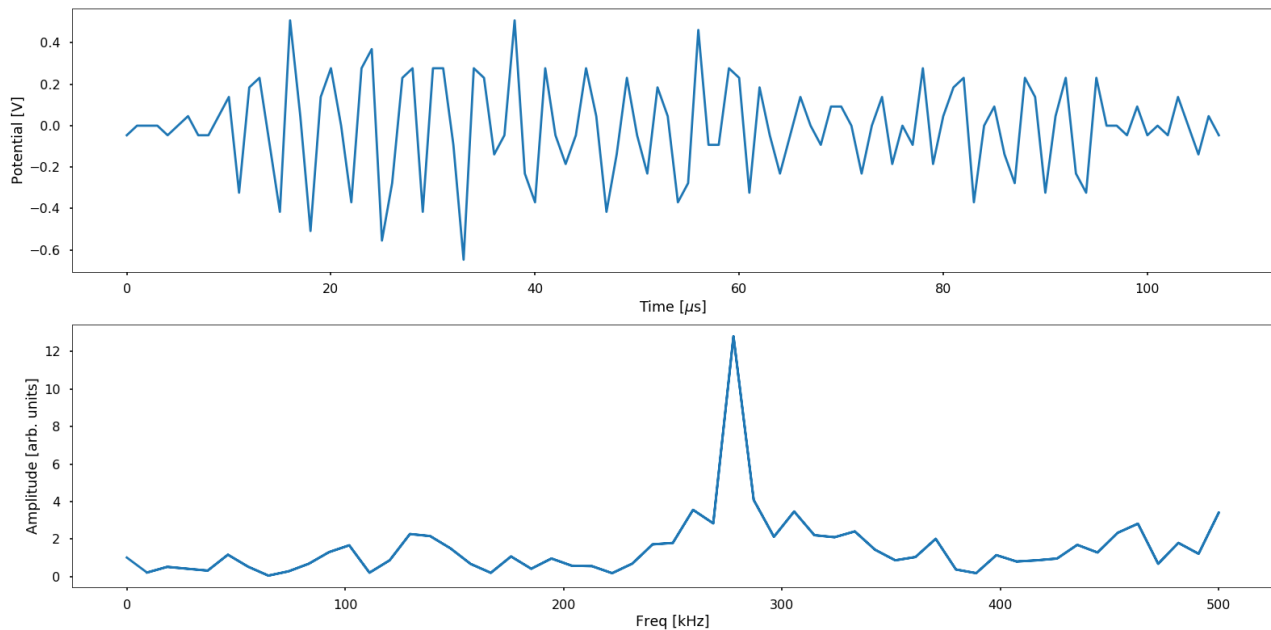
Figur 1 a) Setup af PC 5125C, Strømforsyning og Picoscope Digital Oscilloscope b) Setup af "Pencil-Test".

Testen blev gennemført med en optagelse á 1 MSa/s og 50 MSa/s vindue på optagelsen. Strømforsyningen var sat til 30 V og 0.2 A. Blystift længden var på ~2.5 mm á 0.7 mm diameter. I Figur 2 øverst ses det rå signal, hvor størstedelen af signalet er at finde i 0-100  $\mu$ s. Laves der en Fast Fourier Transformation (FFT) på signalet fås frekvensen af signalet, der kommer fra den knækkede blystift. Ser man på figuren, er der meget støj i signalet, og dette overføres til FFT signalet. Hertil kan man rydde op i signalet ved at udskære alt efter omtrent 100  $\mu$ s. I Figur 3 ses det forfinede signal, og der er et mere tydeligt peak i FFT signalet. Peaket i FFT signalet ligger omtrent 270 kHz, hvor der i litteraturen<sup>1</sup> er fundet signal ved omtrent 120 kHz. Dette kan der være basis for i blystiften, hvis det er en tyndere eller tykkere blystift eller stift med et andet materiale i, end hvad forfatterne bruger. Men ikke desto mindre, er der et signal at finde.



Figur 2 Øverst ses det rå signal fra AE-sensor 5125C. Nederst ses Fast Fourier Transformation af signalet hvor man ser frekvensen af signalet.

Da der tydeligt at størstedelen af signalet ligger fra 0-100  $\mu$ s, er der på figur 3 skåret ud så tidsintervallet der målet på, kun går på dette og det efterfølgende betragtes som støj der er skåret væk.



Figur 3 Øverst ses det rå signal fra AE-sensor 5125C. Nederst ses Fast Fourier Transformation af signalet. Som omdanner signalet så man får frekvensen på signalet

Der er blevet testet på 15 stang-emner i 2 størrelser med 3 forskellige opspændinger. Der er kommet et akustisk emissionsignal fra 8 ud af 15 emner. Der kan endnu ikke siges noget definitivt, udover at der kommer signaler fra nogle emner, men ikke hvorfor og hvornår signalerne kan forventes. Pencil-test er gennemført for hver enkelt behandling.

## 4.1.2 Røntgen diffraktion

Et emne er testet hos Teknologisk Institut med røntgenudstyr, hvorved anvendelse af denne metode er blevet evalueret – se afsnittet konklusion.

### 4.1.2.1 Vurdering af udstyr og målinger:

(Powder) X-Ray Diffraction (XRD) er ekstremt kraftfuldt til residualsændingsanalyse og kan kvantisere størrelse og retning af stress i materialeoverflader. Udstyret som Teknologisk Institut har lejet sig til, viser sig at være kraftfuldt. Endvidere er udstyret let transportabelt, og målingerne er ekstremt hurtige i forhold til laboratorie udstyr, idet man kun ser på ét diffraktionspeak. Prisområdet pr. måling på et emne lyder på ca. 150 € som vil være en yderligere udgift til VSR-behandlingen - såfremt der skal måles flere emner vil prisen sandsynligvis også falde. Det skønnes at kunne skræmme nogle virksomheder væk – særligt mindre virksomheder med små serier. DAMRC har valgt ikke at forfølge dette yderligere men kunne tages op i et efterfølgende projekt.

### 4.1.2.2 Vurdering af værdi for projekt, VSR Næste-Generation

Røntgen analysen i sig selv kan skabe værdi i dette projekt. Selvom analysen *kun* er overflade sensitiv ned til få micrometer i dybden, kan den være med til at kvantisere stress i materialeoverfladen og vurdere retningen til en reel dokumentation af VSR-behandlingen. Analysen er dog ikke en forudsætning for dokumentationen, hvis akustisk emission kan bruges. Røntgen kan dog være med til både at verificere afspænding samt validere akustisk emission som in-situ analysemetode. Herved kan røntgen metoden skabe reel grobund for brugen af akustisk emission som verificering.

### 4.1.2.3 Konklusion

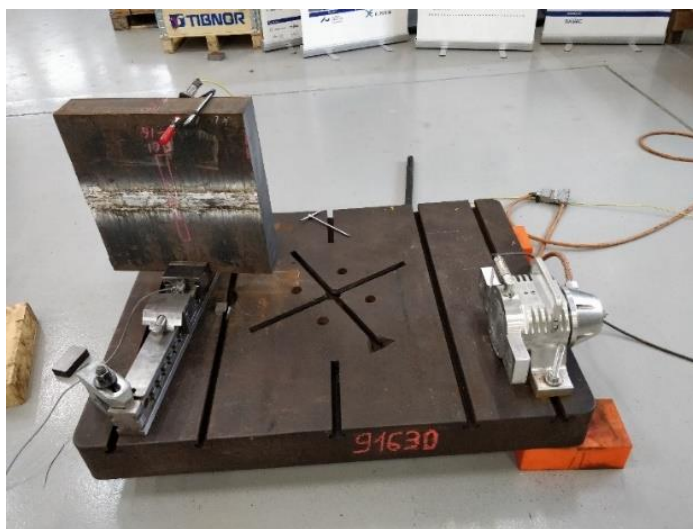
DAMRCs primære fokus skal ikke være røntgen, men kan ikke fuldstændig afvise idéen om at bruge udstyret til projektet. Ydermere skal røntgen målinger bruges som en verificering af akustiske emissionsmålinger, så DAMRC in-house udstyr kan være en valid måling på afspænding. Som anført tidligere anser DAMRC denne mulighed for at være

en meget fordyrende proces med yderligere transport af enten emne eller udstyr og en ekstra udgift på min. €150 per måling per emne som sandsynligvis vil kunne blive billigere ved flere emner.

## 4.2 Feedback fra virksomheder

### Virksomhed nr. 4 – varmebehandling kontra VSR-behandling

Virksomhed nr. 4 har haft udført WPQR, træktest og hårdhedstest. Det svejste emne fra Virksomhed nr. 4 er sammenlignet med et varmebehandlet emne, og konklusionen fra Virksomhed nr. 4 er, at VSR-behandlingen giver et tilsvarende resultat. Både det varmebehandlede emne og det vibrerede emne er blevet godkendt, men det varmebehandlede emne har en tendens til at ændre hårdheden i materialet hvilket er uønsket. I dette aspekt foretrækkes vibrationsbehandlingen.



Figur 4: opstilling af VSR-behandlet emne fra Virksomhed nr. 4

### 4.2.1 Virksomhed nr. 3 – Akustisk emission

Virksomhed nr. 3 havde sendt 15 stænger i 2 dimensioner ( $\varnothing 35\text{mm}$  og  $\varnothing 78\text{mm}$ ). Disse emner er blevet testet med VSR udstyret, og der er udført forsøg med det akustiske emissionssignal. Det akustiske udstyr er blevet vurderet til ikke at give yderligere værdi til projektet, da signalet ikke leverer noget anderledes end det nuværende VSR-system og da det udover dette skal igennem en større proces med databehandling.

### 4.2.2 Virksomhed nr. 1 – Røntgenstrålediffraktion

Et af emnerne fra Virksomhed nr. 1 var blevet røntgen testet (XRD) hos Teknologisk Institut. Røntgenstrålediffraktion bruges til måling af residualspændingerne ikke-destruktivt. Ved en røntgenstrålediffraktion måles belastningerne i metallens atomkrystalgitter og residualspændinger beregnes derefter på grundlag af belastningsmålingerne. Røntgenstrålediffraktion kan kvantisere størrelse og retning af spændingerne i materialeoverflader i en dybde af 0,001 - 0,5 mm. Tidligere blev der konkluderet, at DAMRC's primære fokus ikke skulle være røntgen. Planen var at benytte udstyret til en verificering af akustiske emissionsmålinger, men da akustiske emissionsmålinger ikke viste sig at give værdi er fokus rettet mod at verificere ændringen af frekvenser vha. en eksperimentel modal analyse.



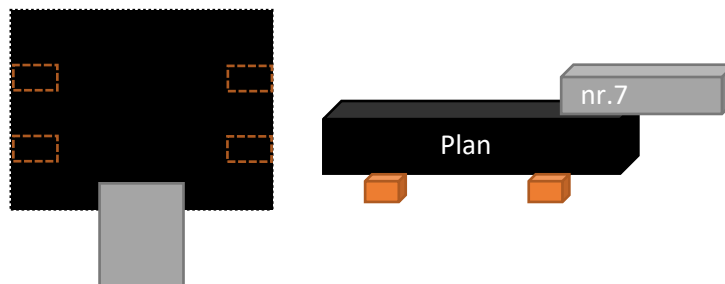
Figur 5: XRD testet emne fra Virksomhed nr. 1 emne.

### 4.2.3 Virksomhed nr. 2 – Modal Analyse

Se under *Analyse af taptest på side 19*

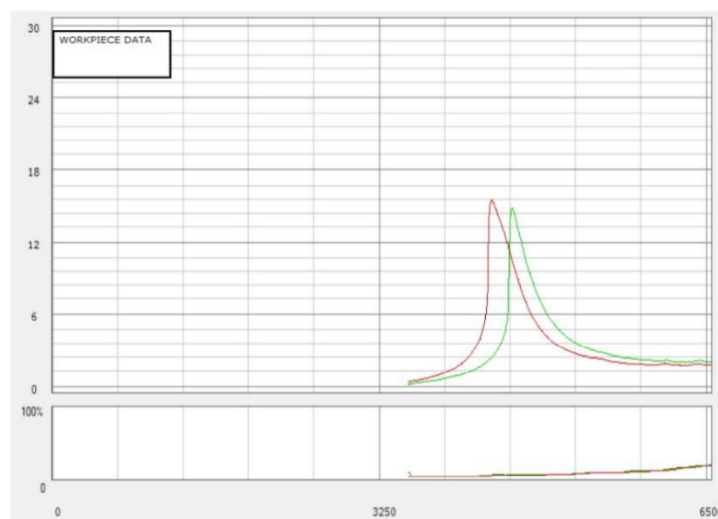
### 4.2.4 Virksomhed nr. 7

Virksomhed nr. 7 har kontaktet DAMRC da de har problemer med at bearbejde aluminiumsemner. Virksomheden fremsendte 14 aluminiumsplader af typen 6082-T6 til VSR-behandling.



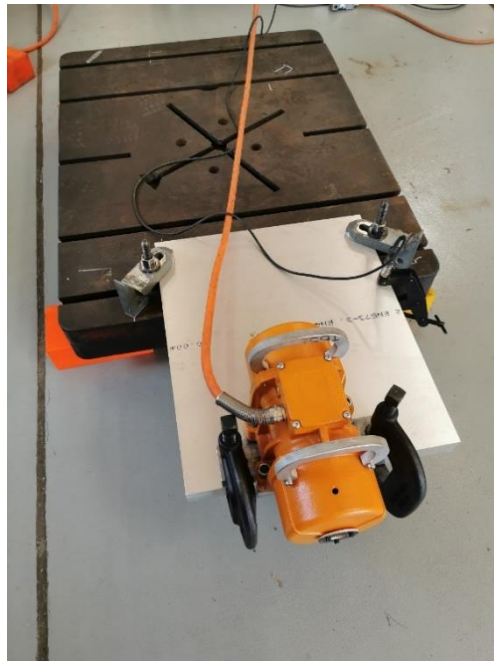
Figur 6: Illustration af set up VSR-behandling af emne 7.

De første 4 emner blev behandlet, som anvist på figur 6. VSR-behandlingen viste en klar ændring af egenfrekvens som er faldet samt amplituden som er steget fra cirka 14-15 hvilket også kan ses på figur 7/figur 7.



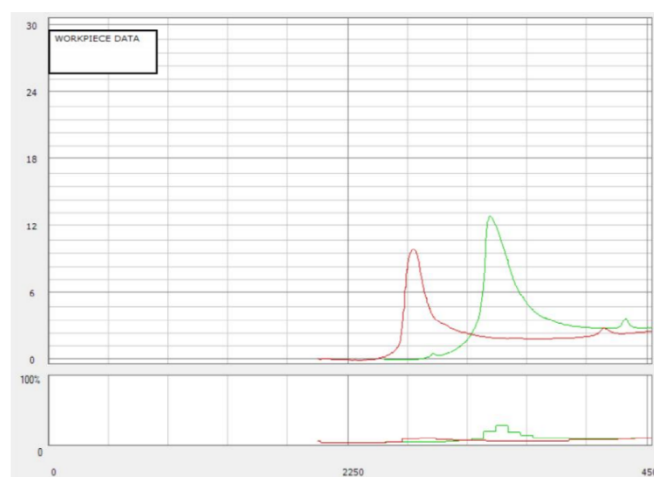
Figur 7: VSR-behandlingen af emne 2. på X akse er rpm(Hz) på y akse er amplituden i g. Her ses pre scan som grøn linje og post scan som rød linje hvor det kan ses at egenfrekvensen er faldet ved post scan og amplituden er steget.

Virksomhed nr. 7 afhentede emnerne, bearbejdede dem og meldte tilbage. VSR-behandlingen havde ikke en effekt på aluminiumsemnerne. DAMRC udtænkte derfor en mere ekstrem måde at behandle emnerne på samt tiltænkt en måde at multipel behandle på, se afsnit **Fejl! Henvisningskilde ikke fundet.** Motoren blev stillet direkte på emnet for at mindske tab af vibrationer. Det man skal være særlig opmærksom på her er, at der muligvis kan opstå ujævnheder hvis aluminiummet deformerer.



Figur 8: Ekstrem behandling af emne fra virksomhed nr. 7 hvor motor er monteret på emne i stedet for planet.

Under behandlingen var det synligt at aluminiummet blev belastet voldsomt.

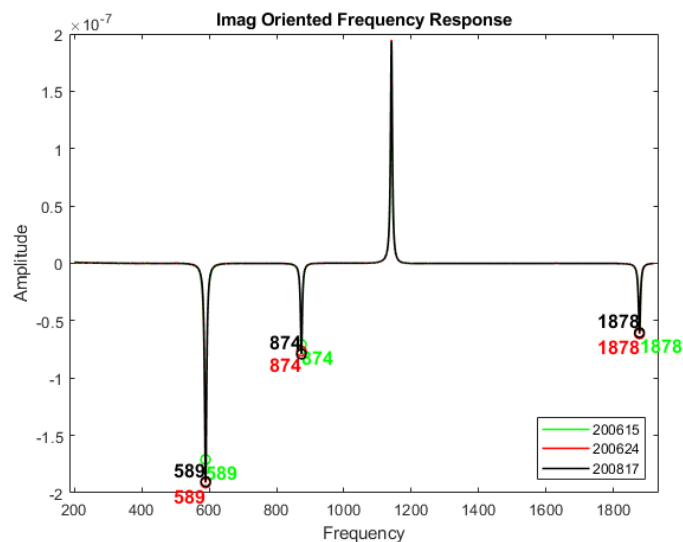


Figur 9: VSR-behandlingen på emne 6 X aksen er rpm(hz) og y-aksen er amplituden angivet i G. Grøn linje er pre scan, rød linje er post scan. Det ses at egenfrekvensen er faldet og at amplituden også er faldet.

VSR-behandlingen viser at der er sket en tydelig ændring, se figur 9. Virksomhed nr. 7 har dog desværre meldt tilbage at der ikke er nogen ændring under bearbejdning.

#### 4.2.4.1 Liggetid

VSR-behandlingen har ikke virket på Virksomhed nr. 7 emnerne, der er derfor i den anledning lavet en taptest analyse af emnerne for at se om der sker en ændring i frekvenserne ved at lade materialet ligge i en periode. Analysen er foretaget på 2 emner i en længere periode.

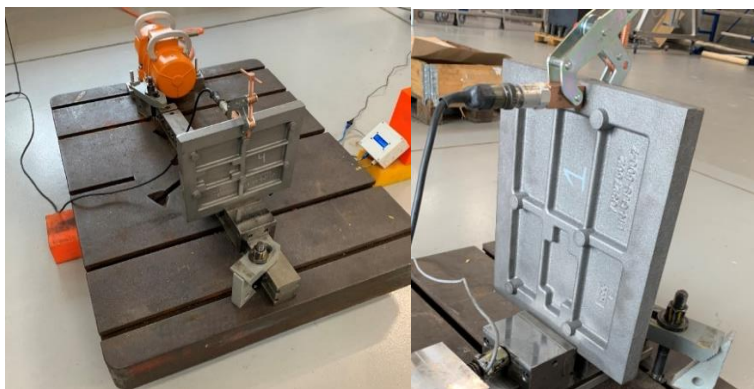


Figur 10: graf for modalanalyse lavet til liggetids analyse.

De forskellige farver på figur 10 indikerer forskellige datoer emnerne er blevet taptestet. Analysen er foretaget i løbet af ca. 2 mdr. Analysen illustrere at der ingen ændringer er på dette specifikke emne. Resultatet har været ensartet på alle forsøg.

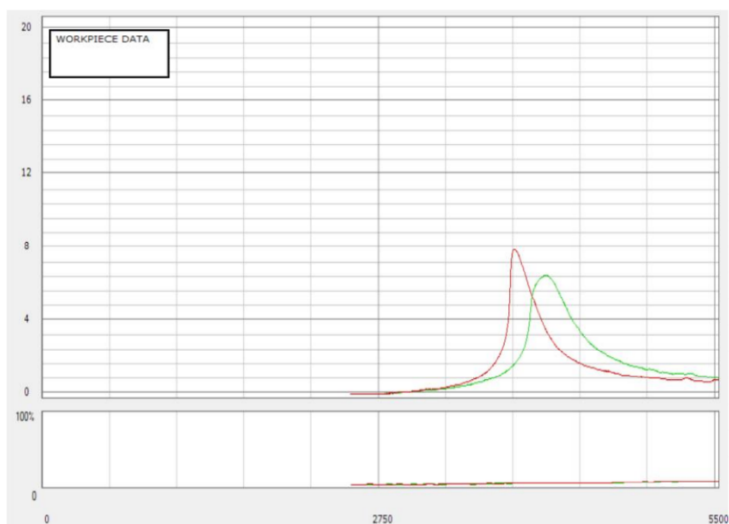
#### 4.2.5 Virksomhed nr. 6

Virksomhed nr. 6 havde sendt 20 støbejernsemner af typen EN-GJS-500-7 til VSR-behandling.



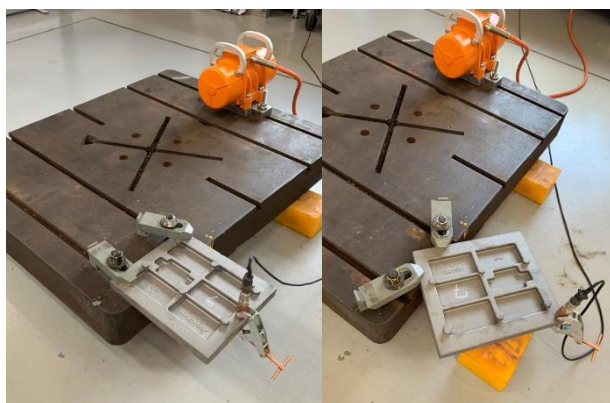
Figur 11: VSR-behandling af virksomhed nr. 6-emne med fikstur.

De første emner er blevet behandlet med en fikstur som anvist på figur 11.



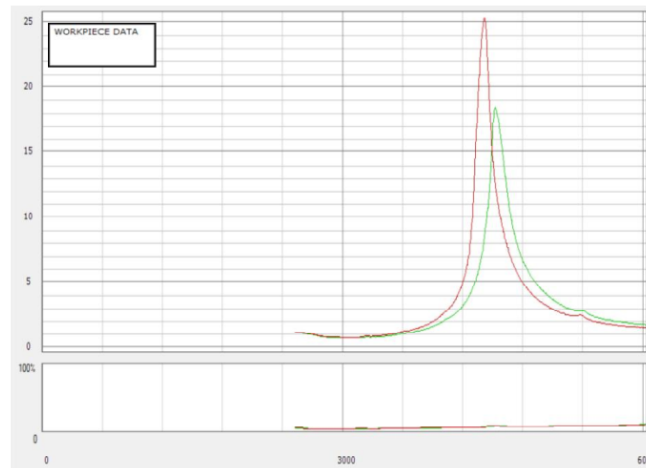
Figur 12: Graf der viser VSR-respons af emne på figur 11 hvor det kan ses at amplitude er steget og egenfrekvensen faldet ved Post scan som er røde data I forhold Pre scan som er de grønne data.

Derudover er emnerne også blevet behandlet som anvist på Figur 13.13.



Figur 13: (Venstre) Behandling af virksomhed nr. 6-emne uden fikstur (bøjningstilstand). (Højre) Behandling af virksomhed nr.6 - emne uden fikstur (vridningstilstand).

Emnerne er blevet behandlet hvor bøjningstilstanden var dominerende som anvist til venstre og et andet emne hvor vridningstilstanden har været dominerende. I opsætningen som er anvist på figur 13, er emnerne behandlet således, at fladen har vendt imod gulvet og loftet hvilket vil sige, at de har fået en dobbeltbehandling.

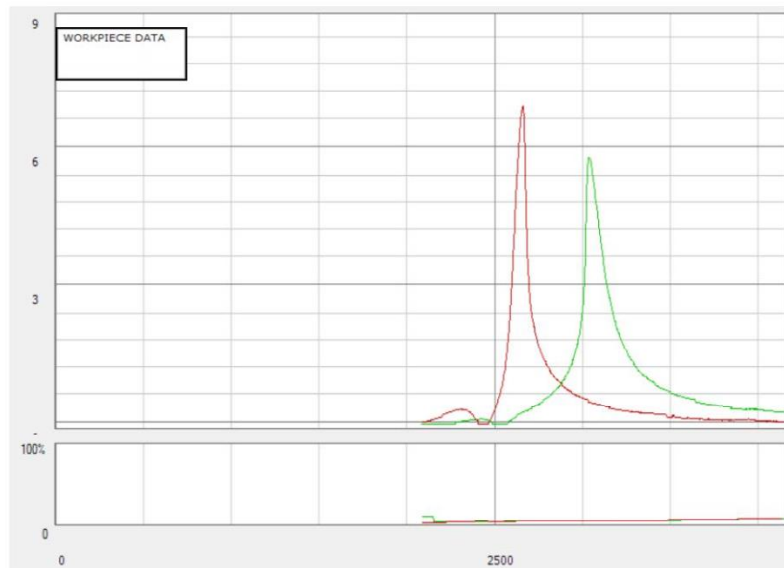


Figur 14: VSR-respons af et af tilfældene i Figur 13 hvor det kan ses at egenfrekvensen er faldet og amplituden steget ved post scan som er de røde data i forhold til pre scan som er de grønne data.

Både på figur 12 og figur 14 kan der på VSR-plottet ses en ændring. virksomhed nr. 4 har fået leveret emnerne tilbage og de har desværre tilbagemeldt, at der ingen ændringer har været under bearbejdning.

#### 4.2.6 Virksomhed nr. 8

Virksomhed nr. 8 kontaktede os da de havde problemer med 100 emner som de skulle behandle. Normalt plejer de at skrubbe emnet, lade det hvile og derefter bearbejde dem. Her ville de bearbejde emnerne under én proces, hvilket resulterede i at der opstod kast. I den anledning sendte de alle emner til os. Emnerne er blevet VSR behandlet og sendt retur. Virksomhed nr. 8 emnerne er af ukendt materialetype da de er *fortrolige*.



Figur 15: VSR-behandling af Virksomhed nr. 8 emne her ses et stort faldt i egenfrekvensen ved post scan som er de røde data i forhold til pre scan som er de grønne data.

På Figur 155 ses der en klar forskel før og efter behandlingen. Emnerne er sendt retur til Virksomhed nr. 8 og her har de set en klar forskel på de VSR behandlede emner. De kan nu kontra før behandle emnerne succesfuldt.



## 4.3 Aarhus Universitet

Aarhus Universitet vil som projektpartner bidrage i form af en Finite Element Analyse (FEA). AU har også deltaget og bidraget til første projekt hvilket er årsagen til at de er valgt som projektpartnere. AU vil udover FEA studiet assistere med at sikre kvalitet og tolkning af vores måledata i forbindelse med denne arbejdsopgave.

Tidligere var der tiltænkt at AU skulle lave et FEA-studie der beskrev spændingstilstanden i de givne emner baseret på akustisk emission. Det har siden da vist sig at der ikke er værdi at hente på akustisk emission, derfor er det i samråd med AU konkluderet at se bort herfra. AU har tidligere lavet et FEA-studie af, hvordan residualspændingerne opstår i materialet. Det er gjort ved at løse det termiske problem og undervejs have fokus på de geometriændringerne der opstår. AU's ønske er, at der det fra tidligere projekt til det nuværende projekt er kontinuitet i projektet således, at begge parter kan gavne på projektet. DAMRC har derfor i sammenhæng med AU besluttet, at der i dette studie er sat fokus på egenfrekvenserne før den termiske analyse, som inducerer spændingerne. Denne beslutning er blevet truffet på baggrund af et nyt studie DAMRC har opstartet hvor taptest udstyret fra MetalMax anvendes og en modal analyse udføres. DAMRC har i samråd med AU konkluderet, at der for begge parter er værdi i at se om egenfrekvenserne ændrer sig. DAMRC leverer dimensioner, materialedata og opsætningen til AU.

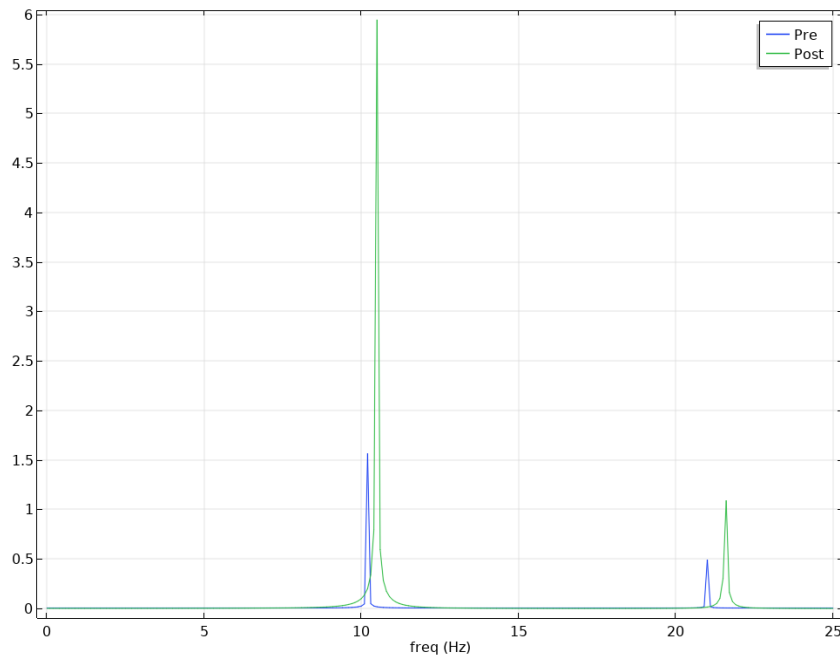
### 4.3.1 FEA-studie

Computermodellen AU har udarbejdet beskriver fremkomsten af residualspændinger under afkøling af et smeltet metal. På den måde beskriver modellen den spændingstilstand som et råmateriale besidder før en spåntagene bearbejdning påbegyndes. Modellen sammenligner derefter egenfrekvenserne for et materiale med og uden residualspændinger. Resultaterne dokumenterer hvordan den indre øget spændingstilstand, der kommer ud af at faseovergange optræder i materialet under afkølingen, har betydning for positionen af egenfrekvensen i frekvensspektret. En VSR-behandling forventes at reducere residualspændingerne og har derfor på tilsvarende vis en modsatrettet effekt på positionen af egenfrekvensen i frekvensspektret. Dette er dokumenteret for både aluminium og kulstofstål.

Det har ikke været muligt indenfor projektets rammer at dokumenterer ved hjælp af FEA hvorledes en VSR-behandling har indflydelse på materialets mikrostruktur. Det skyldes, at der ikke er etableret en FEA-model der foruden at fastlægge de residualspændinger ud fra det termiske problem også løser det transiente elastiske problem. Det sidst nævnte skal løses under brug af en konstitutiv model som kan beskrive hvorledes interferensen af elastiske bølger kan lede til plastisk deformation i materialets mikrostruktur og dermed en relaksation af spændingstilstanden. En sådan konstitutiv sammenhæng er ikke etableret og eksperimentelt valideret. AU har udtænkt et projekt man kunne starte op, projektet omhandler forskning i form af at løse den transient elastiske del numerisk og bruge synkrotronstrålingsmåling til etablering af en relevant og valideret konstitutiv sammenhæng. Dette kan ske i samarbejde med Henning Friis Poulsen fra DTU, ekspert indenfor krystalstruktur ændringer<sup>3</sup>.

---

<sup>3</sup> Subgrain dynamics during recovery of partly recrystallized aluminum, S.R. Ahl, H. Simons, C. Detlefs, D. Juul Jensen, H.F. Poulsen, Acta Materialia (185) 2020, 142-148, <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2019.10.042>



Figur 16: FEA-studie af AU der sammenligner de to laveste egenfrekvenser i et emne hhv. med og uden residualspændinger, dvs. pre og post til afkølingen.

## 4.4 Eksperimentel Modal Analyse

Som det nye har DAMRC valgt at anvende taptestudstyret MetalMax. Dette udstyr er tilgængeligt hos DAMRC (egen ejendom) og kendt idet det ofte anvendes i industrien. Ved brug af taptestudstyret kan en eksperimentel modalanalyse (EMA) udføres. EMA er en metode, som man benytter til at kortlægge de dynamiske egenskaber af et specifikt emne. EMA har flere anvendelsesmuligheder, men i dette projekt anvendes det primært til at finde emnets naturlige frekvenser. DAMRC kan ved hjælp af det nuværende VSR-system kun se, om der opstår amplitude- og frekvensændringer i intervallet 0–133 Hz. Ved at anvende taptest udstyret er man ikke begrænset, men kan alt afhængig af interesse undersøge lave eller høje frekvenser. Fordelen ved EMA kontra eksisterende VSR-systemets resultatvisualisering er, at man kun kan se en lille eller slet ingen ændring i frekvenserne, når emnet er behandlet. Dette betyder nødvendigvis ikke, at materialet ikke er afspændt. På nuværende tidspunkt er ideen, at når et emne behandles, påføres der energi nok til at atomerne kan optage nye pladser og derved gøres emnet mindre stift så der ændres på egenfrekvenserne. Et mindre stift emne vil typisk medføre at egenfrekvensen falder og amplituden stiger. De første egenfrekvenser er nødvendigvis ikke dem der ændrer sig relativt mest. Ofte kan de højere egenfrekvenser ændre sig relativt mere. Det er her, at en eksperimentel modalanalyse er fordelagtigt. Udover dette kan udstyret benyttes til den pneumatiske motor, som yderligere beskrevet i WP5.

### 4.4.1 Analyse ved hjælp af eksperimentel Modal Analyse

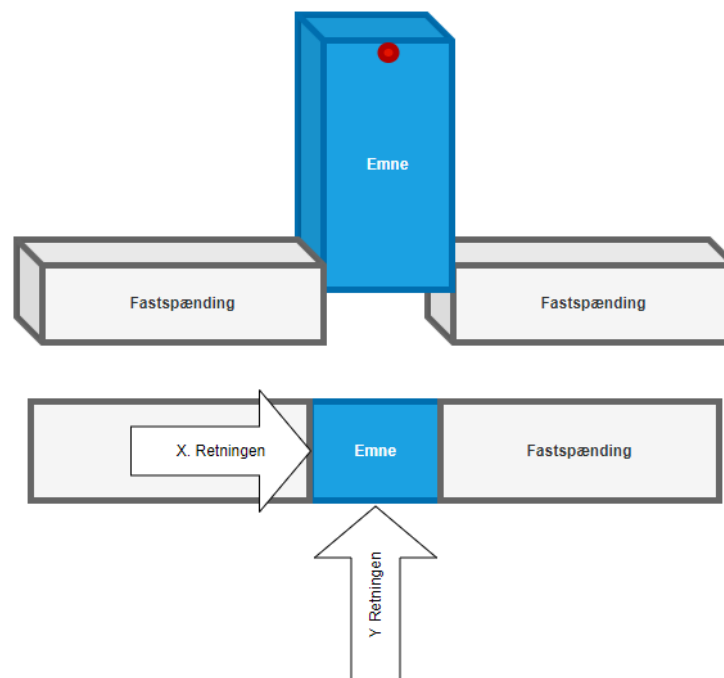
For at benytte taptestudstyret i projektet skal der i første omgang bevises, at der kan registreres ændringer af egenfrekvenserne. På figur 19 er der udført en EMA for et bjælkeelement med målene 150 mm × 147 mm × 359 mm i aluminium 6082-008. Bjælken er fastlåst i de to overflader som har dimensionen 147 mm, ses på figur 17.



Figur 17: Billede af den ene side ved fastgøring i to parallelle overflader.

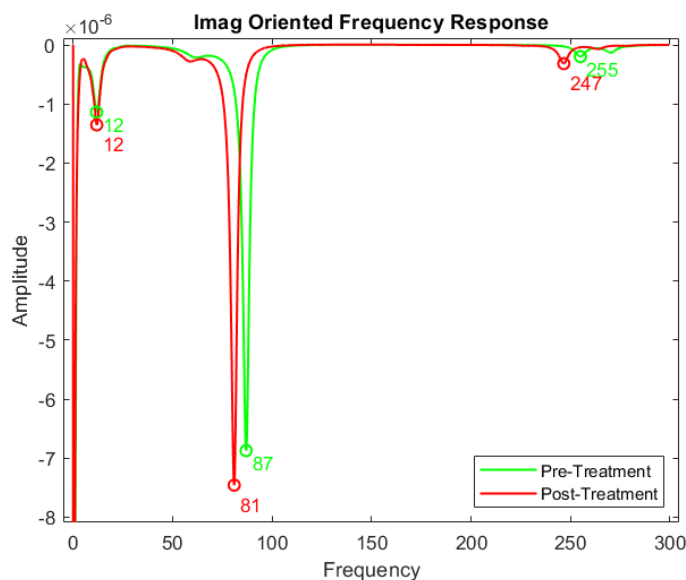
For at kunne dokumentere ændringerne på videnskabeligt niveau skal det bevises, at resultaterne på figur 19 ikke er tilfældige. Det vil sige at der skal laves eksperimentelle forsøg, hvor der ændres på forskellige faktorer for at se om de påvirker resultatet. DAMRC har i samarbejde med AU udtænkt en plan for, hvilke faktorer der skal ændres på. Resultatet vil i første omgang blive præsenteret, og derefter vil et studie, hvor ændringen foretages, blive præsenteret for at se, om dataene er pålidelige. Der vil i disse analyser ikke nødvendigvis benyttes det samme emne.

#### 4.4.1.1 Resultat



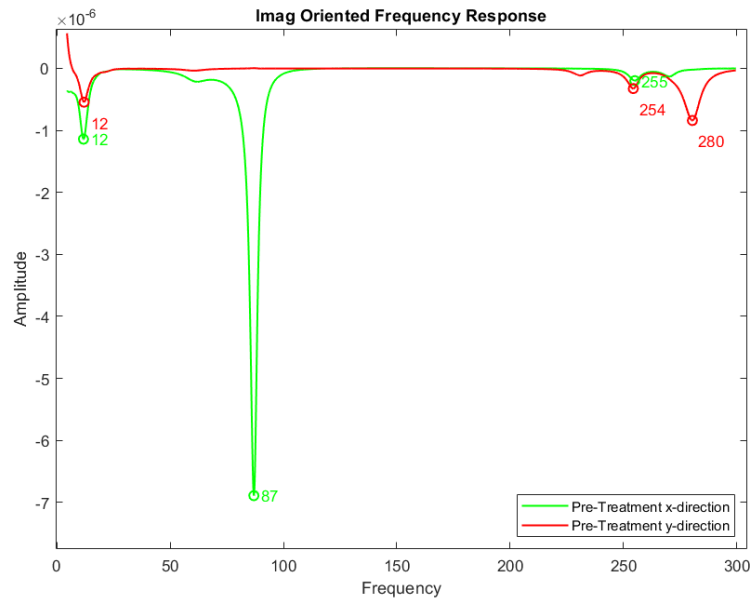
Figur 18 : Illustration af hvordan opspænding har været og hvordan målingerne er taget øverst, ses opstillingen 3dimensionelt og nederst er opstillingen set oppefra

På figur 19 er det tydeligt at se, at der ved behandlingen er sket ændringer. Ved den første fremhævede egenfrekvens ved 12 Hz er der ikke sket ændringer, hvilket var forventet, da de små frekvenser sjældent ændrer sig meget. Den anden frekvens på 87 Hz havde VSR udstyret ikke opfanget, hvilket kan skyldes retningen, hvori der måles. For at teste dette udføres en EMA i hhv. x og y retningen som illustreret på figur 18, det røde punkt påviser hvor accelerometer til målingen er påsat og kraften er påført i modsatte side af emnet. Den sidste frekvens på 255 Hz kan VSR udstyret ikke måle, da det overskrider dens øvre grænse på 133 Hz.



Figur 19: Plot af den imaginære del af frekvens-responsfunktionen fra 0-300 Hz der dokumenterer egenfrekvenserne før og efter behandling i X retningen.

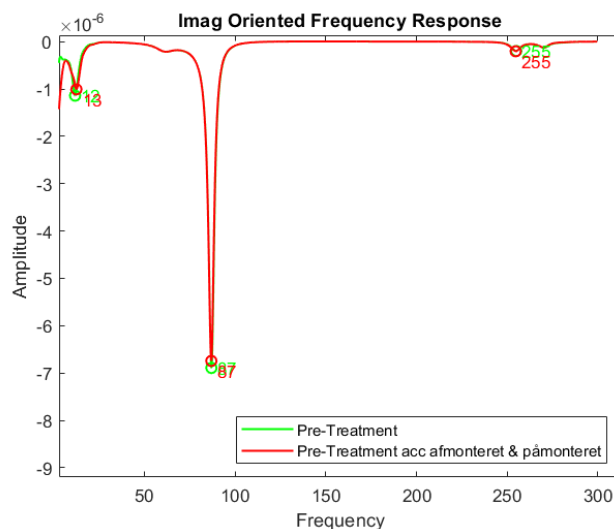
Som det ses på figur 19, har accelerometer påsætningen betydning for, hvilke egensvingsformer, der opfanges. Egenfrekvenserne på 12 Hz hhv. 255 Hz opfanges i begge retninger, men vigtige informationer går tabt, hvis accelerometeret påsættes i X retningen som anvist på figur 18 da det er den stiveste retning. Dette skal man tage i betragtning, da VSR-udstyret udsender vibrationerne i begge retninger og derfor godt kan behandle i dette frekvensområde.



Figur 20: Graf over spektret 0-300 Hz hvor der for rød linje er målt på X retningen i forhold til opstillingen på figur 18 og grøn linje er målt på Y retningen.

#### 4.4.1.2 Accelerometer

I denne analyse er der udført to eksperimentelle forsøg. En EMA er udført på emnet, hvorefter accelerometeret som det eneste er afmonteret og påmonteret igen for at se, om det har en effekt på egenfrekvenserne.

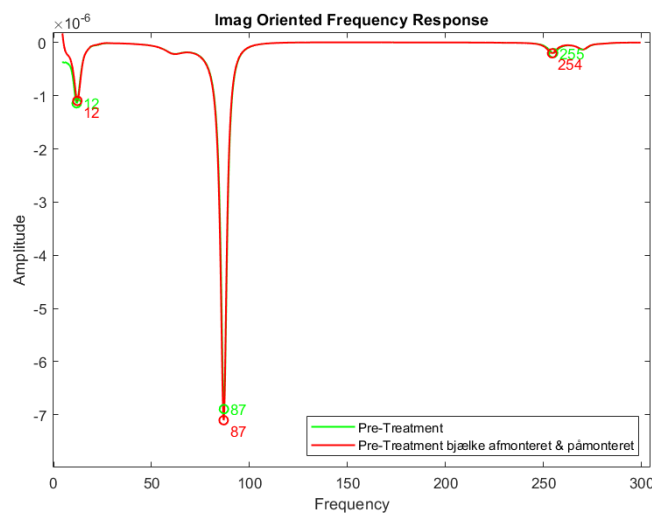


Figur 21: graf af data fra taptest hvor accelerometeret er taget af og på og taget målinger før efter.

Som det ses på figur 21, har afmontering og påmontering af accelerometeret ikke nogen betydning så længe at accelerometeret påmonteres det samme sted og at der slås det samme sted. For at sikre dette bliver gjort, er der på bjælkeelementet markeret placeringer for disse. Ved første egenfrekvens kan man se en stigning fra 12Hz til 13 Hz. En så lille ændring er indenfor de parametre kan forklares med at decimalerne kan blive rundet op eller ned. Derudover ligger den frekvens så lavt og er så lille at den ikke betragtes som et behandlingspunkt i modsætning til den ved 87 Hz. Frekvenserne ændrer sig som nævnt ikke, men en tydelig ændring i amplituden betragtes. Det der påvirker amplituden, er kraften der slås på emnet med, hvilket anses som en menneskelig fejl". Derfor tages der kun udgangspunkt i frekvensændringen.

#### 4.4.1.3 Bjælkeelement

Her er der udført en eksperimentel modalanalyse, hvor emnet er afmonteret og påmonteret igen for at se, om dette har en effekt på egenfrekvenserne. Her er det vigtigt, at bjælkeelementet påmonteres som tidligere, og at fikseringstyrken er ens. Her benyttes der et Newtonmeter for at sikre kontinuitet, da spændingskraften kan påvirke de modale parametre og derfor ændre på egenfrekvenserne.

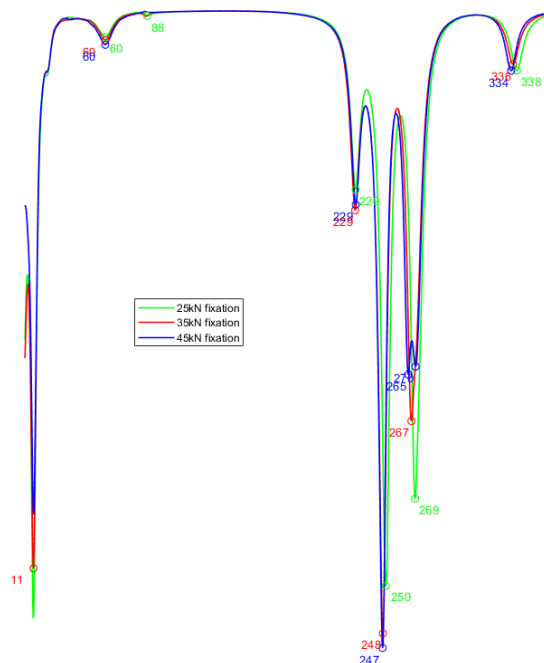


Figur 22: Plot af taptest på bjælkeelement. I dette plot er bjælkeelementet afmonteret og påmonteret.

Bjælkeelementet påmonteres fast igen med 35 kN, og som forventet sker der ingen mærkbare ændringer i egenfrekvenserne.

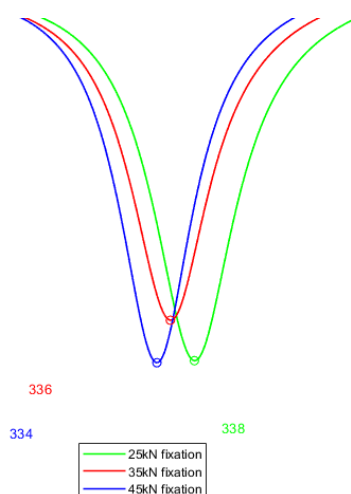
#### 4.4.1.4 Fikseringsstyrke

For at se, hvilken betydning understøtningsforholdene har, betragtes figur 23. Til denne analyse benyttes samme bjælke som i det foregående forsøg, men her er bjælken i stedet fastspændt i de andre to flader, så i forhold til figur 18 er fladen der før var på X retningen nu på Y retningen, hvilket er årsagen til at der ikke er sammenhæng imellem hidtil nu viste plots og denne. Dette har ingen betydning for formålet af analysen.



Figur 23: spektre over frekvenser for fastspændt bjælke hvor der er tilspændt med forskellig kraft og målt for hver tilspænding med 25kN (grøn), 35kN (rød) og 45 kN blå.

Hvis der kigges på egenfrekvenserne ved 11–229 Hz er det tydeligt, at der ingen ændringer er i frekvensen er grundet fikseringsstyrken.

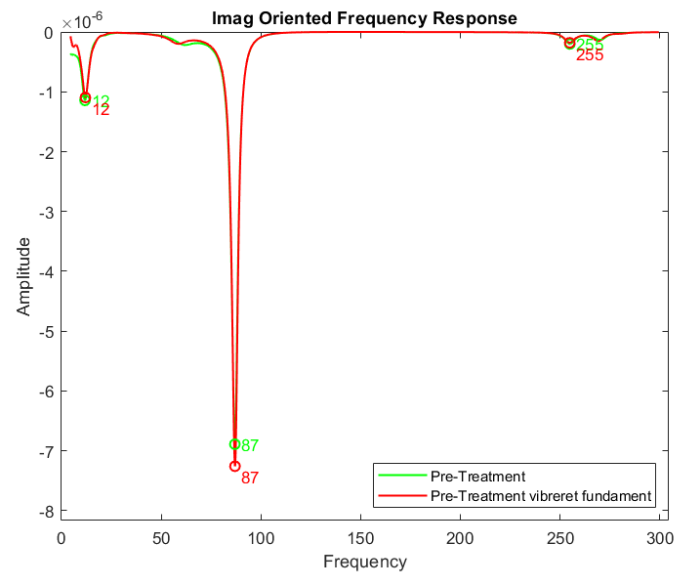


Figur 24: Zoom på den sidste frekvens på figur 23 ved 334-338 Hz.

Ved den højere egenfrekvens på ca. 335 Hz er det tydeligt, at jo større fikseringsstyrke, der anvendes, jo lavere er frekvensen. Heraf konkluderes, at det, for at der kan opnås kontinuitet imellem dataene, er nødvendigt med samme fikseringsstyrke. Ellers kan man intet konkludere ud fra de opnåede resultater.

#### 4.4.1.5 Friktion i fiksturet

For at sikre, at fiksturet ikke flytter sig, når det bliver udsat for kraftige vibrationer, er der lavet en analyse, hvor bjælkeelementet afmonteres, og hele fundamentet vibreres, hvorefter bjælkeelementet påmonteres igen. Denne analyse er vurderet at være nødvendig da understøtningsforholdene kan ændre sig grundet vibrationerne forårsaget af behandlingen.



Figur 25: graf der viser spektret fra 0 til 300 hz hvor frekvenserne kan ses på et emne, hvor grønt scan er før understøtningen er vibreret og rød er efter at emnet er afmonteret, understøtningen vibreret og emnet er påmonteret igen.

Igen ses der sammenhæng imellem dataene, hvilket påviser at understøtningen ikke ændrer sig af vibrationerne.

#### 4.4.1.6 Reduktion i tilspænding

Da forsøget skulle udføres, blev fikseringstyrken sat til 35 kN. Da behandlingen blev sat i gang, blev der sat særlig fokus på Newton meteret, og her viste det sig, at de vibrationer der forekom under behandlingen, reducerede fikseringstyrken. Da emnet var færdig behandlet, var fikseringstyrken reduceret til 21kN. Dette skal man være særlig opmærksom på da sammenhæng mellem dataene er vigtigt for at kunne konkludere noget anvendeligt.

#### 4.4.1.7 Eksperimentel modalanalyse med fri-fri randbetingelser

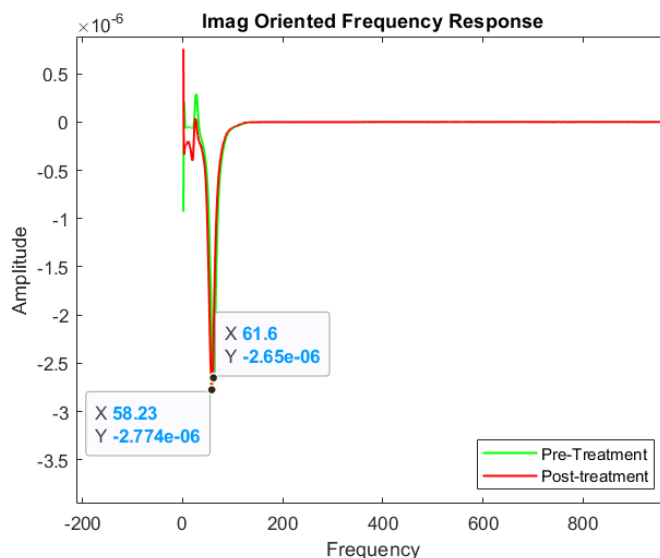
DAMRC har valgt udover disse analyser at køre en analyse mere, hvor understøtningsforholdene er etableret på en måde således, at det ikke påvirker de modale parametre. Dette gøres ved at stille emnet op således at der laves fri-fri betingelser, hvilket kan lade sig gøre vha. elastiksnore eller skumunderlag. Her er det vigtigt at elastikkerne er slappe (tynde eller lange nok) til, at egenfrekvensen relateret til lodret stiv-legeme-bevægelse og rotation om de to vandrette akser ligger langt under frekvensen relateret til første egensvingningsform med indre deformation. Fastgørelse af elastikkerne skal ske således, at slør, glidning og tilsvarende indbyrdes bevægelse mellem dele af ophæng og emne undgås. Her er det bedre at lave knuder end at bruge kroge, øjer, etc., med forbindelser stål-stål. Ophæng bør foretages i punkter, hvor så mange som muligt af de første (relevante) egensvingningsformer har "node of mode" eller hvor der er lille flytning i de interessante egensvingningsformer. Ved skumunderlaget er det igen vigtigt at sikre, at underlaget er så blødt, at man ikke får egenfrekvenserne relateret til stiv-legeme-bevægelse løftet op i nærheden af egenfrekvenserne relateret til deformation af emnet. Dette gøres ved at bruge et skum, som er passende blødt og har en nubret overflade.

Når der er foretaget en EMA for det "frie" emne, sammenlignes resultaterne med en numerisk beregningsmodel, som sammenlignes via det såkaldte *Modal Assurance Criterion* (MAC). Ved at udføre en MAC-analyse kan man se, om understøtningsforholdene har en signifikant indflydelse på de målte resultater. Hvis det viser sig at understøtningsforholdene har en signifikant indflydelse, kan de hidtil nu plottede resultaters pålidelighed/troværdighed diskuteres.



#### 4.4.1.8 Forsøg med skumunderlag

På figur 26 er der udført en modal analyse for et bjælkeelement med målene 105 mm × 110 mm × 405 mm i aluminium 5754-005. Resultatet viser en ændring i egenfrekvenserne som følge af vibrationsbehandlingen. Her ses en ændring fra 62 Hz til 58 Hz.

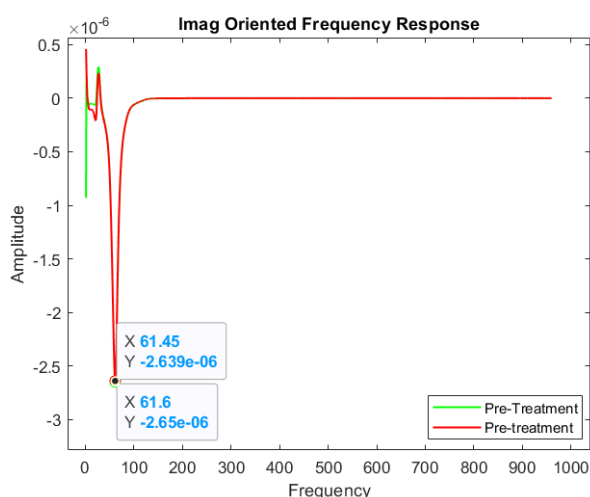


Figur 26: Resultat af modal analyse udført på skumunderlag for hhv. før og efter behandling hvor der kan ses at egenfrekvensen har rykket sig.

For at validere resultatet er der udført forsøg, hvor forskellige parametre er blevet ændret for at se, hvilke parametre det kan være kritisk at ændre på under forsøget.

#### 4.4.1.9 Validering af skumunderlag

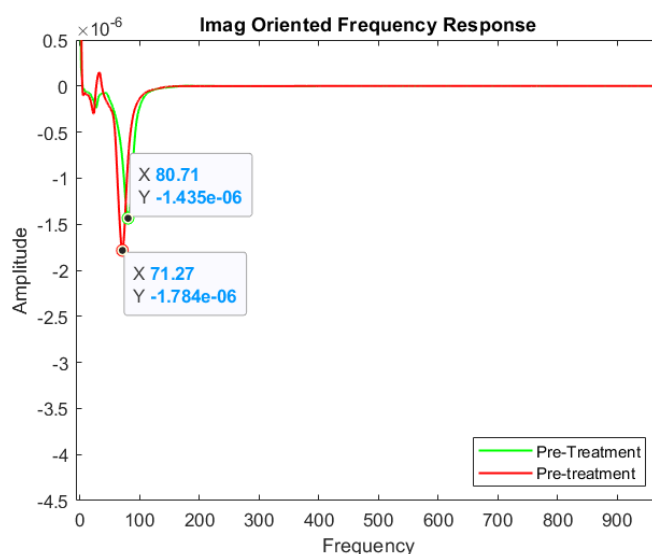
På Figur 27 er modalanalysen udført uden nogen ændringer på parametrene som forventes kritisk for at undersøge, om skumunderlaget påvirker egenfrekvenserne. Her er der erfaret, at skumunderlaget ikke giver sig nok til at skabe fri-fri betingelser, da de samme frekvenser opnås. Begge resultater er fra før behandlingen og passer derfor overens frekvensmæssigt med figur 25.



Figur 27: graf over data fra modal analyse foretaget på skumunderlag før behandling.

#### 4.4.1.10 Placering af skumunderlag

På figur 28 ses en ændring i frekvenserne ved ændringer af placeringen af emnet på skumunderlaget hvor emnet er drejet 90 grader så hvad der før ville have været X retningen nu, er Y retningen.



Figur 28: Modal analyseresultatet hvor placeringen af emnet er ændret i forhold til figur 27.

For at finde frem til hvad der helt præcis er skyld i frekvensændringen ses der først på opstillingen. Bjælken er anbragt på et skumunderlag (Plastazote LD29 er 100% Polyethylen), som er homogent, hvilket vil sige, at skumunderlaget har de samme materialeegenskaber overalt.



Figur 29: Forsøgsopstillingen med bjælken, accelerometeret, skumunderlaget og vaterpasset.

Ved brug af et vaterpas ses på libellerne om emnet er i vater. Her er det erfaret, at gulvet ikke er vandret, hvilket giver ændringen i egenfrekvensen, som ses når man sammenligner figur 27 og 28 hvor der blev ændret på placeringen af emnet på underlaget. For at sikre at det er et ikke vandret underlag der er problemet, er placeringen markeret som anvist på billedet, derefter er emnet fjernet fra sin plads, accelerometeret er afmonteret og det hele er derefter sat på plads igen. De samme resultater som figur 28 anviser, er blevet erfaret efter endnu en test. Det kan derfor konkluderes at underlagets hældning har indvirkning på egenfrekvensen, da der er en ændring på de frekvenser, som ses på figur 27 og 28 og at de samme resultater kan skabes, ved at bruge samme position.

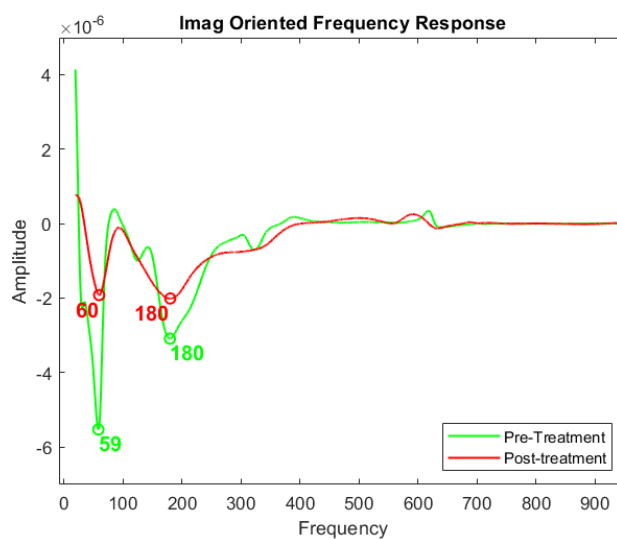
#### 4.4.1.11 Forsøg med elastiksnor

Til forsøget med elastiksnor blev emnet fra tidligere skumunderlags studie skiftet ud med et mindre emne. Elastiksnoren er sat op således at elastikkerne har den samme længde, derudover er placeringerne af elastikkerne markeret og placeringen af accelerometeret samt hammerslaget er markeret i midten på hhv. over og undersiden. Et vaterpas er sat på emnet for at sikre homogenitet imellem forsøgene.



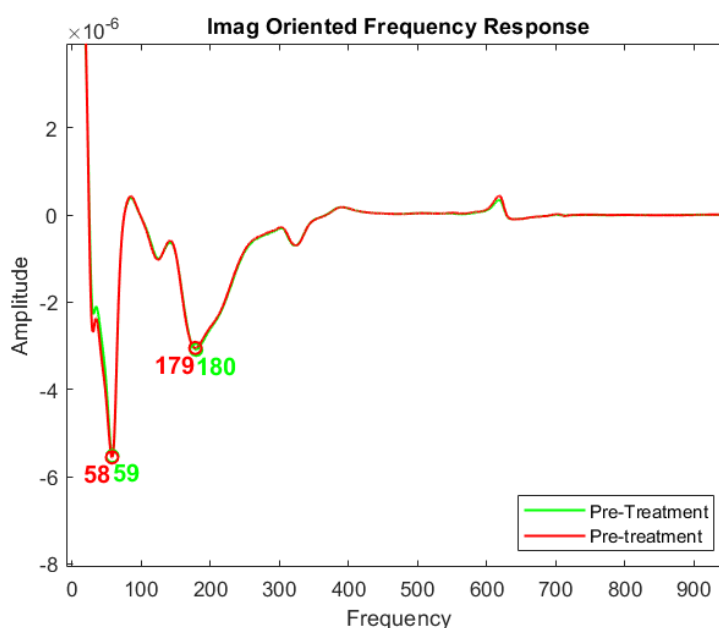
Figur 30: Eksperimentel opstilling af modal analyse med elastiksnor og markering af elastiksnor placering.

På Figur 31 ses der et plot hvor det grønne signal er emnet før vibrationsbehandlingen og det røde signal som er efter vibrationsbehandlingen. Her ses der, at frekvenserne ikke har ændret sig, men at amplituden har. Derudover ses der, at signalets respons har ændret sig.



Figur 31: Resultatet af forsøget før og efter behandling hvor emnet har været fastgjort i elastiksnor.

For at sikre at der er homogenitet imellem dataene er der udført et forsøg hvor emnet er afmonteret og påmonteret for at sikre at det samme respons opnås.



Figur 32: Begge signaler er før behandlingen. Emnet er afmonteret og påmonteret ved det røde signal.

På figur 32 er det tydeligt, at den dynamiske respons fra aluminiumemnet er ens. Det kan derfor konkluderes at elastiksnorene samt underlaget godt kan benyttes. Skumunderlaget benyttes til tunge emner da elastikkerne ikke kan benyttes grundet vægten. Tidligere var der udført en test med et småt emne på skum underlaget og her var der ikke sammenhæng imellem dataene, derfor er det fint at begge metoder benyttes til hhv. lette og tunge emner.

## 5 Industrialisering af VSR-teknologien (WP4)

Denne arbejdsopgave handler om at reducere omkostningen for hver VSR-behandlet komponent og gøre VSR-teknologien til et endnu mere attraktivt alternativ til varmebehandling. Gennem konkrete forsøg skal der, i samarbejde med 3-5 bearbejdningsvirksomheder, der stiller konkrete emner til rådighed, udvikles fikstureringsløsninger og behandlingsmetoder, der gør det muligt at opnå et ensartet resultat for samtidigt behandlede emner.

### 5.1 Forsøg med multiple systemer

Opstillingen er lavet således at en trænet tekniker effektivt kan betjene 2 maskiner, derved kan emner behandles i større mængder. For at forhindre langtidsvarige men, er der sat en kranløfter op der kan bruges på tværs af planerne. Den trænede tekniker behandler så emnerne på tværs af hinanden, således at han har tiden til at afmontere og montere et nyt emne når emnet er færdigbehandlet. Dette lykkedes med succes, hvor den trænede tekniker kunne på/afmontere et emne imens, det andet emne blev behandlet. Det er derfor påvist at en ansat kan betjene 2 systemer, og derved behandle dobbelt så mange emner.



Figur 33 I dette billede VSR behandles Virksomhed nr. 8 emnerne. Opstillingen er sat op således, at der kan produceres effektivt. Emnerne er skjulte da det er fortroligt materiale.

## 5.1.1 Automationsalgoritmer

Dette afsnit vil komme indover hvordan VSR processen og alt tilhørende analyserne er blevet gjort smartere.

### 5.1.1.1 Numerisk programmering

DAMRC har benyttet MetalMax udstyret til modal analyse til at foretage analyser omkring troværdigheden af ændringer i emnerne, se Afsnit 4.3.4. Ved MetalMax udstyret udtrækkes der en del data, heri kræves der et databehandlingsværktøj. I den anledning er MATLAB blevet valgt da softwaren er et matematik-computerprogram som fokuserer på anvendelsen af matricer og vektorer. MATLAB har en masse funktioner, som man desuden kan drage nytte af, heriblandt "findpeak" funktionen. Behandlingen af dataene er kompliceret og kræver forståelse, derfor har DAMRC lavet et brugervenligt script, se34.

```

%% This section contains inputs
% Remove the first X number of data
Rmv_X_data = 100 ; % insert value or 'off'

% Remove the last X number of data
Rmv_to_data = 400 ; % Insert value or 'off'

Smooth_signal = 'off' ; % Smooths signal - value or 'off' - only necessary in IMAG

% IMAG plots with or without dots and frequency value
dots_value = 'on' ; % 'on' & 'off'

% Which data are you plotting?
plotting = 'x-y' % 'x' , 'y' , 'x-y' (x = green , y = red)

FRF_Plot = 'IMAG/REAL' % 'IMAG/COHERENCE' or 'IMAG/REAL'

print = 'off' % 'on' , 'off'

%% REAL

legend_filename1_REAL = 'Pre-Treatment '
legend_filename2_REAL = 'Pre-Treatment '

title_plot_REAL = 'Real Oriented Frequency Response X axis' % Title

x_label_REAL = 'Frequency' % xlabel
y_label_REAL = 'Amplitude' % ylabel

%% IMAG
find_peaksx = 4 ; % Number of peaks in IMAG X

x_label = 'Frequency' % xlabel
y_label = 'Amplitude' % ylabel

legend_filename1 = 'Pre-Treatment ' % Legend for filename1

```

Figur 34: Et udsnit af MATLAB-scriptet som vil kunne fremvise data fra modalanalyse.

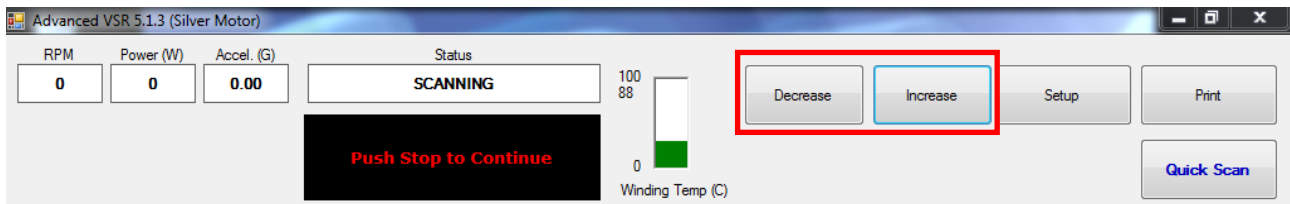
MATLAB scriptet er kodet således, at alt hvad der kan ændres på, er sat op i starten af scriptet, hvilket gør det mere bruger venligt. I starten af scriptet kan der defineres alt fra dataintervallet til hvor mange "modes" der skal inkluderet i FRF datasættet (Frequency Response Function). Programmet kan ud fra en FRF datafil automatisk udtrække alle de modale parametre som ønskes.

Når peaks er fundet fra hhv. det reelle og imaginære FRF-data kobles disse datapunkter sammen. Herefter analyserer scriptet om en række kriterier er opfyldt vedr. de opsamlede datapunkter, med henblik på at eliminere ugyldige datapunkter. Når denne automatiske analyse er gennemført, visualiseres data hvormed evt. fejl kan identificeres.

Ved at simplificere processen er det nødvendigvis ikke en ingeniør der skal databehandle, men nu er det også muligt at en tekniker gør det.

### 5.1.1.2 Fjernstyring

Ved det nye højfrekvente udstyr, se Afsnit 4.5.3, er der i softwaren blevet inkluderet digitale taster hvilket vil sige, at man ikke længere er tvunget til at trykke på fysiske knapper. De digitale knapper kan øge og sænke motorens lastfrekvens. Når ingeniøren eller teknikeren arbejder med emner der skal behandles i 20-40 min, er det ikke altid fordelagtigt, at personen skal stå fastmonteret ved maskinen. I den anledning har der været tiltænkt, at man evt. kunne tilslutte VSR-udstyret til internettet via et lan kabel på indersiden af skærmen og fjernstyre VSR udstyret vha. TeamViewer eller et andet fjernstyringsprogram.



Figur 35: Illustration af de nye digitale knapper i VSR-udstyret.

Dette har der været stor succes med, VSR-maskinen er blevet fjernstyret fra kontoret hvilket betyder at teknikeren udsættes for mindre støj og kan arbejde med andre projekt relaterede opgaver samtidig med, at teknikeren observerer udstyret fra den ekstra tilsluttede skærm.

### 5.1.1.3 Standard Operating Procedure

DAMRC's primære formål i denne arbejdsplan er at standardisere fiksturerings-løsninger til masseproducerede emner således at en trænet tekniker kan udføre behandlingen og dataanalysen. Softwaren i VSR-udstyret er enkelt at benytte, så længe frekvenserne ligger indenfor 0-133 Hz er det forholdsvis enkelt at træne en tekniker til at behandle emner, ved at sætte det i resonans eller sub-resonans. For ikke komplekse emner kan universelle standard fiksture konstrueres, men for komplekse emner skal der en ingeniør med dynamisk forståelse til for at designe fiksturet.

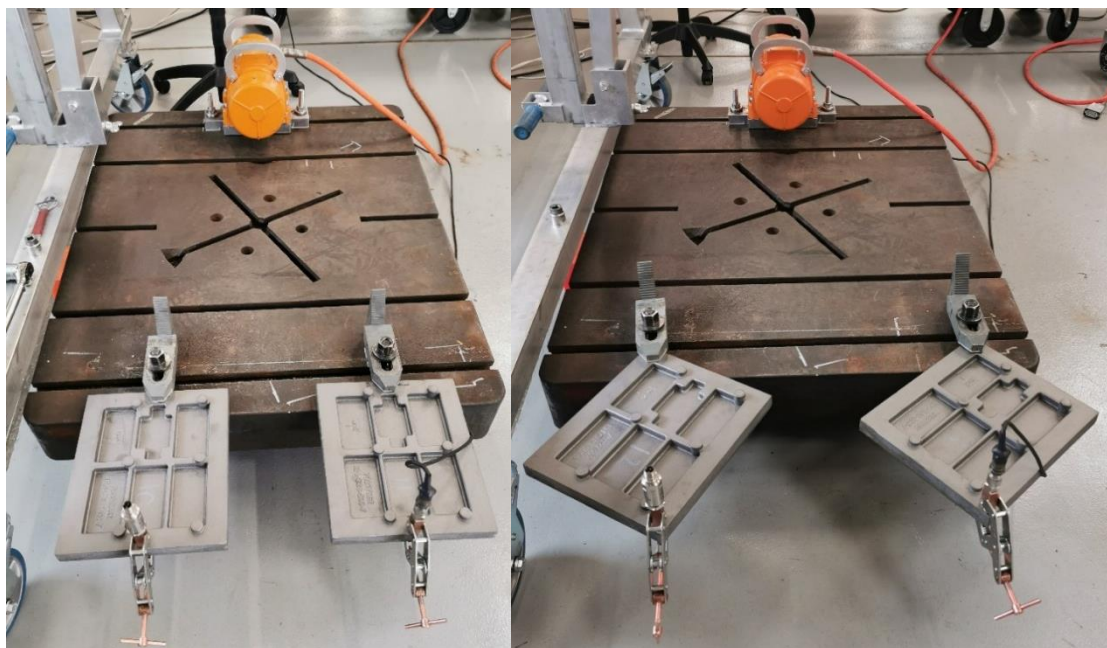
## 5.2 Multibel behandling

I WP4 skal der udvikles, afprøves og evalueres 4 fikstur-løsninger. Dette kræver at der fra virksomhedernes side leveres identiske emner i en vis mængde og at disse behandles så de ikke får for meget ligge tid. Under den multiple behandling er det vigtigt, at stivheden og massen er identisk for de forskellige emner under behandling, da egenfrekvenserne er afhængig af disse. For at kunne behandle de forskellige emner er det derfor vigtigt at tune dem således at de er identiske, dvs. at T-clampen og accelerometeret skal tages med i betragtning.

Selvom hvert emne modtager en vis vibration, er det umuligt at overvåge, om hvert emne opnår resonans (med mindre at en sensor er placeret på hver), hvilket også er hovedårsagen til at der kun behandles 2 emner på samme tid.

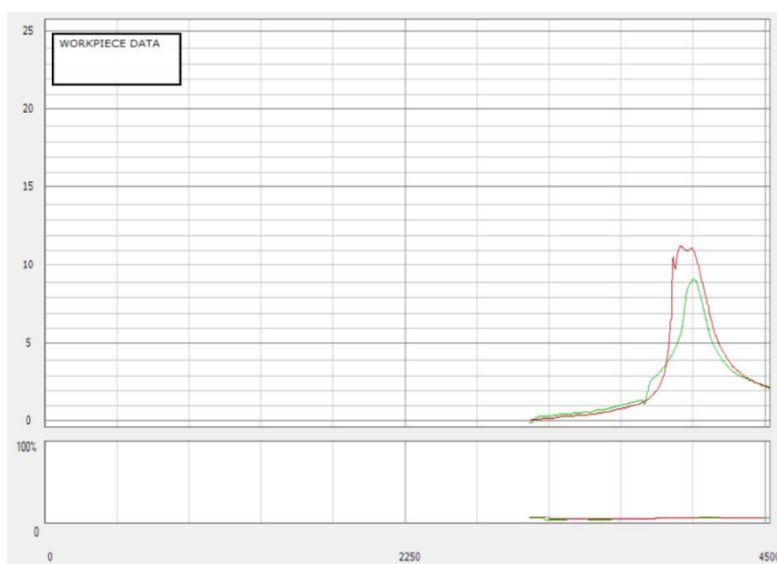
### 5.2.1 Virksomhed nr. 6

Virksomhed nr. 6 er en højteknologisk industriel produktionsvirksomhed med speciale indenfor metalbearbejdning leverede emnerne som anvist på figur 36. De havde problemer med at overholde tolerancerne grundet residualsændingerne.



Figur 36: (Venstre) Emnerne fra virksomhed nr. 6: her ses at bøjningstilstanden er dominerende. (Højre) Virksomhed nr. 6: emnerne hvor torsionstilstanden er dominerende.

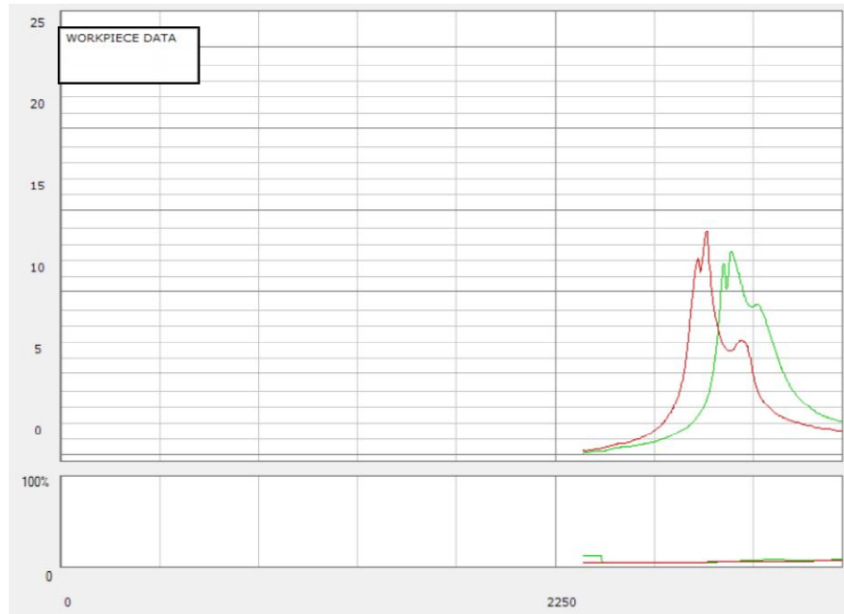
Det at skulle behandle flere emner på samme tid, har givet udfordringer, da der kun kan tilkobles et accelerometer til VSR-udstyret. Der er i stedet tiltænkt to løsninger. Det ene er at tjekke de modale parametre med taptest udstyret hvilket er et dyrt udstyr og et udstyr der er for tidskrævende. Den anden løsning som er den der er benyttet, er at lave et pre-scan på begge emner og sørge for at emnerne er tunet tilstrækkeligt som muligt. Dette er gjort ved at tilføje et tilsvarende t-clamp og et accelerometer på modsatte emne således at massen er identisk. På figur 37, er der lavet et pre-scan for emne 12 og et post-scan for emne 13.



Figur 37: Pre-scan for emne 12 og 13 emne 12 er grøn streg som normalt symboliserer pre scan og emne 13 er rød streg som normalt symboliserer post scan, begge scans er pre scan.

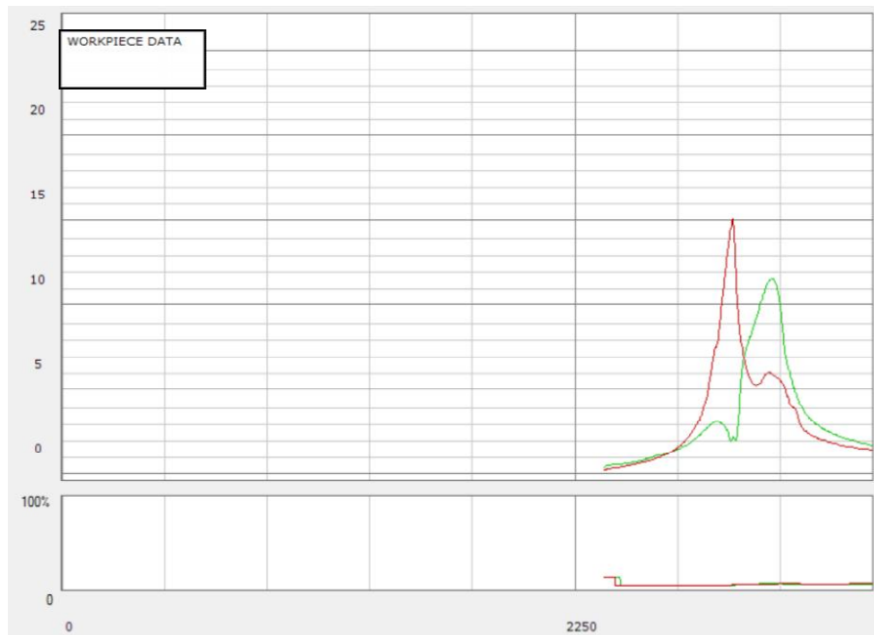
Her ses det, at egenfrekvenserne ligger op ad hinanden hvilket betyder, at emnerne kan behandles på samme tid. Efter dette er der udført et pre-scan og post-scan på emne 13. Det vil sige, at man kun betragter opførslen på emne 13 og emne 12 passivt følger med.





Figur 38: Pre- og postscan for emne 13 hvor det ses at amplituden stiger og egenfrekvensen falder.

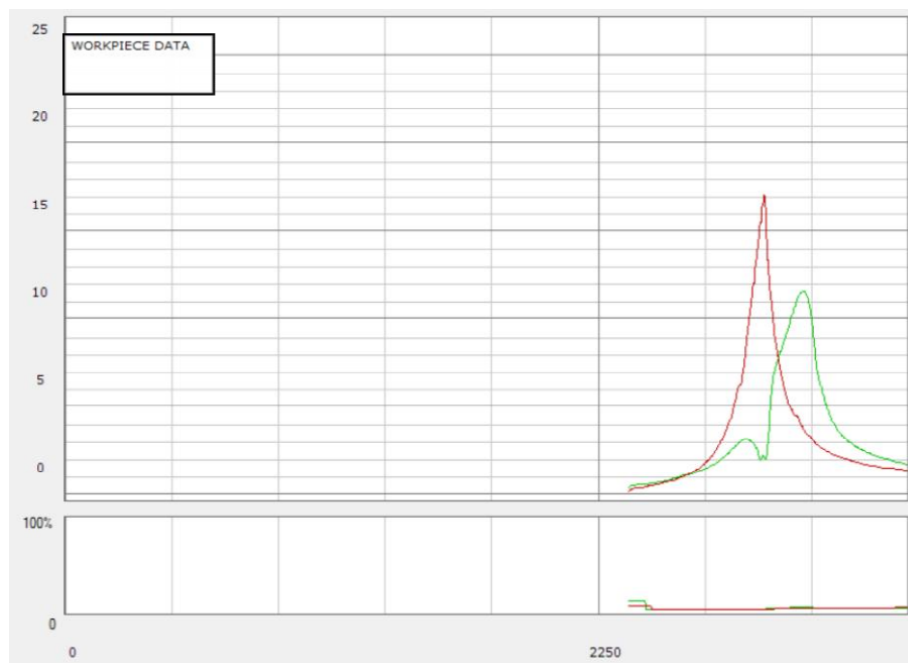
Her ses der en klar ændring på emne 13 før og efter behandlingen. Behandlingen er udført med en motorindstilling på 100% i forhold til hvor mange newton den skal levere i vibrationerne i 60 min. På figur 38 er der udført et pre-scan på emne 12 og post scan på emne 13, her ses der en ændring i frekvenserne. Det vil sige, at selvom man ikke kan registrere ændringerne løbende og sørge for den mest optimale behandling ved at befinde sig på resonans hele tiden og ikke en blanding af sub-resonans og resonans, så har behandlingen afstresset emnet.



Figur 39: pre scan af begge emner, emne 12 er det grønne data sæt og emner 13 er det røde datasæt. Dan ses at peaksne ikke er rene og der er støj på da de påvirker hinanden.

På ovenstående billeder fås der ikke et specielt rent peak, årsagen til dette er undersøgt. Når der ikke er lighed imellem de 2 emners peaks fungerer de som støj for hinanden, den lille ekstra bløde top der ses på både pre og post scan er egenfrekvensen fra det andet emner fastspændt planet som tilfører energi til planet og derved påvirker det emner der

bliver taget måling på. Hvis der forsøges at afmontere eller at sætte en dæmper på det andet emne og køre analysen igen ses der på figur 40, at dette fænomen ophører med at eksistere. Dette kan ikke undgås og har ikke betydning for behandlingen, da der behandles på en frekvens der er højere i amplitude, men kan have betydning for det visuelle man får leveret i plottet i form af støj.

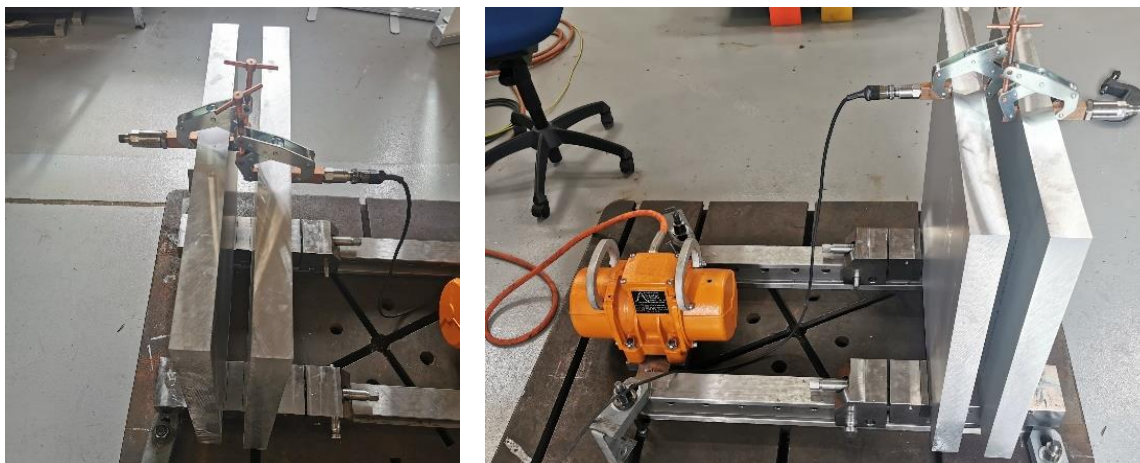


Figur 40: Emne 12 er Prescan som ses som grøn linje, og post scan er emne 13 som er den røde linje, begge svan for foretaget som prescan. Der ses her mindre støj.

Den multiple behandling er udført for 4 af virksomheds nr. 6 emner. De første to er stillet således at bøjningstilstanden er dominerende og på de næste to er det vridningstilstanden. Fikseringsmetoden kan have en indflydelse på behandlingen. For at sikre at koblingen af emnerne til planet med motoren er ens på emnerne er der desuden blevet benyttet en momentnøgle.

### 5.2.1.1 Virksomhed nr. 7

Virksomhed nr. 7 fremstiller prototyper og mindre serier i aluminium, magnesium og zink ved processerne gipsstøbning, trykstøbning og CNC-bearbejdning. Virksomhed nr. 7. havde problemer med at bearbejde deres aluminiumsplader, se figur 41, hvilket resulterede i at de kontaktede os.



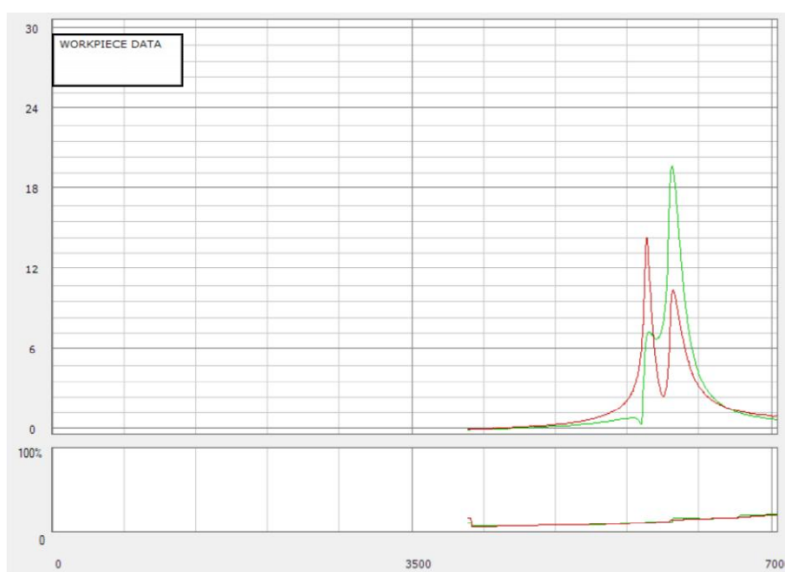
Figur 41: Emner fra virksomhed nr. 7 multipel opstilling.

Virksomhed nr. 7 sendte os aluminium plader med dimensionerne 50×563×670mm. For at komme lidt ind på egenskaberne på aluminiumsprofilerne se Tabel 3.

Tabel 3: Aluminium egenskaber.

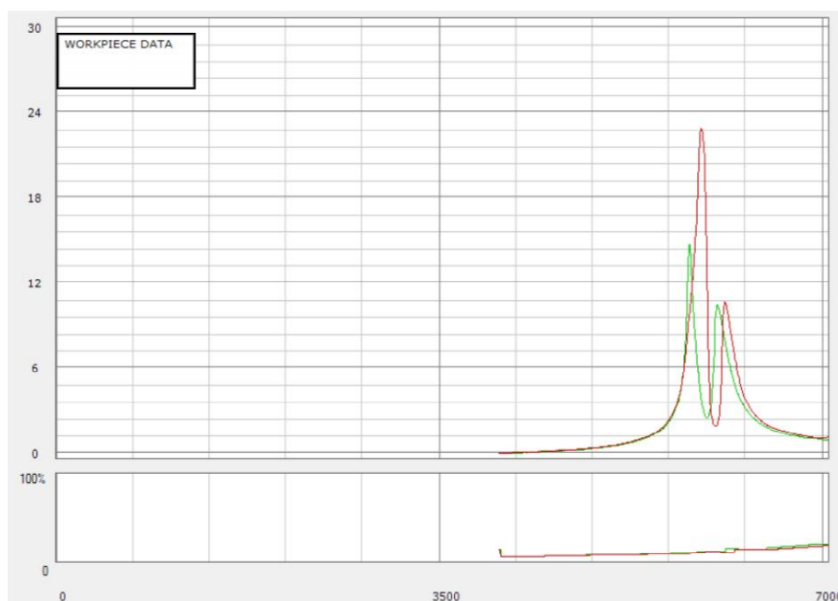
Legering	Tilstand	Varmeledeseegenskab [W/m*K]	Varmeudvidels eskoefficient [ $\mu\text{m}/(\text{m} * \text{K})$ ]	Smeltepunkt		Elasticitetsmodul [kN/mm <sup>2</sup> ]	Elektrisk ledeevne [%IACS]
				Mi n	Max		
EN AW-6082	T6	172	23,1	575	650	70	44

Her behandles emnerne multipelt, ved at lave et pre-scan på begge emner og sørge for at emnerne er tunet tilstrækkeligt som muligt. Dette er gjort ved at tilføje et tilsvarende t-clamp og et accelerometer på modsatte emne således at massen er identisk. På figuren anvist under, er der lavet et pre scan for hvert emne, grundet softwarens begrænsninger er pre scan for emne 7 grøn og pre scan for emne 8 rød på nedenstående graf.



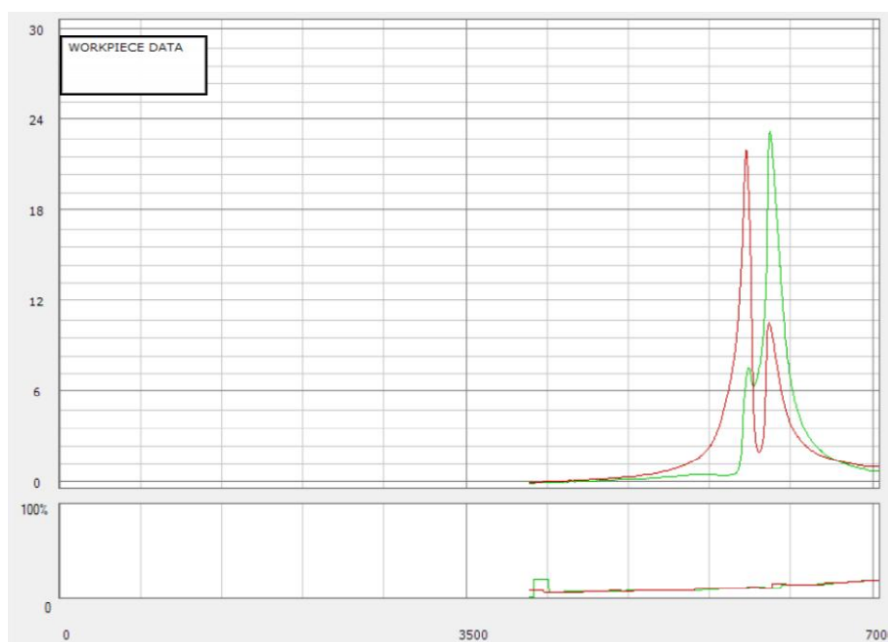
Figur 42: Prescan på emne 7 og postscan på emne 8 før behandlingen begge scan er pre scan før behandlingen men grundet softwarens begrænsninger kan der ikke laves flere pre scans i samme graf.

Figur 42 illustrerer at frekvenserne ligger op ad hinanden, hvilket betyder, at emnerne kan behandles på samme tid, men at det nødvendigvis ikke behandler dem med resonans. Efter dette er der udført et pre-scan og post-scan på emne 8. Det vil sige, at man kun betragter opførslen på emne 8 og emne 7 passivt følger med.



Figur 43: Pre- og postscan på emne 8 hvor det kan ses at amplituden stiger og egenfrekvensen også stiger.

Her ses der en ændring på emne 8, ændringen er ikke som forventet da frekvensen er steget, dog er amplituden steget som forventet.



Figur 44: Prescan på emne 7 og postscan på emne 8 efter behandlingen begge scans er udført efter behandlingen men grundet software begrænsninger er emne 7 lavet som pre scan.

På Figur 44 er der udført et pre-scan på emne 7 og post-scan på emne 8 for at se om emne 7 er blevet behandlet passivt. Ved at betragte figur 42 og figur 44 ses der at responset har ændret sig på begge emner, om det passive emne er blevet behandlet helt optimalt med resonans eller subresonans kan ikke vides.

Virksomhed nr. 7 har bearbejdet emnerne og her har det desværre vist sig at VSR-behandlingen ikke har haft nogen effekt. Materialetilstanden er T6, hvilket vil sige at det har været varmebehandlet og er hovedårsagen til, at det måske ikke har virket. VSR-processen tager ikke så godt imod varmebehandlede emner. Det er hermed eftervist at denne type materiale med denne specifikke tilstand ikke er VSR egnet. Det er hermed fastslået at der ikke var yderligere muligheder for at reduceres residualspændingstilstanden i disse emner

### 5.2.1.2 Virksomhed nr. 3

Virksomhed nr. 3 havde sendt valsede stangemner i 2 dimensioner. I den anledning var der lavet et fikstur, som var tiltænkt multipel behandling. Virksomhed nr. 3 har siden da valgt ikke at fortsætte, hvilket resulterede i at fiksturet ikke blev anvendt. Fiksturet kan benyttes til alle cirkulære emner med en vis diameter. Fiksturet er designet således, at det er egnet til små og mellemstore cirkulære emner. På Figur 45 kan det ses, at der er plads til at behandle 2 mellemstore emner og 3 små emner på modsatte side.



Figur 45: Fikstur til mellemstore og små cirkulære emner.

### 5.2.1.3 Virksomhed nr. 11

Virksomhed nr. 11 leveret kold flydepressede emner, de er siden da gået konkurs. Dette har så medført, at DAMRC har overtaget rørene. Til behandling af rørene er anvendt den pneumatiske motor.

## 6 Tilpasning af industritypiske emnestørrelser (WP5)

Arbejds pakken indebærer, at der skal designes og fremstilles udstyr til højfrekvent VSR-behandling samt at DAMRC med dette udstyr skal eftervise effekt på små emner.

Derudover involverer denne arbejds pakke udvikling af instruktioner til praktisk anvendelse som guide-lines i industrien, sådan at bearbejdningsvirksomhederne får lettere ved at komme i gang med at anvende VSR-teknologien og bliver så selvhjulpne som muligt.

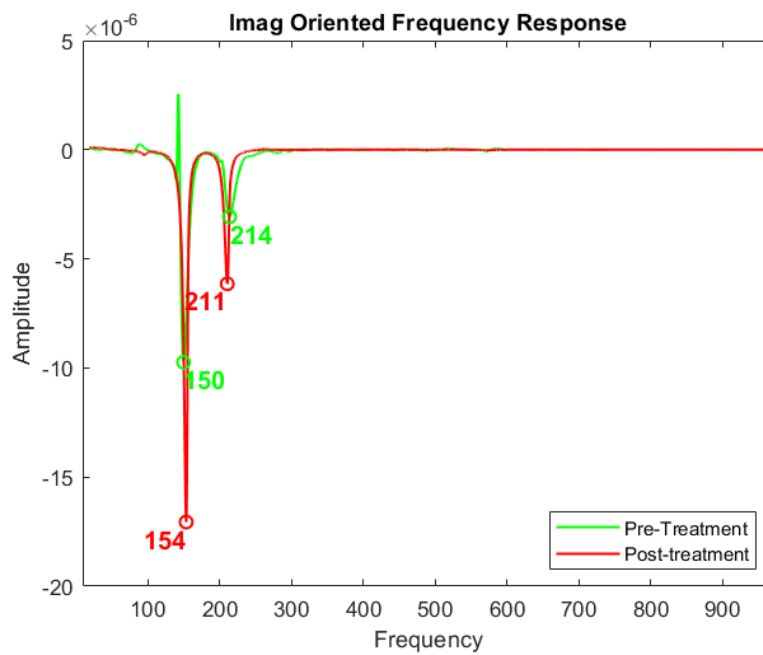
Erfaringen med anvendelse af VSR-udstyret har hidtil været anvendelse til store industriemner – og netop derfor er dette projekt igangsat idet der er udfordringer med mindre industriemner. I Danmark arbejdes der såvel med meget store emner men en stor del af den danske bearbejdningsindustri fremstiller primært mindre industriemner. Dette er årsagen til at der i øjeblikket researches at få løst dette problem.

### 6.1.1 Forsøg med Pneumatisk motor



Figur 46: Pneumatisk motor

Da nogle små kompakte emners egenfrekvens ikke ligger i intervallet 0-133 Hz som den nuværende vibrationsmotor giver mulighed for har DAMRC indkøbt en pneumatisk motor. Det har vist sig at fordelene ved en pneumatisk motor er, at den kan yde 100 % af sine mulige omdrejninger i ubegrænset tid uden at overophede. Desuden er den billig. Den pneumatisk vibrationsmotor var tiltænkt at kunne benyttes til mindre industriemner, som har egenfrekvenser i intervallet 166 – 208 Hz. Der har været succes med den pneumatisk vibrationsmotor, men ulempen har været hvis egenfrekvensen ikke har ligget i intervallet 166 -208 Hz. Den anden svaghed er, at der ikke er forbundet noget feedback system. Det gør processen kompliceret og tidskrævende i form af at taptest udstyret skal inkluderes og man reelt ikke ved om man behandler emnet i resonans eller sub-resonans. Der har derfor også måtte bruges Taptest udstyr til at påvise ændringen i egenfrekvens det kan ses på billedet herunder.



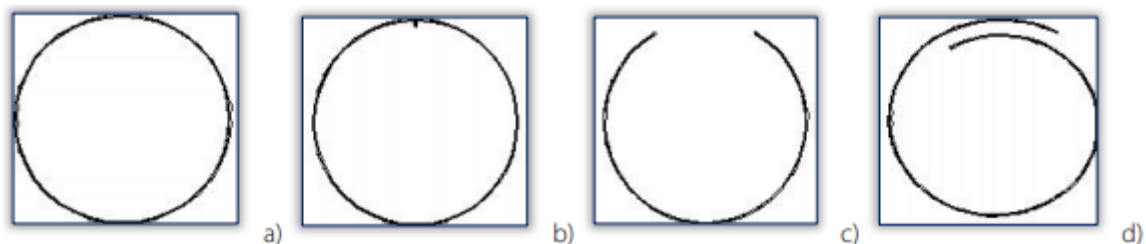
Figur 47: Resultat af test hvor det kan ses at egenfrekvensen er steget og amplituden er steget markant ved både 154 hz og 214 hz. Forsøg med rør pt. 2

I dette forsøg opnås der forståelse for residualsændinger i rør samt måleteknikkerne. Da emnerne kun er hule på den ene side, saves den ene ende af således at der fås nogle "rør". Som anvist på figur 48 er enderne på røret savet over således at røret er hul.



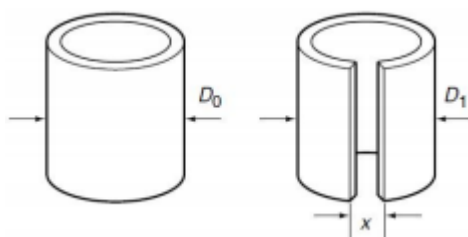
Figur 48: Enden skæres af.

Ideen er at fræse emnet på langs for at se om der er residualsændinger i røret = destruktiv test. De vil så optræde som en deformation af det nu åbne rør, som skitseret på figur 49.



Figur 49: a) før fræsning b) efter fræsning, her er der ingen residualspændinger c) trækresidualspændinger d) trykresidualspændinger.

Måleteknikken der bliver benyttet for at se påvirkningen fra residualspændingerne, er vist på figur 50. Fremgangsmåden viser om der er residual træk- eller tryk spændinger.



Figur 50: Målemetode.

I dette forsøg anvendes en 10 mm endefræser, hvilket vil sige at hvis afstanden (x) fra de to opståede flader er 10 mm er der ingen residualspændinger. Hvis afstanden er mere end 10 mm er der residuale trækspændinger og hvis det er mindre end 10 mm er der residuale trykspændinger.



Figur 51: Fræsede hule rør.

Under bearbejdningen blev der i hvert forsøg betragtet sammentrækninger af materialet der resulterede i at emnet prøvede at sætte sig fast i endefræsere og derfor endte ud med det anviste på figur 51. Efter bearbejdningen af hvert emne blev afstanden x målt i midten af emnet og kan aflæses på Tabel 4.

Tabel 4: Resultater af forsøg.

Behandlede emner	148 X 40 mm Afstand x	148 X 40 mm $D_1 - D_0$	180 X 40 mm Afstand x	180 X 40 mm $D_1 - D_0$
B1	8,06	1,94	7,51	2,49
B2	8,10	1,90	7,80	2,20
B3	Fejl	Fejl	7,75	2,25



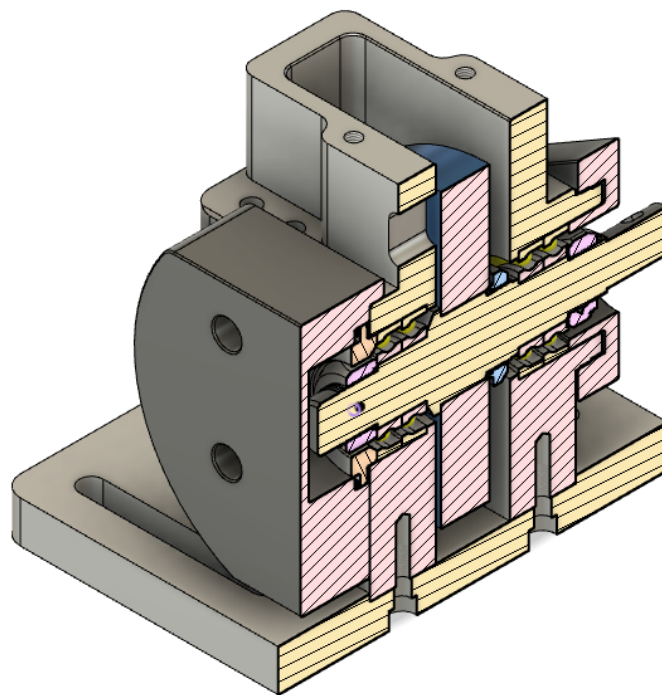
B4 (VSR)	8,80	1,20	7,92	2,08
----------	------	------	------	------

Det er tydeligt at se, at de VSR behandlede emner har færre residuale trykspændinger end de resterende da sammentrækningen er mindre – dog var ønske scenariet at der ingen residualsændinger skulle opstå ved B4, dette var desværre ikke tilfældet men. Det vil være interessant i et opfølgende projekt at gentage forsøget med flere test emner, hvoraf nogle ville skulle varmebehandles til en direkte sammenligning af de to metoder. På disse emner har virksomheden haft ikke kunne løse problemet med varmebehandling, og derfor anses VSR for at være en yderst relevant behandling i dette konkrete tilfælde.

### 6.1.2 Højfrekvent motor

Da projektet blev skrevet, var ønskescenariet en 20 kHz motor. Undervejs er DAMRC blevet klogere og det har vist sig, at der ikke findes en egnet 20 kHz motor til dette formål. I projektbeskrivelsen bliver der nævnt, at der skal designes og fremstilles et højfrekvent udstyr, som er bedre tilegnede mindre emner. Her har Mercantec bistået DAMRC med rådgivning, og efterfølgende hjulpet med at lave et Graphic User Interface (GUI), til styring af flere motorer. I første omgang er DAMRC's eksisterende vibrations motor blevet tilsluttet systemet.

Efterfølgende er der med rådgivning fra Mercantec blevet indkøbt en motor på 1,5 kW og 3400 rpm. DAMRC her hertil udviklet en vibrationsenhed med gearing der kan tilsluttes den indkøbte motor med remtræk. Gearingen imellem svinghjul på motor og vibrationsenhed gør at der burde opnås 23360rpm på vibrations-enheden hvilket tilsvare 390 Hz.

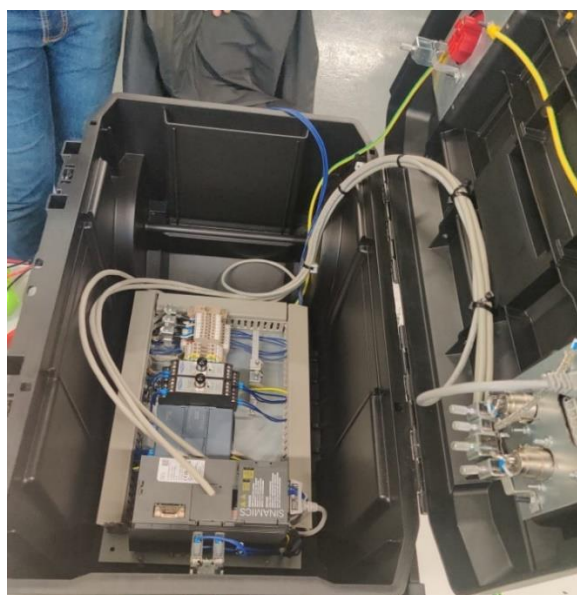


Figur 52 : Snit af vibrationsenhed

Der er til styringen af vibrationsenhed og motor lavet en kuffertløsning med frekvensomformer, PLC og signalkonditioners. Dette er konstrueret under et forløb ved Mercantec som har stået for el-installation og programmering samt opsætning med deres tidligere leverede GUI.

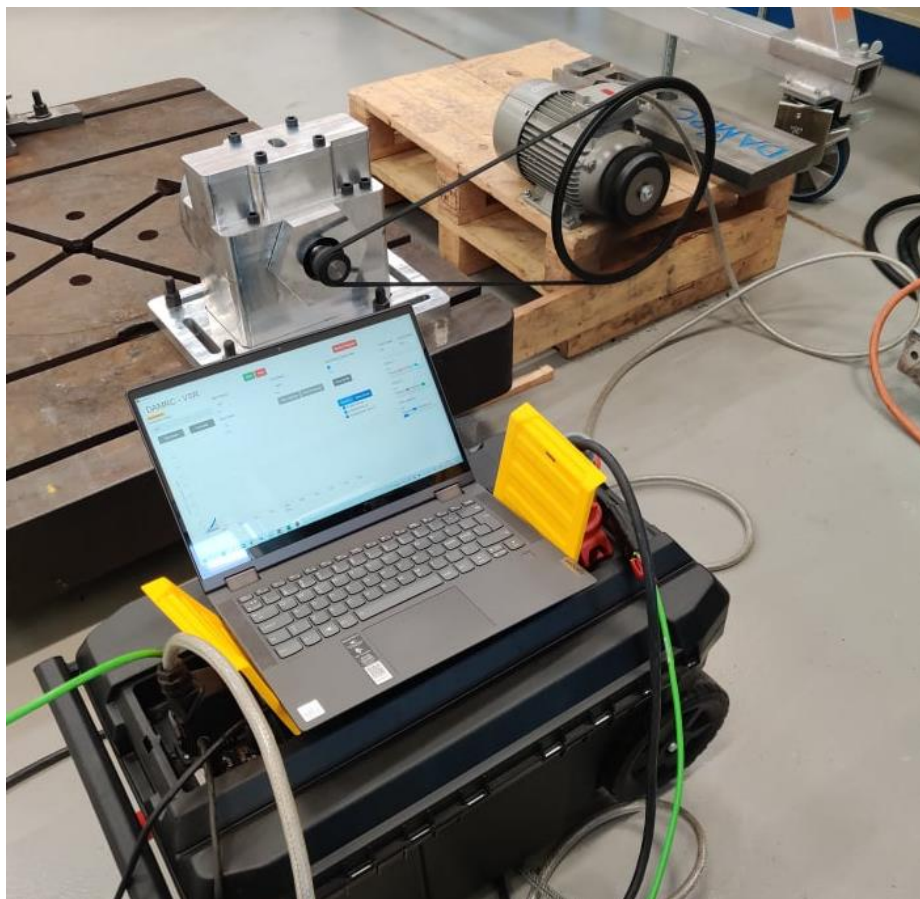


Figur 53: Vibrationsenhed samlet



Figur 54: Kasseløsning med styring

Der er med den nye motor opnået 11507 rpm tilsvarende 192 Hz som er 44 % højere end det eksisterende udstyr hos DAMRC. Efter test hos DAMRC har det kunnet konkluderes at den indkøbte motor ikke kan trække vibrationsenheden ved høje omdrejninger. Der ville ikke inden for budgettet på dette projekt kunne indkøbes større motor og frekvensomformer.



Figur 55: Samlet set up med styring, motor og vibrationsenhed fastspændt på plan

### 6.1.3 Instruktioner til brug af nyt VSR-udstyr

Tabel 5 Brugsanvisning til nyt VSR-udstyr

Step nr	Step	Vær opmærksom på
1	Først fastspændes vibrations enhed og motor på separate plan. Som vist på figur 55 kan det ses at vibrations enhed er fastspændt på et plan af metal, og motoren til at trække den er fastspændt på en palle ved siden af.	Dette step er nødvendigt fordi, at en motor ikke fungerer optimalt under stærke vibrationer.
2	Ledninger forbindes. Der skal bruges kraftstik til at drive styringen og motoren. Derudover skal kabel til motor forbindes. Kabel til accelerometer 1 Kabel til accelerometer 2 Ethernet kabel til at få forbindelse til styringen via computer.	Alle kabler er lavet så de ikke kan sættes i forkert stik. Hvert kabel kan kun forbindes i dets eget stik på styringskassen. Kun styringen til motor kan vendes forkert, men der er tal på benene både, på han og hun stikket som skal passe sammen.
3	Opsætning af emner til VSR. Opsætning af industriemner kan variere alt efter emnets geometri. Som udgangspunkt bør det fastspændes direkte på planet ligesom motoren. Eventuelt kan der anvendes proclamp til at fastspænde flere emner til multipel behandling.	Der skal eventuelt udvikles fiksuter til emner der fastspændes, da kraften under VSR-behandling vil kræve en hård fastspænding, der evt. kan

		deformere emnerne hvis dette ikke gøres korrekt.
4	<p>For selve behandlingen skal der først køres et Pre-scan. Der anbefales at scanne ved 10rpm/måling. hvor der fastlås, om der er et behandlingspunkt (over 3g) og ved flere behandlingspunkter skal der udvælges et behandlingspunkt.</p> <p>Hvis der ikke er behandlingspunkt, kan der evt. stilles på amplituden, eller ændres i opstillingen med henblik på at fremme vibrationer.</p> <p>Hvis der er flere mulige behandlingspunkter, er det en vurderings sag for teknikeren</p>	Ved flere behandlingspunkter skal man overveje, bliver motoren varm ved at vælge et der kræver højere RPM, og hvor mange G kan fastspændingen og emnet klare.
5	Behandlingen anbefales at tage ca. 30 minutter. Det er vigtigt at operatøren sikrer sig at fastspændingerne ikke løsner sig, samtidig vil operatøren på udstyret skulle sikre sig at amplituden opretholdes. Dette kræver ofte at der løbende skrues ned for frekvensen. Hvis opstillingen løsner/rykker sig vil der skulle tages et nyt pre-scan.	Det sker ofte at amplituden stiger under behandlingen og efterfølgende langsomt falder. Den høje amplitude kan så ofte opretholdes, ved langsomt at skrue ned for frekvensen
6	Efter behandlingen tages et post-scan, som efterviser om der er sket en ændring under behandlingen.	Det ses ofte at amplituden stiger og egenfrekvensen falder omkring de eksisterende egenfrekvenser. Der hvor der findes "støj" bør det ikke ændre sig mærkbart.
7	Til sidst analyseres og konkluderes der ved at sammenligne pre og post scan, hvorvidt der er sket en ændring.	

### 6.1.4 Multipel behandling.

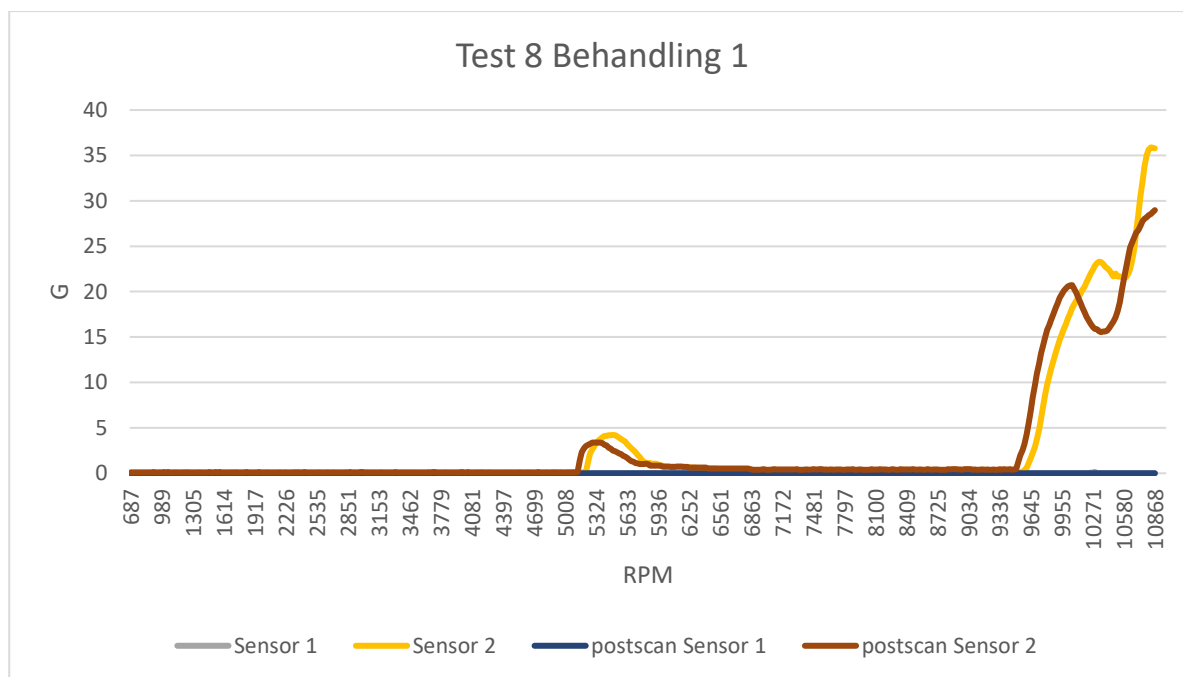
For at nedsætte omkostningerne for hvert behandlet emne, er der lavet forsøg med multipel behandling. Tidligere er der beskrevet hvordan en operatør har kunnet behandle 2 emner ved at betjene 2 systemer dette kategoriseres ikke som multipel behandling. Med multipel behandling menes der at et system behandler minimum 2 emner samtidig ligesom de tests der blev foretaget under WP4. DAMRC har modtaget 50 emner i 3 forskellige størrelser hvor fordelingen har været 20x2,5kg 20x5kg 10x30kg. Emnerne er blevet fastspændt med Pro-Clamps i sæt af 3-6 stk. Der er arbejdet ud fra et princip at med stram nok fastspænding vil emnerne og Pro-Clamp reagere som et emne under behandling. Der er testet både med eksisterende VSR-udstyr men primært gjort brug af det nyudviklede VSR-set-up.

Tabel 6: udsnit af tests med multipel behandling

Test nr	5		6		7	
Størrelse på emner	Mellem		Små		Mellem	
Antal	3		3		5	
Emne 1 markeret	T6P1D		T7P1D		T8P1D	
Emne 2 markeret	T6P2D		T7P2D		T8P2D	
Emne 3 markeret	T6P3D		T7P3D		T8P3D	
Emne 4 markeret					T8P4D	
Emne 5 markeret					T8P5D	
Emne 6 markeret						
Behandling	1	2	1	2	1	2
Start tid	08.30	09.09	10.05	11.10	14.15	15.20
Slut tid	09.00	09.39	10.35	11.40	14.45	15.50
G sensor 1	5,2	8	14,1	0,5	0,9	6
G sensor 2	6,7	5	3,2	22	5,8	5
rpm motor	1400	1500	1410	1455	795	850
RPM vibrator	9618	10305	9686,7	9995,85	5461,65	5839,5
Ubalance	1 lille klods	1 lille klods	1 lille klods	1 lille klods	1 stor klods	1 stor klods

Som der kan ses på udklipet fra test, er der for behandlingspunkt blevet kørt ved 9500-10500 rpm tilsvarende 155-175 Hz hvilket er højere end hvad det oprindeligeudstyr har kunnet levere. Dette har gjort den nye vibrationsenhed anvendelig til behandling af emner i skalaen 2,5-30kg.

Tabel 7: Data fra Mercantec program



Figur 56: Data fra nyt vsr system. test8 behandling 1

Data fra det nye system og nye program skal behandles i Excel og kan se således ud. Figur 56 er data fra test 8 første behandling, hvor der er behandlet med 9755 rpm i 30 minutter, der er opnået en g kraft på 22,3 G på det punkt under

behandlingen. Det kan tydeligt ses at egenfrekvensen er rykket mod højre, altså at den er faldet. Samtidig kan det ses at amplituden er faldet. Det ses helst at egenfrekvensen falder og amplituden stiger. Det at egenfrekvensen falder er et sigende tegn på en god behandling i forhold til DAMRC's erfaring. Fastspændingen har været på 140 Nm og er målt med momentnøgle.

Emnerne er opmålt efter VSR-behandling og DAMRC har modtaget måldata fra de små emner på 2,5kg. Dataene fra disse emner ses i tabellen herunder. Der har været 72 målepunkter med tolerancer fra 0,3mm til 0,02mm i forhold til nominelle værdi. For at få et samlet overblik over måldata og om de har haft positiv indvirkning på den dimensionale stabilitet, er der lavet et samlet gennemsnit af afvigelserne fra den nominelle værdi for de 72 målepunkter.

Tabel 8 Uddrag af opmålinger fra emner fra virksomhed nr 10

Emne nr	T2P4B (ubehandlet)	T2P3B	T2P2B	T7P1D	T7P2D	T7P3D
Gennemsnit af afvigelse	0,0506mm	0,0479mm	0,0493mm	0,0475mm	0,0496mm	0,0443mm
Steder hvor emnet er udenfor tolerance	4	4	2	2	3	0

Der kan ses en svag tendens til at gennemsnittet af afvigelserne er mindre ved de behandlede emner i forhold til de ubehandlede. Det skal tages med at datagrundlaget desværre er svagt da sammenligningsdata kun består af et ubehandlet emne hvor et gennemsnit af 3-5 kunne have været ønskværdigt. Det kan ud fra disse data konkluderes at VSR-behandlingen har haft en svagt positiv ændring med 5-10% forbedring ud fra et gennemsnit af alle 72 målepunkters afvigelse fra nominalværdien - samt at flere mål er indenfor tolerancen.

### 6.1.5 Behandling af emner fra Virksomhed nr. 10

DAMRC har sent i forløbet modtaget 7 emner fra Virksomhed nr. 10. 4 af disse har været ens og kan ses på figur 57. Disse har været forsøgt behandlet som tidligere hvor opspænding har været ensartet og afstand på emnerne har været ens. Der har været lavet flere pre-scans med det nye udstyr hvor data har kunnet tages ud og sammenlignes. Desværre er der blevet erkendt at disse emner ikke opnår en amplitude som vil være tilstrækkelig for behandling. Og

der er opgivet på at behandle emnerne multipelt. Der har ikke været forsøgt med fastspænding i Proclamp som Virksomhed nr. 9 emnerne, da der formodes at emnerne der ikke er solide, vil blive deformeret af den fastspænding.



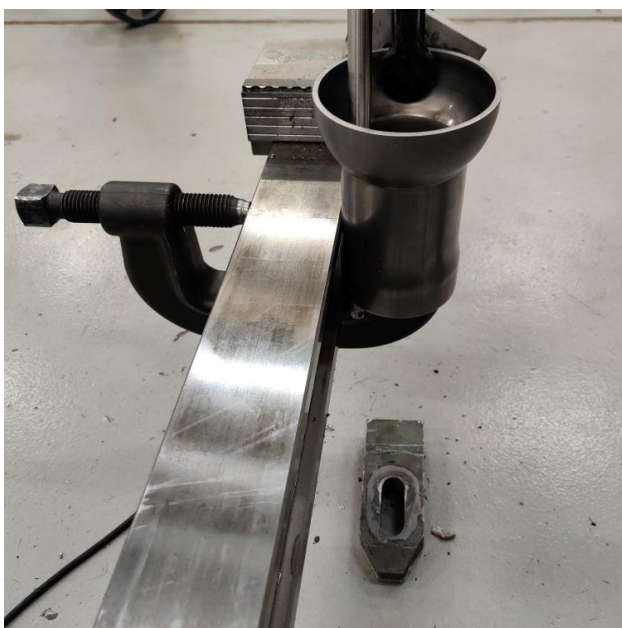
*Figur 57: 4 ens emner fra virksomhed nr. 10 spændt op til multipel behandling*

Emnerne er efterfølgende blevet behandlet 1 ad gangen i proclamp, hvor de er blevet fastspændt uden at blive klemt. Dette kan ses på figur 58 herunder.



Figur 58: enkelt behandling af stort broen emne

Opspændingsmetode for de 3 mindre emner kan ses på figur 59 herunder. Den har været fastspændt Proclamp men af frygt for at deformere rørene er de fastspændt med C-clamp så der kun presses på en side af røret. Grundet software fejl kunne der ikke trækkes data ud fra et af behandlingerne. Men de 2 andre små emner viste tegn på succesfuld behandling ved at egenfrekvensen faldt men at der ikke var mærkbare ændringer i amplituden.



Figur 59: Broen lille emne fastspænding



Virksomhed nr. 10 har meldt tilbage at de har kunnet høre ændring på egen frekvensen på 2 ud af 4 af de store identiske rør. Dette underbygger at VSR-behandlingen har været succesfuld. Hvad der sker med rørene i det videre bearbejdningsforløb vides ikke.

### 6.1.6 Beregning af el-forbrug

Der er taget udgangspunkt i et emne på 30 kg af støbejern. Og processen fra støbning til færdigbearbejdet emne. Det antages at der transporteres med lastbil <16 tons samt at Thermal Stress Relief (varmebehandling TSR) bruger 70 % af det energiforbrug det kræver at støbe jern, da det kræver den halve temperatur, men at den skal bevares i 8-16 timer. Strømmen beregnet til CNC fræsning, er taget fra et tidligere projekt hos DAMRC, hvor der har været målt på en CNC-maskine (DMU80) at den brugte ca. 6 kWh. Strømmen fra VSR er taget med udgangspunkt i normalt strømforbrug på den 2.2 kW motor under en behandling.

Derudover kan VSR udstyret transporteres så der spares ved VSR behandling den transport hvor emnerne fragtes til en ovn, da det kan sættes på både på støberiet og hos bearbejdningsproducenten.

Tabel 9: Miljøberegning

Proces	TSR	kWh	VSR	kWh	Procent i forhold til TSR
Støbning	1050 MJ	291,6	1050 MJ	291,6	100
Transport	2.976 MJ	0,826			0
Materiale normalisering	735 MJ	204,12	1,66 kWh	1,66	0,8
Transport	2.976 MJ	0,826	2.976 MJ	0,826	100
CNC-bearbejdning	30,6 kWh	30,6	30,6 kWh	30,6	100
Total		527,972		324,686	203
% besparelse					<u>39%</u>

Det kan ses at der på den totale proces (samlet forbrug fra støbt emne til behandlet) spares 39 % og at der under materiale normalisering spares 99.2% i forhold til almindelig TSR behandling, udregninger kan findes i bilag. Der er her ikke regnet med multipel behandling. Men ved multipel behandling af 3 emner, vil der kunne spares 99,7 % på punktet materiale normalisering. Stigende el- og gas priser gør denne besparelse mere relevant ud fra et økonomisk synspunkt, da dette gør TSR behandling betydeligt dyrere i modsætning til VSR.

### 6.1.7 VSR/TSR omkostninger

Det antages at

- En tekniker koster 350kr/timen at have ansat.
- VSR-udstyr koster 250.000 kr. afskrives over 5 år og kan bruges 1000 timer årligt, og koster derfor 50kr/timen,
- En trænet tekniker kan betjene 2 systemer ad gangen, så timeprisen for en tekniker og 2 systemer bliver 450kr. timeprisen for hver behandling bliver derfor 450/2=225kr/time
- Omkostninger ved TSR varierer efter mængde og størrelse på emnerne, typisk er det 4-6kr pr. kg materiale. For meget små emner og mængder, kan det være helt op til 11kr. Der tages i eksemplet udgangspunkt i 5kr pr kg.
- Der ses bort fra transportomkostninger til TSR behandling, da dette vil variere meget efter virksomheders geografiske placering.

Proces for store emner	Opsætning og Pre-scan	Behandling	Post-scan omstilling og Pre-scan	Anden behandling	Post scan	Total
Tid	20 minutter	30 minutter	30 minutter	30 minutter	10 minutter	120 minutter
Omkostning	75kr	112,5kr	112,5kr	112,5	37,5	450kr

Tabellen påviser processen under en behandling.

Proces for en behandling	Opsætning og Pre-scan	Behandling	Post-scan	Total
Tid	20 minutter	30 minutter	10 minutter	60 minutter
Omkostning	75kr	112,5	37,5	225kr

TSR vil fast koste 5 DKK pr kg emne, i forhold til 2 behandlinger vil TSR være billigere for emner under 90kg ( $450/5=90$ ) med oprindeligt udstyr. Medtages det, at der kan behandles multipelt op til 6 emner ad gangen med VSR vil skæringen være ved en emnestørrelse på 15kg ( $90/6=15$ ) før TSR bliver et billigere alternativ.

Tages der udgangspunkt i at emnerne kun behøver en enkelt behandling, ligger skæringen ved 45kg ( $225/5=45$ ) for et enkelt emne, hvorimod der med behandling af 6 emner ad gangen vil kunne behandles emner ned til 7,5kg ( $45/6=7,5$ ) pr. emne før TSR bliver økonomisk fordelagtigt.

Det skal tilføjes at der er emner, som grundet materiale egenskaber ikke må blive TSR behandlet, hvortil der førhen ikke har været muligt at lave materiale normalisering.

Det skal yderligere tilføjes at virksomheder netop er begyndt at italesætte, at VSR-behandling med de nuværende gas- og energipriser (og stigende) bliver mere og mere interessant uanset at der ikke kan behandles 100-vis af emner på engang som tilfældet er i en ovn ved TSR-behandling.

## 7 Perspektivering og videre anvendelse af resultater

Der er igennem projektet blevet dokumenteret metoder og procedurer, til at lave effektiv VSR-behandling. Der er endvidere blevet dokumenteret, at mindre emner typisk har en egenfrekvens der er højere, end hvad det oprindelige udstyr DAMRC havde til rådighed i starten af projektet. Der blev derfor udviklet en ny højfrekvent enhed, til behandling af små emner som nåede 192 Hz. Denne enhed vil der kunne videreudvikles på, da det formodes at ved indkøb af ny motor og frekvensomformer, vil der kunne opnås op mod 333 Hz.

Dokumentationen af muligheden for multipel behandling med op mod 6 emner i dette projekt, giver også mulighed for at videretænke mulighederne indenfor dette. Der blev kun behandlet op til 6 emner ad gangen i dette projekt, grundet muligheder for fiksturering af emnerne. Et nyt fikstur vil med baggrund i den viden der er kommet til veje i dette projekt, give mulighed for at behandle mange flere emner ad gangen. Et max antal vil afhænge af emne størrelse, fiksturering, og kraft på motor.

DAMRC vil kunne bruge den viden og dokumentation der er blevet foretaget i dette projekt, til i fremtiden at finde en partner til kommercialisering af VSR udstyret. Med udviklingen og brugen af teknologien skabes der en efterspørgsel på VSR i industrien. Denne efterspørgsel kan DAMRC pt opfylde, ved at modtage og behandle emner. Længere ude i fremtiden vil det blive nødvendigt at finde en kommercialiseringspartner som kan sælge eller stille flere systemer til rådighed ude i industrien til behandling af emner. Der vil derfor hen ad vejen, skulle kigges på en samarbejdspartner til at fremstille og sælge udstyret.

DAMRC har samarbejdet med Micro-Technic sideløbende med projektet. Micro-Technic har udviklet et cloudbased styresystem, som er baseret på deres Skylark. Systemet søger at automatisere VSR. Indtil videre har Micro-Technic brugt en højfrekvent Butt kicker som motor. Der er under tests også opnået 4,5 g med denne vibrations enhed, hvilket er nok til at kunne behandle, men ikke imponerende. Fokusområdet har været selve styringen til VSR, og automatiseringen af denne. Udstyret er testet hos DAMRC med gode resultater for styringen.

## 8 Konklusion

Der er igennem WP1 blevet undersøgt og fundet 11 samarbejdspartnere i industrien hvor der har været opbakning til projektet. Efterfølgende er der igennem projektet blevet identificeret yderligere 5 virksomheder som har leveret emner til projektet. Alle emner er blevet testet og behandlet med VSR. Der er igennem disse behandlinger under WP3 blevet **dokumenteret hvordan VSR har effekt på emner samt hvilke faktorer der har indvirkning på behandlingen**. Det kan ud fra forsøgene foretaget i dette projekt konkluderes at fiksturering, tilspænding, fikseringstype har indvirkning på resultatet af en VSR-behandling. Derudover er effekten af VSR blevet dokumenteret via modal analyse ( Taptest) samt destruktiv metode ved CNC-bearbejdning.

I WP4 er der blevet testet og undersøgt metoder til at VSR kan gøres billigere for industrien at bruge. Det er lykkedes DAMRC at lade en trænet tekniker **betjene 2 systemer samtidig**, derudover er der udviklet **script** til at overskueliggøre data så der ikke skal en ingeniør til at gøre dette men kan overdrages til en trænet tekniker. Det kan også konkluderes at det er muligt at **fjernstyre** systemet så en tekniker ikke fysisk skal være ved systemet. Der er også i denne arbejdsplan undersøgt mulighederne for **multipl behandling**. Da der på eksisterende udstyr ikke er mulighed for at tilslutte to accelerometre er multipl behandling gennemført med det i WP5 nyudviklede udstyr. Effektiviteten af VSR er blevet påvist igennem et simpelt forsøg, hvor træk og tryk spændinger blev gjort målbare, ved at opsikere rør. De behandlede og ikke behandlede rør, er blevet sammenlignet med det resultat, at det VSR behandlede rør havde færre spændinger end de ikke behandlede.

Der er under WP 5 blevet udviklet en ny højfrekvent vibrations enhed i samarbejde med Mercantec. Denne enhed er testet og kan køre 192 hz hvilket er **44 % højere** end det udstyr DAMRC hidtil har haft tilgængeligt. Vibrationsenheden er designet og fremstillet af DAMRC og har fået lavet styringsprogram og automation af Mercantec. Den er efterfølgende brugt til at afprøve **multipl behandling af mindre og mere industritypiske emner**. Der er testet og lavet succesfuld multipl behandling med emner fra 2,5 kg og opefter og der er behandlet op til 6 emner på en gang. Det betegnes som en succes at vi er nået så langt.

DAMRC vil arbejde videre med at fintune udstyret og teste i industrien med målet at udstyret på et tidspunkt kan overdrages til en kommercialiseringspartner.

## 9 Oversigt over gennemførte formidlingsaktiviteter i projektperioden

Se også Bilags-dokument samt tilsendte præsentation:

Roll-up - står hos DAMRC:

DAMRC webpage: <https://www.damrc.dk/miljoenlig-materialenormalisering/>

Linkedin samt FB fra DAMRC og Dansk Energirådgivning

ELFORSK dag afholdt hos DAMRC den 16. september 2020 med indlæg fra 3 Elforsk-projekter – PPT vedhæftet

Indlæg og demo v/Manufacturing Festival 8. maj 2020 hos Aarhus Universitet, Herning + DAMRC. Dansk Energirådgivning del af følgegruppen

Video optaget og udsendt primo januar 2021

<https://www.youtube.com/watch?v=dM66zVxisII>

Teknovation – PDF vedhæftet

Indlæg til ELFORSK Nyhedsbrev:

- Oktober 2020
- September 2021
- November 2021

Stand på følgende messer afholdt hos DAMRC:

- SPÅNLIGA (med deltagelse af 500 gæster)
- MADE OPEN LAB 16. september 2021 (40 deltagere)
- Interforce arrangement (30 deltagere) <https://www.interforce.dk/damrc-danish-advanced-manufacturing-research-center-inviterede-stoettevirksomheder-fra-interforce-region-midtjylland-paa-virksomhedsbesoeg/>