

Voorwoord

Om mij studie Industrieel Ingenieur Elektromechanica optie Elektromechanica aan de Hogeschool West-Vlaanderen departement PIH te Kortrijk, te vervolledigen heb ik gekozen om mijn thesis te maken bij de firma CET-Motoren te Gullegem.

Bij deze wil ik enkele mensen bedanken voor hun steun en hulp tijdens het verloop van mijn thesis.

In eerste plaats dank ik Olivier Courtois en Bruno Vanslambrouck, mijn promotoren, die mij met hun deskundige uitleg tijdens het project hebben begeleid.

Tevens dank ik de directie en arbeiders van CET-Motoren die altijd klaar stonden met de nodige uitleg en hulp.

Ook een woord van dank voor Michaël Luca en Delphine Bouwet die mijn scriptie hebben doorgenomen naar correctheid qua spelling en grammatica.

Ten slotte wil ik mijn ouders bedanken omdat ze mij de mogelijkheid hebben gegeven om verder te studeren en voor de steun die ze mij gedurende de afgelopen vier jaar hebben gegeven.

Inhoudsopgave

<u>VOORWOORD.....</u>	<u>I</u>
<u>INHOUDSOPGAVE.....</u>	<u>II</u>
<u>FIGUREN LIJST</u>	<u>V</u>
<u>TABELLEN LIJST.....</u>	<u>VII</u>
<u>1 INLEIDING.....</u>	<u>- 1 -</u>
1.1 SITUERING VAN HET PROBLEEM.....	- 1 -
1.2 SITUERING EN AANPAK VAN HET PROJECT	- 1 -
1.3 SITUERING VAN HET BEDRIJF	- 2 -
<u>2 TRILLINGSANALYSE</u>	<u>- 3 -</u>
2.1 FILOSOFIE ACHTER HET GEBEUREN.....	- 3 -
2.2 TRILLINGSOPNEMERS	- 3 -
<u>3 VERWERKING VAN TRILLINGEN.....</u>	<u>- 6 -</u>
3.1 BASISBEGRIPPEN	- 6 -
3.1.1 MECHANISCHE TRILLINGEN	- 6 -
3.1.2 FFT-ANALYSE EN SPECTRUM	- 7 -
<u>3.2 ANDERE VERWERKINGSMETHODES</u>	<u>- 9 -</u>
3.2.1 ENVELOPE SPECTRUM	- 9 -
3.2.2 OVERALL METING	- 11 -
3.2.3 SCHOKPULSMETHODE	- 11 -
3.2.4 SCHOKPULS SIGNALLEN EN TRILLINGEN	- 12 -
3.2.5 OPMETEN VAN SCHOKPULSEN	- 12 -
3.2.6 CONDITIEBEWAKING VAN LAGERS	- 13 -
3.2.7 DE GENORMALISEERDE SCHOKPULSAFLEZING.	- 14 -
<u>4 KLASSERING VAN VERWERKINGSMETHODE VOLGENS NIVEAU.....</u>	<u>- 15 -</u>

4.1	ALGEMEEN	- 15 -
4.2	LEVEL 1 METINGEN	- 15 -
4.3	LEVEL 2 METINGEN	- 16 -
5	<u>TRILLINGSVERHOOGING DOOR EXTERNE OORZAKEN</u>	- 17 -
5.1	ONBALANS	- 17 -
5.1.1	STATISCHE ONBALANS	- 17 -
5.1.2	KOPPELONBALANS	- 17 -
5.1.3	DYNAMISCHE ONBALANS	- 18 -
5.1.4	SPECTRAAL BEELD	- 18 -
5.2	RESONANTIE	- 18 -
5.2.1	WAT IS RESONANTIE?	- 18 -
5.2.2	RESONANTIE OF ONBALANS?	- 19 -
5.2.3	HOE RESONANTIE BESTRIJDEN?	- 19 -
5.3	UITLIJNING	- 20 -
5.3.1	UITLIJNINGSFOUTEN	- 20 -
5.3.2	SPECTRAAL BEELD	- 20 -
5.3.3	UITLIJNING OF ONBALANS?.....	- 21 -
5.4	SPELING	- 21 -
6	<u>TRILLINGSVERHOOGING DOOR LAGERSCHADE</u>	- 22 -
6.1	BINNEN – EN BUITENRINGSCHADE	- 22 -
6.1.1	FASE 1	- 22 -
6.1.2	FASE 2 EN 3	- 23 -
6.1.3	FASE 4	- 24 -
6.2	KOOIBREUK	- 24 -
6.3	SCHADE AAN DE ROLELEMENTEN	- 25 -
6.4	BEREKENEN VAN DE LAGERFOUTFREQUENTIES	- 26 -
7	<u>ELEKTRISCHE FOUTEN</u>	- 27 -
7.1	STATORPROBLEMEN	- 27 -
7.1.1	PROBLEMEN	- 27 -
7.1.2	TRILLINGSPECTRUM.....	- 28 -
7.2	ROTORPROBLEMEN	- 28 -

8 MEETAPPARATUUR..... - 30 -

8.1 TESTBANK - 30 -

8.2 MEETAPPARATUUR - 32 -

8.2.1 ONO SOKKI CF-350..... - 32 -

8.2.2 LMS PIMENTO - 33 -

8.2.3 VIBSCANNER..... - 34 -

9 BESPREKING VAN DE MEETRESULTATEN - 37 -

9.1 ALGEMEEN..... - 37 -

9.2 LAGERSCHADEDETECTIE VIA SPECTRUMANALYSE - 38 -

9.2.1 WERKWIJZE..... - 38 -

9.2.2 BEPALEN VAN DE LAGERFOUTFREQUENTIES - 38 -

9.2.3 METINGEN..... - 41 -

9.3 INVLOED VAN BELASTING EN SMERING - 46 -

9.3.1 INVLOED VAN BELASTING - 46 -

9.3.2 INVLOED VAN SMERING - 49 -

9.4 METINGEN AAN DE HAND VAN DE SCHOKPULSMETHODE..... - 52 -

9.5 REPRODUCEERBAARHEID VAN DE METINGEN - 54 -

9.5.1 PROEFOPSTELLING - 54 -

9.5.2 MEETAPPARATUUR - 56 -

9.5.3 UITVOERING VAN DE METING - 58 -

9.6 OPMERKINGEN - 60 -

10 BESLUIT - 61 -

BIBLIOGRAFIE VIII

BIJLAGE 1: INDEX EN UITLEG METINGEN (CD-ROM)

BIJLAGE 2: METINGEN OP LAGERSCHDE (CD-ROM)

BIJLAGE 3: METINGEN OP BELASTING EN SMERING (CD-ROM)

BIJLAGE 4: METINGEN OP REPRODUCEERBAARHEID EN SPM (CD-ROM)

Figuren lijst

- fig. 1.1: Voorkant van het bedrijf CET-motoren
- fig. 2.1: Levensduur van identieke lagers
fig. 2.2: Filosofie van predictief onderhoud
fig. 2.3: Verplaatsingsopnemer
fig. 2.4: Signaalkarakteristiek van een inductieve opnemer
fig. 2.5: Snelheidsopnemer
fig. 2.6: Accelerometer
- fig. 3.1: Eenvoudig massa-veer systeem in beweging
fig. 3.2: Harmonische trilling
fig. 3.3: Eenheden voor het uitdrukken van de amplitude
fig. 3.4: Voorbeeld van een tijdsignaal
fig. 3.5: Spectrum van een harmonische trilling
fig. 3.6: Principe van de FFT-transformatie
fig. 3.7: Voorbeeld van een trillingsspectrum
fig. 3.8: Principe van demodulatie
fig. 3.9: Voorbeeldtoepassing van envelope spectrum
fig. 3.10: Praktijkvoorbeeld van een overall meting
fig. 3.11: Twee fasen binnen en botsing
fig. 3.12: Signaalverwerking
fig. 3.13: Tapijtwaaarde en maximum waarde
fig. 3.14: Normalisatie van de schokpuls methode
- fig. 4.1: Level 1 meting
fig. 4.2: Level 2 meting
- fig. 5.1: Statische onbalans
fig. 5.2: Koppelonbalans
fig. 5.3: Spectrum van onbalans
fig. 5.4: Resonantie
fig. 5.5: Uitlijningsfouten
fig. 5.6: Spectrum van een uitlijningsfout
fig. 5.7: Spectrum van speling
- fig. 6.1: Defect aan buitenring
fig. 6.2: Eerste fase bij ringschade
fig. 6.3: Invloed van de lengte van het defect
fig. 6.4: Tweede fase
fig. 6.5: Derde fase
fig. 6.6: Vierde fase bij ringschade
fig. 6.7: Spectrum bij kooibreuk
fig. 6.8: Spectrum bij schade aan rolelementen

fig. 7.1:	Opbouw stator
fig. 7.2:	Excentriciteit van de rotor
fig. 7.3:	Vervorming van de stator
fig. 7.4:	Stroommeting
fig. 8.1:	Testopstelling
fig. 8.2:	Ono Sokki CF-350
fig. 8.3:	Spectraal beeld opgenomen met Ono Sokki CF-350
fig. 8.4:	LMS Pimento
fig. 8.5:	Software programma Pimento
fig. 8.6:	VibScanner
fig. 8.7:	Tiptector
fig. 8.8:	Software programma Omnitrend
fig. 9.1:	Verschillende gebruikte meetpunten
fig. 9.2:	Demontage V-riemschijf met poelietrekker
fig. 9.3:	Lager 6309
fig. 9.4:	Lager 6209
fig. 9.5:	Lagerverwarmer
fig. 9.6:	Rolling Bearing Catalogue
fig. 9.7:	Snelheidspectrum Case1
fig. 9.8:	Spectrum Case1 in eenheden van aardversnelling
fig. 9.9:	Beschadigde lager Case1
fig. 9.10:	Buitenring lager Case 1
fig. 9.11:	Binnenring lager Case 1
fig. 9.12:	Snelheidsspectrum Case2
fig. 9.13:	Spectrum Case2 in eenheden van aardversnelling
fig. 9.14:	Beschadigde lager Case2
fig. 9.15:	Volledig spectrum Case3 in eenheden van aardversnelling
fig. 9.16:	Spectrum Case3 ingezoomd op 4 ^{de} Harmonische
fig. 9.17:	Motor 0,6 kW belast
fig. 9.18:	Motor 5,7 kW belast
fig. 9.19:	Moter 10,7 kW belast
fig. 9.20:	Amplitudestijging t.g.v. belastingsverhoging
fig. 9.21:	Vergelijking amplitudestijging t.g.v. belastingsverhoging
fig. 9.22:	Lager niet gesmeerd, 0 gram
fig. 9.23:	Lager ideaal gesmeerd, 13 gram
fig. 9.24:	Vergelijking amplitudestijging t.g.v. smering
fig. 9.25:	Teveel smering bij een lager.
fig. 9.26:	Schokpulsmeting op lager uit Case1
fig. 9.27:	SPM meting voor en na smeren
fig. 9.28:	Meting voor demontage
fig. 9.29:	Meting na demontage
fig. 9.30:	Meting met en zonder frequentieomvormer
fig. 9.31:	Meting met Ono Sokki CF-350
fig. 9.32:	Meting met LMS Pimento

- fig. 9.33: Meting met VibScanner
fig. 9.34: Meting radiaal horizontaal rechts
fig. 9.35: Meting radiaal horizontaal links
fig. 9.36: Invloed van druk op de sensor bij SPM
fig. 9.37: Invloed van druk op de sensor bij frequentiespectrum

Tabellen lijst.

- Tabel 2.1: ISO 10816-3 norm
Tabel 8.1: Date sheet 11 kW motor

1 Inleiding

1.1 Situering van het probleem

Machinestilstand is in deze economische tijd een zaak van veel geldverlies. Daarom zijn technici op zoek gegaan naar een middel om dreigende vroegtijdige machine-uitval vast te stellen. Het analyseren van de machinetrillingen bleek hiervoor een krachtig hulpmiddel te zijn. Eveneens is het een goed onderbouwd middel om de leverancier te bewapenen tegen ongegronde garantieclaims.

Het analyseren van trillingen ter bewaking van de machineconditie is niets nieuw. Al jaren gebeurt er onderzoek naar de bestrijding tegen het onverwacht uitvallen van machines. Echter is tegenwoordig de vraag ernaar zo sterk gestegen dat bijkomend onderzoek op bedrijfsniveau noodzakelijk is. Steeds meer bedrijven vragen naar een trillingsopname na een herstel of installatie. Sommige houden zelfs een periodiek trillingsbeeld bij van hun machinepark.

1.2 Situering en aanpak van het project

In navolging van een IWT-project rond trillingsmetingen op lagers dat vorig jaar liep bij CET-Motoren te Gullegem en de Hogeschool West-Vlaanderen departement PIH te Kortrijk werd beslist om het onderzoek nog te verdiepen via een thesis.

Als er een defect optreedt aan een lager kunnen we dit merken binnen het frequentiespectrum. Wanneer deze fout toeneemt, zal de amplitude van het trilsignaal ook toenemen. De doelstelling van deze thesis is het terugvinden van deze fouten binnen het frequentiespectrum en in een verdere fase verder onderzoek te verrichten naar de invloed van smering en belasting op deze amplitude

Het uitvoeren van de metingen gebeurt op een testbank die zich bevindt in een van de labo's eigen aan het PIH. Hierop worden de verschillende beschadigde lagers gemonteerd. Zo krijgen we een beeld dat de bedrijfssituatie benadert.

Een 11 kW inductiemotor van het merk WEG vormt de basis van de testbank. Deze drijft een DC-generator aan die we kunnen belasten aan de hand van lampenborden. De aandrijving gebeurt via een riemoverbrenging met twee V-riemen.

De resultaten verkrijgt men door op vijf verschillende meetpunten een versnellingsensor te plaatsen. Deze verschillende punten worden verder in de scriptie besproken.

Een dergelijk type sensor genereert een elektrisch signaal wanneer het trillingen opneemt. Dit signaal wordt gestuurd in een Fast Fourier Transformatie Analyser (FFT-analyser). Een dergelijk toestel bepaalt uit welke frequenties het binnenkomende signaal is samengesteld. Door het kalibreren van de sensoren verkrijgen we een signaal in de gewenste eenheid.

1.3 Situering van het bedrijf

CET-Motoren, gelegen te Gullegem is een grote speler in de verdeling van allerhande motoren. Indien u een speciale of aangepaste motor nodig hebt, bent u bij CET aan het juiste adres. Een kleine greep uit het gamma van nieuwe producten levert volgende reeks machines: allerhande motoren (merk WEG), motorreductoren (haaks en in lijn), frequentieregelaars, trommelmotoren, elektrische kettingtakel, installatie van hoog rendementsmotoren...

Naast deze nieuwe producten doet het bedrijf ook nog aanpassing en herstelling aan alle motoren en reductoren die niet standaard zijn, alsook op gelijkstroombmotoren.

Hiernaast hebben ze sinds kort ook een nieuwe service: “maintenance on the field”. Deze service bestaat uit drie delen. Het periodiek onderhoud, regelmatige revisie waarbij lagers en dichtingen worden vervangen en het uitlijnen van machines. Het preventief onderhoud, het opmeten en bijhouden van de machinetrillingen en uitvoeren van een surgetest. Tenslotte hebben we de service zelf. Dit houdt ondermeer in: projectmatig werk, het opstellen van een contract op maat van de klant, opleidingen en dergelijke meer.

CET-motoren is een hedendaags familiebedrijf, geleid door ing. Kathy en ir. Lieve Theys. Zij namen de fakkel over van vader Frans Theys. Door de jarenlange ervaring inspireert de jonge generatie zich tot een nieuwe dynamiek binnen het bedrijf.

In maart 2004 wonnen de huidige bedrijfsleiders nog de “Womad Award”. Dit is een prijs voor de meest verdienstelijke vrouwelijke ondernemers van dat jaar.



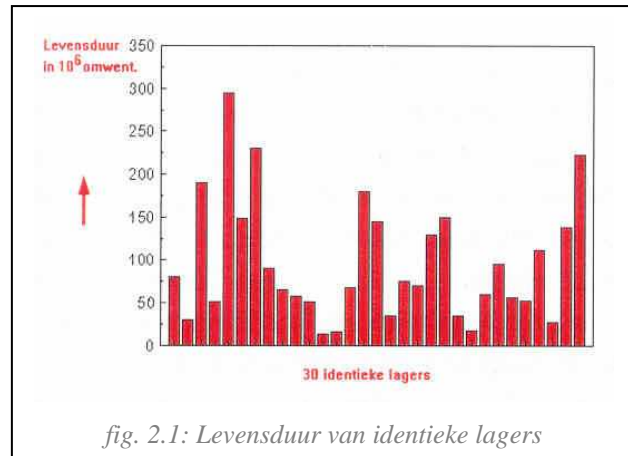
fig. 1.1: Voorkant van het bedrijf CET-Motoren

2 Trillingsanalyse

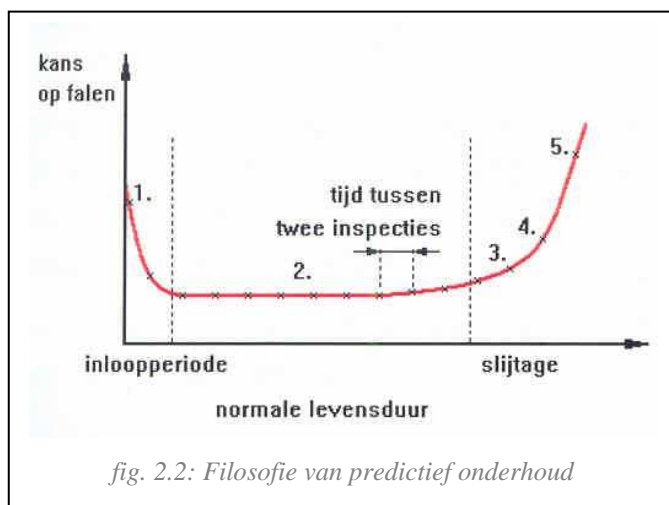
2.1 **Filosofie achter het gebeuren.**

Geen enkel lager is gelijk. Iedere lager heeft zijn eigen karakter en levensloop. Deze wordt beïnvloed door verschillende factoren. De belangrijkste zijn montage, belasting, smering, temperatuur...

Doordat juist elk lager zijn eigen karakter heeft, zal elk lager zijn eigen levensduur hebben. Dit heeft als groot nadeel dat je nooit de uitval van een machine kan voorspellen, waardoor de bedrijfszekerheid sterk achteruit gaat. Figuur 2.1 geeft de levensduur van dertig identieke lagers weer.



Via periodieke trillingsmetingen kan men de toestand van een lager opvolgen. Een nieuw geïnstalleerde of gereviseerde machine heeft een grotere kans op falen door mogelijke montage-, ontwerp- of fabricagefouten. Wanneer de machine een tijdje heeft gedraaid neemt deze kans aanzienlijk af. De goede conditie van de machine wordt bevestigd na enkele metingen, indien het trillingsniveau niet toeneemt of geen alarmwaarden aanneemt.



ontwerp- of fabricagefouten. Wanneer de machine een tijdje heeft gedraaid neemt deze kans aanzienlijk af. De goede conditie van de machine wordt bevestigd na enkele metingen, indien het trillingsniveau niet toeneemt of geen alarmwaarden aanneemt.

Vervolgens zou het trillingsniveau van de machine gedurende een zekere tijd constant moeten blijven. Dit volgen we op door op regelmatige tijdstippen metingen uit te voeren (meestal driemaandelijks). Na een bepaald aantal omwentelingen zal de lager slijtage

beginnen te vertonen. Deze zullen we tijdens één van de periodieke metingen opmerken. Neemt het probleem toe in verloop van tijd dan zal een geschikt moment uitgekozen worden om de lager te vervangen. Dit moment wordt gekozen vooraleer de machine uitvalt. Deze manier van aanpak noemt men ook predictief of toestandsafhankelijk onderhoud.^[2]

2.2 **Trillingsopnemers**

Een trillingsopnemer zet de trillende beweging om in een elektrisch signaal. Dit elektrisch signaal is een replica of een analoog van de trilling. We hebben drie grote groepen opnemers: de verplaatsings-, snelheids- en versnellingsopnemer. Naast deze bestaan er ook nog andere soorten,

maar deze komen slechts zelden tot nooit voor bij dergelijke toepassingen.

De verplaatsingssensor wordt veelal gebruikt bij het bewaken van glijlagers. Bij glijlagers wordt de as namelijk gedragen door een oliefilm en niet door de lagerring. Het is hier dus wenselijk de afstand op te volgen tussen de lagerschaal en de as.

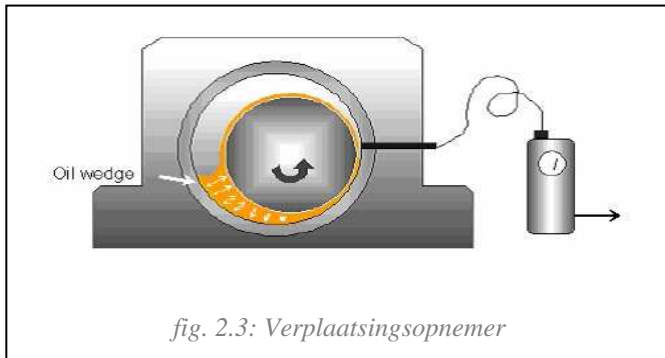


fig. 2.3: Verplaatsingsopnemer

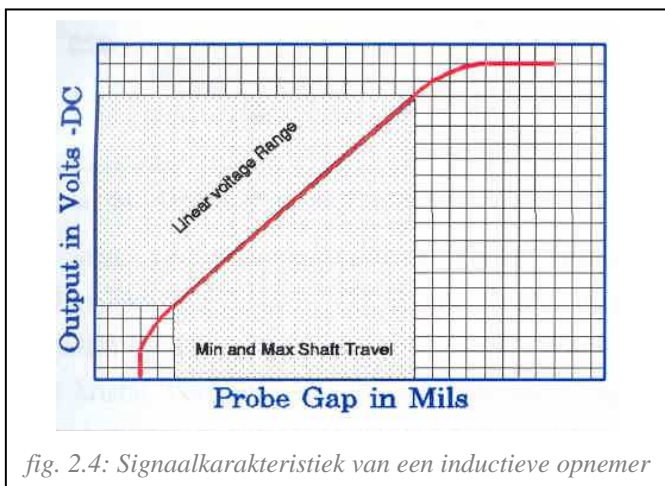


fig. 2.4: Signaalkarakteristiek van een inductieve opnemer

De werking is als volgt. Een kleine spoel wordt bevestigd in het huis van de lagerblok. In deze spoel vloeit een wisselstroom opgewekt door een externe oscillator. De magnetische flux die hierdoor ontstaat, induceert wervelstromen in het oppervlak van de as. Deze stromen induceren op hun beurt een tegenwerkende stroom in de spoel. Hierdoor ontstaat er in de spoel een spanningsval. Deze spanningsval is binnen een bepaald werkingsgebied evenredig met de afstand tussen de spoel en het asoppervlak. Let wel: het opgenomen signaal geeft niet het trillingsniveau van de gehele as of machine weer.

De snelheidsopnemer was een van de eerst gebouwde opnemers en bestaat uit een magneet opgehangen door middel van een zeer slappe veer. De magneet kan zich bewegen ten opzichte van het huis. Aan de binnenkant van de behuizing en dus rond de magneet bevindt zich een spoel. De behuizing van de sensor wordt bevestigd op de structuur waarop we metingen uitvoeren. Deze volgt dus de trillingen van het bevestigingsoppervlak. Boven een bepaalde frequentie, reeds enkele Hertz, kan de zware magneet de bewegingen niet volgen en blijft ze stilstaan. Doordat de spoel meebeweegt met een zekere snelheid en de magneet stilstaat, wordt er een spanning geïnduceerd in de wikkelingen van de spoel die een maat is voor het trillingsniveau.

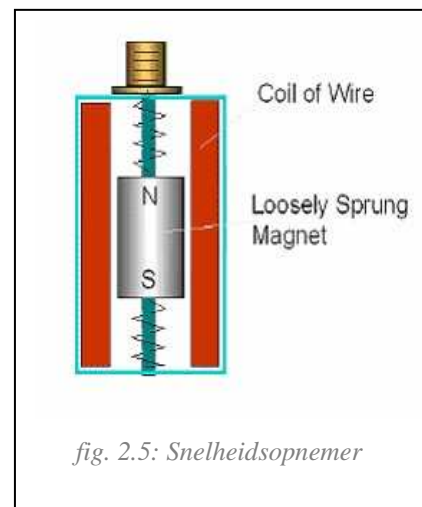


fig. 2.5: Snelheidsopnemer

Een versnellingsopnemer of accelerometer maakt gebruik van een kristal met piëzoëlektrische kenmerken. Dit wil zeggen dat op de vlakken van het kristal een lading ontstaat wanneer het onder druk wordt gebracht. Wanneer de massa boven een dun laagje van dit kristal versnellingen ondergaat, wordt een kracht opgewekt volgens de tweede wet van Newton ($F = m \cdot a$). Deze kracht zorgt ervoor dat er een lading wordt gegenereerd op het kristal.

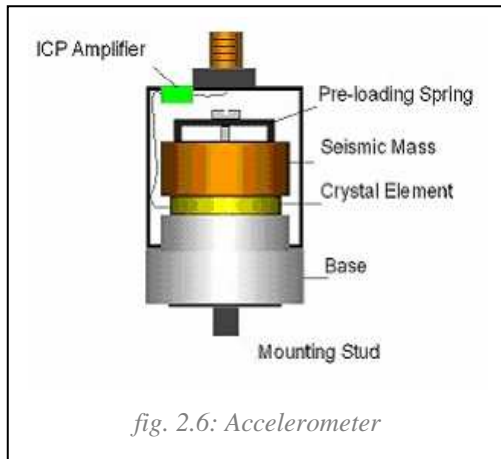


fig. 2.6: Accelerometer

De accelerometers van tegenwoordig zijn uitgerust met een inwendige versterker die de lading omzet in spanning. Deze versterker dient wel intern gevoed te worden met een gelijkstroombron.

Door zijn robuustheid en lage aankoop prijs is dit type sensor de meest verspreide opnemer geworden.

Ook tijdens de metingen in het kader van dit eindwerk werden versnellingssensoren gebruikt. De gevoeligheid van onze sensoren is 100 mV/g .^[2,3]

3 Verwerking van trillingen

3.1 Basisbegrippen

3.1.1 Mechanische trillingen

We beschouwen een massa-veer systeem in rust. Geven we de massa een uitwijking dan zal het systeem op en neer bewegen. Voor de eenvoud laten we de dempende wrijving buiten beschouwing.

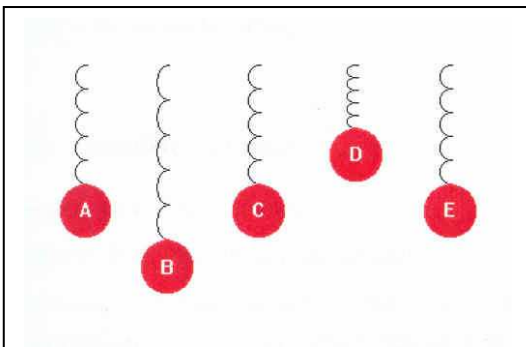


fig. 3.1: Eenvoudig massa-veer systeem in beweging

Wanneer we de verschillende posities van de veer uitzetten in functie van de tijd krijgen we een sinusoidale curve die constant blijft in de tijd. We spreken in dit geval van een harmonische trilling. Op identieke wijze kan een trilling aan het oppervlak van een machine of een lagerhuis worden voorgesteld.

De amplitude drukt uit hoe groot het trillingssignaal is en de frequentie hoe vaak de trilling de volledige cyclus doorloopt. De periode is de tijdsduur van één

dergelijke cyclus. Eén cyclus is de weg tussen twee “dezelfde” punten, bijvoorbeeld tussen twee opeenvolgende positieve maxima.

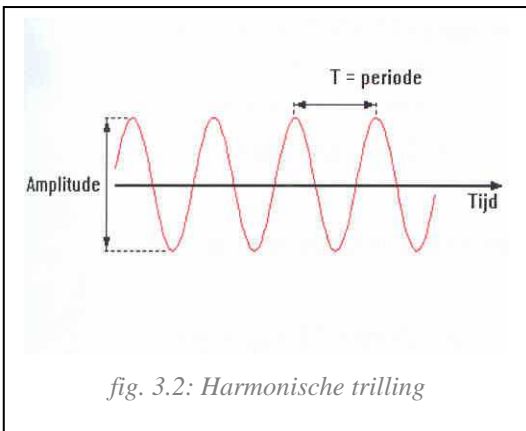


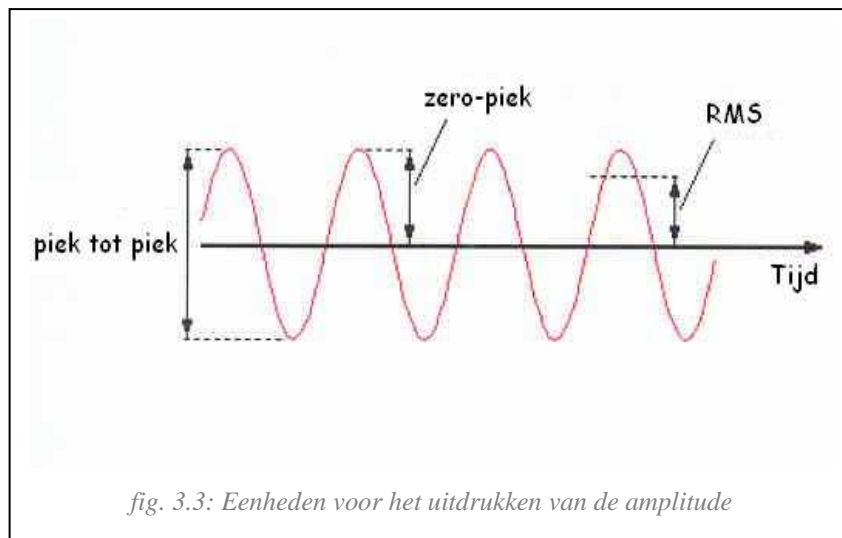
fig. 3.2: Harmonische trilling

Frequenties kunnen gemeten worden in Hertz (Hz) wat overeenkomt met het aantal cycli per seconde, of in cycli per minuut (CPM). Een andere minder gebruikte eenheid is Order. Gebruikt men Orders dan herleidt men de frequentie naar het toerental van de machine waarop men de trillingen vaststelt. Bij een machine die 1500 toeren per minuut draait is 1 Order bijgevolg gelijk aan 1500 CPM of 25 Hz, 2 Orders aan 3000 CPM of 50 Hz...

Voor amplitudes kunnen we spreken van Piek tot Piek waarden, Zero – Piek waarden en RMS waarden.^[2, 6] Piek tot Piek = amplitude

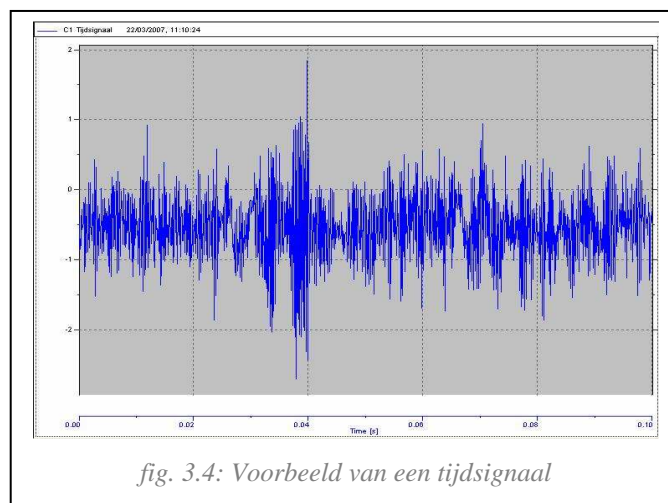
Zero – Piek = $\frac{1}{2}$ Piek tot Piek

RMS = 0,707 x Zero – Piek



3.1.2 FFT-Analyse en spectrum

Als we de trillingen van een machine opmeten, dan is het verkregen tijdssignaal heel wat complexer dan voorgesteld in figuur 3.3. In figuur 3.4 geven we een voorbeeld opgemeten op de testbank in het PIH.

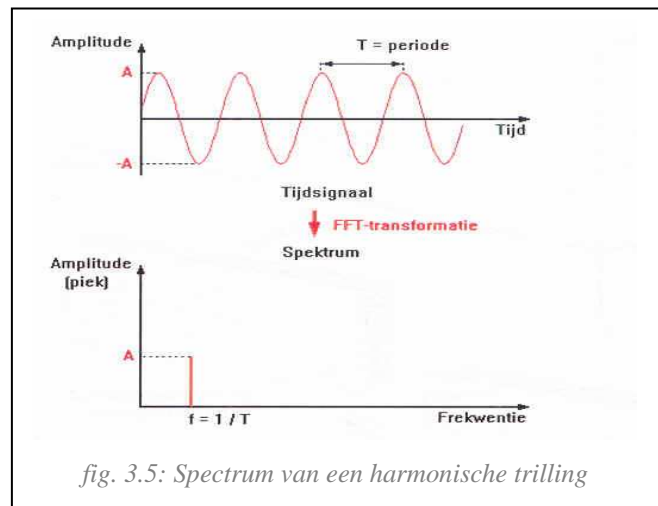


We zien een heel druk beeld dat moeilijk te interpreteren is.

Hierdoor zal men mechanische trillingen op een andere manier voorstellen. Een meer geschikte en beter te analyseren beeld is dat van het trillingspectrum. Om over te gaan van het tijdssignaal naar het spectrum wordt gebruik gemaakt van de FFT-analyse (Fast Fourier Transformatie). Deze omzetting gebeurt onmiddellijk bij de meting door de datacollector.

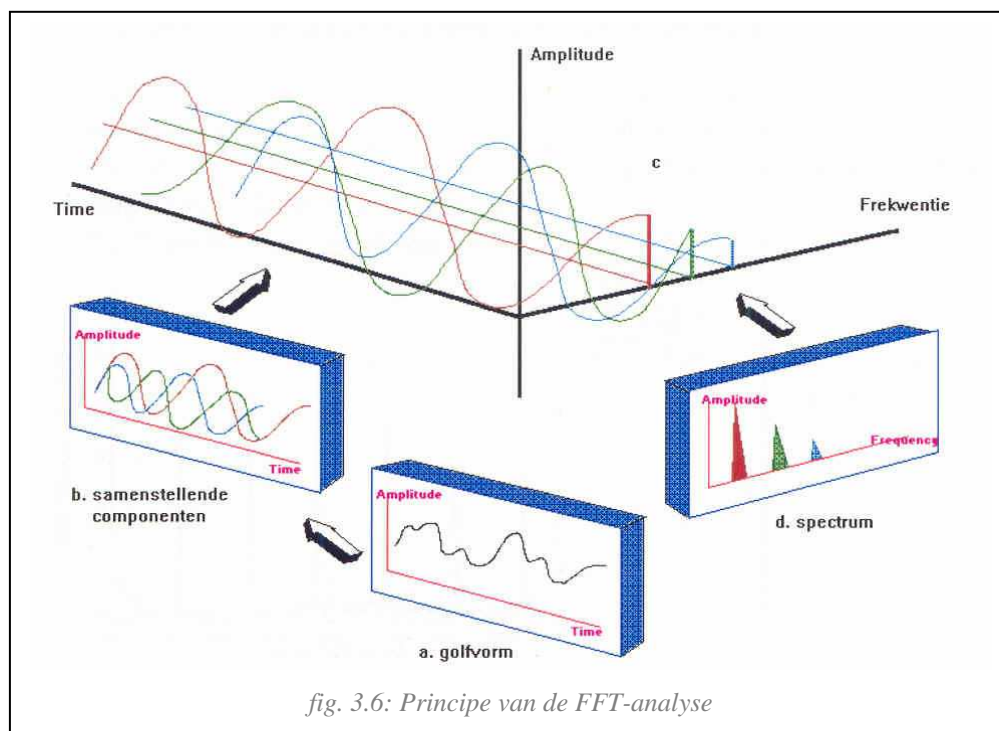
De FFT-analyse berust op de wet van Fourier die zegt: “Elke, in de tijd stationaire trilling kan opgesplitst worden in de som van een aantal harmonische of sinusoïdale trillingen.”

In het tijdssignaal werd op de y-as de amplitude afgebeeld en op de x-as de tijd. Nu wordt in het spectrum op de y-as nog altijd de amplitude afgelezen, maar op de x-as wordt de frequentie uitgezet. De voorstelling van een trilling wordt nu een frequentiepiek.

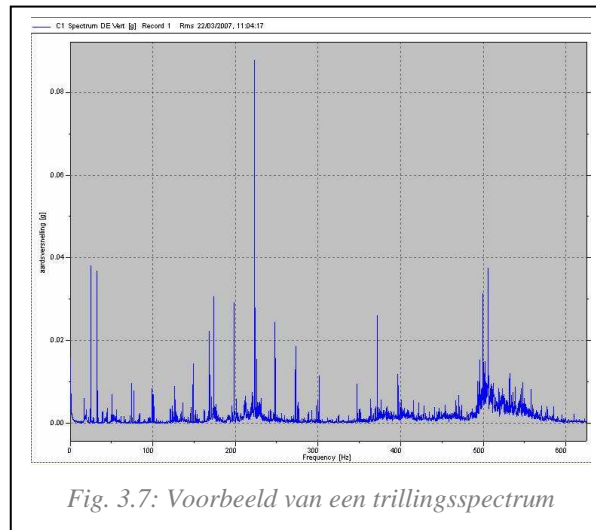


Het spectrum van een complex tijdssignaal wordt bekomen door eerst het signaal op te splitsen in zijn harmonische componenten. Vervolgens wordt elke component door een frequentiepiek voorgesteld.

In figuur 3.6 wordt dit duidelijk gemaakt. Een complexe golfvorm (a) wordt opgesplitst in zijn samenstellende harmonische componenten (b). Elk van deze componenten kan nu voorgesteld worden als een frequentiepiek. Dit gebeurt door de harmonische golfvorm zijdelings te projecteren op de frequentie-as (c). Passen we deze projectie toe voor elke harmonische golfvorm dan krijgen we het trillingspectrum (d).^[2, 3]



Het berekende spectrum in overeenstemming met het tijdsignaal uit figuur 3.4 ziet er dan als volgt uit:



3.2 Andere verwerkingsmethodes

Naast het trillingspectrum worden soms ook nog andere manieren gebruikt om het trillingsignaal weer te geven. Drie andere frequent gebruikte methodes bij het opsporen van lagerschade worden hieronder besproken.

3.2.1 Envelope spectrum

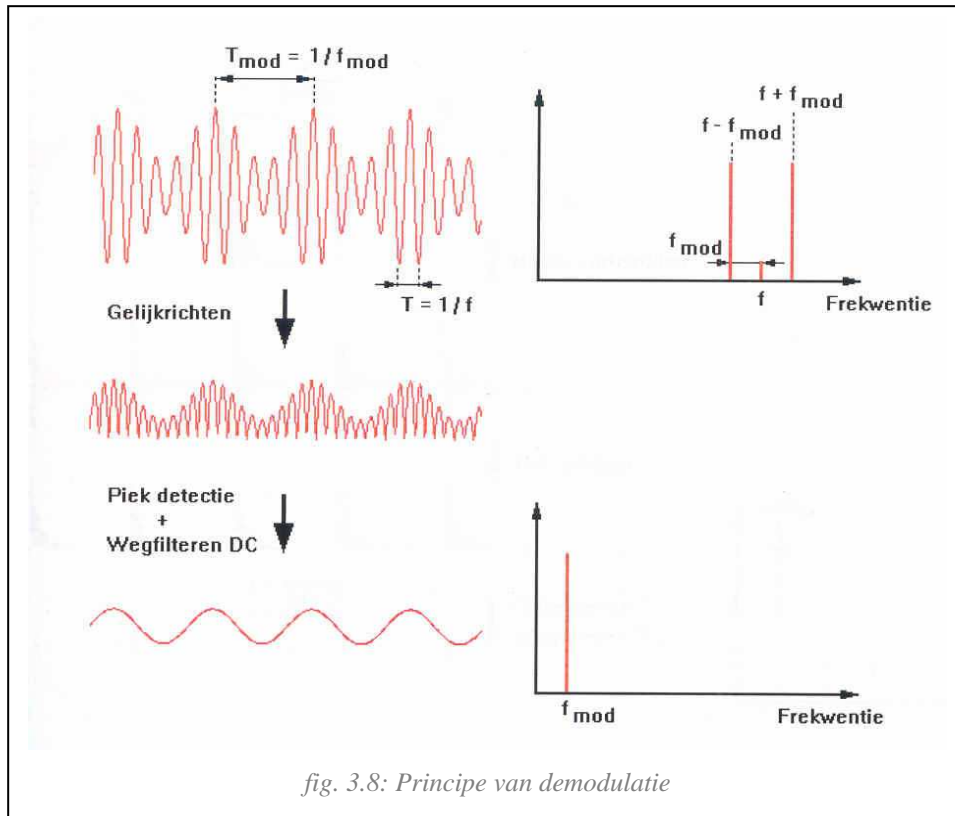
Het envelope spectrum wordt gebruikt om hoge frequenties geëxciteerd door lage frequenties zichtbaar te maken in het spectrum. Deze methode wordt vooral gebruikt bij het opsporen van lagerschade. Bij dit soort schade worden hoogfrequente storingen geëxciteerd op een laagfrequente storing (zie verder).

Het principe van envelope spectrum berust op de demodulatie techniek. Hierbij worden op het tijdsignaal een aantal bewerkingen gedaan alvorens we de FFT-analyse toepassen.

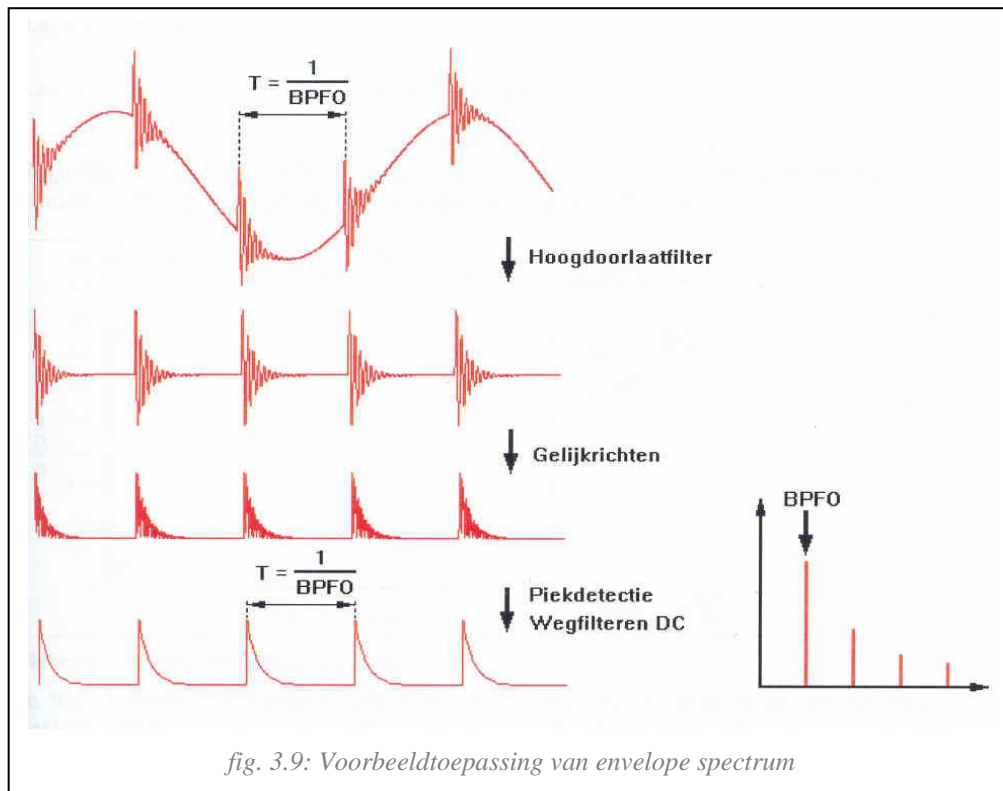
Onderstaande figuur heeft het principe van de demodulatie techniek weer. Het bestaat uit een aantal analoge schakelingen waarbij een hoge frequentie f wordt gemoduleerd door een lage frequentie f_{mod} . In het spectrum zal dit zich vertalen als een piek bij de hoge frequentie f , met twee zijbanden op een afstand f_{mod} . Via demodulatie is het de bedoeling dat we het gemoduleerde signaal afzonderen. Dat gebeurt via volgende stappen:

- gelijkrichten van het signaal;
- piekdetectie, zo bekomen we de omhullende van het bestaande signaal;
- wegfilteren van DC-waarde bij deze omhullende.

Wordt van het gedemoduleerde tijdsignaal opnieuw het spectrum berekend, dan verkrijgen we een frequentiepiek bij de modulerende frequentie f_{mod} .



Wanneer we het envelope spectrum gebruiken bij conditiebewaking, dan wordt het signaal eerst nog door een hoogdoorlaatfilter gestuurd. Dit heeft als voordeel dat ook modulerende frequenties met lage amplitudes zichtbaar worden. Onderstaande figuur geeft het principe van demodulatie weer toegepast op beginnende lagerschade aan de buitenring (zie ook verder).

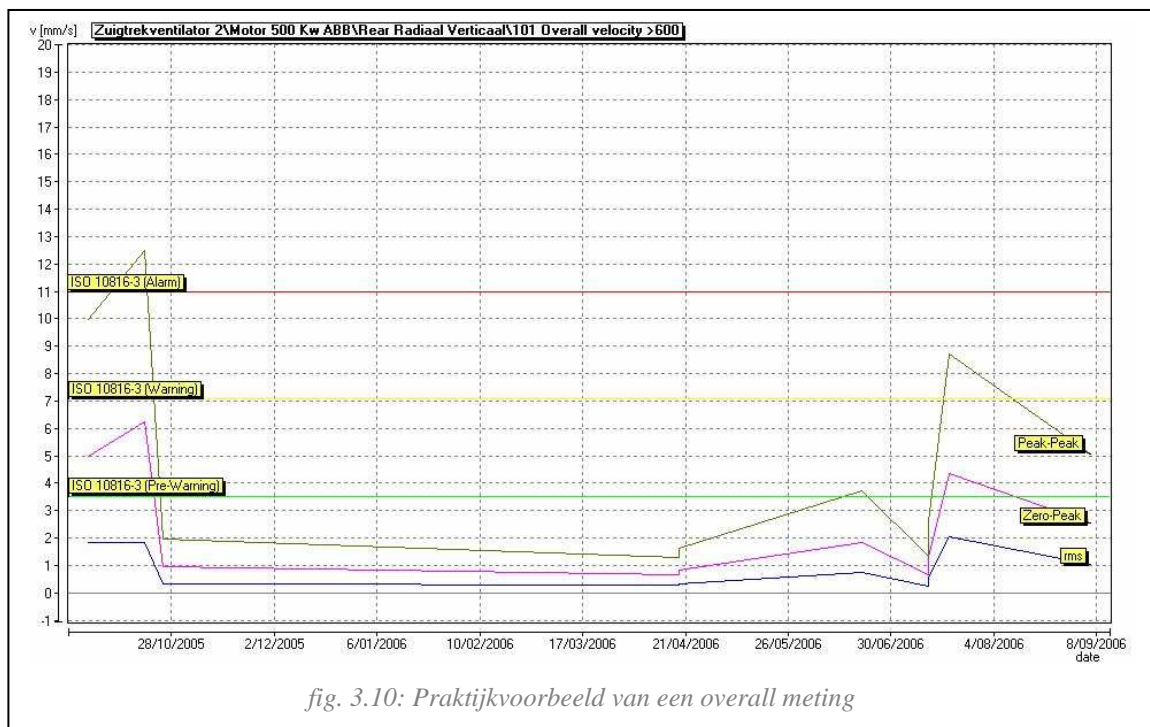


Let wel: envelope spectrum is geen kwantitatieve meting! Men kijkt hier niet naar de amplitudes van de trillingsniveaus, maar wel naar het al dan niet aanwezig zijn ervan. Het is dan ook niet de bedoeling om trends te maken aan de hand van deze metingen. Het is eerder de bedoeling vroegtijdige lagerschade op te merken.^[2]

3.2.2 Overall meting

Een overall meting is het algemene trillingsniveau van een machine opmeten. Hierbij wordt de totale trillingsenergie gemeten binnen een bepaald frequentiedomein en weergegeven door één waarde. De overall waarde wordt als volgt berekend:

$$\text{overall waarde} = \sqrt{\frac{1}{2} \cdot (A_1^2 + A_2^2 + A_3^2 + \dots + A_n^2)} \quad A = \text{amplitude piek } 1, 2, \dots, n \text{ }^{[1, 6]}$$



3.2.3 Schokpulsmethode

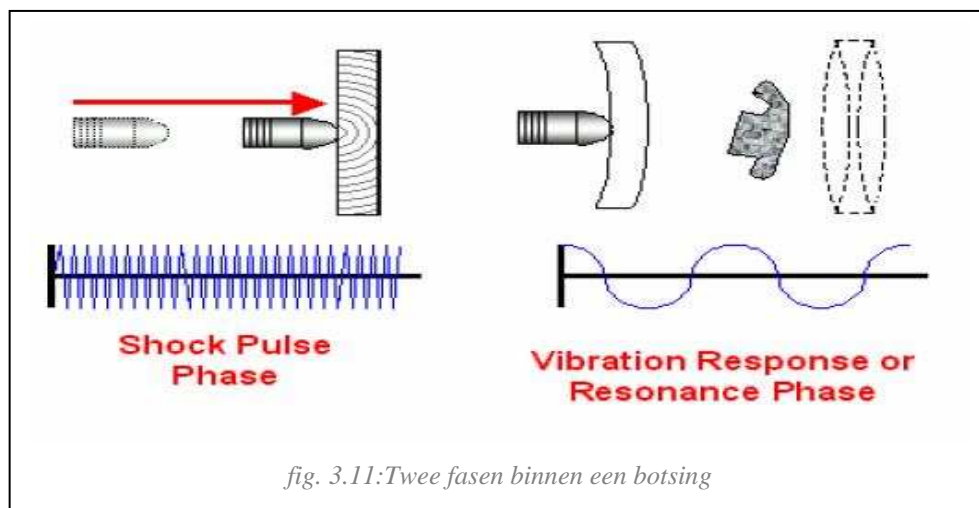
De schokpulsmethode, afgekort SPM, is een signaalverwerkingstechniek gebruikt om de metaalimpact en het rollende geluid bij wentellagers op te meten. De methode is wereldwijd een basis geworden bij het uitvoeren van predictief onderhoud.^[4]

3.2.4 Schokpuls signalen en trillingen

Wanneer twee metalen in beweging elkaar raken, dan ontstaan er twee met elkaar verband houdende, doch verschillende processen.

Bij de eigenlijke impact ontstaat er een schok of drukgolf die zich snel verspreidt over het metaal. Deze schokpuls ligt binnen de ultrasonische frequentieband en komt typisch voor rond een centerfrequentie van 36 kHz. De amplitude van de puls is evenredig met de snelheid van de botsing. Het is deze schok of drukgolf die we willen opmeten bij de SPM.

Wanneer het effect zich verder ontwikkelt worden de metalen oppervlakken samengedrukt en beschadigd. Na de terugslag zullen de metalen delen nog een tijdje buigen tot de botsingsenergie volledig is verdreven. Deze tweede fase van de botsing is een trilling waarvan de frequentie afhankelijk is van het metaal. De schokpulsmethode filtert deze fase uit, aangezien de omvang van de trilling afhankelijk is van de structuur en het materiaal.^[4]

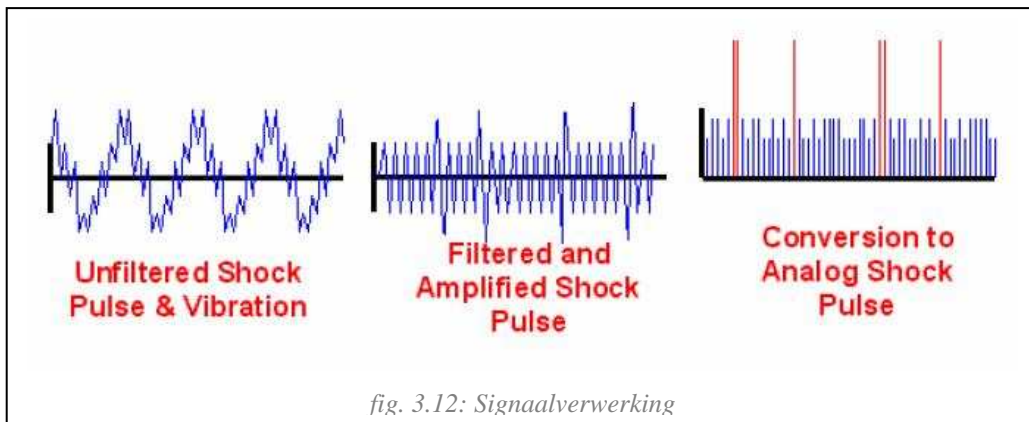


3.2.5 Opmeten van schokpulsen

Om schokpulsen op te meten gebruiken we een speciale versnellingsopnemer, welke voorzien is met specifieke kenmerken voor schokpulsmetingen zodat de schokpulsen correct opgenomen worden. Normaal kan deze opnemer ook gebruikt worden om gewone trillingsmetingen mee uit te voeren. Omgekeerd is niet gegarandeerd dat een gewone versnellingsopnemer geschikt is om de 36 kHz schokpulsen probleemloos binnen te lezen.

Schokpulssignalen zijn meestal relatief klein in amplitude en leggen geen grote afstanden af. De eerste stap binnen het opmeten is dan ook een versterking. Om het signaal te vergroten worden de piezoëlektrische kristallen zó gemaakt dat ze enkel een signaal opwekken bij de 36 kHz schokpulsen. Om de schokpulsen te onderscheiden van de gewone trilling wordt een banddoorlaatfilter rond de 36 kHz gebruikt. Dit helpt om de pulsen te isoleren van andere storingen bij de machine.

De werking van een SPM-opnemer kan je eigenlijk vergelijken met een stemvork. Deze wordt ook alleen door impacts in resonantie gebracht. Wanneer men de stemvork gewoon op en neer beweegt, gebeurt er niets.^[1, 4]



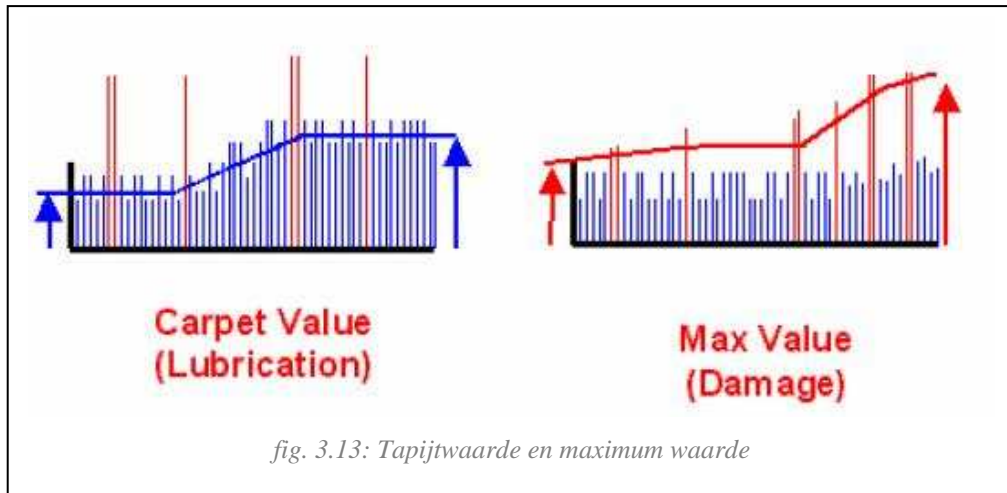
3.2.6 Conditiebewaking van lagers

Bij SPM bestaan er twee aflezingen: de tapijtwaarde (carpet value) en de maximumwaarde (maximum value).

Tapijtwaarde: metaal op metaal contact komt altijd voor bij wentellagers. Zelfs een nieuw lager dat onder normale omstandigheden werkt, komt elke dag dichterbij zijn uitval. Mocht de smering perfect zijn, zou een lager nooit uitvallen.

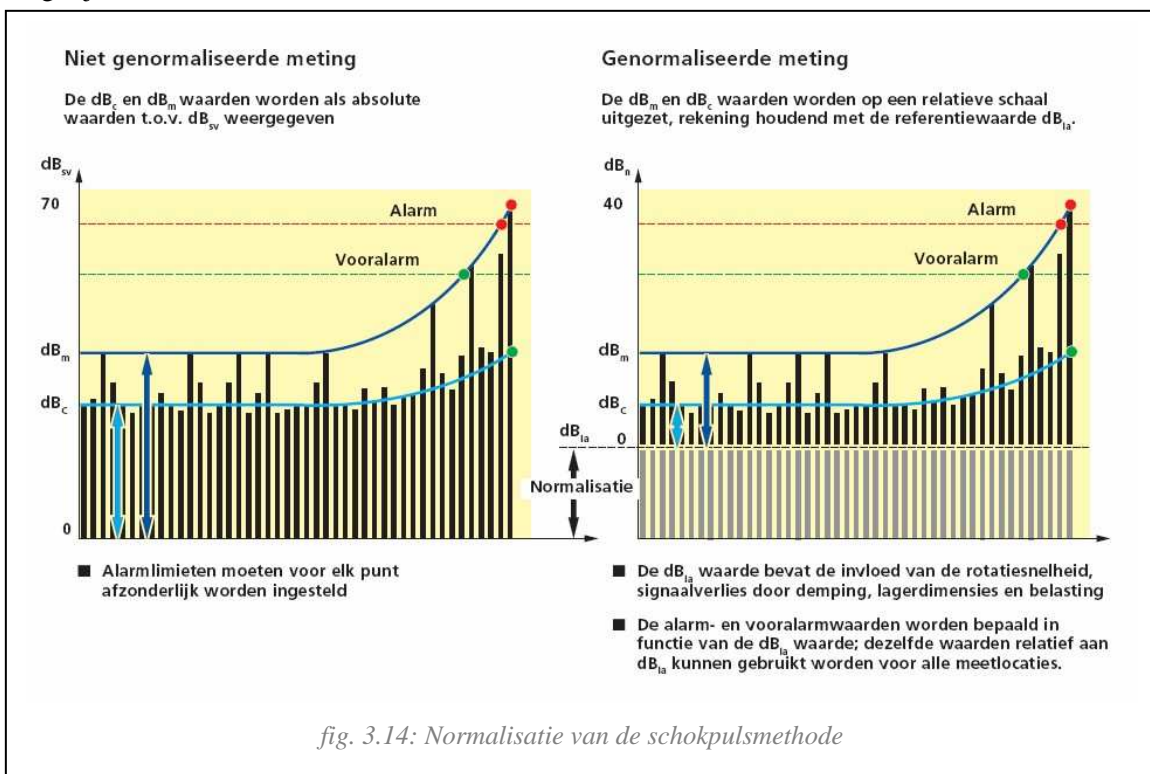
Wanneer er geen schade is aan de lager dan zorgt het metaal op metaal contact voor een constant achtergrondgeluid van schokpulsen. Deze pulsen worden verbonden aan de tapijtwaarde. Wanneer de smering zijn werking begint te verliezen, is er meer metaal op metaal contact. Dit zal zich reflecteren in een stijging van de tapijtwaarde. Met andere woorden kunnen we stellen dat een stijging van de tapijtwaarde betekent dat een lager meer metaal op metaal contact ondervindt binnen een bepaald tijdsinterval. Meestal is de oorzaak van een stijging van de waarde te wijten aan het verlies van de beschermende krachten van de lagersmering.

Maximumwaarde: wanneer er zich een defect voordoet aan een lagerelement wordt dit defect periodiek geraakt door een ander element van de lager. Bijvoorbeeld wordt een defect aan de buitenring telkens geraakt door een voorbij rollende kogel. Deze periodieke botsing veroorzaakt een reeks schokpulsen met een amplitude die hoger is dan deze van de tapijtwaarde. Hetzelfde gebeurt wanneer men met de wagen over een put rijdt. Wanneer men over de put rijdt is het veroorzaakte lawaai ook groter dan het normaal aanwezige geluid. Door een “peak hold” applicatie kunnen we deze waarde onderscheiden van de tapijtwaarde. Dus: wanneer er zich ergens in de lager een defect ontwikkelt zal deze maximumwaarde stijgen. Zodoende is de SPM-methode een zeer goede indicator voor een al dan niet beschadigd lager.^[4]



3.2.7 De genormaliseerde schokpulsaflezing.

De schokpuls methode is een combinatie van de amplitude en het aantal metaal op metaal contacten. Het is dan ook te verstaan dat de snelheid van de machine alsook de diameter van de lager belangrijke factoren zijn. Wanneer een machine sneller draait zal het aantal metaal op metaal contacten ook toenemen. Zo zal de tapijt- en maximumwaarde ook toenemen of afnemen naar gelang de snelheid. Om dit te corrigeren kan men de diameter van de as (of van de lager) samen met de snelheid van de machine ingeven in het SPM-toestel. Deze berekent dan zelf een compensatiecijfer dat hij optelt bij de gemeten schokpulsen, het resultaat is een genormaliseerde schokpulsuitlezing. Door deze manier van werken kan men verschillende machines met elkaar vergelijken. ^[1, 4, 5]



4 Klassering van verwerkingsmethode volgens niveau

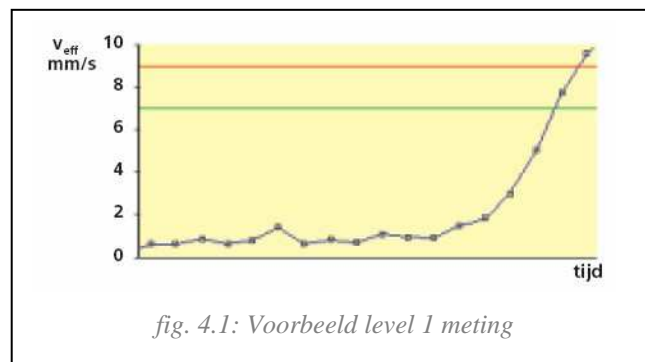
4.1 Algemeen

Het trillingssignaal kan op twee niveaus worden verwerkt. Het eerste niveau wordt vooral toegepast in de foutdetectiefase en bij trendanalyse. Op dit niveau wordt de gemiddelde trillingswaarde afgebeeld. Deze kan worden vergeleken met vorige waarden. Op deze manier kan men vaststellen in welke toestand de machine verkeert. Deze methode noemt men Level 1 condition monitoring.

Zoals juist beschreven gaat het bij Level 1 slechts over gemiddelde waarden. Uit deze karakteristieken kunnen we geen foutoorzaken halen. Hiervoor stappen we over naar Level 2 condition monitoring.^[1]

4.2 Level 1 metingen

Level 1 meting heeft een overall waarde als resultaat die in een tijdsgrafiek wordt geplaatst. De RMS waarde die men kan aflezen uit deze grafiek dienen te worden vergeleken met de alarmwaarden in de ISO 10816-3 norm. In deze norm wordt een onderscheid gemaakt tussen motoren op een stijve of flexibele ondergrond. Ook met het vermogen wordt rekening gehouden. De norm is geldig voor motoren tussen de 15 kW en 50 MW, met een toerental van 600 tot 15 000 RPM. Hieruit dient men vast te stellen of er al dan niet iets fout loopt binnen of rondom de machine.



Men krijgt op dit niveau dus enkel een globaal idee van de slijtage van de gehele structuur in functie van de tijd. Het voordeel is echter wel dat de metingen zeer eenvoudig toe te passen zijn. Eveneens krijg je zonder veel moeite een trendbeeld van de machine. Doordat het aflezen van de waarden even makkelijk is als het opnemen dient men hiervoor geen hooggeschoolde personen in te schakelen.

In hoofdstuk 3 gegeven level 1 methodes zijn het opnemen van het trillingsniveau van een overall meting en lagerschadedetectie via het opmeten van de schokpulsen.^[1, 5]

Trillingslimieten volgens ISO 10816-3

Aandrijfvermogen tussen 15 kW en 50 MW. Toerental tussen 600 RPM en 15.000 RPM

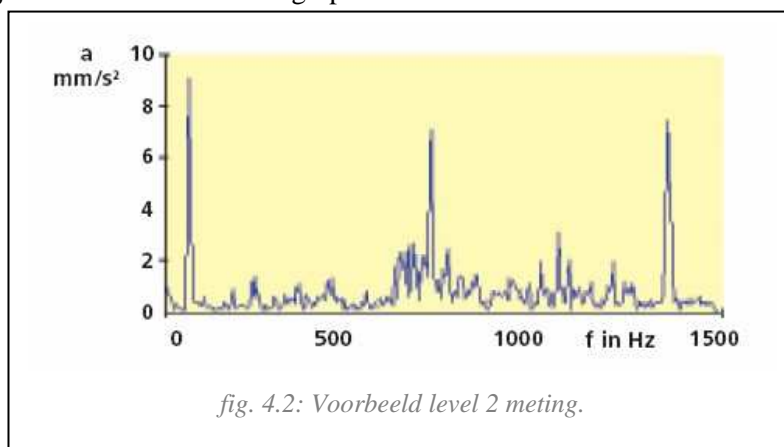
Stijf	Flexibel	Stijf	Flexibel	Stijf	Flexibel	Stijf	Flexibel	Fundering
Pompen > 15 kW, axiaal, radiaal, mixed flow.				motor 160 ≤ H < 315 mm		motoren H > 315 mm		Machine- type
Rechtstreeks op motoras		Gekoppelde assen		15kW < P ≤ 300 kW		300kW < P < 50 MW		
								11.00
								7.10
								4.50
								3.50
								2.80
								2.30
								1.40
								0.71
								0 mm/s
Groep 4		Groep 3		Groep 2		Groep 1		ISO Groep

Legende: H: Ashoogte Nieuw Vooralarm
P: Vermogen Goed Alarm

Tabel 4.1: ISO 10816-3 norm

4.3 Level 2 metingen

Daar men uit level 1 meting geen foutoorzaak kan vinden, dient men voor verder onderzoek over te stappen op level 2. Dit niveau van meten is meer diepgaand met het behulp van spectrumanalyse. Het uitlezen van de resultaten is hier veel complexer dan bij de voorgaande methode. Het is dan ook noodzakelijk om hiervoor een trillingspecialist in dienst te nemen.



In hoofdstuk 3 gegeven level 2 metingen zijn amplitudespectrum (FFT-analyse) en envelope spectrum.^[1, 5]

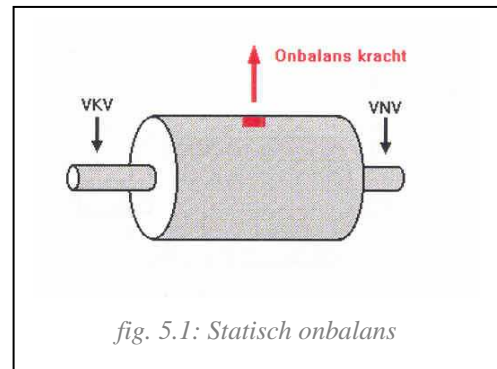
5 Trillingsverhoging door externe oorzaken

5.1 Onbalans

Bij onbalans onderscheiden we drie gevallen: statische onbalans, koppelonbalans, en dynamische onbalans.

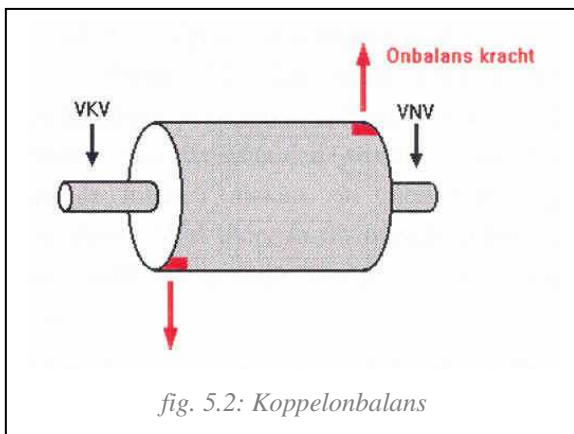
5.1.1 Statische onbalans

Bij statische onbalans is de rotor in rust niet in balans. Men kan dit beschouwen als een perfect uitgebalanceerde rotor waarop een onbalansmassa werd toegevoegd. Wanneer de rotor zal draaien zal de onbalansmassa een kracht uitoefenen die ronddraait met de omwentelingssnelheid van de rotor. Meet men nu op dezelfde plaats de trillingen op aan drive end en non drive end, dan verkrijgt men op beide punten hetzelfde signaal. Wanneer het opgemeten onbalanssignaal maximaal is, zal de kracht op de lagers gericht zijn naar de meetpunten. Dit geldt voor gelijk welke positie van de onbalansmassa. Hieruit volgt dat de kracht op beide lagers telkens in dezelfde richting zal werken. We kunnen dus besluiten dat de krachten en bijgevolg ook de trillingssignalen op drive end en non drive end in fase zijn.^[1, 2]



5.1.2 Koppelonbalans

Beschouwen we nu dezelfde rotor als in punt 5.1.1, maar met dit verschil dat er twee gelijke onbalansmassa's worden aangebracht 180° verschoven ten opzichte van elkaar over het rotoroppervlak. Als de rotor in rust is, dan is hij perfect in balans. Beide onbalansmassa's heffen elkaar op. Echter wanneer de rotor begint te draaien, treedt er koppelwerking op. Meten we nu opnieuw op dezelfde plaatsen als in punt 5.1.1 het trillingssignaal op, dan krijgen we deze keer niet tweemaal hetzelfde beeld. De krachten en bijgevolg hun veroorzaakte trillingen zijn in tegenfase.^[1, 2]



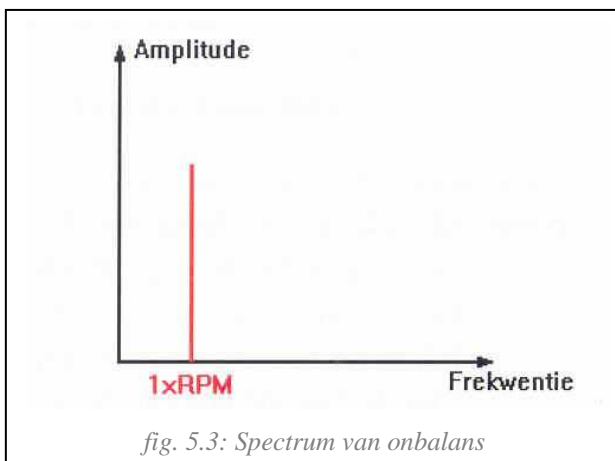
5.1.3 Dynamische onbalans

Men spreekt van dynamische onbalans wanneer er een combinatie optreedt van de twee voorgaande gevallen. Het faseverschil tussen de twee signalen opgemeten, zoals beschreven in punt 5.1.1 kan in dit geval gelijk welke waarde aannemen.^[1,2]

5.1.4 Spectraal beeld

Ieder type van onbalans leidt tot een sinusoidaal trillingssignaal met een periode gelijk aan de omwentelingssnelheid van de rotor. Een trillingsspectrum opgemeten op een rotor die onbalans vertoont, zal dus een piek geven bij een frequentie gelijk aan het rotortoerental.

In deze voorstellingswijze krijgen we geen uitsluitsel over het type onbalans. Dit komt doordat er in onze voorstellingswijze geen fase-informatie uitgelezen wordt.



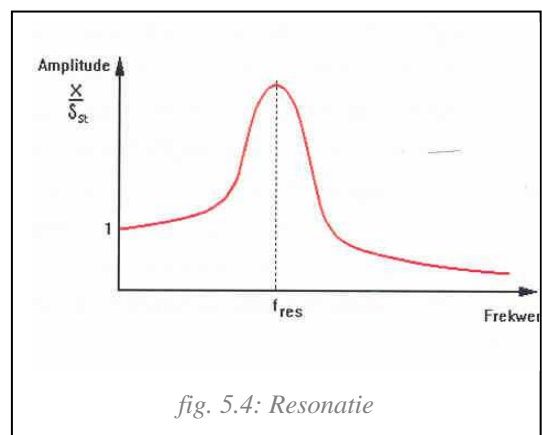
Het belang om te weten met welk type onbalans men te maken heeft, komt tot uiting bij het uitbalanceren. Hiervoor dient men nog bijkomende fasemetingen uit te lezen.

Bij statische onbalans volstaat het om een éénvlakbalancering uit te voeren. Dit is het corrigeren van onbalans in één vlak. Bij koppel- en dynamische onbalans dient men over te stappen naar twee- of meervlaksbalancering.^[1,2]

5.2 Resonantie

5.2.1 Wat is resonantie?

Resonantie is het verschijnsel waarbij op een bepaalde frequentie een kracht sterkere trillingen veroorzaakt dan bij frequenties die hoger of lager liggen. Een bekend praktijkvoorbeeld is wanneer men met de wagen rijdt. Bij bepaalde snelheden kan het voorkomen dat men trillingen waarneemt aan het stuur. Deze verminderen wanneer men iets sneller of trager gaat rijden.



Bij het aanlopen van een machine kan het gebeuren dat de ogenblikkelijke toerentalrequentie overeenstemt met een resonantiefrequentie van de as zelf. In dat geval spreekt men van een kritische snelheid. Om die reden wordt er vaak op motoren een rem voorzien om tijdens het uitlopen deze frequenties voldoende snel te doorlopen.

Resonantie treedt niet enkel op bij rotatiefrequentie. Het verschijnsel kan optreden bij gelijk welke frequentie. De kracht die dan geëxciteerd wordt zal niet deze zijn door rotoronbalans maar kan bijvoorbeeld de riemfrequentie, trillingen veroorzaakt door lagerfouten... zijn.^[1, 2]

5.2.2 Resonantie of onbalans?

Wanneer men in een opgemeten spectrum een piek verkrijgt bij 1xRPM, heeft men te maken met onbalans. Nu kan het gebeuren dat deze piek versterkt is door resonantie. Om hierover uitsluitel te krijgen moet men het trillingsniveau beschouwen aan de horizontale en verticale kant van de lager. De kracht veroorzaakt door onbalans werkt in elke richting even sterk. Dus zal de trilling opgemeten aan horizontale en verticale zijde verhoogt zijn. De waarden van de amplitudes kunnen wat verschillen voor een verschil in stijfheid verticaal en horizontaal.

Heeft men echter te maken met structuurresonantie, dan zal het trillingsniveau in de ene meetrichting verhoogd zijn ten opzichte van de andere richting. Dit komt doordat resonantie directioneel is. Alleen in het zeldzame geval waarbij de resonanties in beide richtingen de trillingen gelijkmatig versterken geldt dit niet.^[2]

5.2.3 Hoe resonantie bestrijden?

Wanneer resonantie voorkomt bij toerentalrequentie dan heeft men de optie het toerental te wijzigen om het probleem weg te werken. Is dit praktisch niet mogelijk dan zal men moeten proberen de demping sterk te verhogen of de resonantiefrequentie te verschuiven.

In de fysica wordt de resonantiefrequentie weergegeven door volgende formule:

$$f_{\text{resonantie}} = 2\pi \cdot \sqrt{\frac{k}{m}} \quad \text{Hierbij is: } k \text{ de stijfheid, } m \text{ de massa.}$$

Bijgevolg kan de frequentie waarbij resonantie optreedt gewijzigd worden op twee manieren. Enerzijds door de stijfheid van de structuur te verhogen of te verlagen. Dit zal ervoor zorgen dat de resonantie zal opschuiven naar hogere of lagere frequenties. Anderzijds door de massa te veranderen. Het toevoegen van massa zal resulteren in lagere resonantiefrequenties.^[1, 2]

5.3 Uitlijning

5.3.1 Uitlijningsfouten

Wanneer we spreken over foutieve uitlijning moeten we twee verschillende soorten beschouwen. Bij een hoekuitlijningsfout staan de twee centerlijnen van de gekoppelde assen onder een hoek. Bij een paralleluitlijningsfout zijn de gekoppelde assen wel evenwijdig ten opzichte van elkaar, maar liggen hun centerlijnen niet in elkaars verlengde.^[2]

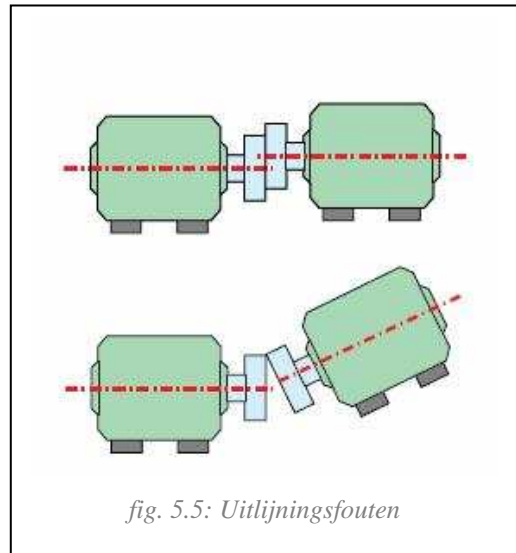


fig. 5.5: Uitlijningsfouten

5.3.2 Spectraal beeld

Bij een slechte uitlijning zullen de trillingen bij de omwentelingsnelheid toenemen. Daarnaast zullen ook harmonische zichtbaar zijn. Dit komt doordat bij een gebrekkige uitlijning er een weerstand ontstaat bij het roteren. Deze weerstand zal verschillen afhankelijk van de positie van de as. Echter zal de wisselende weerstand zich wel iedere omwenteling herhalen.

Bemerk ook dat een versleten koppeling een uitlijningsfout veel minder goed kan opvangen, waardoor het trillingsniveau hier ook veel hoger zal zijn.

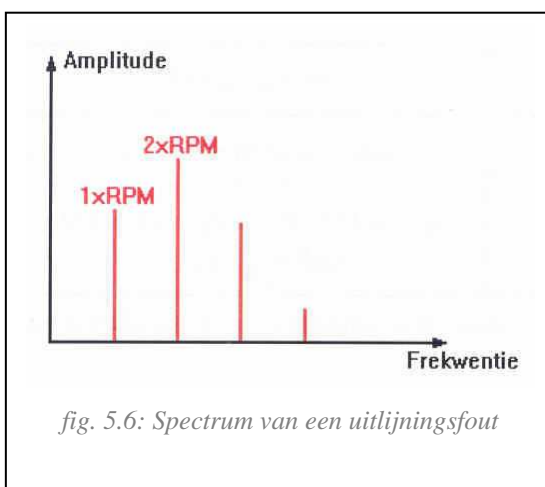


fig. 5.6: Spectrum van een uitlijningsfout

Vertonen de twee in lijn gekoppelde assen alleen een parallelfout, dan zullen de trillingen zich vooral voordoen in radiale richting. Hebben de twee assen een hoekfout, dan zal men in de axiale richting ook een niet onbelangrijke component kunnen opmerken.

In de praktijk zal men uiteraard meestal te maken hebben met een combinatie van beide fouten. Het spectrum zal dan een frequentiepiek tonen bij 1xRPM en bij veelvoud van deze frequentie. Afhankelijk van welke uitlijningsfout er overheerst, zal men al dan niet een belangrijke axiale component terugvinden.^[2]

5.3.3 Uitlijning of onbalans?

Als we een spectraal beeld opnemen waarbij er een trillingstoename is bij 1xRPM dan kan deze veroorzaakt zijn door onbalans maar ook door een hoekuitlijningsfout. Het is dus belangrijk eerst te zorgen dat de rotor is uitgebalanceerd alvorens conclusies te trekken rond hoekuitlijningsfouten.

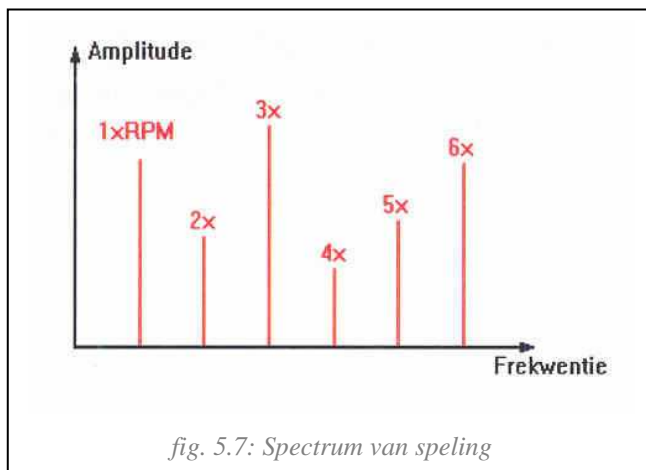
Een onbalans zal bijna uitsluitend trillingen genereren in radiale richting, terwijl we weten dat een hoekuitlijningsfout te herkennen is aan zijn niet te verwaarlozen axiale piek. Met andere woorden: indien in axiale richting een niet onbelangrijke component wordt vastgesteld hebben we te maken met een hoekuitlijningsfout.^[2]

5.4 Speling

Speling bij rollagers kan zich op meerdere manieren uiten: speling tussen buitenring en lagerhuis of flens, tussen binnenring en as of inwendig in de lager zelf.

Ten gevolge van lagerspeling zal een trilling gegenereerd worden waarbij het tijdsignaal meestal onregelmatig is. De kracht die deze trilling veroorzaakt is de onbalans van de rotor.

Heeft men een te verwaarlozen speling, dan zal de onbalans zich voordoen als een sinusoïdaal



tijdsignaal en in het spectrum als een piek bij 1xRPM. Wanneer er echter speling optreedt dan zal dit tijdsignaal volledig vervormd worden. Vermits de onbalans hier de exciterende kracht is zal het spectrum synchroon zijn. Dit wil zeggen dat men niet alleen een piek zal waarnemen bij toerentalrequentie, maar ook bij gehele veelvouden ervan. Of ook: het spectrum ten gevolge van speling vertoont frequentiepieken bij 1xRPM en talrijke harmonische.

In werkelijkheid zal het spectrum een veel complexer uitzicht hebben. Maar doordat we er hier van uitgaan dat de exciterende kracht de onbalanskracht is, blijft de energie-inhoud synchroon.^[1, 2]

6 Trillingsverhoging door lagerschade

In een rollager onderscheiden we vier onderdelen: de binnenring, de buitenring, de kooi en de rolelementen (kogels, kegels of tonnen). Elk van deze delen kan falen en bijgevolg zorgen voor een verhoging van het trillingsniveau. In dit hoofdstuk bespreken we schade aan deze vier onderdelen, samen met hun typisch schadepatroon.

6.1 Binnen – en buitenringschade

Deze twee onderdelen bespreken we samen omdat hun schadepatroon zeer analoog verloopt. Zowel voor binnenringschade als buitenringschade beschouwen we het geval waarbij de buitenring stilstaat en de binnenring roteert. Dit is ook het geval bij de motor op onze proefstand.

Veronderstel dat er zich in de binnenring of buitenring schade voordoet, dan zullen de rolelementen volgens een bepaalde frequentie over dit defect rollen. Deze frequentie wordt de passeerfrequentie (of ball pass frequency) genoemd. BPFO (Ball Pass Frequency Outer Race) is de passeerfrequentie voor de buitenring, BPFI (Ball Pass Frequency Inner Race) is deze voor de binnenring. Deze frequenties zijn afhankelijk van het toerental, de lagermaat en de fysische gegevens van de lager.

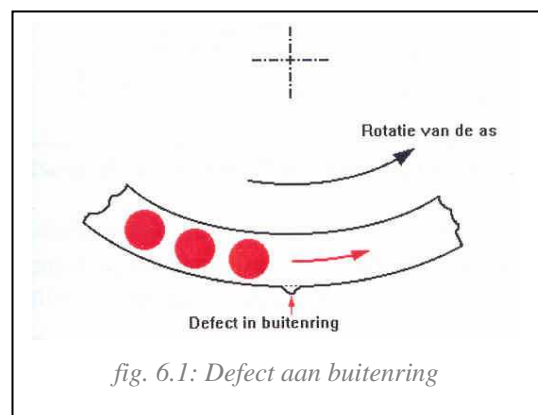


fig. 6.1: Defect aan buitenring

Bij het ontwikkelen van een defect in de binnen- of buitenring van een lager onderscheiden we vier opeenvolgende fasen.^[2]

6.1.1 Fase 1

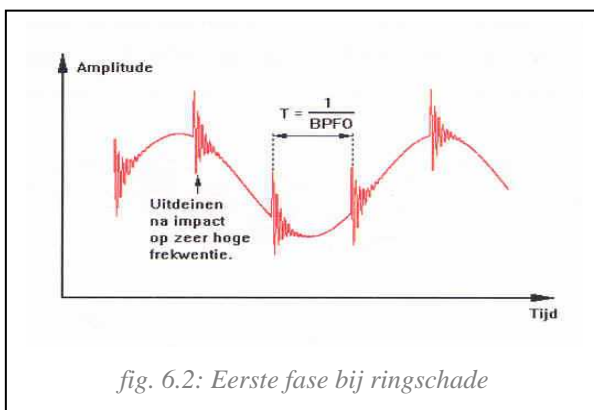


fig. 6.2: Eerste fase bij ringschade

In de eerste fase is het defect een microscopisch scheurtje. Er is hier nog geen sprake van een put waar de rolelementen in- en uitrollen. Elk element die echter de scheur passeert, zal een impact veroorzaken op de binnen- of buitenring en zal de resonantiefrequenties ervan exciteren. De binnen- of buitenring zal bij deze frequenties beginnen te trillen, maar zal ook snel weer uitdeinen. Deze frequenties liggen typisch boven de 2 à 3 kHz. Dit alles resulteert in een

golfvorm zoals op figuur 6.2.

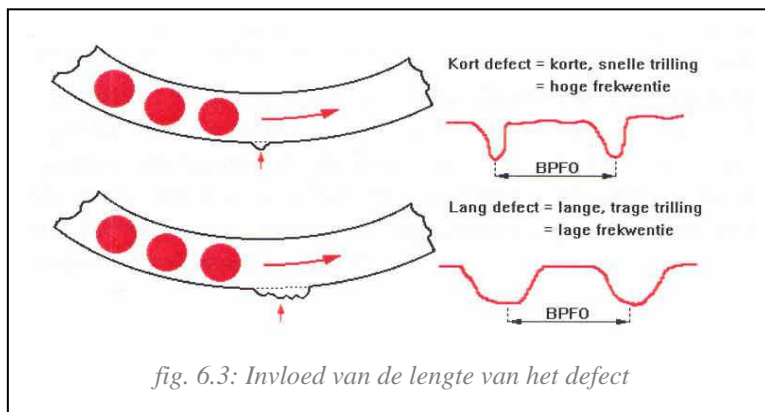
De onderliggende laagfrequente sinus kan afkomstig zijn van een onbalans, uitlijning.... De frequentie waarbij de impacts voorkomen is gelijk aan de BPFO of BPFI, afhankelijk of de schade zich bevindt op de binnen- of buitenring.

De energie-inhoud van dergelijke trillingen veroorzaakt door deze impacts is zeer hoogfrequent. Hierdoor zal deze niet zichtbaar zijn binnen het normale frequentiespectrum.

Met andere woorden, bij gewone apparatuur die enkel werkt met FFT-analyse, zal vroegtijdige lagerschade niet worden opgemerkt. Hiervoor worden meettoestellen ontworpen speciaal voor het detecteren van lagerschade. Ze werken volgens principes zoals schokpulsmetingen, envelope spectrum, enz.^[2]

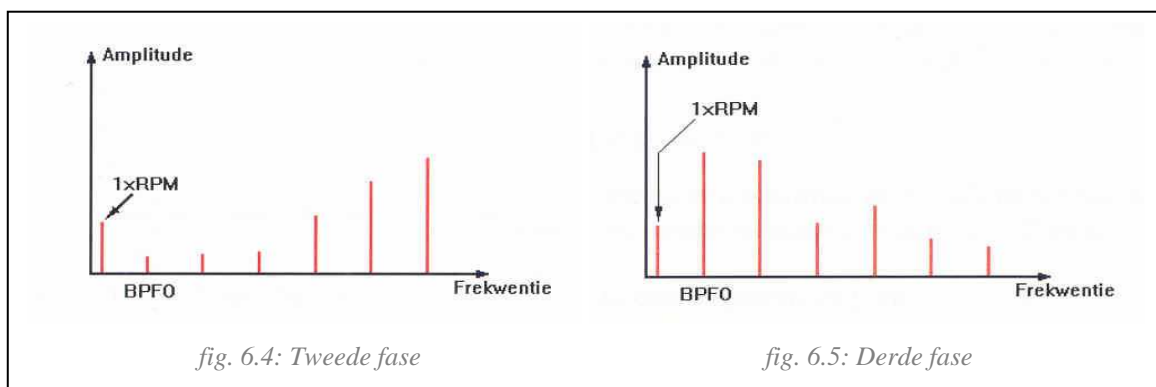
6.1.2 Fase 2 en 3

Wanneer de schade verder toeneemt, zal er materiaal uit de binnen- of buitenring verdwijnen en vormt er zich een put in het rolvlak. De rolelementen rollen nu constant in en uit het defect. Dit in- en uitrollen zal niet alleen resonantiefrequenties exciteren, maar zal ook trillingen genereren op de BPFO of BPFI frequentie. Het trillingssignaal wordt nu een tijdsvorm met een periode gelijk aan de ringfrequenties. Daar de trilling niet zuiver harmonisch is resulteert dit binnen het FFT-spectrum als een piek bij de BPFO of BPFI frequentie samen met een aantal harmonischen.



De amplitude van de verschillende harmonischen is afhankelijk van de energie-inhoud van het trillingssignaal, wat op zijn beurt weer afhankelijk is van het defect zelf. De lengte van het beschadigde stuk op de ring zal bepalend zijn. Dit wordt intuïtief geïllustreerd met figuur 6.3.

Aanvankelijk zal de lengte van het defect relatief kort zijn. De energie-inhoud van de trillingen veroorzaakt door het in- en uitrollen zal bijgevolg hoogfrequent zijn. Naarmate de schade zich verder ontwikkelt, wordt het defect langer en zal de energie-inhoud in de resulterende trillingen verlagen. In het spectrum vinden we dit terug als het toenemen van het niveau van lagere harmonischen van de ringfrequentie. Onderstaande figuren illustreren dit.



Beginnende lagerschade is dus zichtbaar door het verschijnen van hogere harmonischen van de BPFO of BPFI frequentie. Deze vorm van lagerschade kan het best opgemerkt worden in het spectrum voorgesteld in versnelling, omdat hierbij de componenten met hoge frequenties het sterkst worden benadrukt.^[2]

6.1.3 Fase 4

De lagerdefect zal steeds langer worden. Wanneer de ring over (bijna) het volledige oppervlak is ingelopen, zullen de trillingen afnemen in niveau. Echter zal wel door het contact van de rolelementen met de lager een grote hoeveelheid ruis ontstaan. Indien het defect zo groot wordt dat de lagerspeling begint toe te nemen zal naast het ruisbeeld ook het klassieke beeld van speling zichtbaar worden.

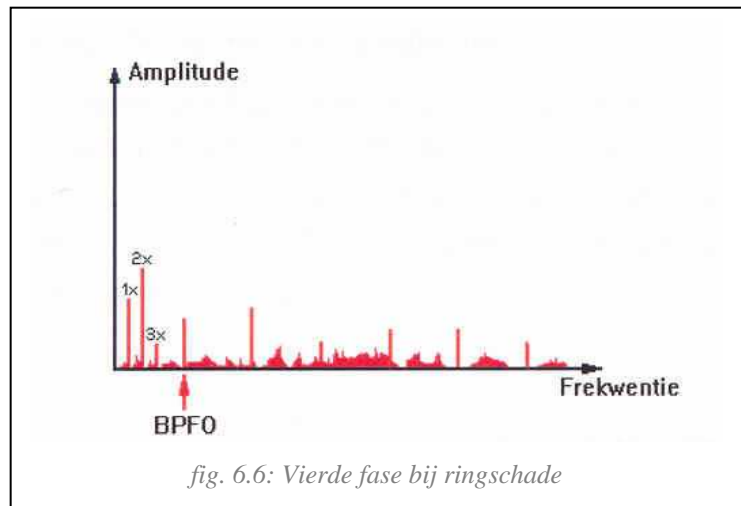


fig. 6.6: Vierde fase bij ringschade

Merk echter wel op dat in deze fase de kans op falen van de lager zeer hoog is! Het is dan ook aangeraden om deze fase te vermijden voor de continue loop van de machine en de lager vroeger te vervangen.^[2]

6.2 Kooibreuk

De frequentie waarmee de rolelementen binnen een lager roteren is gelijk aan de frequentie waarmee de lagerkooi ronddraait. Deze frequentie wordt aangeduid als de kooifrequentie of FTF (Fundamental Train Frequency). Deze frequentie ligt voor de meeste lagers in de buurt van 0,4 X RPM.

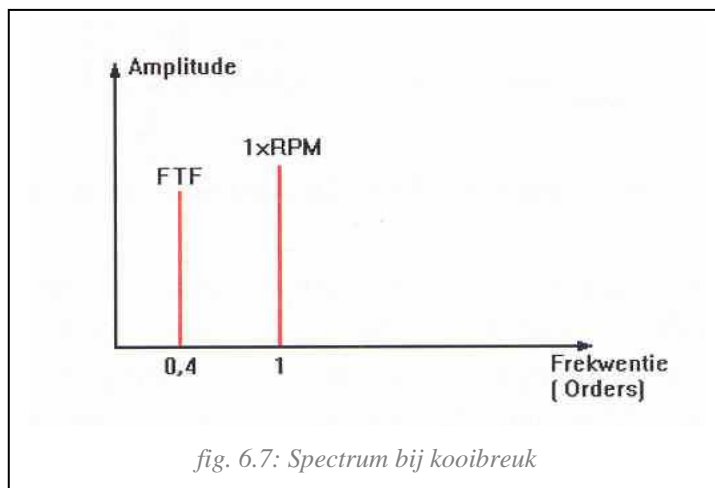


fig. 6.7: Spectrum bij kooibreuk

Wanneer de kooi van een lager stuk is, zullen de rolelementen zich niet meer op de juiste locatie van elkaar bevinden. Ze zullen zich groeperen waardoor er een onbalans ontstaat. Deze onbalans draait rond met een frequentie gelijk aan de kooifrequentie.

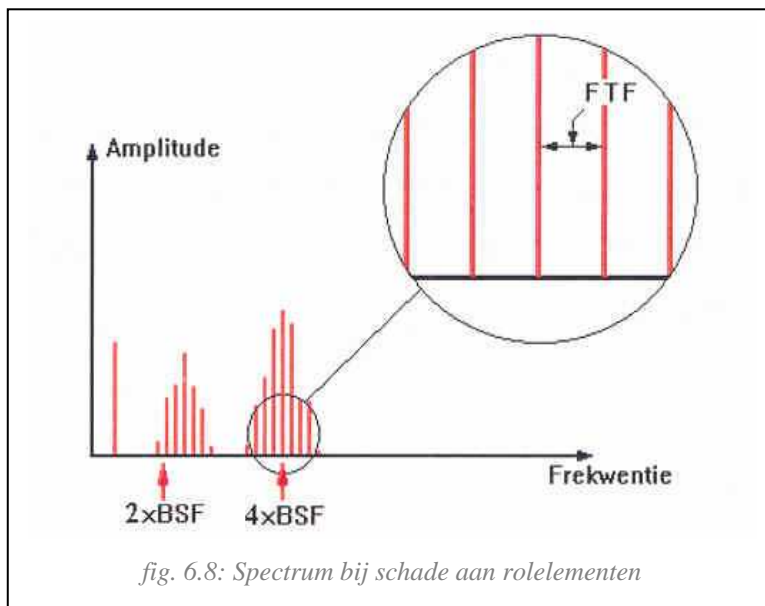
Het overeenkomstige spectrum is dan ook een frequentiepiek ter hoogte van de kooifoutfrequentie.

In de praktijk zal een dergelijk

spectrum echter zelden voorkomen. De reden hiervoor is het feit dat de lager meestal kort na de kooibreuk breekt. Voor de breuk is er daarentegen geen enkele aanwijzing van het opkomende probleem. Dit maakt kooibreuk het probleem waarvoor periodieke trillingsmetingen het minst kan beveiligen.^[2]

6.3 Schade aan de rolelementen

De frequentie waarmee de rolelementen rond hun eigen as draaien wordt aangeduid als de kogelrotatiefrequentie of BSF (Ball Spin Frequency).



Een defect aan één of meerdere rolelementen zal een typisch beeld geven zoals aangeduid op figuur 6.8. Er zullen trillingen optreden bij de BSF frequentie en veelvouden die echter elk op zich sterke modulaties op de kooifrequentie vertonen. Door het feit dat rolelementen die beschadigd zijn zowel bij het raken van de binnen- en buitenring impacts veroorzaken, zullen vooral de even harmonischen met modulaties op de kooifrequentie zichtbaar zijn.

Het trillingsniveau bij dergelijke fouten zal normaal relatief laag zijn. Eveneens is het beeld meestal slechts zichtbaar in het spectrum voorgesteld in versnelling, door de relatief hoge frequenties waarbij het defect zich voordoet.^[2]

6.4 Berekenen van de lagerfoutfrequenties

Normaal kan men de lagerfoutfrequentie berekenen via verschillende software programma's. Hebben we deze software niet ter beschikking, kunnen onderstaande formules voor een sterke benadering zorgen. We spreken slechts van een sterke benadering omdat de formules zelf geen rekening houden met de materiaaleigenschappen van de lager. De softwarematige databases kunnen dit wel doordat elke fabrikant een catalogus van zijn lagers ter beschikking stelt dat kan worden ingeladen in het programma.

$$\begin{aligned}
 BPFO &= \frac{n_{rol}}{2} \cdot \frac{RPM}{60} \cdot \left[1 - \left(\frac{D_{rol}}{D_p} \cdot \cos \Theta \right) \right] & BPFO &= \text{buitenringfrequentie} \\
 BRFI &= \frac{n_{rol}}{2} \cdot \frac{RPM}{60} \cdot \left[1 + \left(\frac{D_{rol}}{D_p} \cdot \cos \Theta \right) \right] & BRFI &= \text{binnenringfrequentie} \\
 BSF &= \frac{D_p}{D_{rol}} \cdot \frac{RPM}{60} \cdot \left[1 - \left(\frac{D_{rol}}{D_p} \cdot \cos \Theta \right)^2 \right] & BSF &= \text{kogelfrequentie} \\
 FTF &= \frac{1}{2} \frac{RPM}{60} \cdot \left[1 - \left(\frac{D_{rol}}{D_p} \cdot \cos \Theta \right) \right] & FTF &= \text{kooifrequentie} \\
 & & n_{rol} &= \text{aantal rolelementen} \\
 & & RPM &= \text{toerental} \\
 & & D_{rol} &= \text{kogeldiameter (mm)} \\
 & & D_p &= \text{buitendiameter binnenring (mm)} \\
 & & \Theta &= \text{contacthoek (}^\circ\text{)}
 \end{aligned}$$

7 Elektrische fouten

Dit hoofdstuk behandelt problemen bij elementen die specifiek zijn voor een inductiemotor. Deze zijn problemen binnen de stator en rotor. In de voorgaande hoofdstukken over externe oorzaken en lagerschade kunnen we de lijn ook doortrekken naar DC-machines, hier echter niet. We behandelen stator- en rotorproblemen apart.^[2]

7.1 Statorproblemen

De stator bestaat uit een gelamineerde structuur waarin uitsparingen zijn ingebracht. Deze uitsparingen noemen we statorgleuven of statorslots. Hierin worden de statorwindingen aangebracht.^[2]

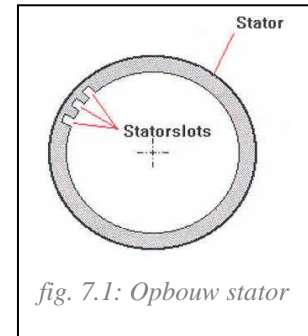


fig. 7.1: Opbouw stator

7.1.1 Problemen

Losheid: met losheid wordt bedoeld dat de windingen die bevestigd zijn in de gleuven loskomen ofwel het loskomen van de bevestiging van de stator op de motorbehuizing zelf. Eveneens losheid tussen de lamellen onderling is ook mogelijk.

Ongelijke luchtspleet: een ongelijke luchtspleet kan verschillende van oorzaken hebben. Een eerste oorzaak kan een excentrische opstelling van de rotor in de stator zijn. Een tweede mogelijke oorzaak kan zijn dat de stator vervormd is, waardoor de luchtspleet niet meer constant is.

Isolatieproblemen: isolatieproblemen kunnen tussen de lamellen onderling voorkomen met als gevolg lokale opwarming.^[2]

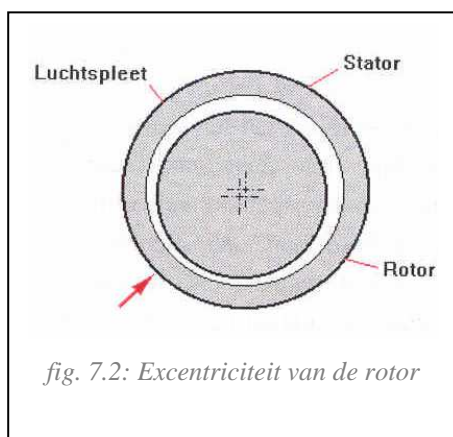


fig. 7.2: Excentriciteit van de rotor

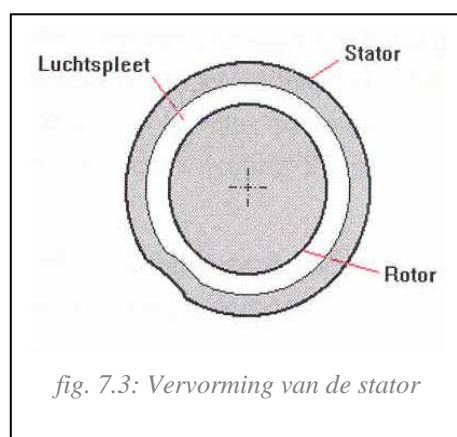


fig. 7.3: Vervorming van de stator

7.1.2 Trillingspectrum

De windingen in de stator genereren een magnetisch veld met een frequentie $f_{\text{draai veld}} = 50 \text{ Hz/p}$. Bij een eenvoudige tweepolige inductiemotor roteert het magnetisch veld met een frequentie f_0 gelijk aan 50 Hz. Dit kan worden voorgesteld als een tweepolige magneet die met een frequentie f_0 ronddraait. Er ontstaat een motorkoppel door de krachten op de rotorstaven die zich in de buurt van de magnetische noord- en zuidpool bevinden. De zones waar het motorkoppel waar het motorkoppel op ingrijpt, verplaatsen zich dus met dezelfde snelheid als de tweepolige magneet, namelijk met 50 Hz.

Bovenvermelde problemen (zie punt 7.1.1) zullen er voor zorgen dat de werking van het magnetisch statorveld niet homogeen verloopt over de gehele motoromtrek. Dit wil zeggen dat het motorkoppel een variatie zal kennen telkens wanneer een zone van maximale kracht de zone van niet homogeniteit passeert. Deze doorgang gebeurt twee keer per omwenteling, bijgevolg pulseert het motorkoppel met een frequentie gelijk aan twee keer de lijnfrequentie van 50 Hz, dus aan 100 Hz.

Bij motoren met meerdere poolparen is dit volledig analoog. In het geval dat de motor p aantal poolparen bezit, draait het magnetisch veld rond met een frequentie gelijk aan 50 Hz/p . Er zijn telkens $2p$ zones waar de kracht op de rotor maximaal is, waardoor een niet homogeniteit terug een pulserend koppel zal geven met een frequentie van 100 Hz.

Met andere woorden: statorproblemen vertalen zich in het spectrum als een frequentiepiek bij 100 Hz (dubbele van de lijnfrequentie).

Actie ondernemen tegen deze fout is pas nodig wanneer men merkt dat de piekwaarde gevoelig hoog wordt, of plots sterk stijgt. Een lichte verhoging van de amplitude bij 100 Hz is volledig normaal voor inductiemotoren.

Een veel voorkomende oorzaak van een vervormde stator is de zogenaamde soft foot. Dit is het geval wanneer de vier voeten van de motor niet in hetzelfde vlak liggen. Opsporen van een dergelijke fout kan eenvoudig door telkens een voet te lossen, een meting uit te voeren en de voet terug aan te spannen. Dit herhalen we voor elke voet, het trillingsniveau op 100 Hz neemt af wanneer de bout gelost is die statorvervorming veroorzaakt.^[2]

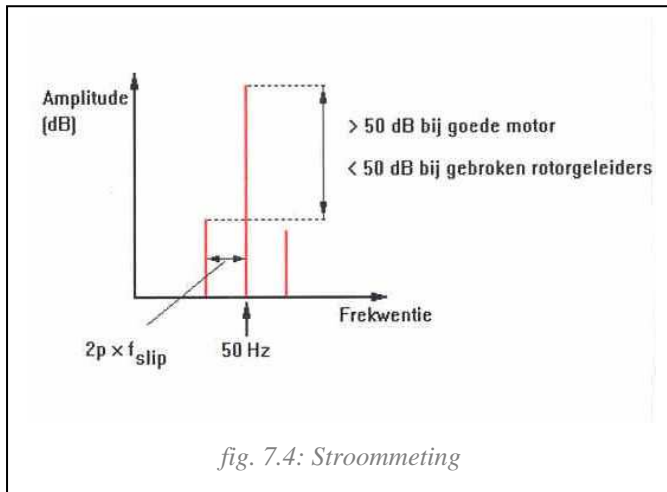
7.2 Rotorproblemen.

De problemen die hier het vaakst voorkomen zijn excentriciteit van de rotor en vooral gebroken rotorgeleiders. Beide problemen zijn niet makkelijk op te sporen binnen het spectrum en vergen enige ervaring om ze te herkennen. Daarom wordt voor het opsporen van dergelijke fouten overgestapt naar een elektrische stroommeting. Hier wordt de stroom door één van de drie fasen van de motor opgemeten. Deze stroom heeft een sinusoidaal verloop met een frequentie gelijk aan de lijnfrequentie van 50 Hz. In het spectrum vertaalt dit zich als een piek bij 50 Hz. Wanneer de rotor nu één of meerdere gebroken geleiders bevat, zal de opgemeten stroom variëren. In het frequentiespectrum zien we nog steeds de piek bij f_0 , maar nu met twee zijbanden op f_1 en f_2 .

$$\begin{aligned} f_1 &= f_0 - 2p \cdot f_{\text{slip}} \\ f_2 &= f_0 + 2p \cdot f_{\text{slip}} \end{aligned} \quad f_{\text{slip}} = \frac{50 \text{ Hz}}{p} - \frac{\text{RPM}_{\text{motor}}}{60}$$

$p = \text{aantal poolparen}$
 $f_0 = \text{lijnfrequentie}$
 $f_{\text{slip}} = \text{slipfrequentie}$

Door het grote verschil tussen de frequentiepiek bij 50 Hz en de zijbanden wordt het spectrum in logaritmische schaal voorgesteld. Bij een goede toestand moet het verschil tussen de centrale piek en de zijbanden minstens 50 dB bedragen.



Opmerking: om te weten of een bepaalde piek binnen het spectrum al dan niet elektrisch is, kan men dit eenvoudig testen. We bekijken het spectrum tijdens het afsluiten van de voeding. Wanneer direct na het afleggen van de voedingsspanning de piek verdwijnt, is de fout elektrisch. Blijft ze bestaan tot de motor effectief stil ligt, dan is de fout niet-elektrisch.^[2]

8 Meetapparatuur

8.1 Testbank

De meetresultaten werden opgenomen op een testbank die staat in het labo toegepaste mechanica van het PIH. De testbank bestaat uit een motor die via een V-riemoverbrenging (twee maal type SPA 1700 riemen) een DC-generator aandrijft. Als belasting wordt gebruik gemaakt van lampenborden. De belasting kan gewijzigd worden door enerzijds de ankerspanning van de generator te wijzigen of anderzijds het aantal geschakelde lampen te veranderen.

Onderstaande tabel geeft een opsomming van de belangrijkste motorgegevens.

DATA SHEET Three-phase Induction Motor - Squirrel Cage								
Customer	: IWT project							
Motor line	: Multivoltage							
Frame	: 160M				Service factor	: 1,00		
Rated Output	: 11,0 kW				Duty cycle	: S1		
Frequency	: 50 Hz				Ambient temperature	: 40 °C		
Poles	: 4 poles				Altitude	: 1000 m.a.s.l		
Full load speed	: 1460 rpm				Degree of protection	: IP55		
Slip	: 2,67 %				Aprox. weight	: 105 kg		
Voltage	: 380/660 V				Moment of inertia	: 0,0803 kgm ²		
Full load current	: 22,0/12,7 A				Noise level	: 62 dB(A)		
Locked rotor amps	: 132/76,0 A				Bearings	D.E.	N.D.E.	
Locked rotor current (II/In)	: 6,00				Regreasing int.	6309-C3	6209-Z-C3	
No load current	: 8,00/4,61 A				Grease amount	20000 h	20000 h	
Full load torque	: 72,0 Nm					13 g	8 g	
Locked rotor torque	: 200 %				Performance under load			
Breakdown torque	: 230 %				Load	cos ϕ	Efficiency(%)	
Design	: N				100%	0,85	89,2	
Insulation class	: F				75%	0,82	89,6	
Temperature rise	: 80 K				50%	0,74	88,3	
Locked rotor time	: 16 s							
DRAWING AND DIMENSIONS								
A	AA	AB	AC	AD	B	BA	BB	
254	64	308	312	250	210	65	254	
C	CA	D	E	ES	F	G	GD	
108	174	42k6	110	80	12	37	8	
DA	EA	TS	FA	GB	GF	H	HA	
42k6	110	80	12	37	8	160	22	
HC	HD	K	L	LC	S1	d1	d2	
317	410	14.5	598	712	2xM40x1.5	DM16	DM16	

tabel 7.1: Data sheet 11 kW motor

Er wordt gebruik gemaakt van een 11 kW inductie motor. De lagers waarop we metingen uitvoeren zijn aan Drive End (aszijde) van het type nummer 6309 en aan Non Drive End (ventilatorzijde) van het typenummer 6209.

De motor werd gekoppeld aan het driefasig net via een frequentiesturing van het type CFW09 15 kW 400 V. De sturing is zo afgeregeld dat alle nodige parameters kunnen ingesteld worden via het bedieningsbordje aan de voorzijde van de regelaar. Via deze frequentiesturing kunnen we het toerental van de motor laten variëren.

Het geheel is bevestigd op één constructie die wordt vastgemaakt aan de tafels in het labo. De koppeling tussen de onderdelen en de bevestiging ervan op de constructie is echter wel instelbaar.

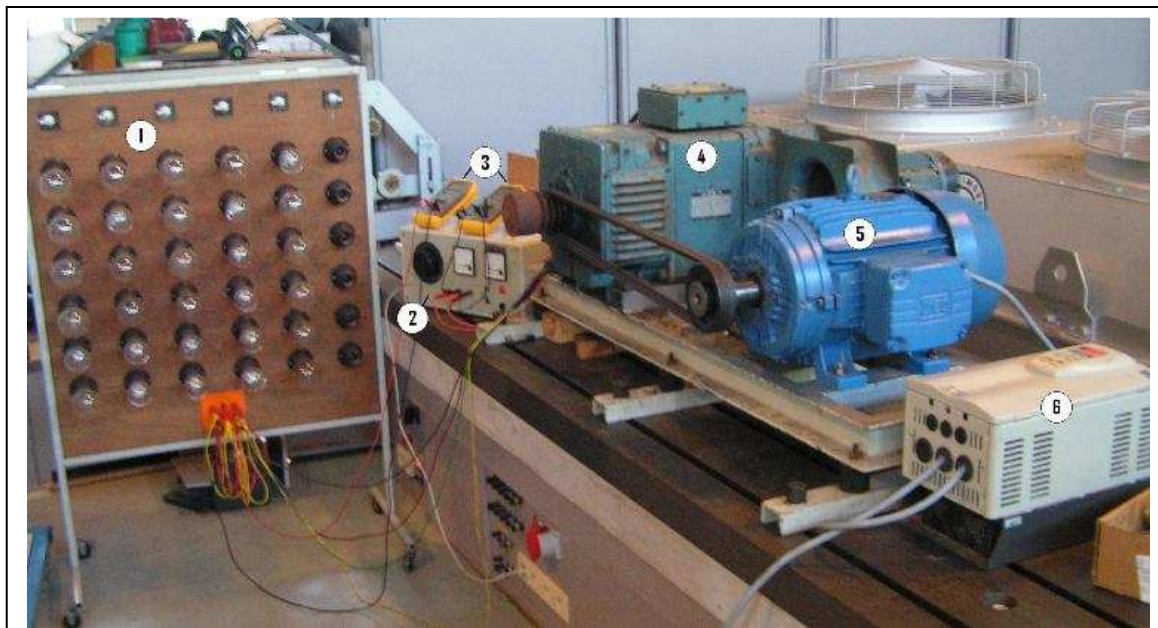


fig. 8.1: Testopstelling

Legende:

- 1: Lampenbord
- 2: DC-voeding die zorgt voor het veld van de DC-generator.
- 3: 2 Voltmeters om veldspanning en lampenspanning mee te controleren.
- 4: DC-generator
- 5: 11 kW motor
- 6: Frequentieomvormer

Gegevens DC-generator:	31 kW	1816 tr/min
Anker:	470 V	75,1A
Veld:	310 V	3,28 A

Gegevens frequentieomvormer: type CFW09 15 kW 400V (merk WEG)

- Algemeen: U/f-sturing, sensorloos (of closed loop) vector gestuurde omvormer
- Eigenschappen:
- * Sensorloze vectorsturing
 - * Vectorsturing met encoder terugkoppeling
 - * V/Hz scalaire sturing
 - * Zelf-tuning
 - * EMC filter
 - * LED en LCD display

8.2 Meetapparatuur

Om de trillingen binnen de lezen hebben we drie verschillende instrumenten gebruikt. Twee toestellen eigen aan het PIH: Ono Sokki CF-350 en LMS Pimento. Daarnaast nog een toestel eigen aan CET-Motoren dat verdeeld wordt door Prüftechnik, de VibScanner.

8.2.1 Ono Sokki CF-350

De Ono Sokki CF-350 is een twee-kanaals-FFT-analyser met een frequentiebereik tot 40 kHz. De metingen met dit toestel kunnen niet ingelezen worden in een PC. Voor verdere analyse dient men de meting af te drukken of op te slaan op een diskette.

Dit apparaat beschikt niet over een voeding die de versterker binnen onze versnellingsopnemer kan voeden. Daarom dienen we tussen de analyser en meetsensor een speciale voeding te zetten voor ICP-versnellingsopnemers.

Met de Ono Sokki kunnen we enkel Level 2 metingen uitvoeren. De resultaten worden weergegeven in veelvouden van de aardversnelling. Via de functietoetsen kunnen we de eenheden van de gegevens omzetten naar snelheid of verplaatsing.

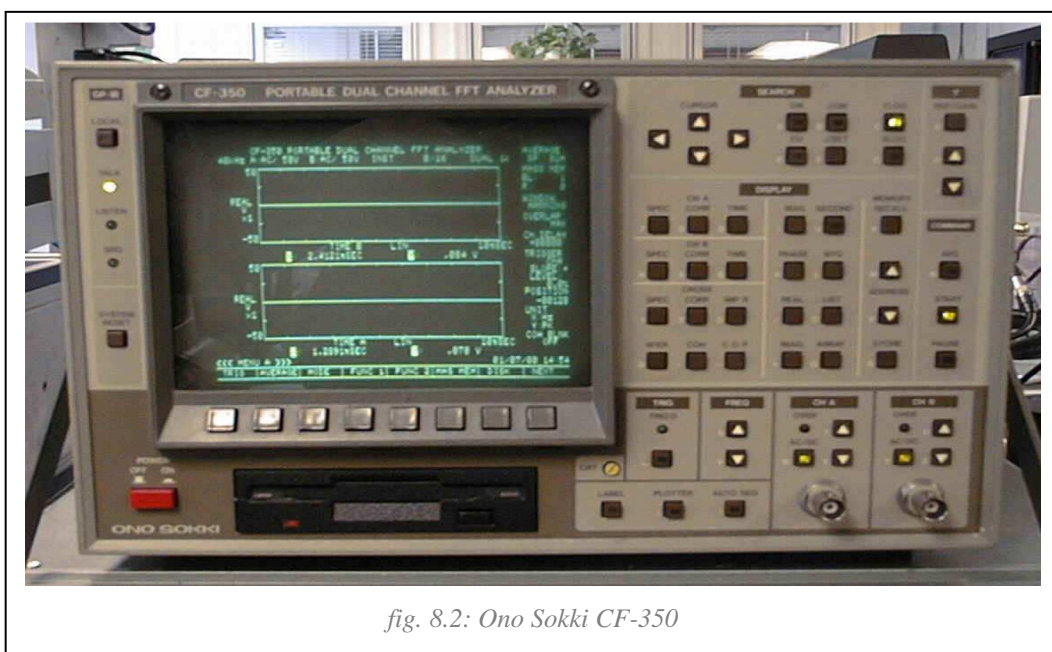
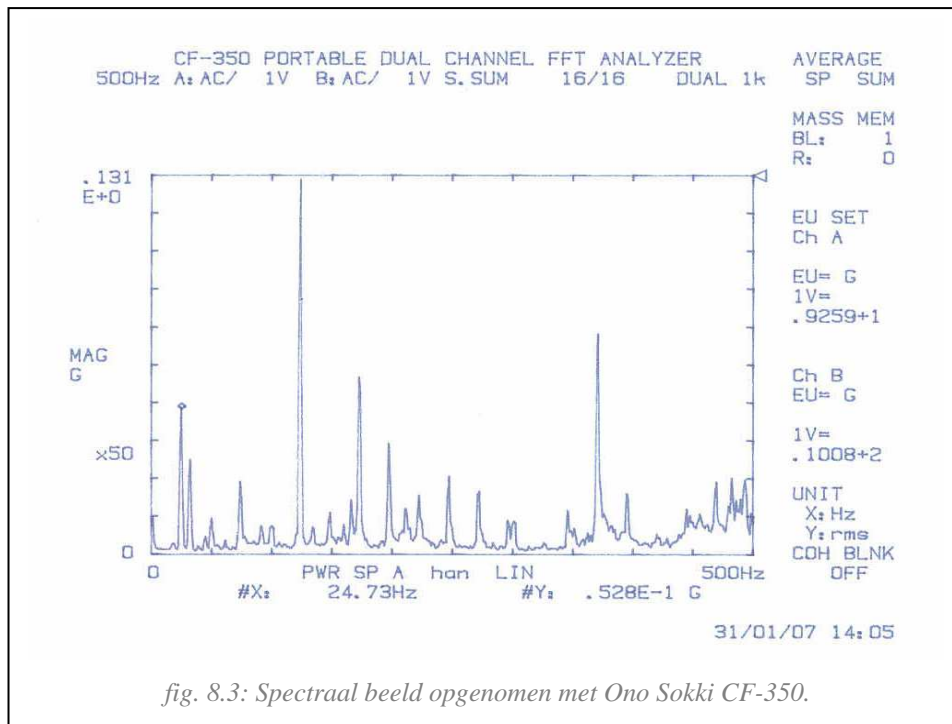


fig. 8.2: Ono Sokki CF-350



8.2.2 LMS Pimento

Het toestel van LMS is ook een FFT-analyser, maar nu met vier kanalen. De instellingen gebeuren hier allemaal softwarematig met het softwarepakket Pimento. Dit toestel bevat wel een voeding voor onze opnemers waardoor we de externe bron kunnen weglaten. Net als bij de Ono Sokki kunnen we ook hier geen trendmetingen doen, maar enkel Level 2 metingen. Echter hebben we hier wel een veel uitgebreider rekenorgaan waarmee we onze binnengelezen waarden in vele vormen en grootheden kunnen omzetten.

Het grote voordeel van dit toestel is dat we een hele reeks metingen kunnen uitvoeren en opslaan om pas later grondig te analyseren op de PC. Op het Ono Sokki toestel kunnen we enkel gegevens opslaan op een diskette om later op het toestel zelf terug te analyseren.. De gebruiksvriendelijkheid van het LMS-toestel is dan ook veel beter dan de wat oudere Ono Sokki. Echter is het wel zo dat bij de analyser van LMS moeilijkheden kunnen optreden om de frequentiewaarden correct uit te lezen. Dit is een veel voorkomend probleem wanneer men een aantal harmonischen van een bepaalde frequentie wil uitlezen. Vaak liggen de frequenties een paar tienden verschoven, wat het analyseren bemoeilijkt.

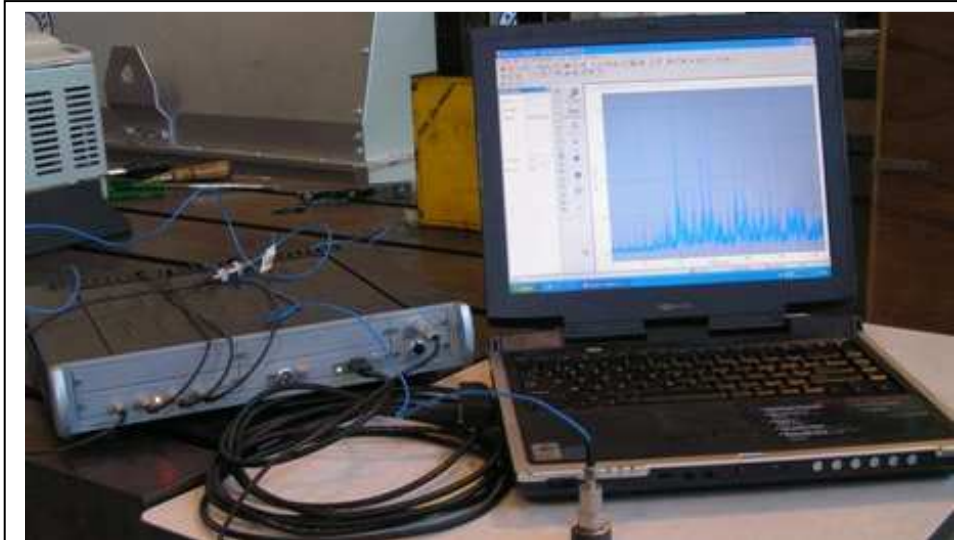


fig. 8.4: LMS Pimento

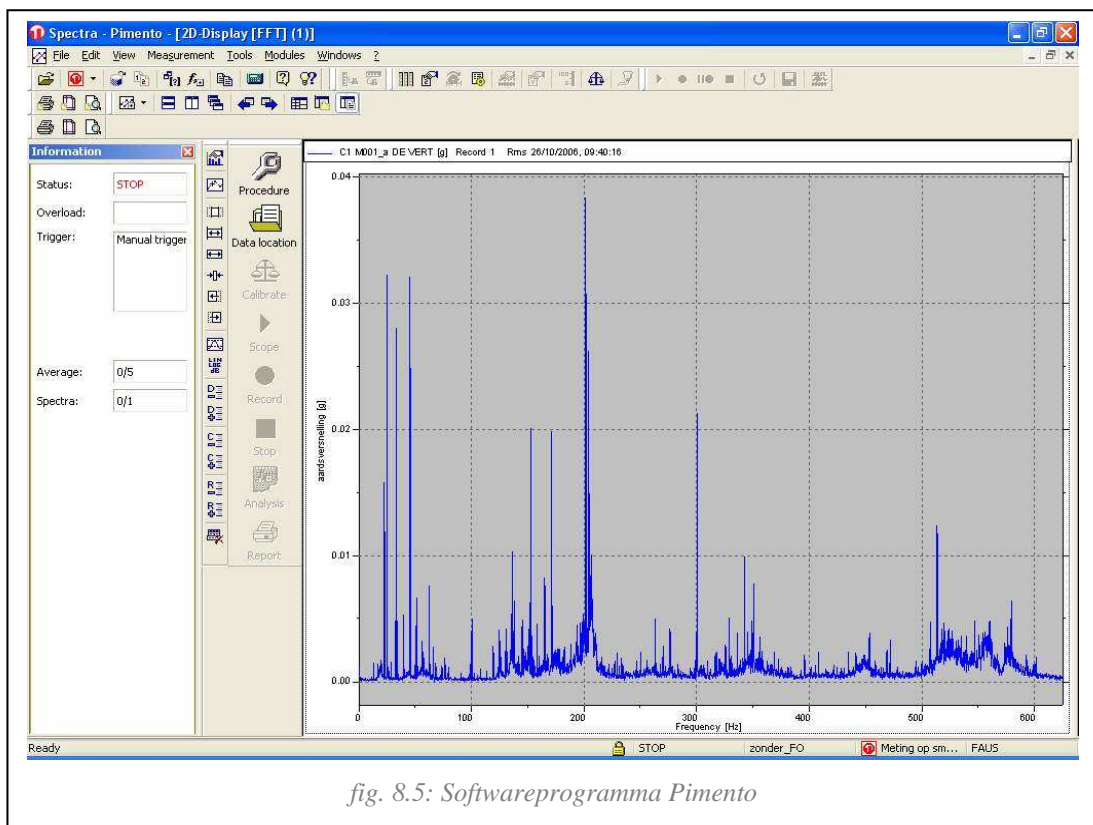


fig. 8.5: Softwareprogramma Pimento

8.2.3 VibScanner

Met de VibScanner kan men zowel Level 1 als Level 2 metingen uitvoeren. Eveneens is er de mogelijkheid om specifieke analyses te doen zoals schokpulsmetingen. De instellingen kunnen rechtstreeks aan het toestel gedaan worden ofwel via het bijhorende softwarepakket Omnitrend. Deze software is speciaal ontwikkeld voor conditiebewaking. Via enkele handige tools kan men zeer snel alarmgrenzen instellen of frequentiemakers invoeren.

Een nadeel aan het toestel is wel dat je geen uitvoerige berekeningen kunt uitvoeren op de

metingen. Men dient met andere woorden voor iedere andere grootheid of vorm een andere meting uit te voeren. Hierdoor stijgt de meettijd en kunnen er door een niet periodieke storing soms afwijkingen zijn tussen twee dezelfde metingen met een verschillende grootheid.

In tegenstelling tot de vorige twee toestellen gebruiken we hier geen magneet-versnellingsopnemer. De VibScanner maakt gebruik van een eigen meetsensor, de tiptector.

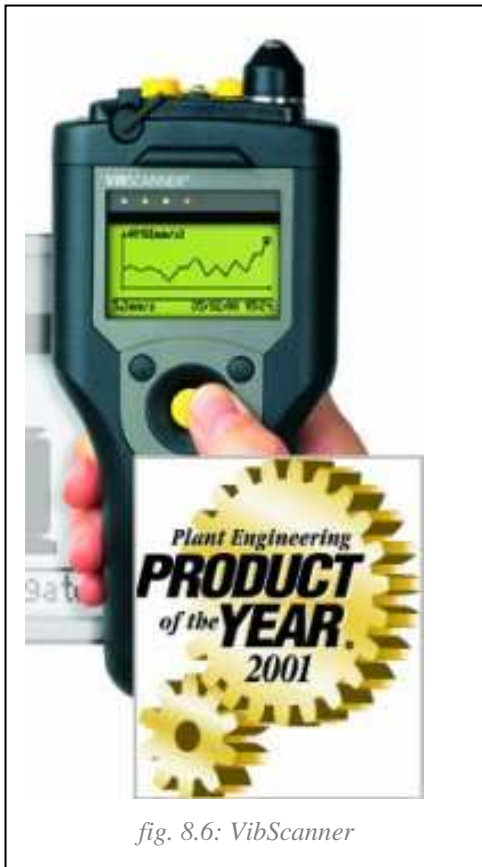


fig. 8.6: VibScanner

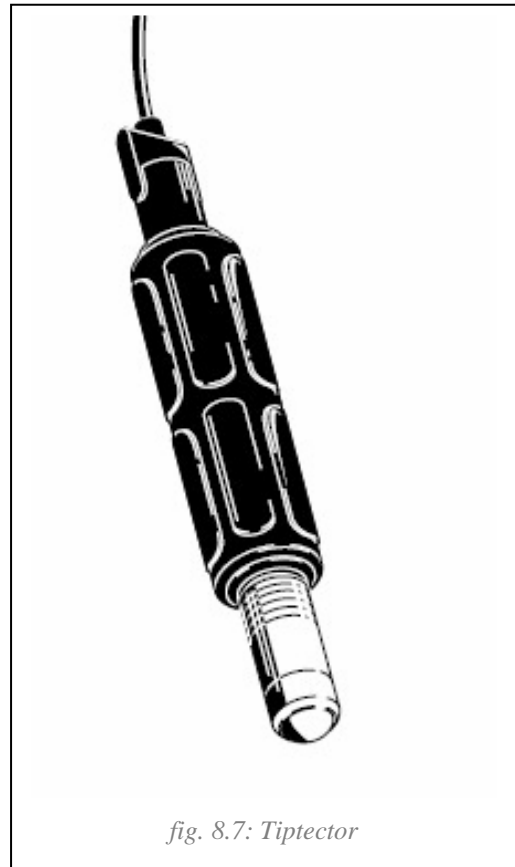


fig. 8.7: Tiptector

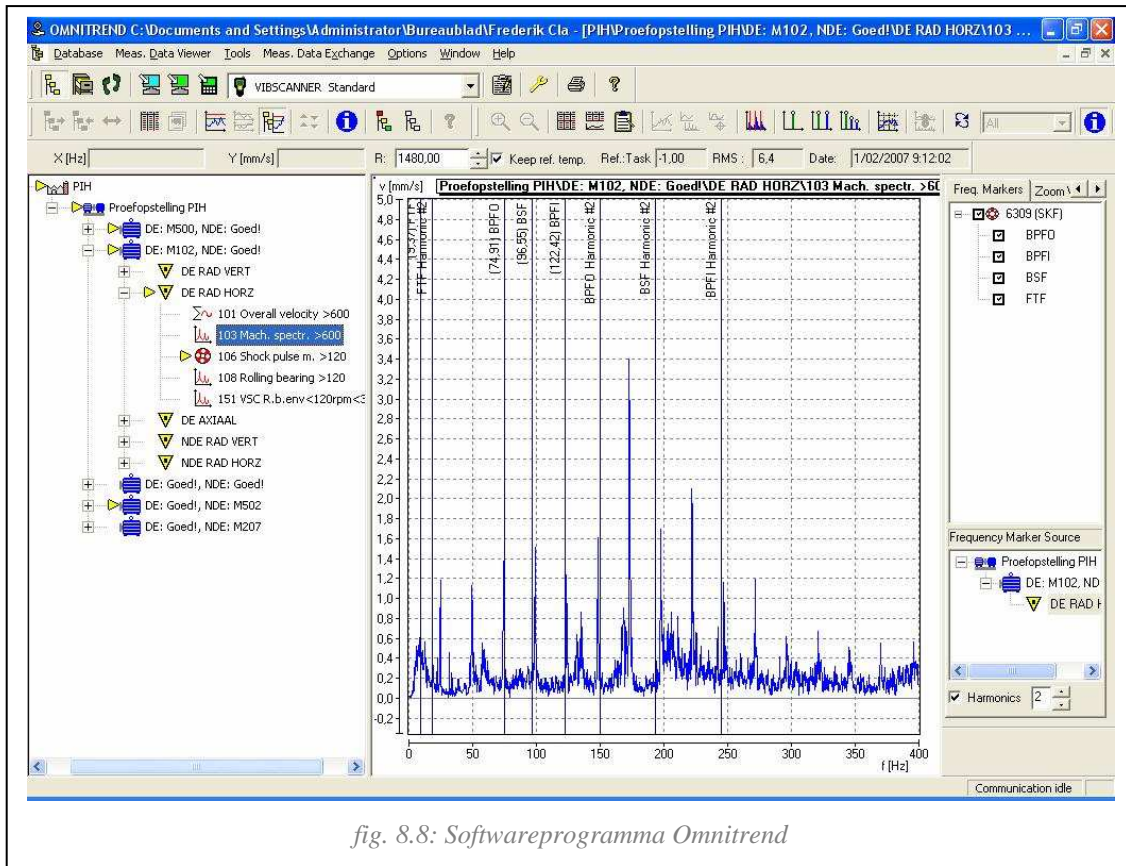


fig. 8.8: Softwareprogramma Omnitrend

9 Bespreking van de meetresultaten

9.1 Algemeen

Om een goed trillingsbeeld van een motor te verkrijgen wordt meestal gemeten op zes punten. Deze punten zijn aan drive end zijde (aszijde) en non drive end zijde (ventilatorzijde) de volgende: horizontaal, verticaal en axiaal. Omdat de ventilator zich bevindt aan de non drive end zijde kunnen we meestal hier de axiale richting niet opmeten. In onze situatie is dit ook zo, bijgevolg meten we slecht op vijf punten. Zie ook figuur 9.1.^[2]

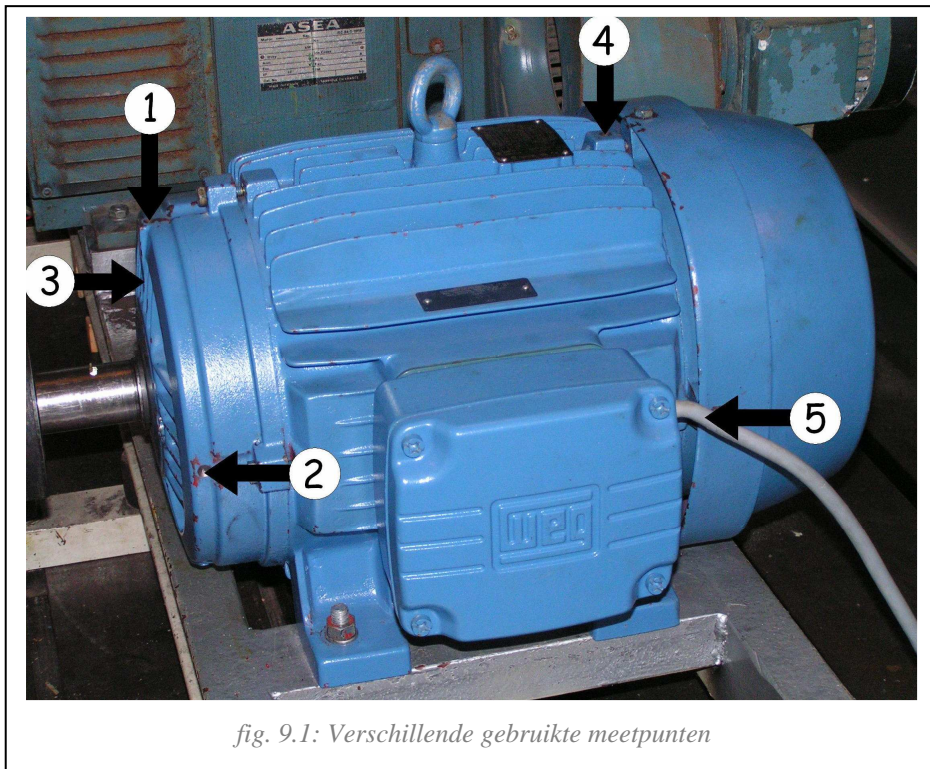


fig. 9.1: Verschillende gebruikte meetpunten

Legende bij de figuur:

Meetpunt nr. 1: drive end, radiaal verticaal (DE RAD VERT)

Meetpunt nr. 2: drive end, radiaal horizontaal (DE RAD HORZ)

Meetpunt nr. 3: drive end, axiaal (DE AXIAAL)

Meetpunt nr. 4: non drive end, radiaal verticaal (NDE RAD VERT)

Meetpunt nr. 5: non drive end, radiaal horizontaal (NDE RAD HORZ)

9.2 Lagerschadedetectie via spectrumanalyse

9.2.1 Werkwijze

Vanuit het bedrijf CET-Motoren hebben we een aantal geschikte lagers voor de motor beschikbaar. Deze lagers worden één voor één gemonteerd en gedemonteerd.

De lagers bevinden zich aan beide zijden achter de flens van de motor. Om deze te verwijderen aan drive end zijde dienen we vooreerst de V-riemschijf te verwijderen doormiddel van een poelietrekker, zie figuur 9.2. Eens deze is afgenomen kunnen we probleemloos de flens losschroeven. Vervolgens kunnen we de lager zelf demonteren met behulp van dezelfde poelietrekker.



fig. 9.2: Demontage V-riemschijf met poelietrekker

Aan non drive end zijde hebben we geen poelie maar wel de ventilator. Deze kunnen zeer vlug gedemonteerd worden door de beschermkap los te schroeven en de ventilator te verwijderen doormiddel van een kliksysteem. Na het afnemen van de flens kunnen we opnieuw met de poelietrekker de lager verwijderen.



fig. 9.3: Lager 6309



fig. 9.4: Lager 6209

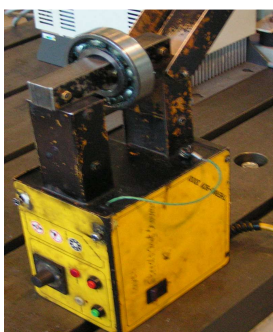


fig. 9.5: Lagerverwarmer

Bij het monteren wordt dezelfde manier van werken omgekeerd uitgevoerd. Echter, bij het plaatsen van de lagers dienen deze eerst wat opgewarmd te worden. Door de klempassing tussen de binnenring en de as kunnen we de lager niet zomaar op de as schuiven. Het opwarmen gebeurt met een lagerverwarmer, dit toestel verwarmt de lager doormiddel van een hooginductief veld. Ook de V-riemschijf kunnen we via dit toestel verwarmen en zo makkelijker monteren. Vervolgens wordt er op elke lager een trillingsmeting uitgevoerd, waaruit de een frequentiespectrum bekomen wordt.

9.2.2 Bepalen van de lagerfoutfrequenties

Om het type lagerschade op te sporen via spectrumanalyse dienen we eerst de lagerfoutfrequenties te weten. Deze kunnen we berekenen aan de hand van de formules gegeven in 6.4 samen met onderstaande gegevens.

Lagertype 6309

$$n_{rol} = 8$$

$$RPM = 1490 \text{tr} / \text{min}$$

$$D_{rol} = 17,15 \text{mm}$$

$$D_p = 72,5 \text{mm}$$

$$\Theta = 18^\circ$$

$$BPFO = \frac{n_{rol}}{2} \cdot \frac{RPM}{60} \cdot \left[1 - \left(\frac{D_{rol}}{D_p} \cdot \cos \Theta \right) \right] = \frac{8}{2} \cdot \frac{1490}{60} \cdot \left[1 - \left(\frac{17,15}{72,5} \cdot \cos(18^\circ) \right) \right] = 76,98 \text{Hz}$$

$$BPFI = \frac{n_{rol}}{2} \cdot \frac{RPM}{60} \cdot \left[1 + \left(\frac{D_{rol}}{D_p} \cdot \cos \Theta \right) \right] = \frac{8}{2} \cdot \frac{1490}{60} \cdot \left[1 + \left(\frac{17,15}{72,5} \cdot \cos(18^\circ) \right) \right] = 121,68 \text{Hz}$$

$$BSF = \frac{D_p}{D_{rol}} \cdot \frac{RPM}{60} \cdot \left[1 - \left(\frac{D_{rol}}{D_p} \cdot \cos \Theta \right)^2 \right] = \frac{72,5}{17,15} \cdot \frac{1490}{60} \cdot \left[1 - \left(\frac{17,15}{72,5} \cdot \cos(18^\circ) \right)^2 \right] = 99,67 \text{Hz}$$

$$FTF = \frac{1}{2} \cdot \frac{RPM}{60} \cdot \left[1 - \left(\frac{D_{rol}}{D_p} \cdot \cos \Theta \right) \right] = \frac{1}{2} \cdot \frac{1490}{60} \cdot \left[1 - \left(\frac{17,15}{72,5} \cdot \cos(18^\circ) \right) \right] = 9,62 \text{Hz}$$

Echter, door middel van het programma Omnitrend van Prüftechnik kan dit snel gebeuren met de toepassing “Rolling Bearing Frequency Editor”. Onze motor draait onder belasting met een toerental van 1490 tr/min. Zo krijgen we voor onze lagers aan Drive End en Non Drive End volgende waarden:

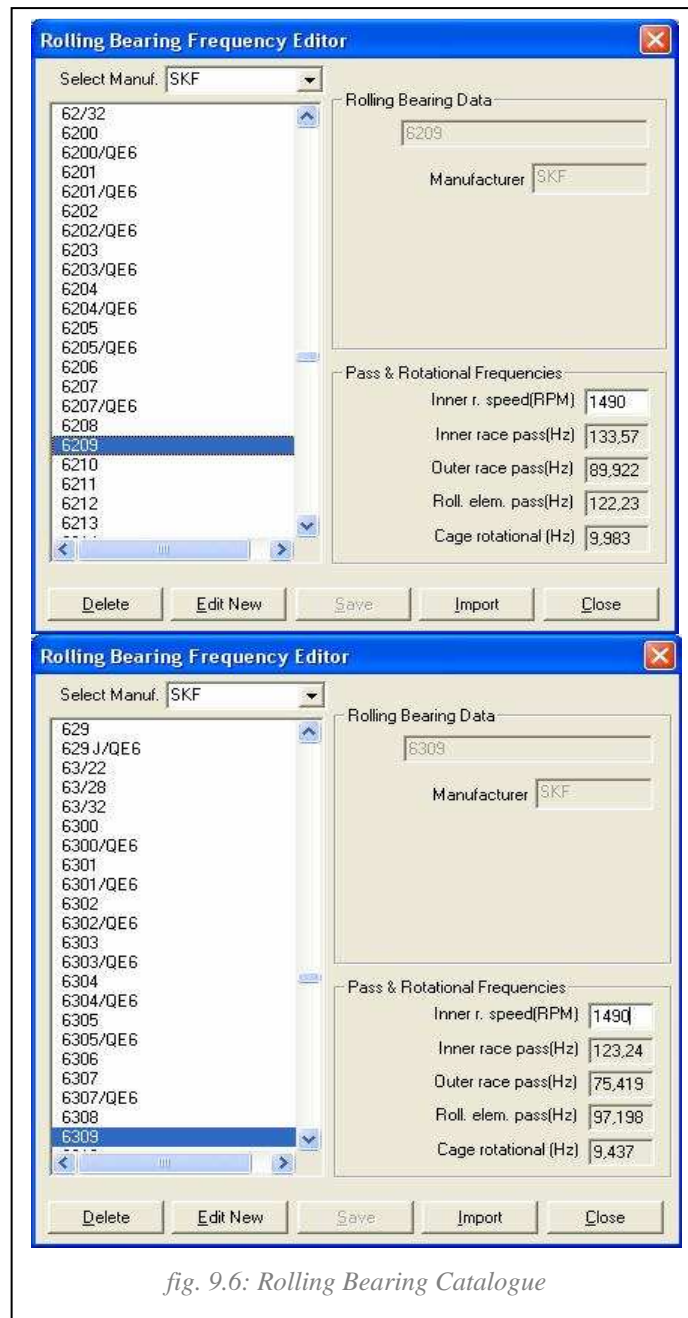


fig. 9.6: Rolling Bearing Catalogue

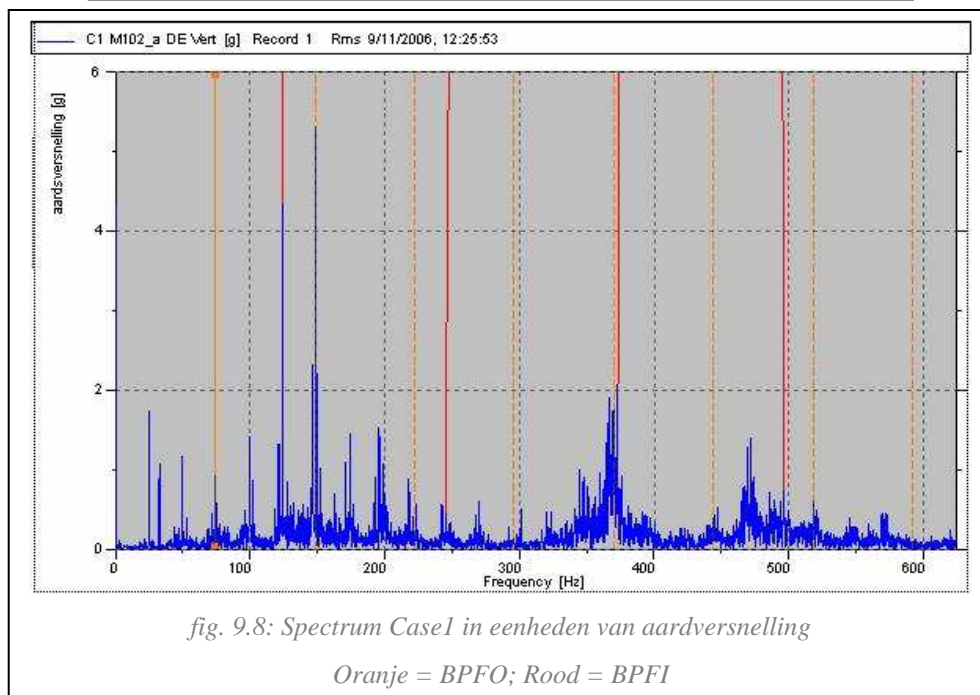
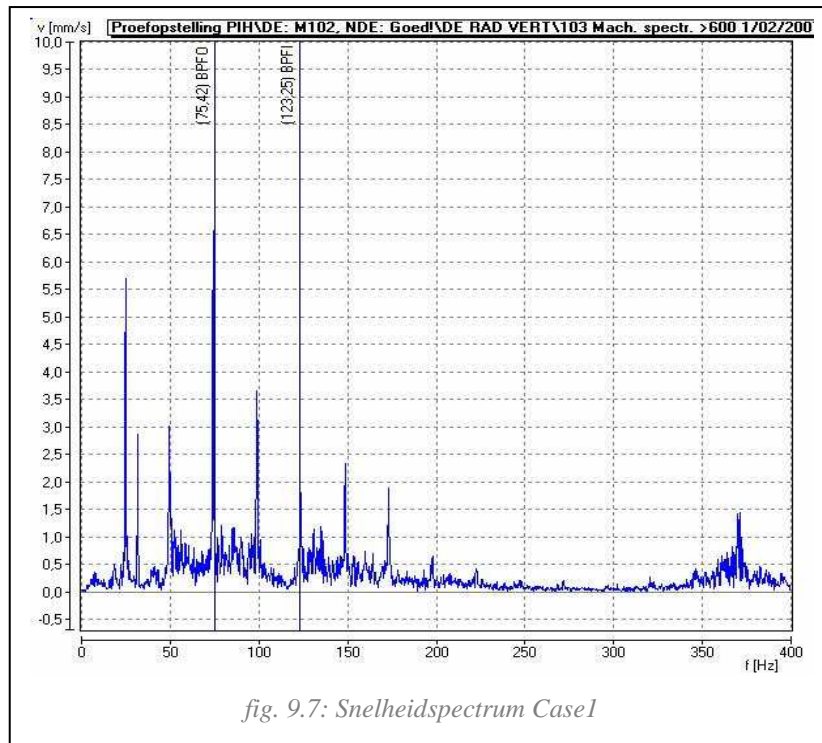
Als we de berekende waarden vergelijken met de waarden die de “Rolling Bearing Catalogue” weergeeft, is te zien dat deze slechts een kleine afwijking hebben. Deze afwijking is zoals reeds eerder vermeld te wijten aan het feit dat de formules geen rekening houden met de materiaaleigenschappen van de verschillende lagers.

9.2.3 Metingen

Case1: Lager aan Drive End zijde met schade aan binnen- en buitenring.

Wanneer we de motor laten draaien met de lager gemonteerd, is meteen een haperend geluid te horen. Hieruit kan worden afgeleid dat er zeker iets misloopt bij de lager.

Na het uitvoeren van de metingen op meetpunten 1 en 2, kan er in het frequentiespectrum een hoge piek worden waargenomen bij de BPFO en een piek bij de BPFI.



Wanneer we hetzelfde beeld bekijken in eenheden van de aardversnelling krijgen we een duidelijker beeld, want in deze voorstellingsvorm komen de hogere frequenties duidelijker naar voor. Hier zien we nu dezelfde fouten, maar met talrijke harmonischen. Uit deze twee beelden wordt er afgeleid dat er zeker iets fout loopt binnen de lager. Vermoedelijk een put in de buitenring en beginnende schade aan de binnenring.

Echter, bij demontage en na kijken naar de lager zien we dat er een speling waar te nemen is tussen binnen en buitenring. Deze speling kan ook een oorzaak zijn van de verhoogde pieken veroorzaken op de binnen- en buitenringfoutfrequentie.

Na het openschijven van de lager merken we geen enkele beschadiging aan de binnen of buitenring. De verhoogde pieken en het geproduceerde lawaai zijn dus enkel en alleen te wijten aan de speling die aanwezig was in de lager.



fig. 9.9: Beschadigde lager Case 1



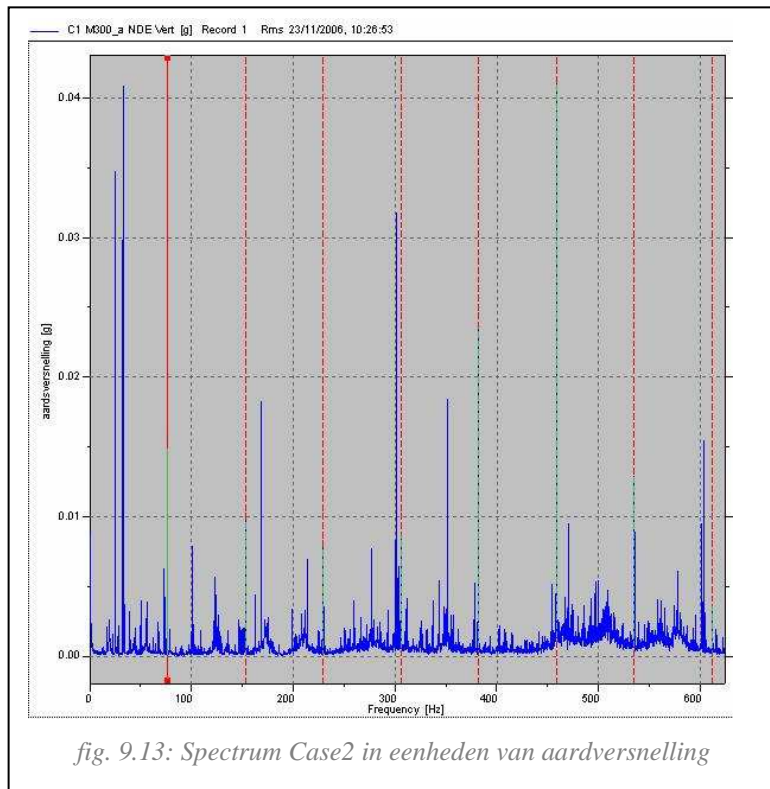
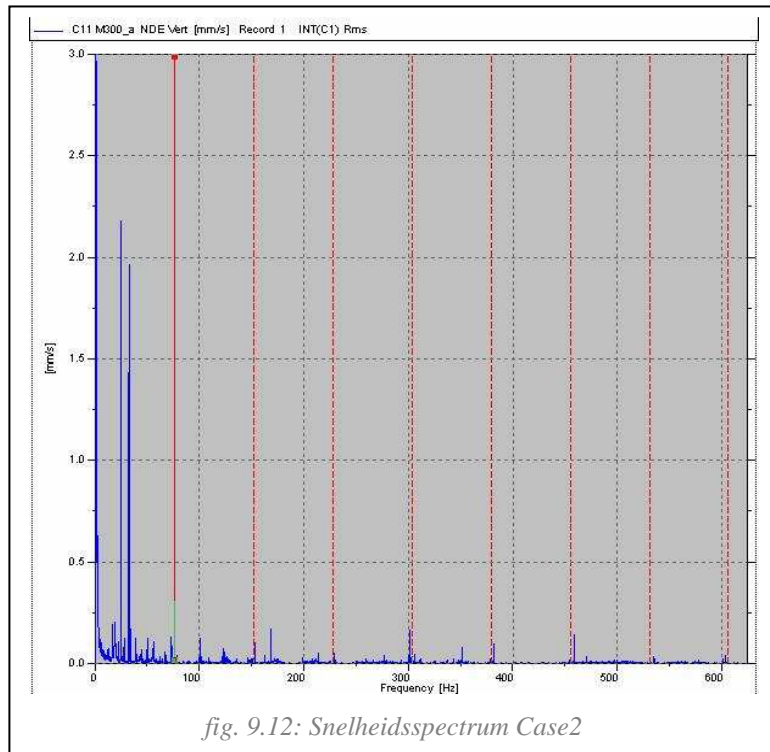
fig. 9.10: Buitenring lager Case 1



fig. 9.11: Binnenring lager Case 1

Case2: Lager aan Drive End zijde met gebroken buitenring.

Wanneer we het trillingsniveau opnemen in snelheid via meetpunten 1 en 2, merken we weinig merkwaardigs op. We zien een lichte piek bij de buitenringfoutfrequentie (figuur 9.12, rode volle lijn op 75,5 Hz) en enkele hele kleine harmonische ervan (rode stippelijnen), maar deze amplitudes zijn nog niet verontrustend.



Wanneer we echter dezelfde meting bekijken in eenheden van de aardversnelling, zien we talrijke harmonischen van dezelfde frequentie. Vermoedelijk is er hier toch iets aan de buitenring van de lager dat niet meer in orde is. In de praktijksituatie zou men hier dit lager nauwlettend opvolgen aan de hand van periodieke metingen. Indien de amplitude van de BPFO zou toenemen, moet men een stop inlassen om de lager te vervangen.

Bij demontage blijkt inderdaad dat er iets defect is aan de lager. Tijdens het aftrekken van de lager van de as wordt zichtbaar dat de buitenring gebroken is. Tijdens de periodieke metingen in de praktijk zouden de amplitudes al snel toenemen ten gevolge van deze breuk.

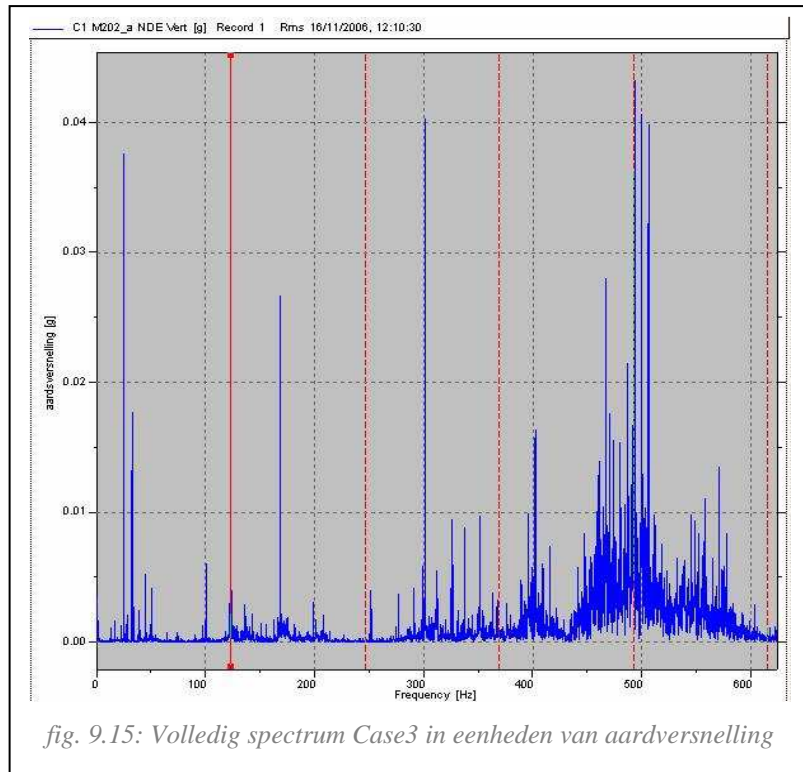


Uit dit alles kunnen we besluiten dat het meestal niet voldoende is enkel het snelheidsspectrum te beschouwen. Veel pieken worden pas duidelijk zichtbaar in het versnellingspectrum.

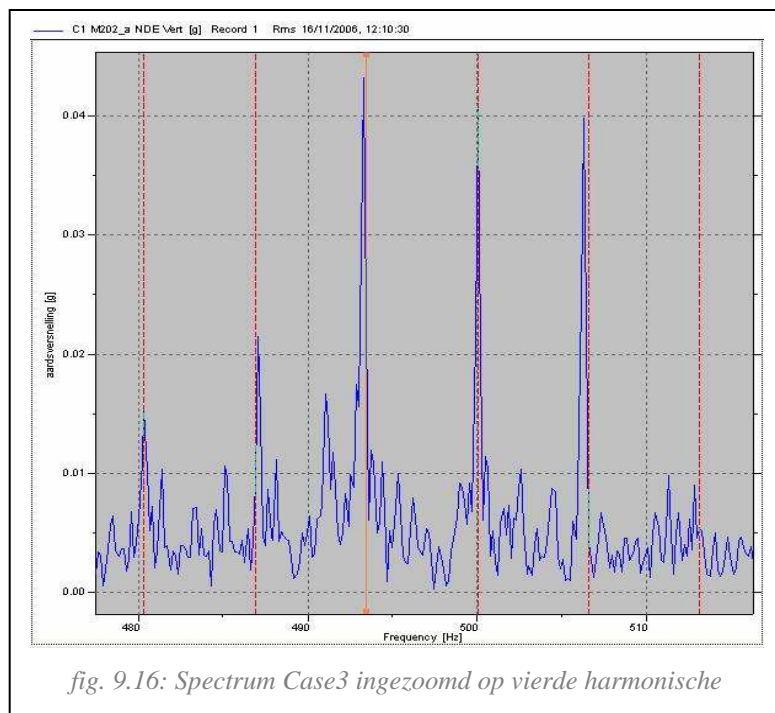
Case3: Lager aan Non Drive End zijde met kogelschade.

Zoals in hoofdstuk 6 beschreven, kenmerkt kogelschade zich vooral door een hoge tweede en vierde harmonische met daarrond verschillende zijbanden. Daar deze harmonischen geen al te hoge niveaus aannemen wordt kogelschade het best bekeken in een versnellingspectrum.

In het spectrum opgenomen door een meting op meetpunt 4 en 5, zien we een verhoogde vierde harmonische van de BSF (122 Hz). Hieruit kunnen we vermoeden dat we temaken hebben met lichte kogelschade.



Wanneer we inzoomen op deze vierde harmonische zien we dat rond deze frequentie zijbanden voorkomen waarbij de deltawaarde ongeveer gelijk is aan 0,4 keer de rotatiefrequentie, of gelijk is aan de kooifoutfrequentie. De lager heeft hier te maken met beginnende kogelslijtage. Periodieke opvolging van de lager is hier wenselijk.



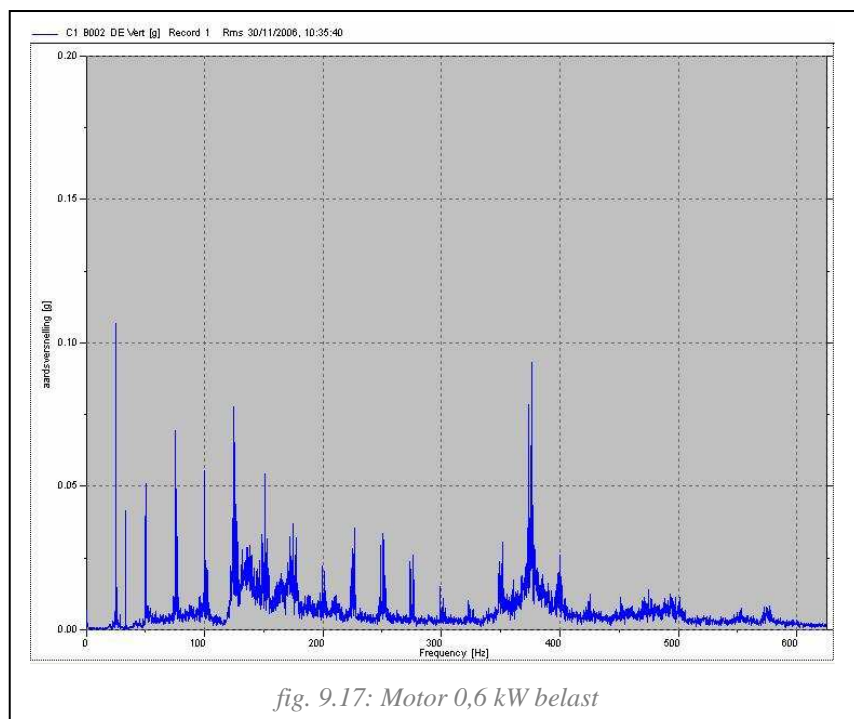
Voor meer details betreffende de metingen: zie bijlage 2.

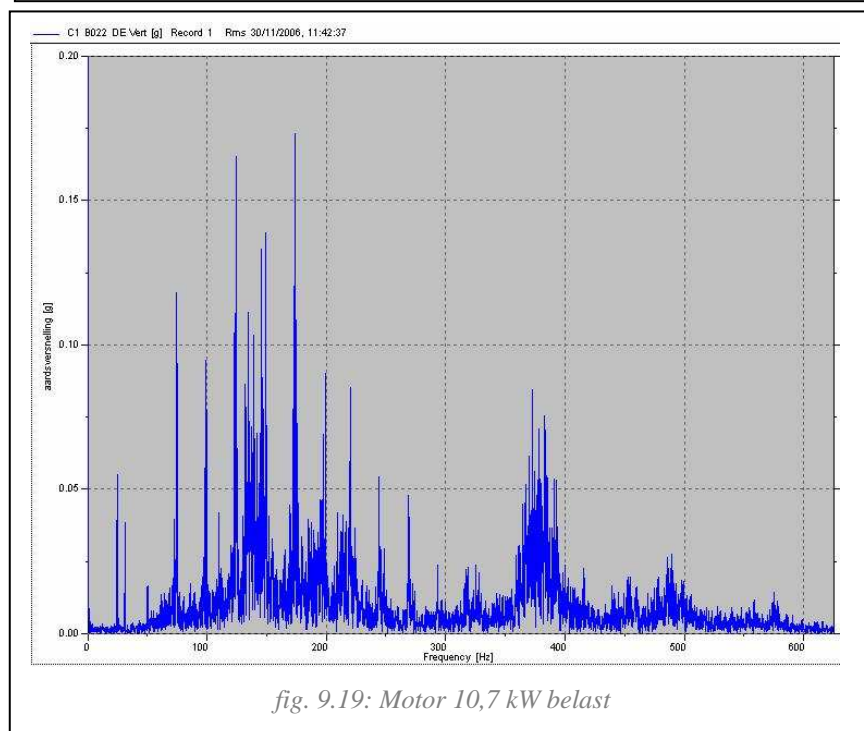
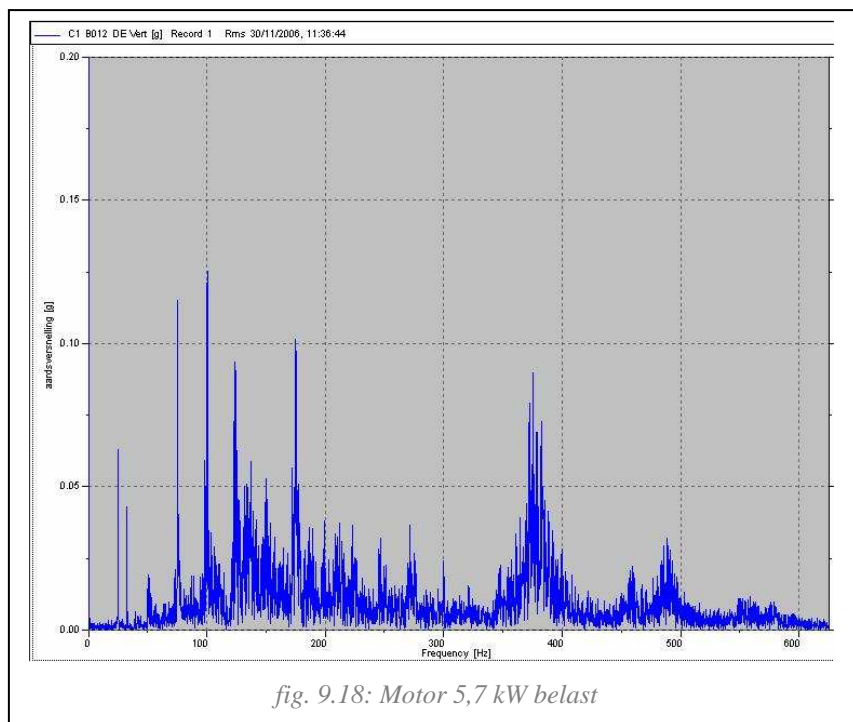
9.3 Invloed van belasting en smering

9.3.1 Invloed van belasting

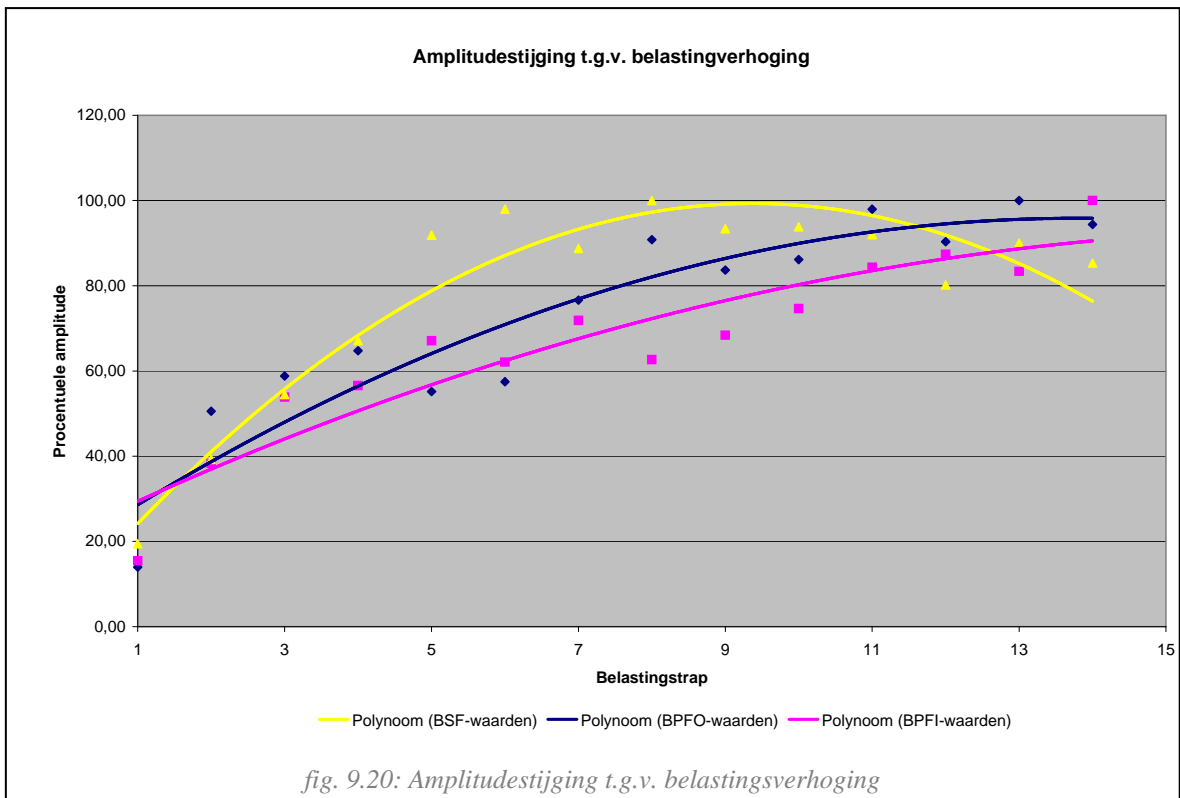
Om de invloed van de belasting na te gaan, monteren we een lager onder goede smercondities op de testbank. Onder goede smercondities wordt verstaan: 13 g voor type 6309 en 9 g voor type 6209 lagers. Vervolgens meten we het trillingsniveau op onder verschillende belastingstoestanden. Deze toestanden kunnen we laten variëren door meer of minder lampen te schakelen verbonden met de DC-generator. We beginnen met een belasting van 600 W, na elke meting voeren we de belasting telkens op. Zo wordt in ongeveer 15 trappen een variatie gemaakt tussen 0,6 kW en het nominaal vermogen van 11 kW.

Onderstaande grafieken geven enkele trappen van de meetcyclus weer. We kunnen globaal merken dat het trillingsniveau stijgt.

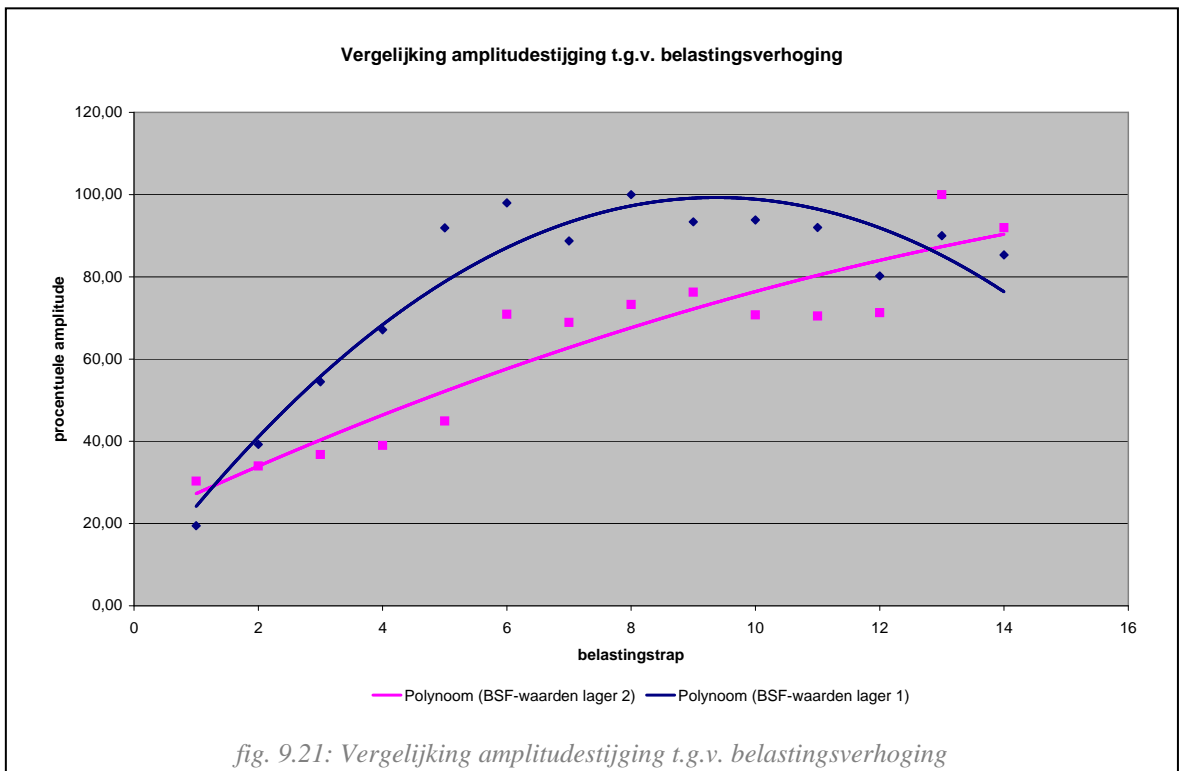




Echter is er nog altijd niets geweten over de invloed op de lagerfoutfrequenties. Hiervoor noteren we bij de verschillende belastingstrappen de amplitudes op volgende frequentie: BPFO, BPFI en BSF. De kooifoutfrequentie wordt niet bekeken, om de eenvoudige reden dat deze niet zichtbaar is binnen het spectrum. De grafiek in figuur 9.20 toont de amplitudevariatie volgens de belastingstrap. De amplitudes worden procentueel voorgesteld om het vergelijken te vereenvoudigen. Hierbij stemt 100% telkens overeen met de maximum gemeten amplitude bij iedere frequentie.



Figuur 9.21 vergelijkt het verloop van de BSF-waarden bij twee verschillende lagers. Met de vraag of we altijd kunnen spreken van een amplitude stijging wanneer de belasting toeneemt.



Er kan duidelijk worden afgeleid dat wanneer de belasting wordt verhoogd, ook de trillingsniveaus

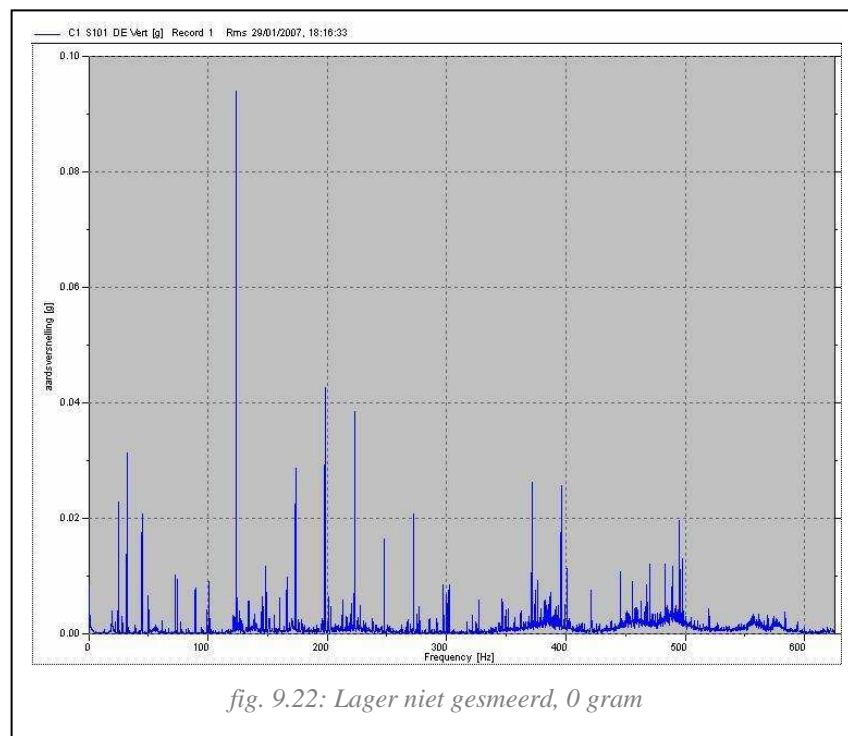
stijgen. Verder is er ook op te merken dat de amplitudes niet continu blijven toenemen maar vaak blijven schommelen rond een bepaalde waarde. Echter is er geen duidelijke trend af te leiden tussen de belastingsvariatie en variatie van de amplitudes. Met deze reden besluiten we dat bij het variëren van de belasting ook de trillingsniveaus op de lagerfrequenties wijzigen. Het is daarom aangewezen alvorens een trillingsmeting uit te voeren te controleren of de belasting nog altijd identiek is aan deze bij de vorige meting. Hierdoor wordt het ook onmogelijk om een trend te maken bij motoren onder variabele belastingen.

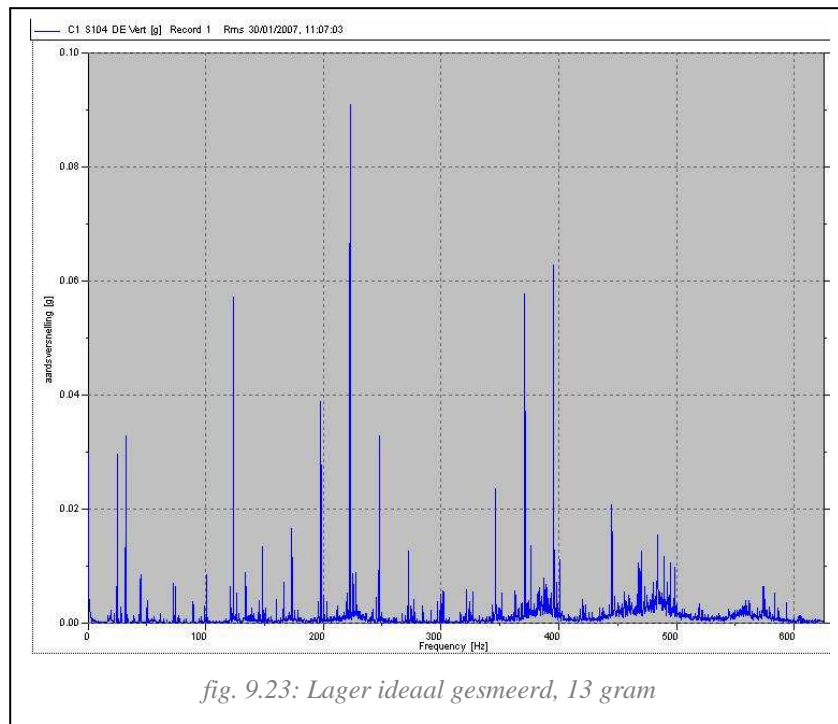
Voor meer details betreffende de metingen: zie bijlage 3.

9.3.2 Invloed van smering

De invloed van smering gaan we na door een bepaalde lager onder dezelfde belasting meer of minder te smeren. We beginnen met een droge toestand. De lager is dus aanvankelijk totaal niet gesmeerd. Vervolgens voeren we de smering op tot de lager ideaal gesmeerd is. Volgens de WEG-richtlijnen wil dit zeggen 13 g bij type 6309 en 9 g bij type 6209.^[7]

De metingen gebeuren in vijf trappen, bij elke trap wordt er ongeveer 3 gram smeervet aan toegevoegd. Onderstaande grafieken geven de metingen weer bij de eerste en de laatste trap.

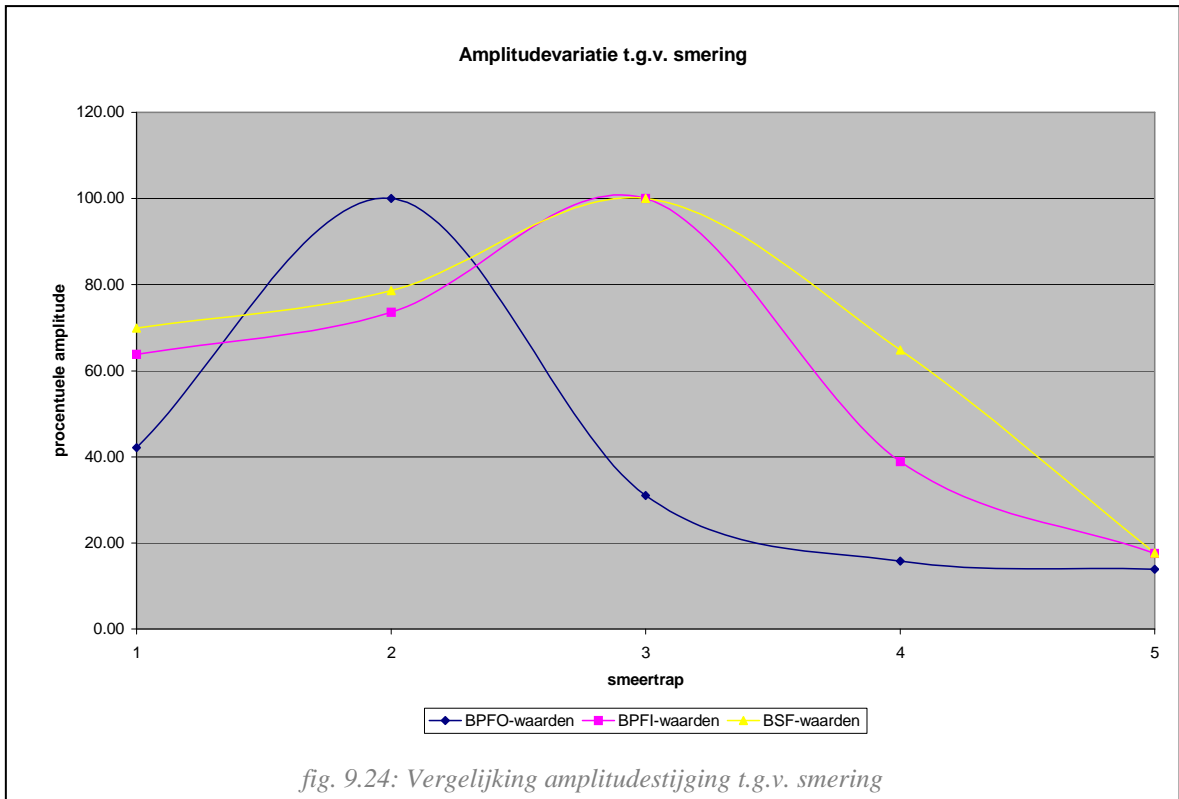




Uit de metingen kan men afleiden dat we een afname krijgen van de laagfrequente trillingsniveaus en een toename van de hoogfrequente. In het spectrum vertaalt zich dit alsof de lagerschade een fase wordt teruggedrongen. Wat ook logisch is, de smering zorgt ervoor dat de rolelementen niet meer zo hard door een put rollen, de oneffenheden worden gedempt. Dit kan je vergelijken met het rijden over een oneffen wegdek met volle wielen of met luchtbanden. In het tweede geval dempt de lucht ook een groot deel van de schokken.

In de grafiek op volgende pagina wordt het volledige amplitude verloop weergegeven. We merken dat bij te weinig smering de waarden van de amplitudes op de lagerfoutfrequenties stijgen. Na de tweede of derde trap dalen de trillingsniveaus terug. Dit is na ongeveer 6 gram smeervet te hebben toegevoegd. Bij ideale smering zien we dat de amplitudes een gunstige waarde aannemen.

Hieruit kan besloten worden dat het nodig is om voor de meting de lager nog eens goed te smeren. Belangrijk is dat na het smeren het vet te tijd krijgt zich te verdelen over de lager en de juiste temperatuur kan krijgen eer men begint te meten. Indien met te vroeg meet zullen de metingen geen betrouwbare resultaten opleveren. Tevens dient men op te letten dat er ook niet teveel gesmeerd wordt, in dat geval kan het gebeuren dat het smeervet uit de lager geduwd wordt. Ook zal bij overvloedige smering het vet niet meer de gewenste bedrijfstemperatuur bereiken, waardoor z'n werking ook niet optimaal zal zijn. Voorbeeld van een lager met teveel smering in figuur 9.25.



Voor meer details betreffende de metingen: zie bijlage 3.

9.4 Metingen aan de hand van de schokpulsmethode.

Uit hoofdstuk 4 weten we dat er bij de SPM-methode twee waarden van belang zijn: de maximum- en de tapijtwaarde. De maximumwaarde slaat op de lagerschade, de tapijtwaarde op de lagersmering.

Hernemen we nu de lager uit punt 8.1, Case1. We voeren een schokpulsmeting uit op dit lager.

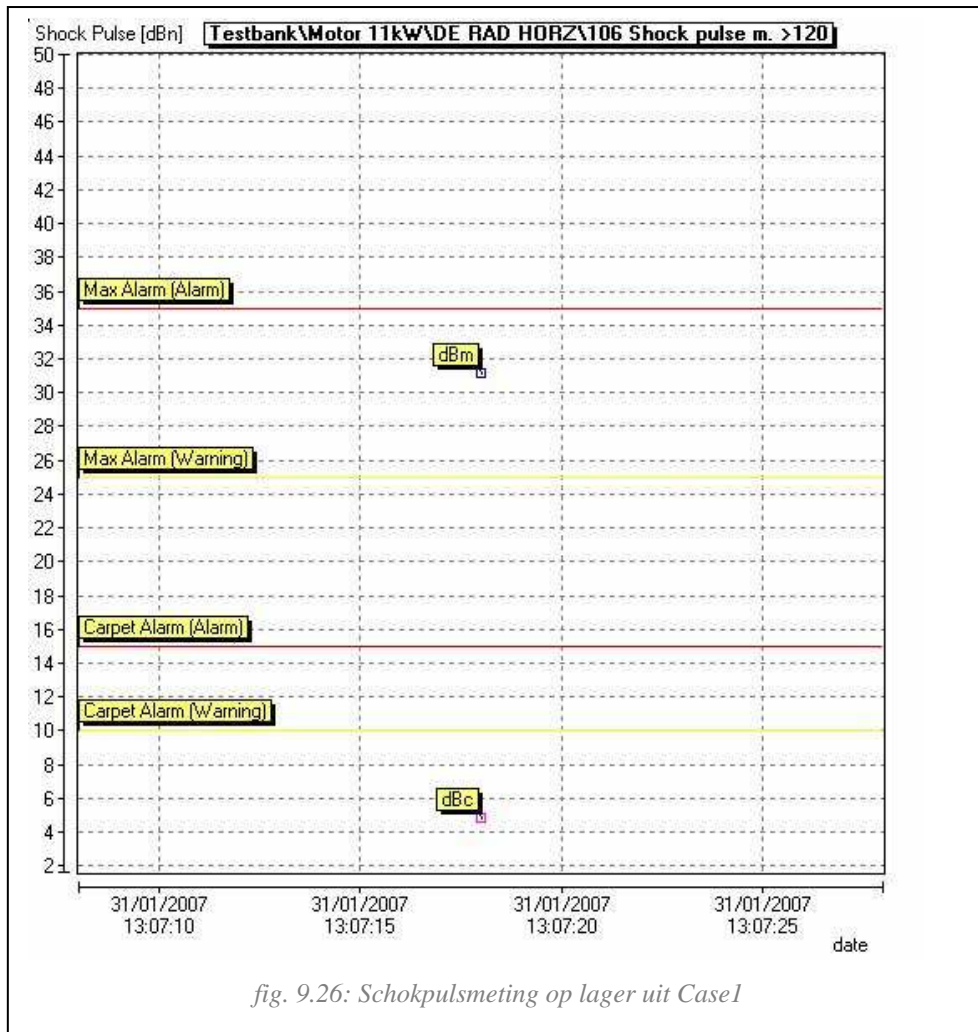
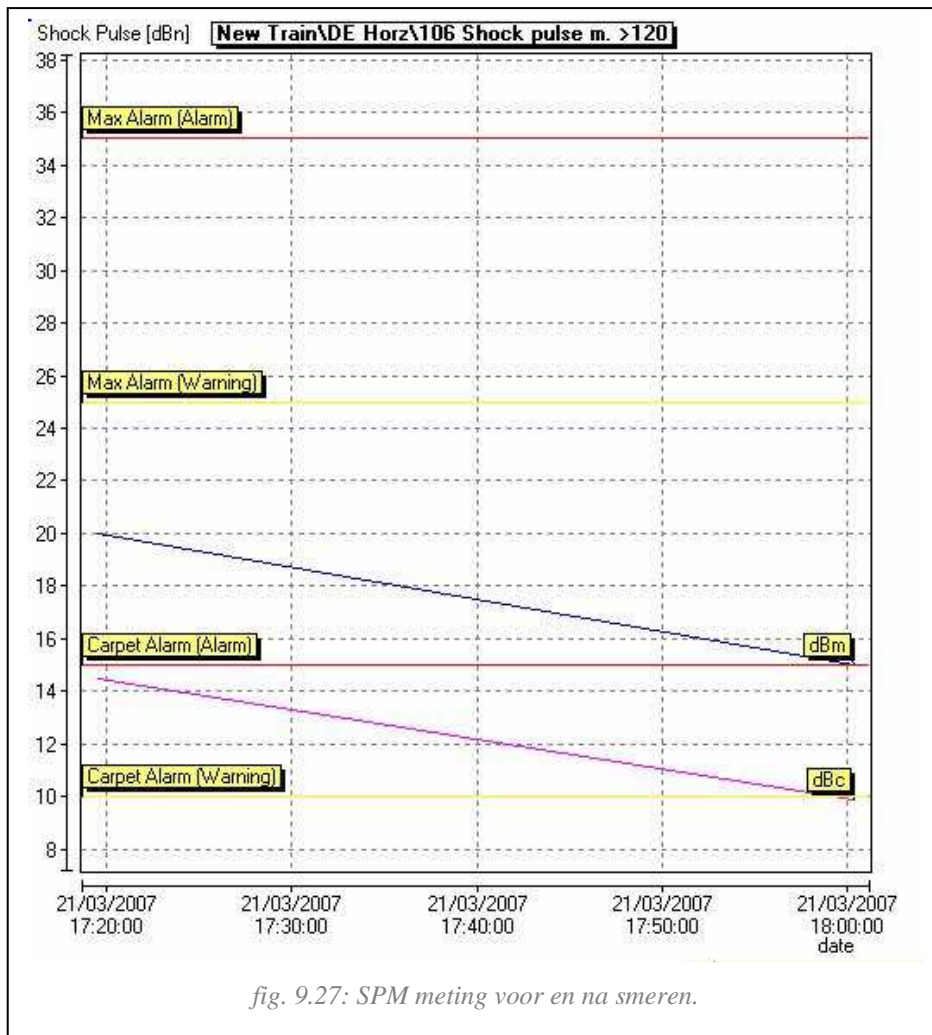


fig. 9.26: Schokpulsmeting op lager uit Case1

We zien duidelijk dat de tapijtwaarde niet in de alarmzone gaat terwijl de maximumwaarde ver boven het waarschuwningsniveau ligt en zelfs heel dicht bij de maximumalarmwaarde. Hieruit kunnen we afleiden dat de tapijtwaarde weinig invloed ondervindt van de graad van de lagerschade.

In een volgende meting bekijken we in hoeverre de tapijtwaarde reageert op meer of minder smering. We voeren eerst een meting uit op een droog lager om daarna dezelfde meting te hernemen onder goede smercondities.



We merken dat de tapijtwaarde sterk daalt wanneer de lager wel gesmeerd is. Ook de maximumwaarde neemt evenredig af. Dit is logisch daar bij meer smering de trillingsniveaus in waarde afnemen en de dBm-waarde een peak-hold waarde is.

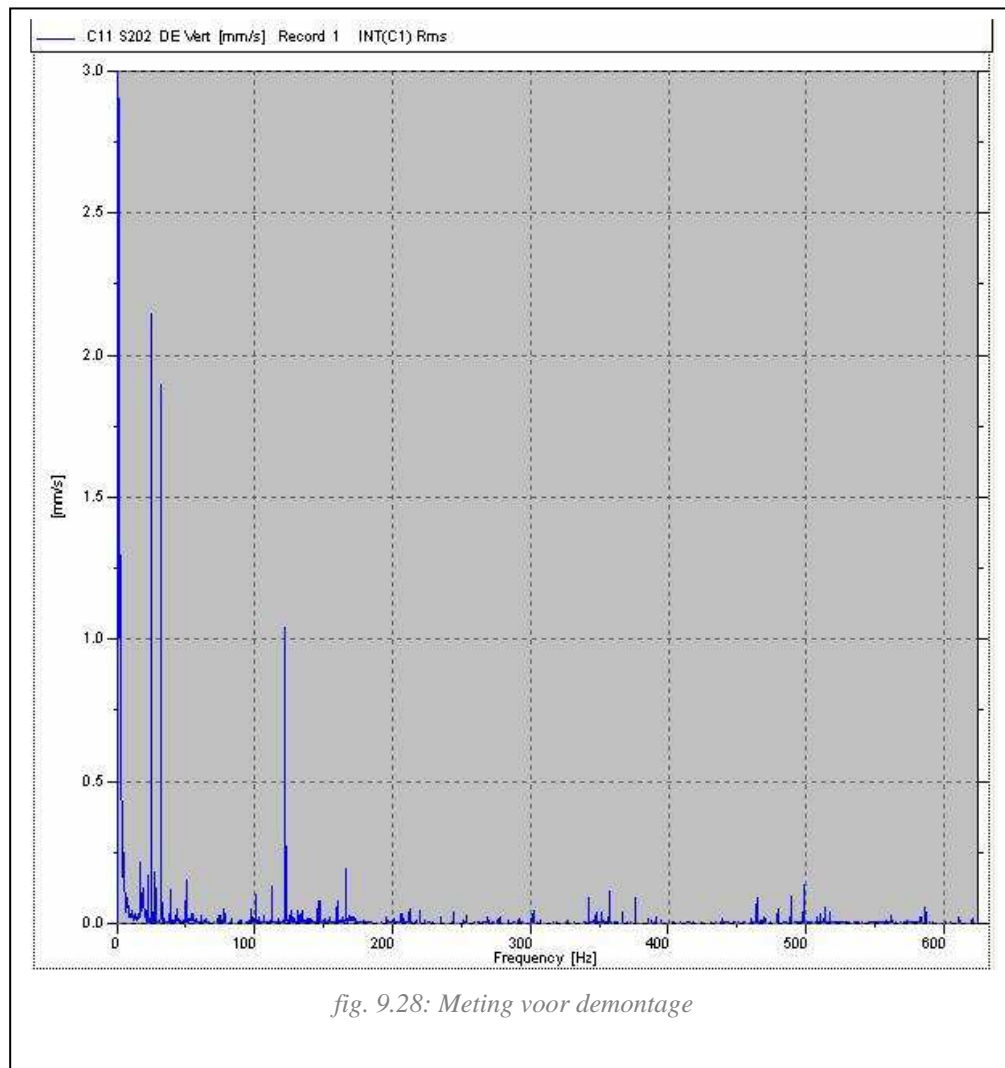
Hierdoor kunnen we de SPM-methode ook anders interpreteren. Doordat de maximumwaarde evenredig verschuift met de tapijtwaarde, kan men het volgende besluiten: hoe verder de dBm en dBc-waarde uit elkaar liggen, hoe slechter de toestand van de lager.

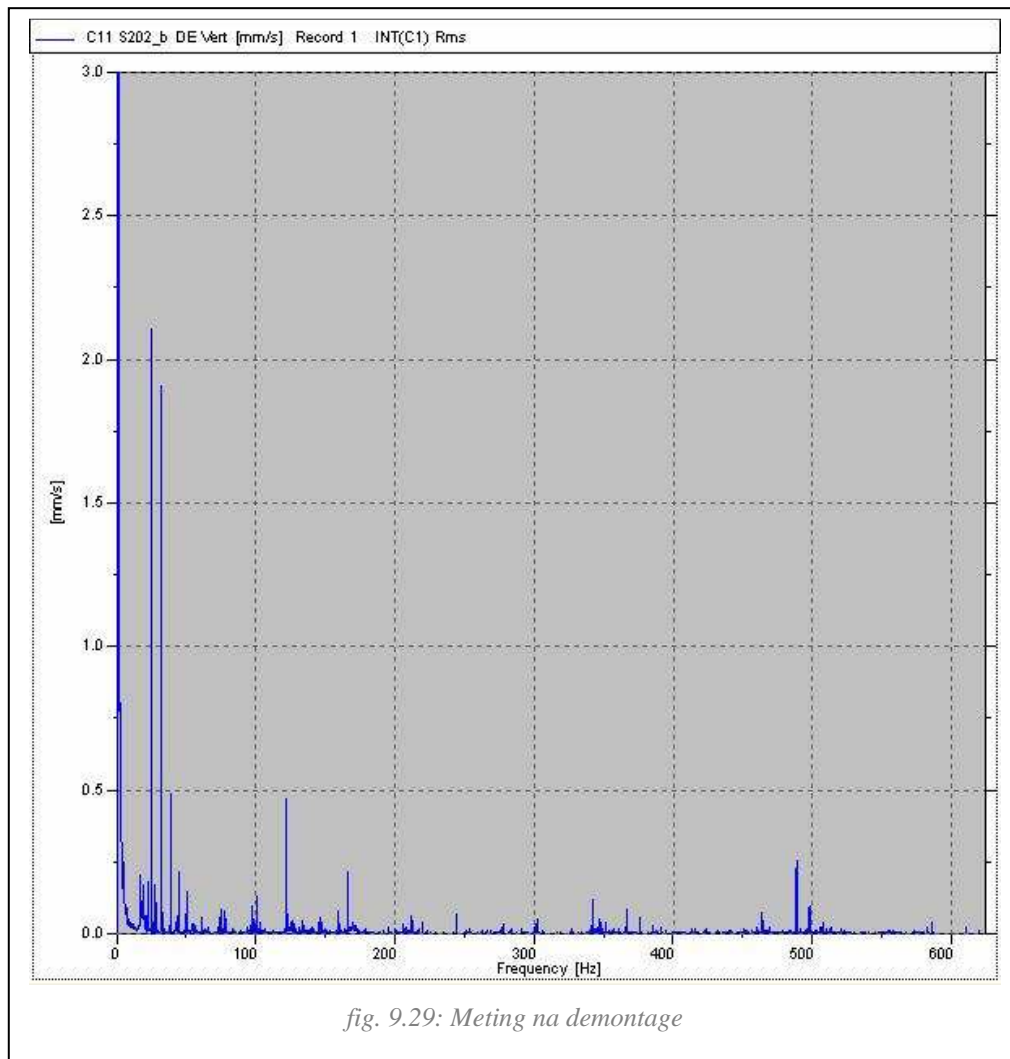
9.5 Reproduceerbaarheid van de metingen

Om goede besluiten te vormen is het zeer belangrijk te weten in welke mate onze metingen betrouwbaar zijn en niet worden beïnvloed door tal van nevenfactoren.

9.5.1 Proefopstelling

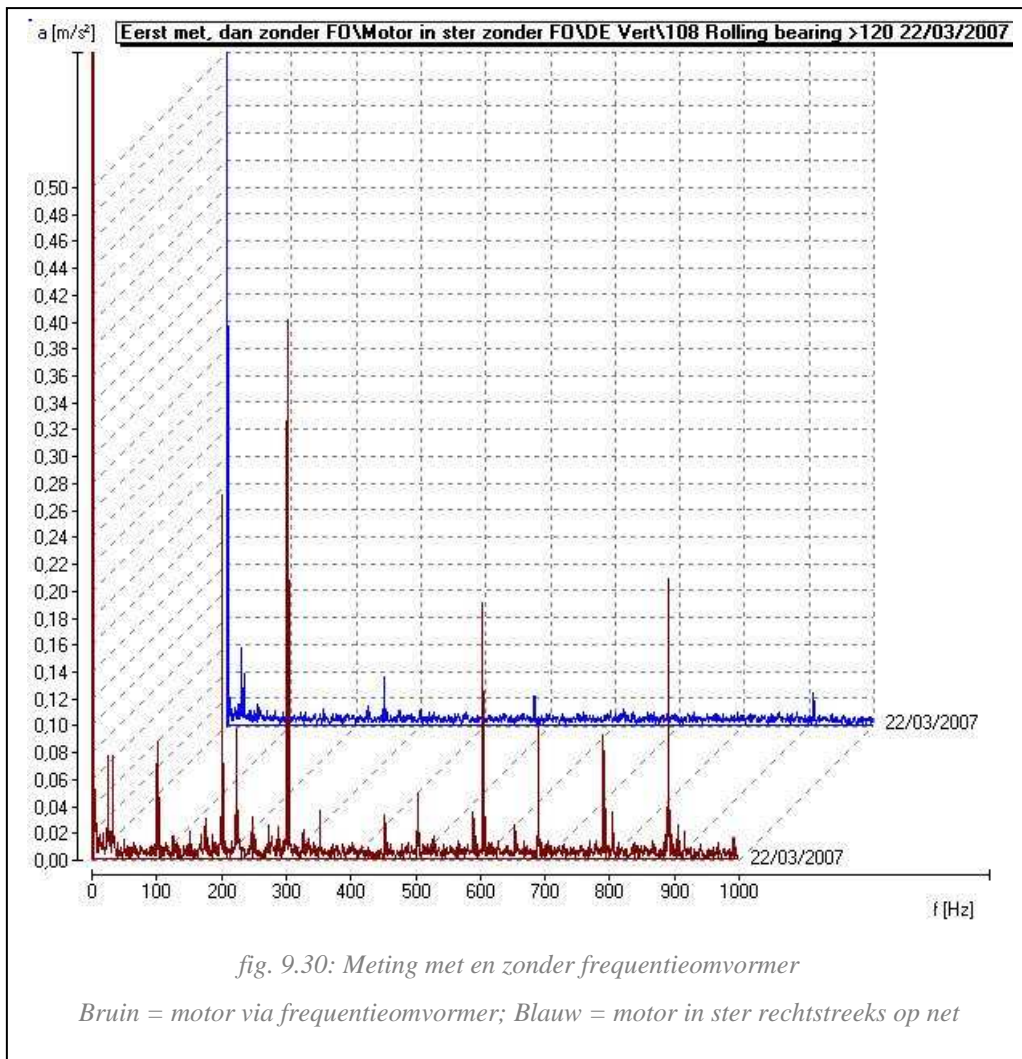
Telkens wanneer er een lager vervangen wordt of wanneer er een wijziging dient te gebeuren aan de smeertoestand, moet de flens van de motor verwijderd worden. Tijdens het hermonteren ervan is het zeer belangrijk dat hij op dezelfde manier wordt teruggeplaatst, om de interne spanning tussen flens en lager altijd constant te houden. Dit is echter zeer moeilijk, waardoor de reproduceerbaarheid van de metingen vóór en na het demonteren en monteren bemoeilijkt wordt. Onderstaande grafieken geven hiervan een voorbeeld.





Hiermee moeten we bij het trekken van besluiten rekening houden wanneer tijdens de metingen de flens werd verwijderd.

Bij het versnellingspectrum krijgen we heel wat pieken die niets te maken hebben met lagerschade. Soms kunnen ze wel een vertekend beeld geven als ze toevallig op een harmonische van een foutfrequentie voorkomen. Na onderzoek blijken deze frequenties afkomstig te zijn van de frequentieomvormer. Grafiek in figuur 9.30 geeft een meting weer waarbij de motor geschakeld is via de frequentieomvormer en waarbij de motor in ster geschakeld is rechtstreeks op het net.



9.5.2 Meetapparatuur

Daar onze metingen gebeuren met drie verschillende toestellen is het niet onbelangrijk dat we deze waarden ook met elkaar kunnen vergelijken. Het is dus vereist dat de afgelezen waarden op de toestellen zo goed als identiek zijn.

Door drie eenvoudige metingen met de toestellen in dezelfde omstandigheden kunnen we dit dan ook makkelijk controleren.

Uit de drie volgende grafieken blijkt dan ook dat ze alle drie gelijklopende waarden geven.

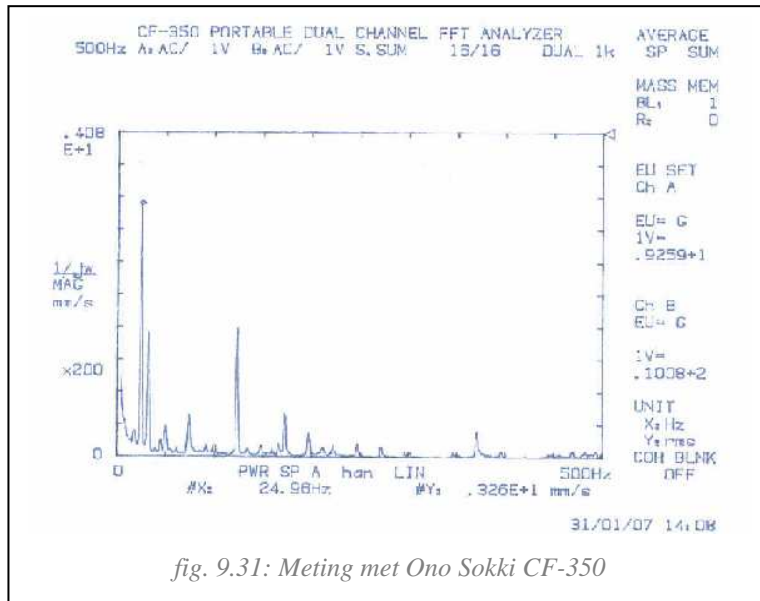


fig. 9.31: Meting met Ono Sokki CF-350

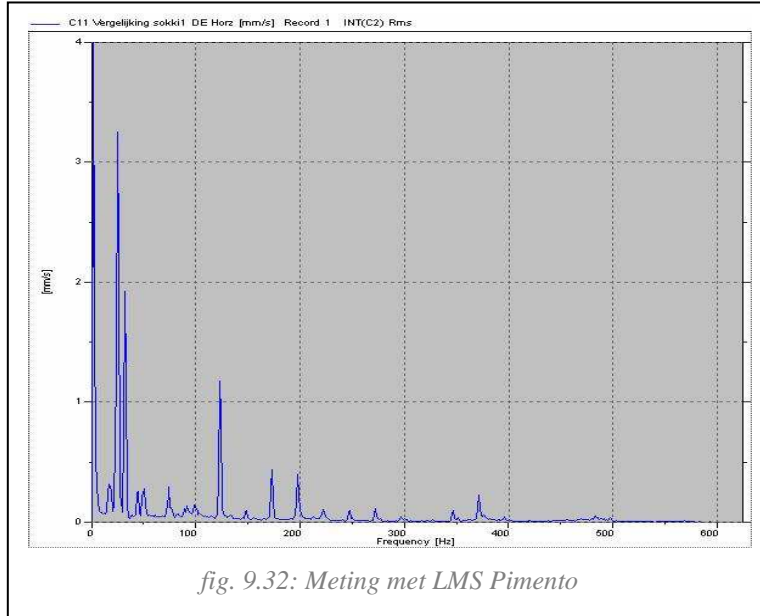


fig. 9.32: Meting met LMS Pimento

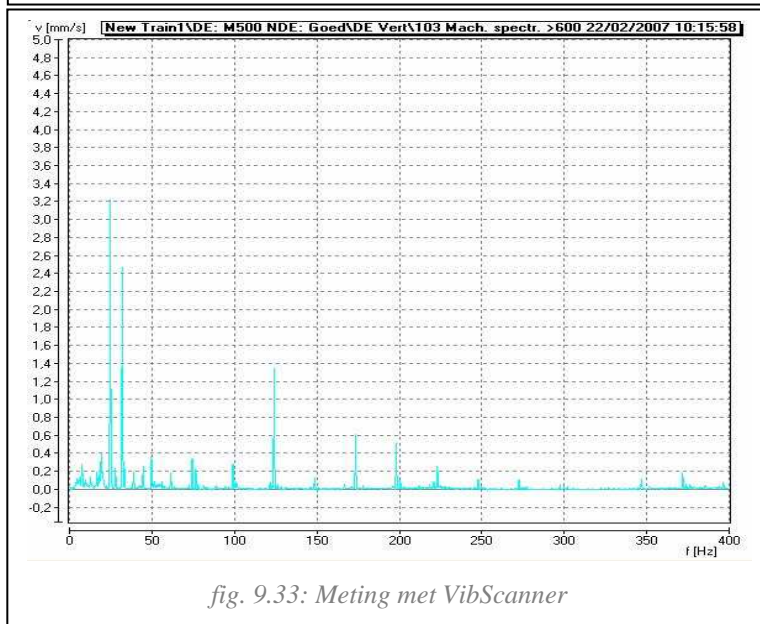
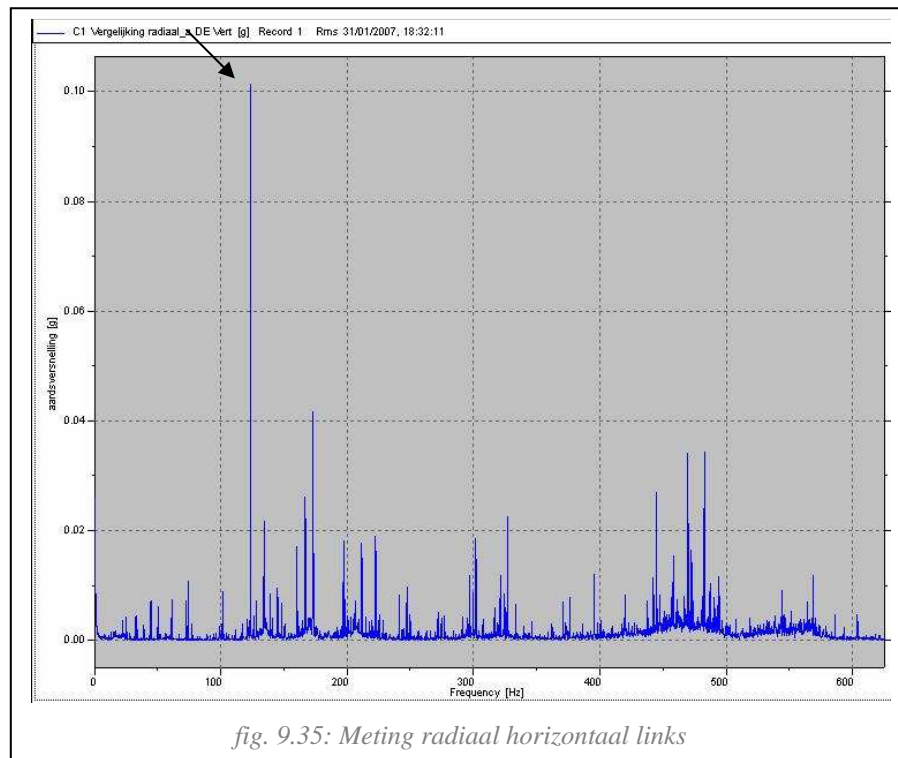
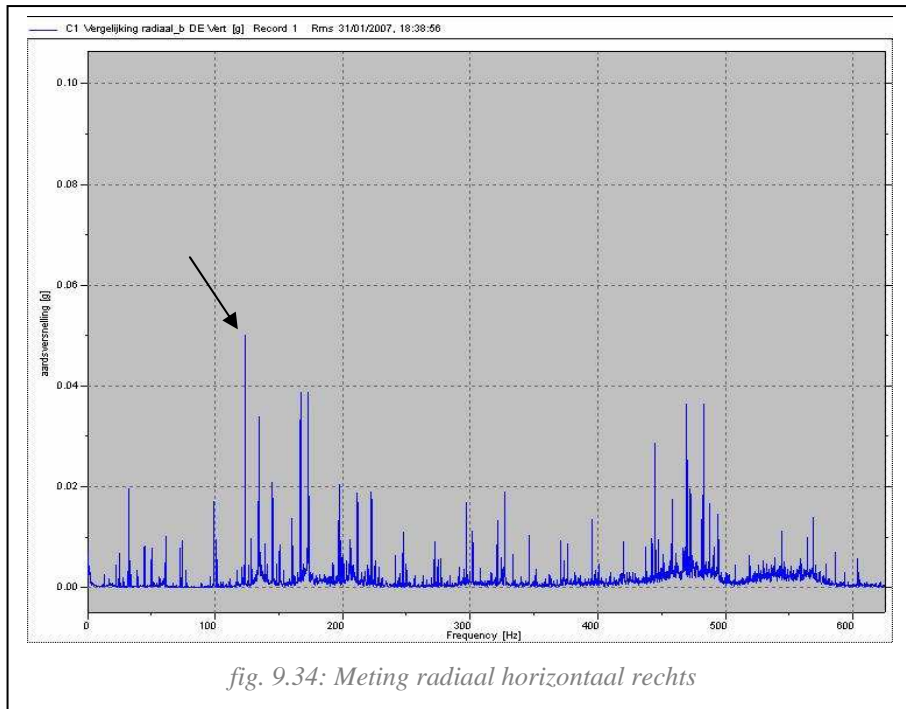


fig. 9.33: Meting met VibScanner

9.5.3 Uitvoering van de meting

De uitvoering van de meting kan eveneens gevolgen hebben op de reproduceerbaarheid. Zo kan men de vraag stellen of het nodig is om telkens op dezelfde positie te meten. Onderstaande grafieken tonen het verschil aan tussen een meting radiaal horizontaal links en radiaal horizontaal rechts.

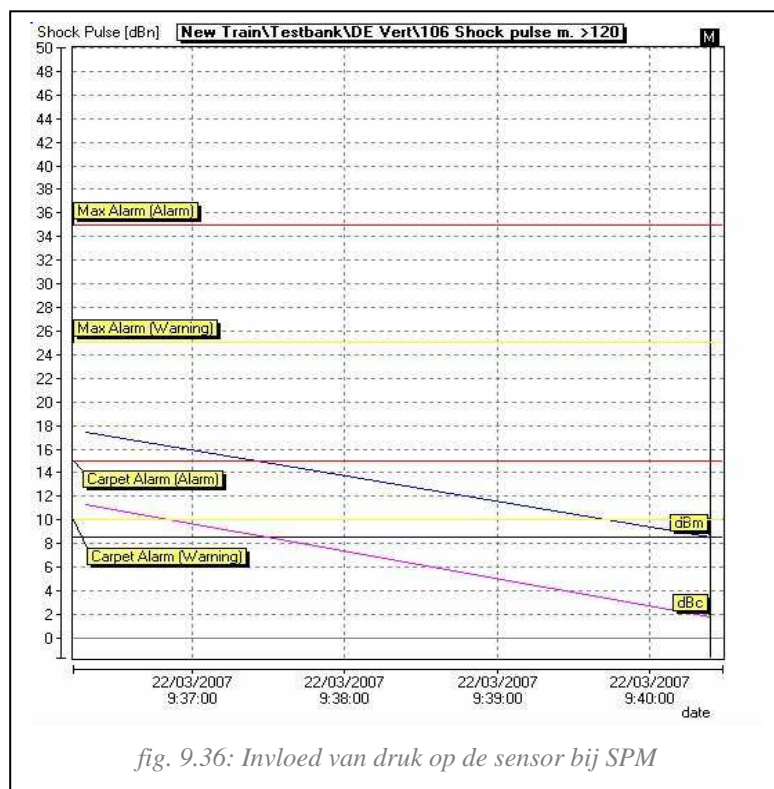


Er is op te merken dat de piek op ongeveer 123 Hz sterk stijgt. Deze frequentie komt overeen met de BPFI. Dit is ook logisch te verklaren: de V-riem oefent een zekere trekkracht uit op de poelie en de as van de motor. Deze kracht wordt opgevangen door de lager, waardoor de binnenring wat meer naar de buitenring toe gedrukt wordt. Hierdoor zullen fouten op de lagerfrequenties links beter meetbaar zijn dan rechts. Echter is er door veiligheidsoverwegingen (gevaar om mee te draaien met de riem) vaak beter toch rechts te meten. Op onze testbank wordt deze veiligheid ook ingebouwd en gebeuren de metingen altijd rechts.

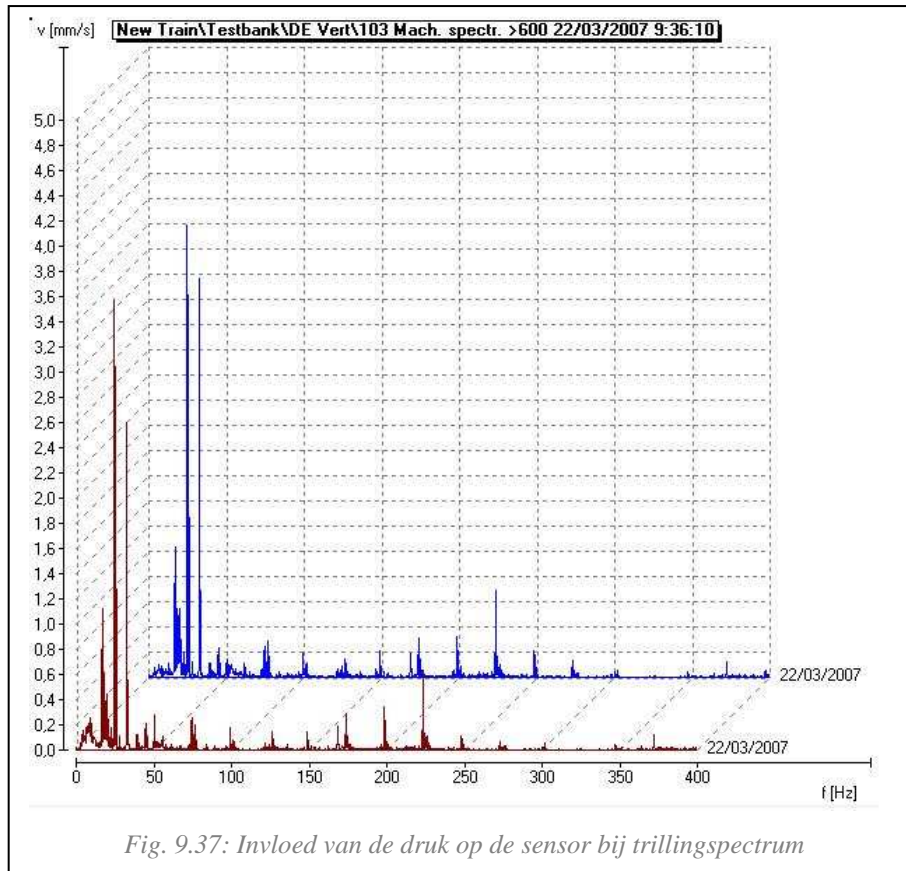
Bij het vormen van trends kan men besluiten dat het noodzakelijk is om altijd op dezelfde positie te meten. Deze positie kan men bijvoorbeeld markeren door een kleine boring aan te brengen of schroefdraad te voorzien zodat men de sensor op de juiste positie kan schroeven.

Wanneer we metingen uitvoeren met de tiptector verbonden aan de VibScanner, merken we op dat bij sommige metingen de druk op de sensor van belang kan zijn. In het bijzonder bij de schokpulsmethode is de uitgeoefende druk zeer belangrijk. In onderstaande meting oefenen we eerst een grote druk uit op de sensor om daarna gewoon de sensor rakend te houden aan het trillend vlak.

Bij het uitvoeren van verschillende schokpulsmetingen is het bijgevolg noodzakelijk steeds dezelfde druk uit te oefenen op het trillend vlak. Dit vormt geen groot probleem wanneer de metingen altijd gebeuren door dezelfde persoon. Maar wanneer twee of meerdere personen verschillende metingen uitvoeren met hetzelfde meetinstrument wordt het moeilijk om nog verbanden te leggen. Tevens is er geen richtlijn ter beschikking die spreekt over de hantering van de sensor op vlak van drukgevoeligheid.



Andere meetmethodes hebben nagenoeg geen invloed van de druk op de meetsensor. Onderstaande meting geeft het verschil bij een frequentiespectrum. We merken op dat de amplitude waarden nagenoeg niet wijzigen.



Voor meer details betreffende de metingen: zie bijlage 4.

9.6 Opmerkingen

Men kan opmerken dat er enkele negatieve kanten zijn aan onze proefstand. Hierdoor lijkt het soms moeilijk om de juiste verbanden te leggen tussen de verschillende metingen. Echter, door het uitvoeren van talrijke metingen werd het mogelijk om de negatieve invloeden op reproduceerbaarheid te verminderen. Door elke meting dubbel of driedubbel uit te voeren kan er gekeken worden of de resultaten evenredig zijn en zo de negatieve effecten uitsluiten.

De volledige database van gebruikte meetresultaten is terug te vinden op de bijgevoegde CD-ROM in de bijlagen.

10 Besluit

De doelstelling van dit eindwerk was verder te werken aan het IWT-project rond lagerconditiebepaling via trillingsmeting dat vorig jaar liep tussen CET-motoren en het PIH. Om daarna in een verder stadium onderzoek te verrichten naar de invloed van belasting en smering bij het maken van trends binnen de metingen.

Werkwijze en onderzoek

Om voldoende kennis te bezitten over de problematiek werd er in een eerste fase een grondige literatuurstudie verricht rond trillingsmetingen en trillingsanalyses, om daarna met een grondige kennis in een sneltreintempo de resultaten van het IWT-project te herhalen.

Eens op gelijke voet konden we ons dieper inwerken op de mogelijke problemen die zich kunnen voordoen bij het vormen van trends doorheen verschillende metingen.

Een eerste punt waar we bij stilstonden was de invloed van de belasting. Deze bleek geen onbelangrijke factor. We merkten namelijk op dat naar hoelang men de belasting opdreef het trillingsniveau ook toenam. Zo konden we afleiden dat het vormen van trends bij machines onder variabele belastingen niet ideaal is.

In tweede instantie gingen we de invloed na van de smering van de rolelementen. Hieruit bleek dat bij voldoende smering het niveau van de opgenomen signalen daalde en dat lagerschade, die bestaat uit vier opeenvolgende fasen, bij voldoende smering een fase achteruit gedrongen wordt. Dit wil dus zeggen dat men bij elke meting attent moet zijn dat de smering zo goed als identiek is, maar ook dat door voldoende smering de lager langer actief kan blijven.

Proefopstelling

De metingen die leiden tot de resultaten worden uitgevoerd op een testopstelling opgebouwd in één van de labo's binnen het PIH. De testbank bestaat uit een 11 kW motor die via een V-riembrenging een DC-generator aandrijft. Deze generator kunnen we dan belasten via lampborden.

In een betere opstelling zou de riembrenging beter vermeden worden. Telkens de V-riemschijf opnieuw gemonteerd moet worden, is het moeilijk om beide machines terug correct uitgelijnd te laten draaien. De poelie van de motor kan immers altijd iets verder of dichterbij zitten op de as dan de vorige keer. Een andere oplossing kan zijn een stootrand voorzien waartegen we altijd de poelie moeten bevestigen. Eveneens het aftrekken van de lagers met behulp van een poelietrekker is niet ideaal. Een beter systeem is waarbij de lager volledig omklemd wordt in plaats van op drie punten.

Bemerkingen tijdens het meten

In verder onderzoek naar de reproduceerbaarheid van onze metingen, kwamen we tot de conclusie dat de plaats waar men de opnemer de machine laat raken, altijd dezelfde dient te zijn. Tevens kwamen we erachter dat bij een type sensor dat we tegen een trillend lichaam moeten aandrukken, de druk tussen sensor en oppervlak constant moet zijn, wat metingen door verschillende personen bemoeilijkt, twee personen oefenen immers niet dezelfde kracht uit op een sensor.

Verder doel van de thesis

In dit eindwerk hebben we wat punten kunnen aankaarten die niet onbelangrijk zijn wanneer men trends wil leggen tussen verschillende metingen. Mochten we deze metingen kunnen herhalen in een meer optimale omgeving zal men beslist heel wat meer verbanden en besluiten kunnen vormen. We beschouwen dit werk dan ook als een goede start naar verder onderzoek en een mooie cursus voor iemand die zich wil verrijken rond de problematiek van lagerschade en lagerfoutdetectie aan de hand van trillingen.

Bibliografie

Tekst

- [1] CET-motoren NV, IWT-project: Introductie van een nieuwe activiteit – machine bewaking op basis van trillingsanalyse, Gullegem: CET-motoren NV, 2006
- [2] Deckers, Kris, Inleiding tot predictief onderhoud, zesde herziening. Leuven: CSI europe, november 2000
- [3] DLI Engeneering Corporation, Vibration Manuel, 14/03/2007, <http://www.dliengineering.com/vibman/>
- [4] Greg Lee, What is Shock Pulse Method?, 14/03/2007, http://www.reliabilityweb.com/articles/shock_pulse.pdf
- [5] Prüftechnik, Diagnose van machineschade: Snel en eenvoudig dankzij trillingsanalyse, Antwerpen: Prüftechnik N.V.
- [6] SKF Reliability Systems, Vibration Diagnostic Guide, California USA: SKF Reliability Systems, 2000
- [7] WEG Moters & Drives, Installation and Maintenance Manual for Electric Motors, Brazil, WEG Moters & Drives, 2005

Figuren

fig. 1.1:

CET-motoren, CET-motoren, 06/04/2007, <http://www.cetmotoren.be/idcet001.htm>

fig. 2.1-5; 2.7; 4.2-3; 4.5-6; 5.1-4; 5.6-7; 6.1-8; 7.1-4:

Deckers, Kris, Inleiding tot predictief onderhoud, zesde herziening. Leuven: CSI europe, november 2000

fig. 2.6; 2.8-9:

DLI Engeneering Corporation, Vibration Manuel, 14/03/2007, <http://www.dliengineering.com/vibman/>

fig. 3.1-2; 4.11; 5.5:

Prüftechnik, Diagnose van machineschade: Snel en eenvoudig dankzij trillingsanalyse, Antwerpen: Prüftechnik N.V.

fig. 4.8-10:

Greg Lee, What is Shock Pulse Method?, 14/03/2007, http://www.reliabilityweb.com/articles/shock_pulse.pdf

fig. 8.4:

LMS, Analyser Solutions Overview, 06/04/2007, <http://www.lmsintl.com/pimento>

fig. 8.6-7:

Prüftechnik, VibScanner by Prüftechnik AG, 06/04/2007,

http://www.pruftechnik.com/cm/products/vibscanner/vibscanner_2001.htm