



# Høgskulen på Vestlandet

## Bacheloroppgave Maskin (ING3039)

ING3039-BAC-2021-VÅR-FLOWassign

### Predefinert informasjon

<b>Startdato:</b>	28-01-2021 09:00	<b>Termin:</b>	2021 VÅR
<b>Sluttdato:</b>	21-05-2021 12:00	<b>Vurderingsform:</b>	Norsk 6-trinns skala (A-F)
<b>Eksamensform:</b>	Bacheloroppgave		
<b>SIS-kode:</b>	203 ING3039 1 BAC 2021 VÅR		
<b>Intern sensor:</b>	(Anonymisert)		

### Deltaker

<b>Navn:</b>	Yadu Nath Baral
<b>Kandidatnr.:</b>	219
<b>HVL-id:</b>	171392@hvl.no

### Informasjon fra deltaker

<b>Tittel *:</b>	Integrert aubalansering for impellerhjul til sentrifugalpumpe
<b>Antall ord *:</b>	14871
<b>Engelsk tittel *:</b>	Integrated balancing of impeller wheels for centrifugal pump

Sett hake dersom  ja **Egenerklæring \*:**  ja  
besvarelsen kan brukes  Nei  
som eksempel i **Inneholder besvarelsen**  
undervisning?  **konfidensielt**  
**materiale?:**

Jeg bekrefter at jeg har  ja  
registrert  
oppgavetittelen på  
norsk og engelsk i  
StudentWeb og vet at  
denne vil stå på  
vitnemålet mitt \*:

### Gruppe

**Gruppenavn:** M022021  
**Gruppenummer:** 2  
**Andre medlemmer i gruppen:** Theodor Didriksen Hansen

**Jeg godkjenner avtalen om publisering av bacheloroppgaven min \***

Ja

**Er bacheloroppgaven skrevet som del av et større forskningsprosjekt ved HVL? \***

Nei

**Er bacheloroppgaven skrevet ved bedrift/virksomhet i næringsliv eller offentlig sektor? \***

Ja, Ydra AS

# Integrert avbalansering for impellerhjul til sentrifugalpumpe



Bacheloroppgave utført ved Høgskolen på Vestlandet – Haugesund

Studieretning:	Maskin	
Emnekode:	ING3039	
Innleveringsfrist:	Fredag 21.05.2021	
Av:	Theodor D Hansen	Kandidatnr: 204
	Yadu Nath Baral	Kandidatnr: 219

# BACHELORPROSJEKT

**Studenten(e)s navn:** Yadu Nath Baral  
Theodor D Hansen

<b>Linje &amp; studieretning:</b>	Maskin, Marin konstruksjonsteknikk
-----------------------------------	------------------------------------

**Oppgavens tittel:** *Integrert avbalansering for impellerhjul til sentrifugalpumpe*

## Oppgavetekst:

Ydra leverer pumper og pumpesystemer av høyeste kvalitet innen fire markeder. De ønsker å forbedre avbalanseringsprosessen av impellerhjul i deres sentrifugalpumper. I dag gjennomføres hele prosessen manuelt, med statisk balansering som er både tidskrevende og uten bestemte krav.

I oppgaven skal en undersøke mulighetene som er for å kunne erstatte eller utbedre produksjonen og effektivisere prosessen, ved identifisering av rett utstyr for avbalansering. Studentene skal se nærmere på ulike løsninger og diskutere fordeler og ulemper med disse. En endelig løsning vil bli valgt etter kriterier som kvalitet, funksjon og kostnad.

Målet med oppgaven er å komme med forslag til effektivisering av denne delen av produksjonsprosessen, og at avbalanseringen blir utført i henhold til standard. Dette vil utarbeides gjennom en dokumentasjon der det drøftes hvordan valgt løsning fungerer.

**Endelig oppgave gitt:** Fredag 26. Februar 2021

**Innleveringsfrist:** Fredag 21.mai 2021 kl. 12.00

**Intern veileder :** Ståle Bright Pettersen

**Ekstern veileder:** Geir Ove Steinsvåg  
**emailadresse :** geir.ove@ydra.no

**Godkjent av studieansvarlig:**  
**Dato:**

*Forum S. Nysted*  
*28/4-21*



Høgskulen  
på Vestlandet

Høgskulen på Vestlandet

Campus Haugesund

Bjørnsonsgt. 45

5528 Haugesund

Oppgavens tittel: Integrert avbalansering for impellerhjul til sentrifugalpumpe Iht. Standard		Rapportnummer:
Utført av: Theodor Hansen, Yadu Nath Baral		
Linje: Maskiningeniør		Studieretning: Marin Konstruksjonsteknikk
Gradering: Åpen	Innlevert dato: 20.05.2021	Bedrift: Ydra AS Husøyvegen 281 4262 Avaldsnes
Intern: Ståle Bright Pettersen		Ekstern: Geir Ove Steinsvåg

### Ekstrakt

Gruppen har i oppdrag fra pumpeprodusent Ydra AS, utredet en rapport hvor målet er å presentere en ny balanseringsmetode, for å erstatte dagens metode. Formålet med oppdraget er å identifisere rett utstyr for denne type balansering. Balanseringen av impellerhjul i sentrifugalpumpe gjøres i dag manuelt. Dette blir gjort basert på kunnskap og erfaring hos den utførende som betyr at resultatet kan variere fra person til person.

Denne rapporten ser på løsningen som Ydra AS har per i dag, samtidig ser rapporten på flere potensielle løsninger, hvor noen anses å være mer gunstige enn andre. Gjennom arbeidet har vi kommet frem til en anbefalt løsning basert på funksjon, kvalitet og kostnad. Rapporten vil fungere som et rådgivende hjelpemiddel for Ydra AS, som har tenkt å investere i en løsning for å forenkle og effektivisere balanseringen.

## Forord

Rapporten representerer en bacheloroppgave som er avslutningsprosjekt på bachelorstudiet i maskiningeniør ved Høgskulen på Vestlandet. Oppgaven består av en skriftlig rapport, en plakat, et produkt og en muntlig presentasjon, som til sammen vil tilsvare 20 studiepoeng. Målet for oppgaven er at gruppen skal bruke kunnskap en har samlet opp gjennom studiet og være i stand til å løse oppgaver med en gitt problemstilling.

Hovedoppgaven fikk vi tildelt av Ydra AS. De ønsket en oppgave som kan gi mulig svar på hvordan en kan forbedre og effektivisere dagens balanseringsmetode av impellere. Gjennom denne tiden har vi lært svært mye, og det har gitt oss mye kunnskap om oppgaveløsning, og om emner vi ikke vært borti før.

Vi vil gjerne takke vår eksterne veileder Geir Ove Steinsvåg. Takk for du har tatt deg tid til oss når vi har lurt på noe, utdelt god informasjon og for gode råd.

Vi vil også rette en takk til vår interne veileder Ståle Bright Pettersen. Tusen takk for gode tilbakemeldinger når vi har lurt på ting, og for gode tips til innhold og oppbygging av en god rapport.

Til slutt vil vi gjerne takke Ydra AS som har gitt oss en spennende og lærerik prosjektoppgave. Ønsker også å takke for samarbeidet og for at vi fikk en omvisning, der vi fikk sett hvordan balanseringsprosessen deres gjennomføres.

Sted og dato:

Hangesund 19.05.21

X Theodor D Hansen  
Theodor D Hansen

X Yadu N. Baral  
Yadu Baral

# Innholdsfortegnelse

<b>Forord</b> .....	iii
<b>Figurer</b> .....	vi
<b>Tabeller</b> .....	vii
<b>Sammendrag</b> .....	viii
<b>Summary</b> .....	ix
<b>1. Innledning</b> .....	1
<b>1.1 Ydra AS</b> .....	1
<b>1.2 Bakgrunn</b> .....	2
<b>1.3 Formål</b> .....	2
<b>1.4 Metodikk</b> .....	2
<b>1.5 Ordliste</b> .....	3
<b>2. Sentrifugalpumpe</b> .....	4
<b>2.1 Hva er en sentrifugalpumpe</b> .....	4
<b>2.2 Impellerhjul</b> .....	5
<b>2.3 Beregningsteori</b> .....	6
<b>2.3.1 Beregning sentrifugalpumpe</b> .....	7
<b>2.3.2 Grunnleggende konsepter for balansering</b> .....	12
<b>2.4 Balansering</b> .....	15
<b>2.5 Metoder</b> .....	16
<b>2.6 Vibrasjoner</b> .....	17
<b>2.7 Karakteristikk av sentrifugalpumpe</b> .....	22
<b>2.8 Effektivitet og virkningsgrad</b> .....	23
<b>2.9 Problemer</b> .....	24
<b>3. Mulige løsninger</b> .....	25
<b>3.1 Funksjonsanalyse</b> .....	25
<b>3.2 Dagens metode</b> .....	26
<b>3.3 Valg grunnlag</b> .....	28
<b>3.4 Alternative løsninger</b> .....	28
<b>3.4.1 Schenck</b> .....	28
<b>3.4.2 Precibalance</b> .....	30
<b>3.4.3 Cimat balancing</b> .....	31
<b>3.4.4 JP-balancer</b> .....	33
<b>3.5 Sammenligning</b> .....	34
<b>4. Foreslått løsning</b> .....	35
<b>4.1 Schenck</b> .....	35

<b>4.2 Teknisk data fra produsent</b> .....	36
<b>4.3 Grunnlag for valg</b> .....	37
<b>4.4 Fordeler og ulemper</b> .....	38
<b>4.4.1 Sikkerhet og plass</b> .....	38
<b>4.4.2 Lave kostnader</b> .....	38
<b>4.4.3 Effektivitet og vedlikehold</b> .....	38
<b>4.4.4 Energi effektivitet</b> .....	38
<b>4.4.5 Målesystem</b> .....	39
<b>4.4.6 Ekstra utstyr</b> .....	39
<b>4.5 Beskrivelse av balanseringsprosessen til ESD</b> .....	40
<b>4.6 Hva følger med løsningen?</b> .....	41
<b>4.7 Arbeidsområde</b> .....	42
<b>4.8 Økonomi</b> .....	43
<b>5. Verifikasjon</b> .....	44
<b>5.1 ISO</b> .....	44
<b>5.2 Standard ISO 21940-11</b> .....	45
<b>6. Tegninger og skisser</b> .....	47
<b>7. Løsningens virkemåte</b> .....	48
<b>7.1 Arbeidsprosess</b> .....	48
<b>7.2 Ulike data</b> .....	49
<b>7.3 Lagring av data</b> .....	50
<b>7.4 Simulering av prosess</b> .....	52
<b>7.5 Vedlikehold</b> .....	54
<b>7.6 Kalibrering</b> .....	55
<b>8. Helse, Miljø og Sikkerhet (HMS)</b> .....	57
<b>8.1 Risikovurdering og Sikkerhetsinformasjon</b> .....	57
<b>8.2 Standard</b> .....	57
<b>8.3 Generelle forsiktighetsregler</b> .....	58
<b>8.4 Miljø</b> .....	60
<b>9. Konklusjon</b> .....	61
<b>10. Veien videre</b> .....	62
<b>11. Bibliografi</b> .....	63
<b>Vedlegg</b> .....	67



## Figurer

Figur 1: Det nye signalbygget til Hatteland (Ydra, 2021) .....	1
Figur 2: Oversikt over de ulike funksjonene i en sentrifugalpumpe (Holt, 2021). .....	4
Figur 3: Semi-åpen impeller, foto: Theodor D Hansen.....	5
Figur 4: Lukket impeller. (Castlepumps, 2016).....	5
Figur 5: Kvern impeller, foto: Theodor D Hansen.....	6
Figur 6: Bilde sett fra side av forenklete sentrifugalpumpe (Yunus A. Cengel, 2014).....	7
Figur 7: En illustrasjon av bruken av Bernoulli i sentrifugalpumpe (JAES-Company, 2019) .....	9
Figur 8: Dekomponering av enhetene med tanke på eulers turbomaskin ligning (Nuclear-power, 2021) .....	12
Figur 9: Illustrasjon av sentrifugalkraft (Gary K. Grim, 2021).....	13
Figur 10: Parametrisering av pumpehulets geometri: a) sett fra siden b) ovenfra (Anagnostopoulos, 2006).....	15
Figur 11: Skade på grunn av vibrasjon (Anspach, 2011).....	18
Figur 12: Precision balance- Diagrammet viser den spesifikke gjenværende ubalansen som er tillatt ifølge ISO 21940-11 (Deuschle, 2021).....	19
Figur 13: Illustrasjon av forskjellige frekvens per sekund (Techplayon, 2021) .....	20
Figur 14: Høy frekvens øverst og lav frekvens nederst (Techplayon, 2021).....	20
Figur 15: Amplitude i frekvens (Techplayon, 2021) .....	21
Figur 16: Typisk performance flow chart for en sentrifugalpumpe (Yedidiah, 1996).....	22
Figur 17: Sentrifugalpumpe prestasjonskurve (King, 2021).....	23
Figur 18: Illustrasjon av skader på grunn av kavitasjon (Fluidhandling, 2019) .....	24
Figur 19: Impeller på et balansestativ, og impeller klar for boring. foto: Theodor D Hansen.....	26
Figur 20: Flytskjema av dagens metode, figur Yadu Nath Baral.....	27
Figur 21: ESD oppsett (Schenck, 2021).....	29
Figur 22: VE2-1 nærbilde (Schenck, 2021).....	30
Figur 23: VE2-1 balanseringsmaskin (Schenck, 2021).....	30
Figur 24: Oppsett av balanseringsmaskin V10-1S (Precibalance, 2021).....	31
Figur 25: Oppsett av balanseringsmaskin CMT-30V2FW (Cimat, 2021).....	32
Figur 26: Nærbilde av prosessen med CMT-30V2FW. (Cimat, 2021).....	32
Figur 27: Vertikale balanseringsmaskinen PHLD-16 (JP-balancer, 2021).....	33
Figur 28: Eksempler på balanseringsmaskiner fra Schenck (Schenck, 2021) .....	35
Figur 29: ESD beholder (Schenck, 2021) .....	36
Figur 30: Eksempel på hvordan arbeidsområde vil se ut (Schenck, 2021).....	42
Figur 31: Sammenligning av standarder (Norsk standard, 2021) .....	44
Figur 32: Tegninger av ESD maskinen (Schenck, 2021).....	47
Figur 33: Flytskjema av prosess med ESD, figur: Yadu Nath Baral .....	48
Figur 34: Measuring display (Schenck, 2021).....	49
Figur 35: Correction display (Schenck, 2021).....	50
Figur 36: Eksempel på hva som må legges inn i en «rotorfil» (Schenck, 2021) .....	52
Figur 37: Impeller settes fast og sentreres med en type nøkkel (schenck, 2021).....	52
Figur 38: Her kan tidligere impellere med samme ID hentes ut, hvor innstillinger allerede er blitt lagt inn fra "rotorfiles" (Schenck, 2021).....	53
Figur 39: Balanseringsprosedyren fortsettes for å eliminere innflytelse på maskinen (Schenck, 2021) .....	53
Figur 40: Målingen blir så gjennomført, resultatet blir deretter vist på displayet (Schenck, 2021).....	53
Figur 41: Med resultatene kan man rette opp ubalansen, når impelleren er balansert kan man sette den inn i sentrifugalpumpen (Schenck, 2021) .....	53
Figur 42: oversikt over ulike kalibrerings muligheter (Schenck, 2021). .....	56
Figur 43: Neste kalibrering (Schenck, 2021).....	56

## Tabeller

Tabell 1: Balanseringsmetoder (Ahrinet.org, 2021) .....	17
Tabell 2: Sammenligning av de ulike balanseringsmaskinene.....	34
Tabell 3: Spesifikasjoner (Schenck, 2021) .....	36
Tabell 4: Balanseringsprosessen (Schenk, 2021).....	40
Tabell 5: Komponent liste over ESD (schenck, 2021).....	41
Tabell 6: Balanseringsgradene (Cimat, 2017).....	45
Tabell 7: Hvordan lage en Rotor fil (Schenck, 2021).....	51
Tabell 8: Før en skal gjøre vedlikehold (Schenck, 2021) .....	54

## **Sammendrag**

Gruppen har i oppdrag fra pumpeprodusent Ydra AS, utredet en rapport hvor formålet er å presentere en ny balanseringsmetode, for å erstatte dagens metode. Formålet med oppdraget er å identifisere rett utstyr for balansering, som skal forenkle balansering, samt være med verifikasjon. Dagens metode anses å trenge forbedring, da den krever mer tid enn det som er ønsket, og i tillegg blir ikke dagens balansering av impellere utført i henhold til en ISO-standard. Da Ydra AS har et ønske om å investere i en løsning for å effektivisere prosessen, vil vurderingen kunne brukes som et veiledende hjelpemiddel de kan benytte seg av.

Hver sentrifugalpumpe har en tilhørende impeller, en roterende impeller som brukes for å øke trykket i en væske. Denne blir til slutt montert sammen med resten av pumpens deler. Før impelleren blir montert fast i sentrifugalpumpen blir den først maskinert i en dreiebenn og deretter balansert manuelt ved hjelp av et balanseringsstativ. Med tanken om effektivitet i bakhodet er det et mål om å automatisere balanseringsprosessen i så stor grad som det er mulig. Derfor har det blitt sett på nye balanseringsmetoder for å automatisere og effektivisere balanseringsprosessen. Hensikten med denne oppgaven er å utarbeide en mulighets studie av ulike balanseringsmetoder, og å komme frem til og anbefale en løsning.

I den avsluttende delen av rapporten henvises det til en foreslått løsning som er blitt vurdert som en god erstatning til dagens balanseringsmetode. Valget endte opp på den statiske balanseringsmaskinen ESD fra Schenck til å utføre prosessen. Fordelene med denne maskinen er at den er brukervennlig, kan balansere det meste av impellere, har høy presisjon og er tidseffektiv, som også fører til avlastning av operatør. Konklusjonen fremkommer av en drøftingsdel, som har basert seg på kontakt med bedrifter med erfaring innenfor dette emne, samt litteraturstudier.

## Summary

On behalf of pump manufacturer Ydra AS, the group has prepared a report where purpose is to present a new balancing method to replace the current method. The purpose of the assignment is to identify the right equipment for balancing, which should simplify balancing and be with verification. The present method is considered to need improvement as it requires more time than desired, and in addition, the current balancing of impellers is not performed according to an ISO standard. As Ydra AS desires to invest in a solution to streamline the process, the assessment can be used as a supplementary guideline.

Each centrifugal pump has an associated impeller, a rotary impeller that is used to increase the pressure in a fluid. This is finally assembled to the rest of the pump. Before the impeller is fixed to the centrifugal pump, it is first machined in a lathe and then balanced manually using a balancing stand. With the idea of efficiency in mind, it is a goal to automate the balancing process as much as possible. Therefore, new balancing methods have been looked at to automate and streamline the balancing process. The purpose of this thesis is to prepare a feasibility study of different balancing methods, and to arrive at and recommend a solution.

The concluding part of the report refers to a proposed solution that has been considered a good replacement for the current balancing method. The choice ended up on the static balancing machine ESD from Schenck to perform the process. The advantages of this machine are that it is user-friendly, can balance most impellers, has high precision and is time efficient, which also leads to operator relief. The conclusion emerges from a discussion based on the literature study and conversations with companies experienced in the field.

# 1. Innledning

## 1.1 Ydra AS

Ydra AS produserer sentrifugalpumper og pumpe-systemer. Kvernepumpe, skruepumpe, og tannhjulspumper er blant de pumpene som de leverer. I tillegg til pumper leverer de tjenester som service og reservedeler, samt import og salg. Pumper som blir produsert av Ydra AS anvendes innen offshore, maritimt, fiskeoppdrett og innen vann og avløp. Hovedkontoret til Ydra AS er lokalisert på Husøy (Karmøy) og servicekontoret lokalisert i Aksdal (Tysvær). Målet deres er å bli de beste innen produktutvikling av pumpe og pumpeteknologi (Ydra, 2021). Ydra AS er en del av Hatteland. Hatteland ble etablert i 1971 og eier også andre firmaer som RamBase, EMP Secure og Inosa i tillegg til Ydra AS (Hamnøy, 2021). Hatteland gruppen har mer enn 200 ansatte som brenner for innovative løsninger innen ulike forretningsområder (Ydra, 2021). Det vil være interessant å se om Ydra i fremtiden også vil kunne levere re-kalibrering av impellere på ulike sentrifugalpumper de har inne til service basert på oppdatert balanseringsmetodikk og utstyr som er foreslått i denne rapporten.



Figur 1: Det nye signalbygget til Hatteland (Ydra, 2021)

## 1.2 Bakgrunn

For Ydra AS handler det meste om pumper, og at produksjonen er av høyeste kvalitet. Pumpene blir levert til flere store markeder, og blir med andre ord brukt i all type industri. Likevel som med alt annet kan det også oppstå ulike feil i pumper, som kan føre til lavere effektivitet i pumpene (Ydra, 2021).

Vibrasjoner i sentrifugalpumper eller pumper generelt er noe som ikke er ønskelig, verken for Ydra eller andre. I korte trekk kan vibrasjon oppstå på grunn av kavitasjon og ubalanse i impelleren. For å forhindre at det oppstår vibrasjoner i pumpene, avbalanserer Ydra dem i dag gitt de begrensninger som finnes i deres nåværende kalibreringsutstyr. Siden de gjør dette manuelt, betyr det både at prosessen ikke blir utført etter en toleranse og at en ikke optimal prosess er tidkrevende og legger beslag på ressurser som kunne gjort annet arbeid.

I den forbindelse har Ydra et ønske om å effektivisere og forenkle avbalanseringsprosessen av impellerhjul etter en standard. Dette gjøres ved å se etter nye metoder for å kunne optimalisere denne delen av prosessen.

## 1.3 Formål

Hensikten med denne oppgaven er å hjelpe Ydra med å finne en mulig løsning til dagens balanseringsprosess. Det vil utarbeides et forslag til hvordan utstyret som brukes i dag kan forbedres med hensyn på å effektivisere avbalanseringen i henhold til standard. Hva som blir endelig løsning tar utgangspunkt i de metoder som vurderes best for hele prosessen. Løsningen skal øke effektivisering av prosessen, samt å forenkle den, øke kvaliteten på balanseringen, og dermed spare tid slik at operatøren kan bruke mer tid til andre oppgaver.

## 1.4 Metodikk

Opgaven vil bli løst ved å samle mest mulig data om balanserings utstyr, ulike balanseringsmetoder og driften av sentrifugalpumper. Informasjonen og litteraturen som benyttes skal være aktuell, informativ og være hentet fra troverdige og trygge kilder. Det vil også bli hentet utstyrsdata, samt annen relevant informasjon fra firmaer med fagkunnskap tilegnet oppgavens problemstilling. Ut ifra denne kunnskapen, vil en kunne ha et godt grunnlag for å gjøre beslutninger om dette emnet.

## 1.5 Ordliste

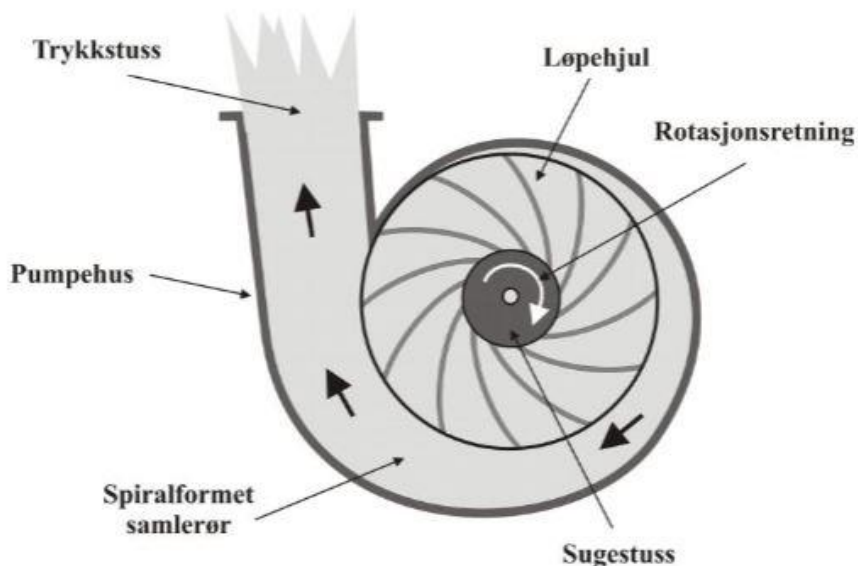
Begrep	Forklaring
<b>Ortogonal</b>	To rette linjer eller to vektorer hvis de står vinkelrett på hverandre.
<b>Head</b>	Løftehøyde
<b>Reservoar</b>	Et sted der noe oppbevares.
<b>Turbomaskin</b>	Maskiner som overfører energi mellom rotor og væske.
<b>Ekspontielt</b>	Ekspontiell økning er når en størrelse øker med en fast prosent over like store tidsrom.
<b>Korrigeringsplan</b>	Retting eller forbedrings plan.
<b>Akkreditering</b>	Akkreditering er en formell aksept eller godkjenning av at noe eller noen oppfyller spesifiserte krav
<b>Aggressive vaskemiddel</b>	Vaskemidler som tærer og skader overflaten. Gjør at ting slites ut raskere om de ikke er laget for denne type rengjøring
<b>Arbor</b>	En aksel som støtter en roterende del på en dreiebenk.
<b>Display</b>	Er det samme som en skjerm eller en monitor.
<b>ISO</b>	Den internasjonale standardiseringsorganisasjonen.
<b>Armatrur</b>	Utstyr eller tilbehør til tekniske installasjoner, anlegg eller maskiner.
<b>Kapsling</b>	Kapsel er hylster av tynn stålplate, plast eller lignende som brukes til dekke over maskindeler eller instrumenter som trenger beskyttelse eller er farlige for arbeideren.
<b>HMS</b>	Helse Miljø Sikkerhet.
<b>Å diagnostisere</b>	Å diagnostisere er å bestemme og klassifisere en årsakssammenheng.
<b>Ergonomi</b>	Detter handler om tilpasningen mellom arbeidsmiljø og menneske, for å unngå skader er det viktig å ta hensyn til ergonomi.
<b>Viskøse spenningstensor</b>	Den viskøse spenningstensen er en tensor som brukes for å modellere deler av spenningen på et punkt i materiale, for å deformere hastighetene rundt det punktet.
<b>Tensor</b>	Tensor er en rekke med tall som transformeres med gitte regler under endring av koordinatene.

## 2. Sentrifugalpumpe

### 2.1 Hva er en sentrifugalpumpe

Sentrifugalpumper er den mest vanlige pumpetyperen i prosessindustrien. Et av kjennetegnene ved en sentrifugalpumpe er at de er enkle å bygge, har få deler og er derfor også ofte svært kosteffektive (Øwre-Johnsen, 2021). De er som regel svært holdbare, driftssikre og har stor kapasitet i forhold til størrelsen. Enkelt forklart så bruker man et roterende løpehjul for å flytte vann eller andre væsker ved å bruke sentrifugalkraft. Sentrifugalpumper er nyttige siden de kan håndtere store mengder væsker, de gir svært høye strømningshastigheter, og kan levere væske fra et sted til et annet (Powerzone, 2021). I praksis kan de fleste væsker brukes i sentrifugalpumpene, likevel er vann, sjøvann og kjemikalier de mest typiske bruksområdene (Axflow, 2021).

Sentrifugalpumpen virker på den måten at væsken som kommer inn i senter av impelleren slynges ut mot veggen av pumpehuset med stor fart på grunn av sentrifugalkraften, se figur 2. Videre så fører kraften til at væsken strømmer radiallyt utover fra impelleren og videre til samlerøret. I samlerøret vil hastigheten til væsken synke og tverrsnittet av røret øke. Som et resultat av dette øker det statiske trykket i spiralområdet. Væsken i trykkstussen forlater pumpen med et stort overtrykk og ved sugestussen blir det undertrykk, som igjen suger mer væske inn i pumpen (Holt, 2021).



Figur 2: Oversikt over de ulike funksjonene i en sentrifugalpumpe (Holt, 2021).



## 2.2 Impellerhjul

Impelleren regnes som kanskje den viktigste komponenten i sentrifugalpumpen. Den finnes i mange ulike former og består normalt av en rekke krummede blader. Det brukes som regel bare en impeller, men dersom man trenger høye utløpstrykk er det mulig å bruke flere i en serie. En vil da kunne få en trykkehøyde opptil 10 000 meter. Dette kalles en flertrinns sentrifugalpumpe (Larsen, 2021). Impelleren er montert inne i et pumpehus hvor den er festet til en aksel, som igjen er festet til en motor, og roterer med stor hastighet. Som vi allerede vet er impelleren en svært viktig del i sentrifugalpumpens design, da den spiller en stor rolle i overføringen av energi fra pumpens motor til væsken. Videre har vi at jo større diameteren er på impelleren eller jo raskere impelleren går, desto høyere er omkretshastigheten ved pumpehullets utgang, og større blir energien som tilføres væsken (Castlepumps, 2021).

Det finnes flere typer impellere, som har forskjellige egenskaper som gjør dem mer eller mindre egnet for en bestemt oppgave. For å vise noen av de ulike typene, kan man i figurene under se eksempler på de typene som er mest brukt hos Ydra AS.



Semi-open impeller, Benyttes for å pumpe vann ved stor vannmengde og lav til medium løftehøyde.

Figur 3: Semi-åpen impeller, foto: Theodor D Hansen



Closed impeller, benyttes for å pumpe vann ved høy løftehøyde.

Figur 4: Lukket impeller. (Castlepumps, 2016)



Cutter impeller, benyttes i en kvernpumper som kverner for eksempel død fisk.

Figur 5: Kvern impeller, foto: Theodor D Hansen

## 2.3 Beregningsteori

### Balanseringstoleranser:

Internasjonal standard ISO 21940-11 som gir regler for å hvordan en skal beregne en akseptabel gjenværende ubalanse, har følgende funksjoner:

- Grove mangler i ubalanse unngås
  - Ubrukelige og dyre balanseringsarbeid er unngått
- (Bhaskar, 2012)

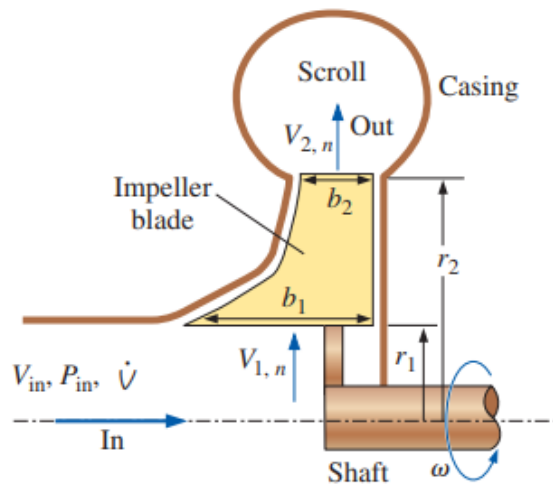
Avhengig av maksimal brukshastighet av hver rotortype, kan en beregne den akseptable totale gjenværende ubalansen per enhetsmassen. Enhetsmassen beregnes med tanke på den totale vekten på impelleren og totale ubalansen (Bhaskar, 2012).

Ifølge standard ISO 21940-11 er alle impellere klassifisert som avhengig av balanseringskravet. Balanseringskravet  $G$  er et tall som definerer balanseringsnøyaktigheten. Balanseringskravet til en impeller er akseptert hvis  $G$  er 6,3 (Bhaskar, 2012). Dette er videre beskrevet i kapittel 5.2, som omhandler denne standarden.

### 2.3.1 Beregning sentrifugalpumpe

Sentrifugalpumper har forskjellige størrelser. Når en skal se på hvilke strømningshastigheter pumpen gir, er det hovedsakelig pumpens tverrsnitt en ser på. Med hensyn på bredden og diameteren kan en utregne volumstrøms hastighetene inn og ut fra pumpen (Yunus A. Cengel, 2014).

Volumstrøm  $V$  som kommer inn i pumpens «øye», passerer gjennom det perifere tverrsnittsområdet definert av bredden ( $b_1$ ) i radien ( $r_1$ ). Bevaring av masse tilsier at det samme volumet må passere gjennom det perifere tverrsnitts arealet definert av bredden ( $b_2$ ) i radien ( $r_2$ ). Ved å bruke de hastighetskomponentene  $V_{1,n}$  og  $V_{2,n}$ , kan en regne ut volumstrøms hastigheten (Yunus A. Cengel, 2014). Figur 6 viser til en illustrasjon av en sentrifugalpumpe og pumpens tverrsnitt.



Figur 6: Bilde sett fra side av forenklede sentrifugalpumpe (Yunus A. Cengel, 2014)

Volumstrøms hastighet blir da ved formell (ut ifra figuren):

$$\dot{V} = 2\pi r_1 b_1 V_{1,n} = 2\pi r_2 b_2 V_{2,n}$$

$$V_{2,n} = V_{1,n} \frac{r_1 b_1}{r_2 b_2}$$

## Prinsipp- sentrifugalpumpe

Sentrifugalpumper består av en impeller og et pumpehus. En impeller er et løpehjul som er inne i pumpen. Det brukes sentrifugalkrefter til å øke trykket i væsken. Innløpet av væsken ligger midt i impelleren. Når væsken kommer inn i pumpen, vil den slynges ut til kantene ved hjelp av impelleren. Dette blir gjort av sentrifugalkraften (NDLA, 2021).

Det grunnleggende prinsippet til en sentrifugalpumpe er å overføre væskevolum fra et reservoar til et annet reservoar. Ved hjelp av sentrifugalpumpe og impeller, overføres væske mellom dem.

Når dette skjer vil farten synke, og trykket vil øke. Det er på denne måten Bernoulli prinsippet forklarer hvordan en sentrifugalpumpe øker trykket i en væske. Impelleren er montert inne i pumpehuset i sentrifugalpumpen, og derfor vil væsken som slynges ut fra impelleren, miste farten som den hadde da den treffer veggene inne i pumpehuset (NDLA, 2021).

$$\frac{p_{ut}}{\gamma} + \frac{V_{ut}^2}{2g} + z_{ut} = \frac{p_{inn}}{\gamma} + \frac{V_{inn}^2}{2g} + z_{inn} - h_f - h_p$$

$\gamma$  representerer den spesifikke vekten av væske.  $\gamma = \rho g$

$\rho$  er væsketettheten og  $g$  er gravitasjonskonstanten

$P$  er trykket

$V$  er hastigheten

$Z$  er høyden

$H_f$  er friksjonstapet i strømmingen

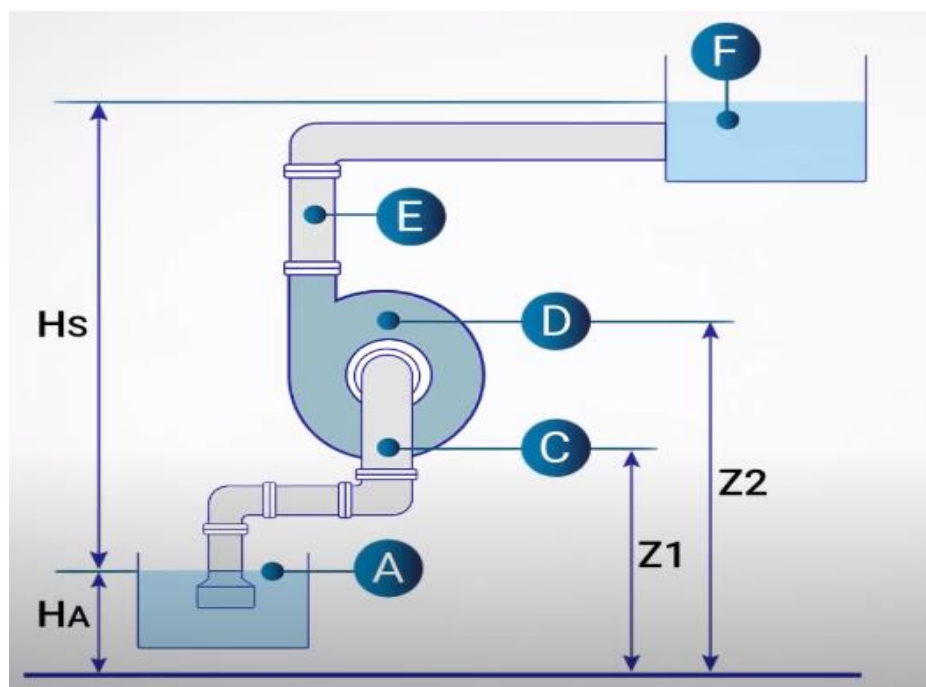
$H_p$  er internt tapet i pumpen

Vi skal nå se på et typisk eksempel av væskeoverføring mellom reservoarene, og hvordan Bernoulli ligningen kommer inn i bildet. Væskeoverføringen skal skje i fra lavtrykk reservoaret til høytrykkreservoaret som er vist i figur 7. Væsken suges fra lavtrykkreservoaret til pumpen, og når impelleren begynner å rotere, sendes væsken videre til

høytrykkreservoaret. Trykket i pumpen er betydelig mindre enn trykket i lavtrykk reservoaret. På grunn av den betydelige trykkforskjellen, vil væsken bli sugd opp fra lavtrykkreservoaret til pumpen. Deretter strømmes væsken fra pumpen til høytrykks reservoaret ved hjelp av impelleren (Bachus, 2003).

Vi bruker Bernoulli ligningen for å forklare trykkforskjellene i de ulike fasene, til og fra pumpe. Når væsken er sugd ut fra lavtrykk reservoaret til pumpe på grunn av trykkforskjell, er det trykktap i prosessen. Det er inngangstap når væsken entrer røret og friksjonstap i strømmingen. Det er også trykktap i strømmingen fra pumpe til høytrykks reservoar, og når væsken entrer høytrykkreservoaret (Bachus, 2003).

Med Bernoulli ligningen kan vi regne trykket i væsken som kommer inn til pumpen og som går ut fra pumpen. Dette kalles «Head» som er pumpens løftehøyde.



Figur 7: En illustrasjon av bruken av Bernoulli i sentrifugalpumpe (JAES-Company, 2019)

Punktet A er lavtrykk reservoaret, mens punktet F er høytrykks reservoaret.

Regningen ved hjelp av Bernoulli ligningen mellom de punktene blir som følger:

Bernoulli i punkt C:

$$\frac{P_C}{\rho g} + \frac{V_C^2}{2g} + z_1 \rightarrow \text{Total head} \rightarrow \text{vanntrykk ved punkt C}$$

Bernoulli i punkt D:

$$\frac{P_D}{\rho g} + \frac{V_D^2}{2g} + z_2$$

$$H = H_D - H_C$$

$$H = \left( \frac{P_D}{\rho g} - \frac{P_C}{\rho g} \right) + \left( \frac{V_D^2 + V_C^2}{2g} \right) + (z_2 - z_1)$$

Bernoulli i punkt D og F:

$$\frac{P_D}{\rho g} + \frac{V_D^2}{2g} + z_2 = 0 + 0 + H_S + H_A + hf_2 + h_p$$

$$\rightarrow H = H_S + h_{in} + hf_1 + hf_2 + h_e$$

$$H = H_S + \Sigma$$

Hvor  $\Sigma$  er summen av alle tapene

$$P_f = 0, \quad V_f = 0$$

Bernoulli i punkt A og C:

$$0 + 0 + H_A = \frac{P_C}{\rho g} + \frac{V_C^2}{2g} + z_1 + h_p + hf_1$$

$$P_A = 0, \quad V_A = 0$$

(Bachus, 2003)

$\rho$  er væsketettheten og  $g$  er gravitasjonskonstanten

$P$  er trykket

$V$  er hastigheten

$Z$  er høyden

$H_f$  er friksjonstapet i strømmingen

$H_p$  er internt tapet i pumpen

$H$  er løftehøyden

## Eulers pumpe ligning

Impellere er turbomaskiner. Euler ligningen viser til kraften som tilføres eller fjernes fra strømmingen på de roterende impellerbladene. Ligningen er basert på konsepter som bevaring av vinkelmoment og bevaring av energi (Nuclear-power, 2021).

Eulers ligning kan brukes til å forutsi virkningen det vil ha på «head» ved å endre impellerens geometri, se figur 8. «Head» som er løftehøyden, er den maksimale høyden som en pumpe kan bevege væske mot tyngdekraften. Hvis dreiemoment og vinkelhastighet har samme tegn (dvs. positivt eller negativt) vil det si at det utføres arbeid på væsken, men hvis tegnene er motsatt av hverandre, utføres det ikke arbeid på væsken (Nuclear-power, 2021). Euler-ligningen vil med andre ord være svært nyttig for designet til pumper.

Euler pumpe/turbomaskin ligningene er:

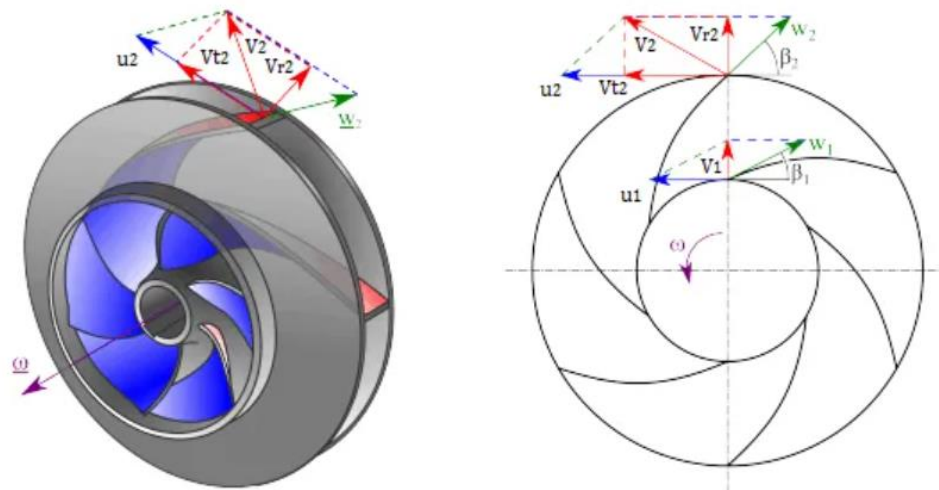
Akselmoment: 
$$T_{aksel} = pQ(r_2V_{t2} - r_1V_{t1})$$

Vann hestekrefter: 
$$P_w = \omega \cdot T_{aksel} = pQ(u_2V_{t2} - u_1V_{t1})$$

Pumpens løftehøyde: 
$$H = P_w / \rho g Q = (u_2V_{t2} - u_1V_{t1}) / g$$

(Nuclear-power, 2021)

- $r_1$  og  $r_2$  er impellerens radius ved innløp og utløp.
- $u_1$  og  $u_2$  er de absolutte hastighetene til impelleren ved innløpet og utløp. ( $u_1 = r_1 \cdot \omega$ )
- $V_{t1}$  og  $V_{t2}$  er de tangentielle hastighetene til strømmen ved innløp og utløp.



Figur 8: Dekomponering av enhetene med tanke på eulers turbomaskin ligning (Nuclear-power, 2021)

### 2.3.2 Grunnleggende konsepter for balansering

Det finnes noen grunnleggende prinsipper når en skal regne på balanseringen.

#### Massesenter:

Det er viktig å finne massesenteret når en skal balansere impeller i sentrifugalpumpe. Massesenteret er det punktet hvor den totale massen av et legeme er jevnt fordelt. Målet med balansering er da å justere massesenteret sammen med det geometriske sentrum. Det vil si at ubalanse vil oppstå hvis massesenteraksen ikke er justert med den geometriske aksene (Pajkovic, 2021). Kraften som virker gjennom dette punktet, vil bevege legemet i en rett linje. Ifølge Newtons andre lov om bevegelse, er  $F = m \cdot a$ . Summen av alle krefter som virker på et legeme,  $F$ , er akselerasjon med en hastighet,  $a$ , ganget med masse,  $m$  (Gary K. Grim, 2021).

#### Trehetsmoment

Trehetsmomentet betyr forskyvning av massen under rotasjon, og det gir målingen av massefordelingen rundt aksene. Vanligvis regnes trehetsmomentet som produktet av massen ganger avstanden fra partikkelaksen ( $I = m \cdot r^2$ ), men for stive legeme, er det integralet, ( $I = \int r^2 \cdot dm$ ). Dessuten har alle stive deler minst ett sett med balanserte aksler, som kalles spindler. De er ortogonale mot hverandre og stammer fra massesenteret (Gary K. Grim, 2021).

Når en jobber med balansering, er det praktisk å beskrive den sentrale hovedaksen som den viktigste aksene. Det ligger da nærmest med rotasjonsaksene som også er kalt masseaksene eller

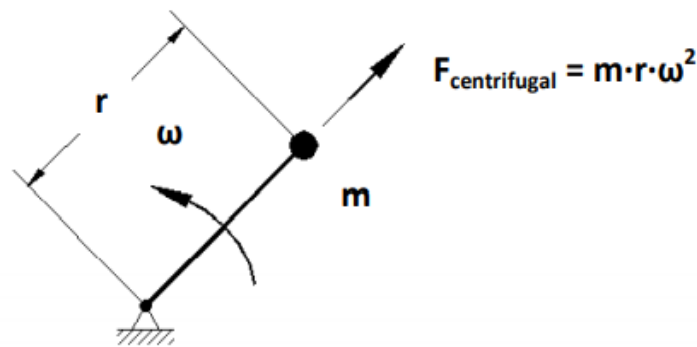


balanseaksen. Hvis rotasjonsakse til en rotor er ikke i samsvar med den sentrale hovedaksen, vil rotoren være ubalansert. Størrelse av ubalansen vil være avhengig av vinkelen mellom akslene og avstanden fra rotasjonsaksen til opprinnelige aksens (Gary K. Grim, 2021).

### Sentrifugalkraften

En sentrifugalpumpe blir brukt for å flytte væske ved hjelp av rotasjonsenergi fra drevne rotor. Væske kommer inn i roterende impellere langs aksens og kastes ut ved hjelp sentrifugalkraft gjennom pumpehjulets vingespisser.

Sentrifugalkraft blir dannet av partikler som er laget for å bevege seg langs en sirkulær bane. Kraften er rettet utover langs den radiale linjen mellom rotasjonssenteret og partikkelen. Når partikkelen roterer rundt senterpunktet, vil også sentrifugalkraften gjøre det samme (Gary K. Grim, 2021).



Figur 9: Illustrasjon av sentrifugalkraft (Gary K. Grim, 2021)

En impeller med massesenter litt forskjøvet fra rotasjonsaksen vil også danne sentrifugal kraft, se figur 9. Dette er kraften tilknyttet til statisk ubalanse. Ubalansen nevnes med masse ganget med radius ( $m \cdot r$ ) og sentrifugalkraften er produktet av ubalanse og vinkelhastighet. Selv når ubalansekraften øker raskt med hastigheten, så vil ikke ubalansen endres i det hele tatt (Gary K. Grim, 2021).

Selv om hastigheten i stive legemer vil øke og kraften blir større, vil ubalansen fortsatt være den samme. Avhengig av stivheten til akselen eller akselstøtten, vil denne kraften føre til økt bevegelse. Kraften øker eksponentielt som kvadratet av endringen i hastighet (Gary K. Grim, 2021).

$$F = m \cdot r \cdot \omega^2 = U \cdot \omega^2$$

F, kraft i Newton

m, masse i kilogram

r, radius i meter

U = m·r, ubalansen

$\omega$ , vinkelhastighet i rad/sek

### Strømning i impeller

Reynolds ligning brukes til strømningsberegningene i polarkoordinater og impeller med referansehjulssystemet (Se figur 10) (Anagnostopoulos, 2006). Det brukes til å regne turbulens og hydraulisk tap under strømmingen, som er viktig å unngå for effektivt bruk av sentrifugalpumpe. De ligningene er uttrykt som følger:

$$\text{Kontinuitet: } \nabla \cdot \vec{w} = 0 \quad (1)$$

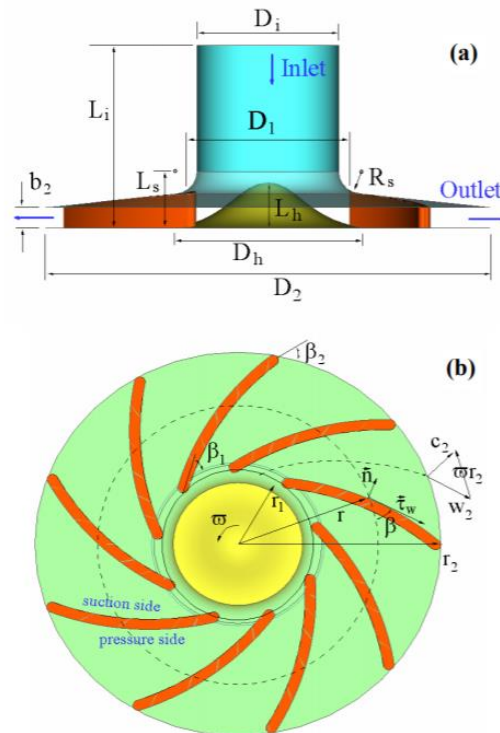
$$\text{Moment: } \vec{w} \cdot \nabla \vec{w} = -2\vec{w} + \omega^2 \cdot \vec{r} - \frac{1}{\rho} \cdot \nabla p + \frac{1}{\rho} \cdot \nabla \cdot \vec{\tau} \quad (2)$$

Hvor w er den relative væskehastigheten,  $\omega$  er impellers vinkelrotasjons hastighet, r er radial plassering, p er væsketrykket, og  $\rho$  er tettheten.

Den viskøse spenningstensoren  $\tau$  inkluderer både viskositet og turbulens viskositetsbetingelser:

$$\tau_{ij} = 2\mu \cdot s_{ij} - \sqrt{\rho \cdot w'_i \cdot w'_j} \quad (3)$$

Hvor  $\mu$  er den flytende dynamiske viskositeten og  $s_{ij}$  er deformasjonstensoren (Anagnostopoulos, 2006).



Figur 10: Parametrisering av pumpehjulets geometri: a) sett fra siden b) ovenfra (Anagnostopoulos, 2006)

## 2.4 Balansering

Balansering er prosessen der vekt fordelingen av en rotor kontrolleres, i vårt tilfelle impelleren. Vektfordelingen justeres om nødvendig, for å sikre at vibrasjon ikke oppstår i maskinen og lagringene. Dette skal gjøres for at, frekvens som tilsvarer hastigheten når den i drift, er innenfor spesifiserte grenser (Hines industries, 2021).

### Balansering av impeller i sentrifugalpumpe:

Balanseringen skal rette ubalanserte impellere. Balanseringen er viktig for å minimere vibrasjon, kavitasjon, støy og slitasje av roterende deler. Balanseringen vil alltid være et av de mest kostnadseffektive måtene å levere kvalitetsprodukter til forbrukerne (Pumpman, 2021).

Det er hovedsakelig to prosesser for å balansere impeller i sentrifugalpumpe:

**Statisk balanseringen:** Ved statisk balansering kan rotoren balanseres i forhold til rotasjonsaksen ved å redusere massen på den bevegelige siden mot tyngdepunktet, eller legge til masse på den motsatte siden om nødvendig. Rotorer balanseres vanligvis ved å fjerne masse på material ved å bore eller frese (Avtopilot-center, 2021).

**Dynamisk balansering:** Dynamisk balansering er utført ved å spinne rotor med høy hastighet. Metoden skal justere balansen og fjerne vibrasjoner ved å trekke fra eller legge til

vekt. Denne prosessen utføres av spesielle maskiner. Rotoren blir kjørt til en bestemt hastighet i en dynamisk balanseringsmaskin, hvor innebygde sensorer i maskinen gir nødvendig informasjon til et målesystem som leser rotoren og dens ubalanse. Etter det, blir den anbefalte mengden masse som sensoren viser, påført eller tatt bort fra gjenstanden som balanseres. Hvis rotoren skal kjøres i høy hastighet, foretrekkes dynamisk balansering fremfor statisk balansering på grunn av sin nøyaktige presisjon (Notmywar, 2021).

## 2.5 Metoder

Statisk balansering og dynamisk balansering er de to alternativene for å balansere en impeller. Metoden som er valgt er avhengig av mange faktorer som fysisk størrelse, form, masse og krav, som er tolket i standard ISO 21940-11. Dynamisk balansering brukes vanligvis når en rotor er relativt bred sammenlignet med diameteren. Det er for at målinger og justeringer kan gjøres i to aksialt separert korrigeringsplaner (Ahrinet, 2021). Statisk balansering vil imidlertid være brukt på en smal impeller hvor målinger og justeringer kun kan gjøres i ett korrigeringsplan. Hovedsakelig kan statisk balansering gjøres både ved hjelp av roterende eller ikke-roterende metoder, mens dynamisk balansering bare kan oppnås ved roterende metoder (Ahrinet, 2021).

Ikke-roterende: Den enkleste metoden for ikke-roterende balansering består av en rotor montert med akselen vannrett og som står fritt til å svinge om sin aksel-akse. Det kan være avvik i massesenteret i forhold til aksel-aksen, og det vil føre til at den svinger (Ahrinet, 2021). Masse kan deretter legges til eller trekkes fra impelleren. En gjør samme prosessen om igjen, om nødvendig flere ganger, til den er balansert. Det finnes forskjellige metoder for å balansere med ikke roterende metoder. De nyeste metodene innen statisk balanseringsteknologi benytter vanligvis en vertikal arbor eller akse som bruker tyngdekraften til å sende elektroniske signaler, og den indikerer hvor mye korreksjon i masse som kreves og hvor den er i impelleren (Ahrinet, 2021).

Roterende: Roterende balansering oppnås normalt med et elektronisk balanseringssystem som har en roterende horisontal arbor med lagre som kan beregne mengde og posisjon for ubalanse i impelleren i to aksialt adskilte plan. Der bredde / diameter-forholdet er større enn 0.3, er to-plan rotasjonsbalanse den foretrukne metoden for balansering av impellere (Ahrinet, 2021).

Tabell 1: Balanseringsmetoder (Ahrinet.org, 2021)

Type of Balancing	Method	Instrumentation
Static Balancing	Single-plane Non-rotating	<i>Horizontal</i> Knife edge, Roller ways
		<i>Vertical</i> Pendulum (electric or non- electric read-out)
	Single-plane Rotating (centrifugal)	Electronic Balancing Machine (horizontal or vertical arbor)
Dynamic Balancing	Two-plane Rotating (centrifugal)	Electronic Balancing Machine (usually horizontal arbor)

## 2.6 Vibrasjoner

Vibrasjon er et fenomen som oppstår når det er ubalanse i massen i roterende maskiner, se figur 11. Det er et utbredt teknisk problem når en skal balansere denne type maskiner. Målet med balansering er å redusere rotorvibrasjon til et praktisk minimum. Reduserer en rotorvibrasjoner, vil levetiden økes betraktelig. Vibrasjon er ikke bare et resultat av impelleren, men kan også være avhengig av feil koblinger og lagringer i maskinen (Chong-Won, 1993).

Det finnes elektroniske maskiner til å finne gjenværende ubalanse, og eventuelt rette det. Retter en ubalanse, reduseres vibrasjon. Basisen med balansering er at en leser av vibrasjonsmålingen i en maskin når det er i ubalanse. En måler vibrasjonsamplitude og fase (Chong-Won, 1993). Det vil gi signal på hvor stor vekt det skal legges til eller eventuelt fjernes i en rotor.



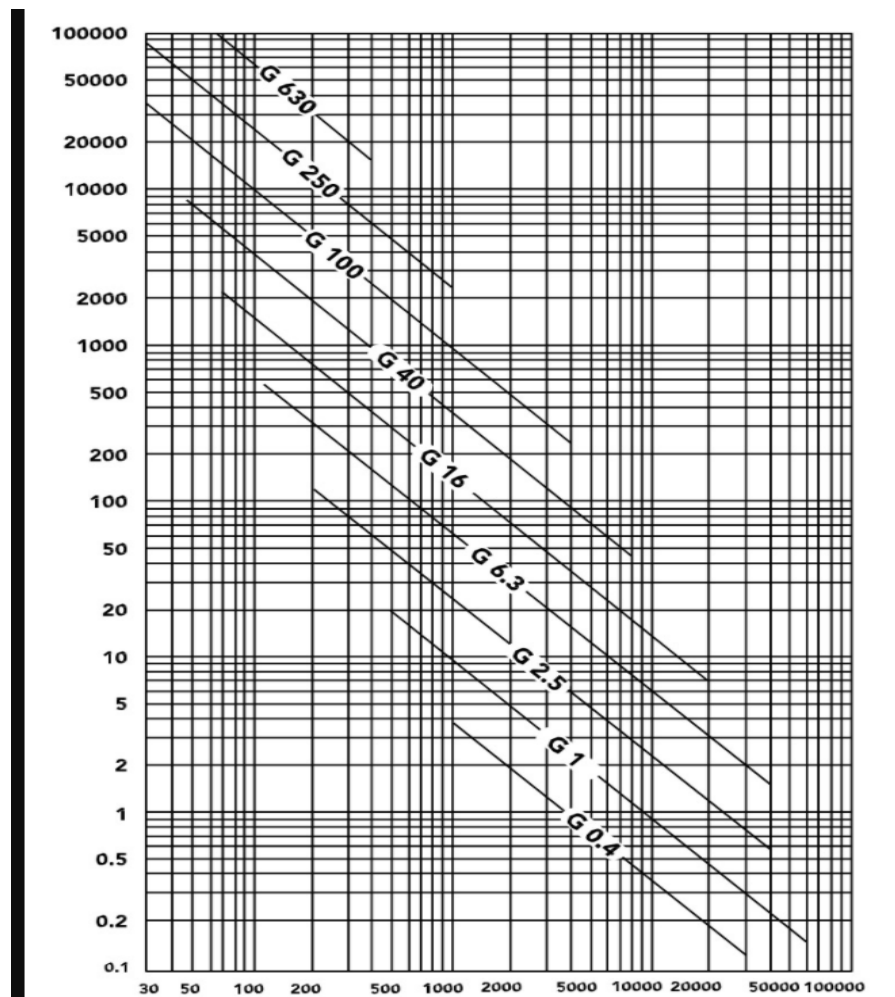
Figur 11: Skade på grunn av vibrasjon (Anspach, 2011)

Den ujevne vektfordelingen er konsentrasjon av ubalansert kraft, og vi legger til eller fjerner vekt til rotoren for å motvirke den ubalanserte kraften. En må finne ut akkurat hvor mye en må endre på vekten, og i hvilken lokasjon på impelleren. For å gjøre det legges det vanligvis til en prøve vekt, hvor en deretter ser hvordan prøve vekten påvirker vibrasjon og målinger. Det en gjør ved vibrasjonsmålinger er at vi legger til prøve vekt og kjører maskinen. Hvis ubalansen har blitt rettet, skal amplituden være redusert (Norfield, 2011).

### **Tillatt vibrasjon**

Når en har fått vibrasjonsmålingene og har fjernet riktig mengde masse på impelleren, vil amplituden reduseres, som vil si at det vil være mindre vibrasjoner i systemet. Da har en klart å redusere vibrasjon.

Det er også viktig å forholde seg til en standard for balansering. En bruker tabellen som heter precision balance som er definert av ISO standard 21940-11, se figur 12. En kan enten beregne dataen eller bruke tabellen. Enkleste måten er å bruke tabellen. Tabellen viser hvor mye ubalanse som er tillatt med hensyn på hastigheten impelleren har. Det trengs et høyt nivå av presisjon for pumper og impellere, derfor så brukes det vanligvis balanseringskvalitet G 6.3 når gjenværende tillatt ubalanse skal fastsettes (Norfield, 2011).



Figur 12: Precision balance- Diagrammet viser den spesifikke gjenværende ubalansen som er tillatt ifølge ISO 21940-11 (Deuschle, 2021)

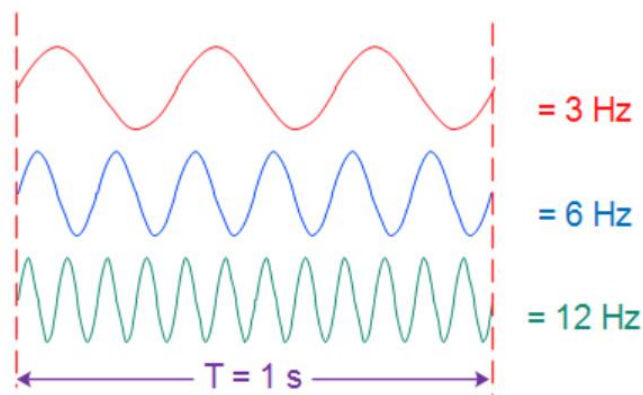
Vertikal linje: tillatt ubalanse

Horisontal linje: Hastigheten til rotor

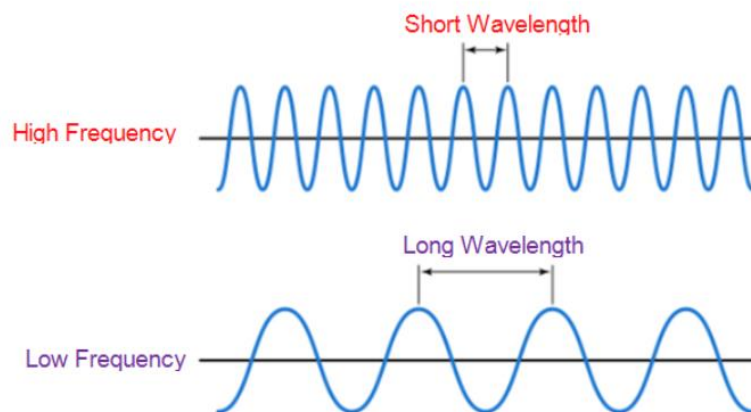
**Viktige parametere i vibrasjon:**

- **Frekvens:**

Med frekvens tolker en hvor fort en maskin og maskindel vibrerer. Et vibrerende system vil være i en posisjon og bevege seg frem og tilbake fra sin vanlige posisjon. Når enheten beveger seg fra det ene stedet til et annet og tilbake igjen til sin opprinnelige posisjon, vil den ha fullført en vibrasjonssløyfe. Frekvens refererer til antall vibrasjonssykluser en vibrerende maskin utfører i løpet av et sekund. Frekvens måles i hertz (Hz). En hertz tilsvarer en syklus per sekund (CCOHS, 2021).



Figur 13: Illustrasjon av forskjellige frekvens per sekund (Techplayon, 2021)



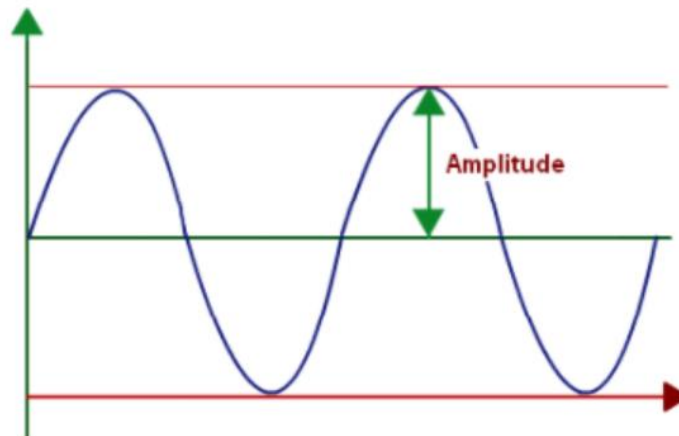
Figur 14: Høy frekvens øverst og lav frekvens nederst (Techplayon, 2021)



- **Amplitude:**

Amplituden gir informasjon om avstanden en maskin vibrerer. På hver side av startposisjon, beveger en vibrerende maskin til maksimal avstand. Når den vibrerer, er amplituden avstanden mellom startpunktet og posisjonene på hver side. Dette uttrykkes i meter (m).

Amplituden til en vibrasjon bestemmer dens intensitet (CCOHS, 2021).



Figur 15: Amplitude i frekvens (Techplayon, 2021)

- **Akselerasjon og hastighet:**

I løpet av hver vibrasjonssyklus varierer hastigheten til en vibrerende maskin fra null til maksimum. Når den beveger seg fra utgangspunktet til en ekstrem posisjon, beveger den seg raskest. Når den nærmer seg det ekstreme punktet, bremser det vibrerende systemet, stopper opp og beveger seg deretter i motsatt retning gjennom startposisjonen mot det andre ekstremer. Vibrasjonshastighet måles i meter per sekund (m/s) (CCOHS, 2021).

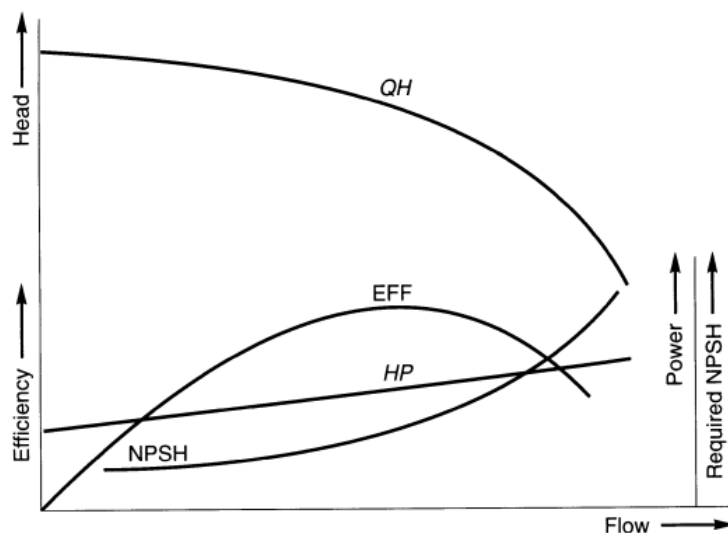
Uttrykket "akselerasjon" refererer til hvor raskt hastigheten endres med tiden. Måleenheten for akselerasjon er meter per sekund i andre ( $m / s^2$ ). I løpet av hver vibrasjonssyklus varierer størrelsen på akselerasjonen fra null til maksimum. Når en vibrerende maskin eller maskinkomponent beveger seg vekk fra sin utgangsposisjon, øker akselerasjonen (CCOHS, 2021).

## 2.7 Karakteristikk av sentrifugalpumpe

Energioverføringen i en sentrifugalpumpe skjer ved endringen i væskens bevegelse. Størrelsen på endringen bestemmes av strømmingens dimensjoner og form, samt impellerens driftshastighet. For en gitt pumpegeometri og driftshastighet, varierer væskens hastigheter med strømningshastigheten. På grunn av dette, utvikler sentrifugalpumper forskjellige løftehøyder ved forskjellige strømningshastigheter. På samme måte varierer effektivitet, kraftbehov og sugeevne også med strømningshastigheter (Yedidiah, 1996).

Vanligvis beskriver en ytelsesegenskapene til en sentrifugalpumpe ved å spesifisere løftehøyde utviklet av pumpen ved en gitt strømningshastighet. På samme måte definerer en ofte ytelse til en sentrifugalpumpe ved å angi strømningshastigheten levert mot en gitt løftehøyde (Yedidiah, 1996).

Når en ny Pumpe er produsert av produsenten, blir den testet og kontrollert. Resultatene av disse testene blir deretter tegnet som kurver på Performance flow chart (Yedidiah, 1996). Dette er med andre ord et ytelsesdiagram som er vist i figur 16.



Figur 16: Typisk performance flow chart for en sentrifugalpumpe (Yedidiah, 1996)

Kurven merket QH viser hvordan løftehøyde endres med strømningshastighet. Kurven merket HP representerer strømførbuket ved forskjellige strømminger, og kurven merket EFF viser forholdet mellom den faktiske mengden kraft i væsken og strømførbuket av pumpen ved gitt strømningshastighet (Yedidiah, 1996).

Den minste løftehøyden som sugedysen på pumpen trenger for å forhindre kavitasjon, er også vist i ytelsesdiagrammet. Dette uttrykkes vanligvis med en kurve merket NPSH (netto

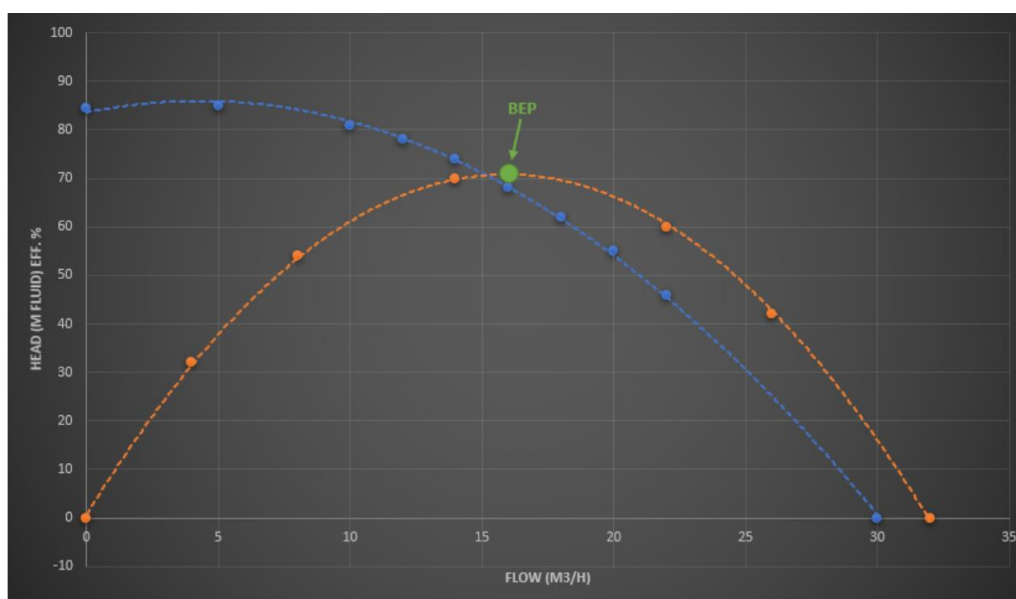
positivt suge løfthøyde). Som vist i ytelsesdiagrammet forventes det under normale driftsforhold at en pumpe viser de samme ytelsesegenskapene i felt, som under testing. Hvis ikke, er det mest sannsynlig noe galt med systemet (Yedidiah, 1996).

## 2.8 Effektivitet og virkningsgrad

En rotasjonsimpeller konverterer inngangseffekten til kinetisk energi i en sentrifugalpumpe. De kan levere høye eller lave strømmer ved lavt eller høyt trykk, alt avhengig av applikasjonen og hvilken spesifikk pumpe som brukes (Pumps&systems, 2021).

Under pumping opplever alle pumpene interne tap. Mengden av tap er i stor grad avhengig av pumpens størrelse og design, samtidig hvor pumpen drives på ytelseskurven. Hver pumpe er konstruert for å levere en bestemt mengde strømming og trykk ved en bestemt hastighet (pumpsandsystems, 2021). Effektiviteten er høyest når pumpen brukes i det beste effektivitetspunktet (BEP). Det er også i dette punktet pumpen er mest hydraulisk og mekanisk stabil (Pumps&systems, 2021).

Beste effektivitetspunktet nevnes med BEP i pumpe-sammenheng. BEP er det mest effektive punktet som representerer arbeidspunktet på pumpens ytelseskurver. Bruker en pumpe i dette punktet, får en det høyeste nivået av driftseffektivitet for en valgt impellerdiameter (King, 2021). I et ideelt scenario, må en alltid bruke sentrifugalpumpe så nær BEP som mulig.



Figur 17: Sentrifugalpumpe prestasjonskurve (King, 2021)

I figur 17 er BEP vist ved det grønne punktet, dvs. toppen av effektivitetskurven. På denne prøven fungerte pumpen i et system der driftspunktet på pumpekapasitetskurven var  $16 \text{ m}^3/\text{t}$  med en løftehøyde på 68 m. Her vil pumpen fungere ved BEP (71%). Dette var det høyeste driftseffektiviteten for den gitte impellerdiameter som disse ytelseskurvene er basert på. I dette tilfelle var impellerdiameter 160 mm (King, 2021).

## 2.9 Problemer

Sentrifugalpumper er en av de mest brukte pumpene. De brukes som regel i industri- og boligsystemer, siden de er godt egnet til forskjellige strømningshastigheter. Siden strømmingen ofte er ustabil, kan det være vanskelig å forbedre ytelsen til turbomaskiner som sentrifugalpumper. Det vil si at strømmingen kan være turbulent og forårsake at det oppstår kavitasjon. Kavitasjon er en dynamisk prosess som ofte blir sett på som en av de viktigste årsakene til pumpesvikt over tid. Det er viktig å diagnostisere kavitasjon og oppdage alvorlighetsgraden for å opprettholde pumpens effektivitet og virkningsgrad. Kontinuerlig overvåking av pumpens tilstand er avgjørende for å forlenge levetiden, redusere vedlikeholdskostnadene og dermed kan øke pumpens effektivitet. Tidlig oppdagelse og forebygging av kavitasjon kan også forbedre pumpens levetid (Al-Obaidi, 2018).



Figur 18: Illustrasjon av skader på grunn av kavitasjon (Fluidhandling, 2019)

Som nevnt i kapittel 2.6 er vibrasjon ofte et problemområde for sentrifugalpumper, da de kan operere med høye hastigheter. Jo høyere hastighet, desto høyere vibrasjonsnivåer vil kunne forekomme. Det kan være ekstremt skadelige for pumpekomponentene som vist i figur 18, og da særlig for tetninger, lagre og koblinger. Disse nevnte delene er de første komponentene som svikter på grunn av vibrasjon. Skadene kan forverres gradvis over tid og føre til økende slitasje på lagre, sprekker på mekanisk tetninger, osv. (Empoweringpumps, 2021). En må sørge for at pumpen brukes med lave vibrasjonsnivåer for å kunne hindre disse skadene. Årsaken til vibrasjon vil som regel være mekaniske problemer. Det at impellerhjulet ikke er balansert er en av de vanligste mekaniske feilene ved pumper. Det kan også skyldes at pumpen ikke står i en vibrasjonsfri stilling. Noen ganger kan det være løse bolter i koblingsforbindelser på pumpen som fører til vibrasjoner. Det kan også begynne å vibrere, dersom pumpen kjøres for langt unna det beste effektivitetspunktet (Empoweringpumps, 2021).

I tillegg til mekaniske problemer, kan vibrasjoner også være forårsaket av hydrauliske problemer. Når det oppstår kavitasjon i pumpens innløp, vil det også forekomme vibrasjoner. Det kan også begynne å vibrere, dersom pumpen kjøres for langt unna det beste effektivitetspunktet (Empoweringpumps, 2021).

### **3. Mulige løsninger**

Det arbeides i denne delen av oppgaven med å finne nye avbalanseringsmetoder som kan forenkle og effektivisere prosessen av balanseringen. Det gjennomgås da flere løsninger som kan vurderes som et supplement til dagens metode, eller til å erstatte denne. Som en del av denne analysen, vurderes den statiske metoden opp mot den dynamiske.

#### **3.1 Funksjonsanalyse**

Hovedoppgaven til balanseringsmetoden som vi etter vårt arbeide vil anbefale, blir å kunne balansere den type impellere som Ydra AS produserer med tilhørende vektklasse og diameter størrelse. Men det viktigste er å finne en balanseringsmetode og et balanseringsutstyr som både kan forenkle og effektivisere denne prosessen, slik at operatørene deres får mer avlastning og får brukt mer tid på annet arbeid innenfor prosessen. Det blir også viktig for den endelige løsningen at balanseringen kan skje i tråd med ISO standard 21940-11.



### 3.2 Dagens metode

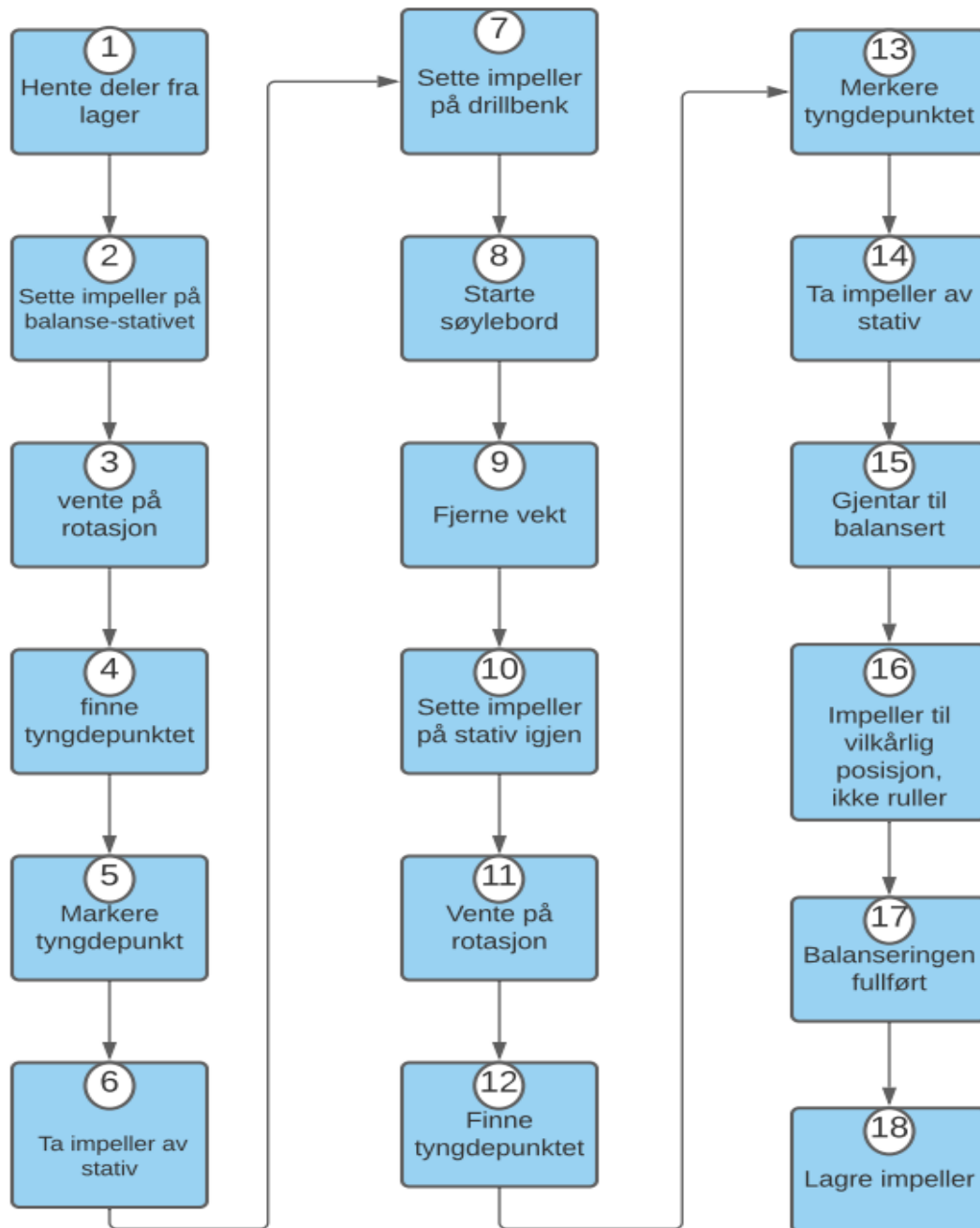
Impellerhjulene som blir laget hos Ydra AS blir utformet fra et støpt rågods som etterpå maskineres i en dreiebenk. Støpte emner er alle litt forskjellige, og avvik på tyngdepunkt på godset vil mest sannsynlig oppstå da tykkelsen i støpen vil kunne variere. Dette er et resultat av at selve støpeprosessen ikke er så nøyaktig som man skulle ha ønsket. Som en konsekvens av at alle de støpte emnene man lager vil være litt forskjellige, må hvert hjul hos Ydra balanseres. Det finnes flere metoder for å balansere impellere på. Hos Ydra brukes det en enkel og statisk metode hvor en bruker et balanseringsstativ, som består av to fastmonterte akslinger og en løs aksel hvor man setter impelleren på, se figur19. For at balanseringen skal være mer nøyaktig settes stativet opp med hjelp av et presisjonsvater, mens selve akselen er presisjonsmaskinert. Videre i denne statiske avbalanseringsmetoden settes impelleren på akslingen, og venter på at hjulets tyngste del skal rulle og bli liggende nederst. Denne delen merkes med tusj og spennes deretter så fast i en søyleborremaskin, for å kunne fjerne materiale for å utligne ubalansen. Denne prosessen gjentas helt til hjulet kan plasseres i en vilkårlig stilling på stativet, og ikke ruller.

Selv om denne metoden anses som en god metode for å utjevne balansen, er den både tidskrevende og ikke gjennomført etter en toleranse. Hos Ydra AS i dag balanseres det ca. 1000 stk. impellere i året og en har forventning om at det skal øke til 3000-5000 om fem år. Det vil si at de vil gå fra å balansere 4 impellere per dag til ca. 20 stk. per dag. Da dagens statiske balanseringsmetode er tidkrevende, anses ikke denne metoden å ivareta fremtidens målsetninger med hensyn til effektivitet.



Figur 19: Impeller på et balansestativ, og impeller klar for boring. foto: Theodor D Hansen

Balanseringsprosessen utføres i dag manuelt, det vil si at en operatør utfører «målingene» og boringen. Flytskjemaet under illustrerer i hovedtrekk fremgangsmåten i prosessen.



Figur 20: Flytskjema av dagens metode, figur Yadu Nath Baral

### 3.3 Valg grunnlag

Vanligvis når man skal finne nye løsninger som skal forbedre en eksisterende løsning, kan det være fornuftig å definere noen funksjonskriterier, som den nye løsningen må oppfylle. Disse kriteriene vil sammen med økonomi og kvalitet bli brukt som valg grunnlag når man skal bestemme seg for en løsning. Funksjonskriteriene under er basert på samtaler med Ydra AS og de impellerne som blir brukt i dag.

1. Løsningen må kunne balansere opptil 20 enheter på en arbeidsdag.
2. Løsningen må kunne balansere impellerne i vedlegget. (Ydra's produktsortiment)
3. Løsningen må kunne balansere impellere med vekt opptil 6250 gram.
4. Løsningen må prøve å ikke overskride størrelse på 2 m<sup>2</sup> + gulvplass.
5. Løsningen må oppnå nødvendige sikkerhetsfunksjoner.
6. Løsningen må kunne balansere etter balansekvalitet G 6,3.

### 3.4 Alternative løsninger

#### 3.4.1 Schenck

Schenck har eksistert i over hundre år, og har etablert seg som en av de største leverandørene innen balansering. Deres maskiner kan man finne innenfor bilindustri, vindkraft, forskning, flyindustri og mange andre områder. Schenck har med andre ord mye kunnskap og erfaring innenfor mange områder som er viktige i dagens industri, det gjelder også innen pumpeindustrien (Schenck-rotec, 2021).

#### ESD

ESD er en statisk balanseringsmaskin, som ikke roterer (se figur 21). Den enkleste måten å balansere Ydra AS sine impellere på er med ikke rotende maskiner som denne. Dette er maskiner med høy presisjon med tre elektroniske lastceller som finner ubalansen i impelleren og angir mengden, og vinkelen på ubalansen. Tiden det tar for å gjennomføre denne prosessen er veldig kort og prosessen er enkel. Når ubalansen er funnet, tas impeller av balanseringsmaskinen. Impellerhjulet avbalanseres deretter ved å fjerne beregnet mengde fra gitt posisjon med for eksempel en søyleborremaskin som Ydra AS i dag benytter i balanseringsprosessen. 2-plan måling er ikke mulig for ESD maskinen, det vil si at den kun kan avbalansere med én-plan måling. En av flere fordeler med deres statiske balanseringssystemer er at de er svært kraftige og håndterer greit periodevis overbelastninger (Schenck-rotec, 2021).



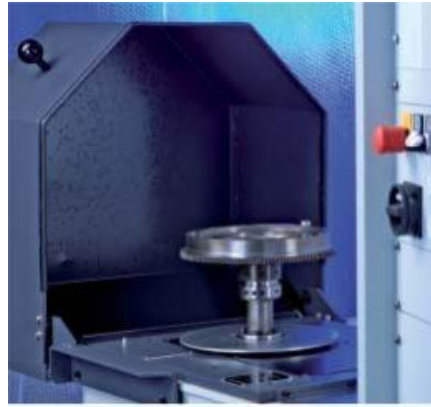


Figur 21: ESD oppsett (Schenck, 2021)

Schenck opplyser at maskinen ESD er både sikker å håndtere for operatøren og lite plasskrevende. ESD benytter seg av målesystemet CAB 920 som ved hjelp av et TFT-display viser måleresultatene tydelig og lett forståelig. I dokumentasjonen om maskinen kan man se at den har en kvalitets grad på G 6.3 når den balanserer, etter toleranse standard ISO 21940-11. Videre beskriver produktspesifikasjonen at den kan holde impellere med en vekt på 20kg, 1500mm diameter og har en balanseringstid på kun 10 sekunder. Utgangsprisen for en ESD maskin er 434.000 kr (Schenck-rotec, 2021).

### **VE2-1**

Schenck har innen balanseringsmodellen VE to balanseringsmaskiner, hvor de innen roterende avbalansering har anbefalt modellen VE2-1 som har én-plan måling, hvor det også er mulighet for å få kjøpt 2-plan måling (se figur 23). Når det gjelder vekt og diameter av impellere som Ydra AS håndterer, er disse godt innenfor maskinens arbeidskapasitet (Schenck-rotec, 2021). En roterende balanseringsmaskin som VE2-1 har den fordelen at den også kan montere en borenhet for ubalansekorreksjon direkte på maskinen. Som en følge av at VE2-1 er en dynamisk maskin er det krav om at det skal være en beskyttelsesmekanisme montert, og av den grunn har Schenck designet et beskyttende kabinett i henhold til ISO standard 7475. I dokumentasjonen til VE2-1 spesifiseres det at den balanserer etter Standard ISO 21940-11. VE2-1 har et kompakt maskindesign, krever lite plass og er enkel å montere. VE2-1 har en prisantydning på 400.000 kroner som utgangspunkt (Schenck-rotec, 2021).



Figur 22: VE2-1 nærbilde (Schenck, 2021)

Utstyrets målesystem CAB 803 er et kompakt basisinstrument laget for all type standard oppgaver innen avbalansering. Den kommer med et enkelt operativt system for enkel drift, har en tydelig visning og gjør det lett for også mindre erfarne operatører å utføre balanseringen med høy nøyaktighet og kvalitet.



Figur 23: VE2-1 balanseringsmaskin (Schenck, 2021)

### 3.4.2 Precibalance

Precibalance holder til i India, og er produsenter av balanseringsmaskiner og balanseringsinstrumenter. Precibalance er ikke like store produsenter som Schenck, men har et godt omdømme for å tilby pålitelige, økonomiske og presise balanseringsmaskiner for mange bruksområder. I sitt produktspekter har Precibalance den vertikale balanseringsmaskinen V10-1S, som gjør balanseringen dynamisk (se figur 24). V10-1S utfører prosessen i et plan i den måleenheten en måtte ønske og kan balansere impellere

opptil til 10 kg. Dokumentasjonen beskriver at avbalanseringen blir utført etter balanseringskvalitet G 6.3, selv om det også er mulighet for å avbalansere etter de høyere kvalitetsnivåene G 2,5 og G 1 om det skulle være nødvendig (Precibalance, 2021). I henhold til produktspesifikasjonen er det en integrert søyleborremaskin på V10-1S, med 300 mm diameter på impellerbord og operasjonsfart 800 RPM. En enkeltplan vertikal maskin med integrert borestasjon vil koste 76.000 NOK. De tilbyr også automatisk posisjonsfunksjon av ubalansen på borestedet, hvor prisen for denne ekstra funksjonen ligger på 9300 NOK (Precibalance, 2021).



Figur 24: Oppsett av balanseringsmaskin V10-1S (Precibalance, 2021)

### 3.4.3 Cimat balancing

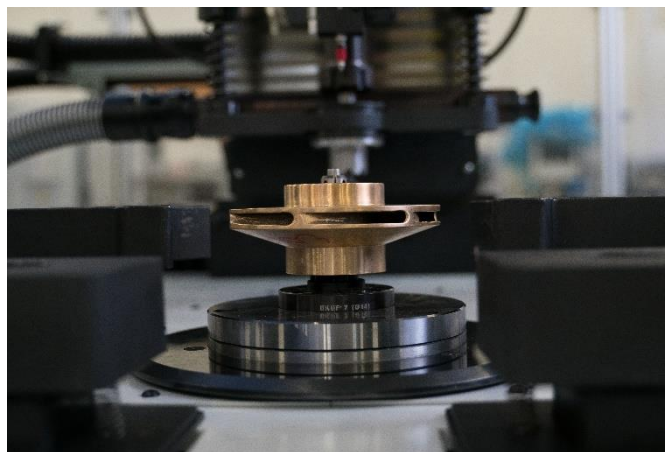
Cimat balancing tilbyr både universelle balanseringsmaskiner og spesial lagde maskiner, skreddersydd til individuelle behov, hvor de også monterer det elektriske og mekaniske og tilbyr opplæring. Cimat har over 34 år med erfaring innenfor denne industrien og leverer sine produkter til mer enn 90 land (Cimat, 2021). CMT-30V2FW er bortimot en hel-automatisk rotasjonsmaskin for enkelt- og dobbeltplan balansering, og kommer med ekstra prosessutstyr etter kundens ønsker.

I dokumentasjonen kan en se at denne maskinen er svært fleksibel når det gjelder hvilke impellere den kan avbalansere. Dette inkluderer de fleste typer impellere, som for eksempel open impeller, semi-open impeller, closed impeller. Denne fleksibiliteten gjør at en enkelt kan balansere impellere med vekt opptil 30kg og impellere med diameter mellom 70-345mm (Cimat, 2021). I tillegg til dette vil også maskinen selv kunne avbalansere impelleren med

enten boring eller fresing, etter at maskinen har detektert ubalansen. CMT-30V2FW som vist i figur 25, tar noe mer plass enn de andre balanseringsmaskinene som vi har vurdert, med et arealbehov på ca. 5m<sup>2</sup>, først og fremst pga. mer ekstra utstyr og større kapasitet. Den automatiske balanseringsmaskinen CMT-30V2FW koster i størrelsesorden 1.300.000 NOK, noe avhengig av hvilket ekstra utstyr som velges (Cimat, 2021).



Figur 25: Oppsett av balanseringsmaskin CMT-30V2FW (Cimat, 2021)



Figur 26: Nærbilde av prosessen med CMT-30V2FW. (Cimat, 2021)

### 3.4.4 JP-balancer

Shanghai JP-Balancing som ble etablert i 2004, leverer dynamiske balanseringsmaskiner basert på høyteknologi og er designet basert på rik erfaring innen fagområdet. De leverer maskinene sine til flere ulike industrier. De fleste kundene deres er fra Kina, men markedet deres inkluderer land som Vietnam og Malaysia. JP-balancing er et selskap som ønsker å levere kvalitet og hvor kundetilfredshet er viktigste mål (JP-balancing, 2021).



Figur 27: Vertikale balanseringsmaskinen PHLD-16 (JP-balancer, 2021)

Etter samtaler med JP-balancing ønsker de å tilby modellen PHLD-16(JP 680B), som vist i figur 27. Dette er en vertikal balanseringsmaskin som også er dynamisk. Programvaren til maskinen er egenutviklet, og selskapet tilbyr gratis programvare oppdateringer hele maskinens levetid. Med maskinen følger det med sensorer utviklet av JP selv, LCD skjerm og HP laser printer. PHLD-16 kan balansere impellere med en maks vekt på 16 kg og en maks størrelse på 800 mm, og kan balansere etter standard ISO 21940-11. Det tilbys videre gratis teknisk støtte hele utstyrets levetid, hvor man vil få detaljert hjelp av deres ingeniører (JP-balancing, 2021).

### 3.5 Sammenligning

Nedenfor er det laget en oversikt over de ulike balanseringsmaskinene som er blitt presentert i kapittel 3.4. Denne oversikten forenkler arbeidet med å sammenligne de ulike produktene og de viktigste detaljene.

Tabell 2: Sammenligning av de ulike balanseringsmaskinene.

	ESD (Schenck)	VE 2-1 (Schenck)	CMT-30V1FW (Cimat)	V10-1S (Precibalance)	JP-Balancer
Non-rotating	X	X	-	-	-
Rotating	-	-	X	X	X
Rotasjonsfart (RPM)	-	100 -5000	1600	800	800
Horisontal	-	-	-	-	-
Vertikal	X	X	X	X	X
Impeller diameter (max)	1500mm	600mm	70mm – 345mm	300mm	800mm
Kvalitets grad	G6.3	G.63	G6.3	G2.5	G6.3
Impeller vekt (kg)	0.5 – 20	0.5 – 30	0.5 – 30	0.5 – 10	0.5 – 16
Arealbehov (m <sup>2</sup> )	Ca. 2	Ca. 2	Ca. 5	Ca. 3	Ca. 2
Ekstra utstyr tilgjengelig	X	X	X	X	X
Fresing	-	-	X	-	-
Boring	-	Ved montering	X	X	-
Hel automatisk	-	-	X	-	-
1 eller 2 plan balansering	1	Ett plan, med mulighet for to	Både ett og to	Ett plan, med mulighet for to	2
Beskyttelse	Ikke nødvendig	X	X	Følger ikke med	X
Startpris (NOK)	434.000	400.000	1.300.000	76.000	55.000



## 4. Foreslått løsning

Basert på de alternative maskinene som ble presentert og sammenlignet opp mot hverandre i kapittel 3.4, er vår anbefaling for Ydra AS å anskaffe Schenck sin statiske balanseringsmaskin for avbalansering av impellere. En av fordelene er at en da vil kunne benytte eksisterende søyleborremaskinen i dette arbeidet.

### 4.1 Schenck

Schenk RoTec GmbH er et firma som har etablert seg som en av de største innen balansering og som leverer sine løsninger på verdensbasis. Deres maskiner har et godt rykte med hensyn til god kvalitet, lang levetid og ikke minst er sikkerhet for operatørene ivaretatt. Deres historie går helt tilbake til 1881. Det året etablerte Carl Schenck en fabrikk i Darmstadt, Tyskland (Schenck-rotec, 2021). Han oppnådde tidlig suksess med sin klokskap, internasjonale orientering og tilstedeværelse på verdensutstillinger. Selskapet begynte å utvikle og produsere balanseringsmaskiner i 1907 (Schenck-rotec, 2021). Schenck sine løsninger for balansering og diagnosteknologi for roterende og svingende komponenter og armaturer er unike over hele verden.



Figur 28: Eksempler på balanseringsmaskiner fra Schenck (Schenck, 2021)

## 4.2 Teknisk data fra produsent



Figur 29: ESD beholder (Schenck, 2021)

Tabell 3: Spesifikasjoner (Schenck, 2021)

Gjenstand	Beskrivelse
Display	Touch screen, 768x1024 pixels
Interface	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ 2x serial (com1 - com2)</li> <li>▪ 4x USB</li> <li>▪ 2x Ethernet</li> <li>▪ VGA (2nd monitor med DVI)</li> <li>▪ alternativt: eksternt keyboard med trackball</li> </ul>
Språk	Engelsk og tysk
System	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Ubalanse måling i 1 plan</li> <li>▪ Automatisk toleransesammenligning</li> <li>▪ Polar display, numerisk og som vektormeter</li> <li>▪ Automatisk selvtest ved oppstart</li> </ul>
Nøyaktighet	Til grensen for den tilkoblede mekanikken
System design	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Modulært, vedlikeholds vennlige design</li> <li>▪ Strømforsyningsenhet med 115-230V + 15%-20% / 50-60Hz med overgang</li> <li>▪ Industriell PC som input enhet</li> </ul>
Alternativer	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Printer</li> <li>▪ Klassifisering, aksial boring, fresing</li> </ul>
Tilkobling	Strømforsyning med manuell justering av 115-230V + 15% -20% / 50-60Hz
Motstandsmoment	10 Nm
Løfteevne	0,5 – 20 kg



### 4.3 Grunnlag for valg

Etter en vurdering av de forskjellige alternativene endte den endelige anbefaling på løsningen ESD fra Schenck, som fyller de viktigste behovene og kravene for at avbalanseringen av impellerne blir gjort med høyeste kvalitet. Pumpe impellerne som Ydra AS produserer er definitivt noe man kan balansere statisk, det vil si at det ikke er nødvendig med dynamisk balansering (i 2-plan) av disse hjulene.

Den mest enkle måten å balansere disse delene på er med en ikke roterende balanseringsmaskin. Dette er en høy presisjons maskin med tre elektroniske sensorer, som fastslår ubalansen og angir mengden og vinkelen på ubalansen. For denne maskinen trenger du en «nøkkel» for å sentrere impelleren på maskinen. Avbalanseringsprosessen med denne maskinen tar svært kort tid og er veldig presis. Så fort ubalansen er funnet i impelleren kan man ta den av spindelen og raskt justere ubalansen med en søyleborremaskin basert på fastsatt lokasjon og mengde som må fjernes.

De ikke-roterende balanseringsmaskinene virker kun for impellere som trenger å bli avbalansert i et plan (statisk). For denne ESD maskinen er det derfor ikke mulig å oppgradere til et 2-plans målesystem, men fra tidligere vet vi at det ikke er nødvendig innenfor det gitte bruksområdet, og at denne maskinen derfor skal kunne gi like gode resultater som de dynamiske alternativene (Schenck-rotec, 2021).

Alternativt til denne løsningen vil være en roterende balanseringsmaskin, som da vil være tilgjengelig med enten 1-plan eller 2-plans måling. Målingen for å finne ubalansen blir her gjennomført under rotasjon. Disse dynamiske maskinene trenger som oftest mer plass og blir noe større da de må bli utstyrt med beskyttende materiell. Også verktøyet til de roterende løsningene er mer komplekse ettersom det er dreiemoment som må overføres. Når alt kommer til alt, tar også arbeidet med å måle ubalansen mer tid i disse maskinene da spindelen må akselereres til driftshastighet. Det vil deretter måles i noen sekunder før den igjen senker farten og en må åpne beskyttelsesanordningen etter full stans (Schenck-rotec, 2021).

På en roterende balanseringsmaskin har vi den fordelen at en kan montere på en søyleborremaskin direkte på balanseringsmaskinen for å rette opp i ubalansen. Men dette er igjen kun mulig om man balanserer i et-plan, og vil heller ikke være nødvendig da Ydra AS har en slik boremaskin som allerede brukes til dette spesifikke arbeidet. Når man ser på valg grunnlagene i kapittel 3.3 scorer ESD maskinen bra på de fleste kriteriene, som også fremkommer i sammenligningen mellom de forskjellige vurderte balanseringsmaskinene i

kapittel 3.5. ESD fra Schenck leveres til en svært fornuftig pris i forhold til bruksområde og de krav som er gitt.

#### **4.4 Fordeler og ulemper**

##### **4.4.1 Sikkerhet og plass**

For statiske maskiner vil det ikke være noe behov for sikkerhets materiell, ettersom de følger det statiske måleprinsippet uten rotasjon. Dette gjør maskinen mer sikker for operatørene å håndtere, den blir enklere og mindre plasskrevende, og den er samtidig mindre kostbar (Schenck-rotec, 2021).

##### **4.4.2 Lave kostnader**

Da det ikke er noe behov for dreiemomentoverføring, kan fast monteringen av rotorene på det statiske balanseringssystemet utføres med enkelt og billigere verktøy. Er denne monteringen ikke gjort tilfredsstillende, vil målesystemet CAB920 gi beskjed om dette. Tidligere kunne bare dynamiske maskiner kalibreres permanent, men nå med ny teknologi tillates også statiske balanseringsmaskiner som ESD å ha permanent kalibrering. Dette gjør det mulig å gjøre balanseringsmaskinen tilgjengelig umiddelbart uten behov for tidkrevende arbeid med å kalibrere. På grunn av dette blir nå endring til de forskjellige rotortypene gjort på en effektiv måte som ikke krever kalibrering av målesystemet for hver type impeller (Schenck-rotec, 2021).

##### **4.4.3 Effektivitet og vedlikehold**

En ytterligere fordel med Schenck sine statiske balanseringsmaskiner er robustheten de har, samt hvor lite den påvirker og blir påvirket av omgivelsene rundt seg i for eksempel en arbeidshall (Schenck-rotec, 2021). ESD balanseringsmaskinen er tilnærmet fri for slitasje som igjen vil sikre lave vedlikeholds- og driftskostnader over lengre perioder, nettopp fordi den består av få bevegelige deler. Med andre ord vil dette si at både den statiske balanseringsmaskinen ESD fra Schenck holder seg svært godt og er svært pålitelig over tid.

##### **4.4.4 Energi effektivitet**

På grunn av arbeidsprinsippene til disse maskinene er de statiske balanseringssystemene svært økonomiske under drift. Dette kan begrunnes med at ikke roterende maskiner ikke roterer under måling av ubalanse. Energien som kreves under balanseringsprosessen er dermed kun en brøkdel av energiforbruket som når du balanserer med en roterende balanseringsmaskin. Det eksisterer heller ikke tap av energi på grunn av luftmotstand med statisk måling (Schenck-rotec, 2021).

#### **4.4.5 Målesystem**

Balanseringsmaskinen ESD er utstyrt med måleenheten CAB920, og selv om den utfører avanserte målinger vil resultatene bli lagt frem på en forståelig måte. For å øke effektiviteten, vil målingene av ubalansen vises frem tydelig på et display, hvor nødvendig korreksjon vises frem enkelt i en vektor- og numerisk modus, som er like lett å forstå for nybegynnere som for erfarne fagpersoner (Schenck-rotec, 2021). Som et resultat av et godt utvalg av programvarealternativer, vil dette muliggjøre korte avbalanseringsprosesser for operatørene.

#### **4.4.6 Ekstra utstyr**

Schenck sin ESD balanseringsmaskin leveres kun med ett plans balansering. Andre statiske balanseringsmaskiner kan leveres med to-plans balansering, og det kan også de fleste dynamiske maskinene (som f.eks CMT-30V2FW maskinen). Basert på bruksområdet for slik balansering hos Ydra, anser en ikke dette som et problem, da ett-plan maskiner håndterer balansering veldig bra med akseptabel toleranse om ikke forholdet mellom bredde og diameter på impeller er for stort. ESD maskinen kan heller ikke få montert en søyleborremaskin som ekstrautstyr, noe som kan være veldig praktisk i noen tilfeller (Schenck-rotec, 2021).

Om en skulle sammenligne balanseringsmaskinen ESD med en annen maskin som CMT-30V2FW, vil en kunne se at sistnevnte har integrert drill og fres. Ikke bare har den integrert på maskinen, men vil også kunne utføre avbalanseringen av impelleren av seg selv. Dette er en oppgave som ESD ikke er i stand til utføre, men siden dette kan gjøres med egen søyleboremaskin, og en kan ha en mye enklere og mer robust balanseringsmaskin, så anses dette ikke som avgjørende for endelig valg av maskin.

## 4.5 Beskrivelse av balanseringsprosessen til ESD

Tabell 4: Balanseringsprosessen (Schenk, 2021)

Antall steg	Beskrivelse av stegene	Første rotor av en batch	Andre og tredje av en batch
Steg 1	Mekanisk oppsett av balanseringsmaskinen for rotortype - montering av passende rotorverktøy på ESD.	Ja	Nei
Steg 2	Legg første rotor på ESD og sentrer / klem fast første rotor.	Ja	Ja
Steg 3	Opprette en "rotor file" for hver rotor som balanseres for første gang eller hent fra eksisterende rotortyper. Hver gang en rotor med samme ID skal balanseres, kan rotortypen hentes tilbake. Forutsetning er at maskinen alltid må settes opp på samme måte for denne ID-en med samme verktøy.	Ja	Ja
Steg 4	Fortsett med indeks balanseringsprosedyren for å eliminere innflytelse på verktøyet.	Ja	Ja
Steg 5	Start ubalanse målingen.	Ja	Nei
Steg 6	Merk av på impelleren hvor ubalansen skal rettes (hvis nødvendig). Løsne impelleren hvis den er i toleranse.	Ja	Ja
Steg 7	Løsne rotoren og fjern rotoren for å korrigere ubalansen.	Ja	Ja
Steg 8	Rett opp ubalansen.	Ja	Ja
Steg 9	Sett impelleren tilbake på balanseringsmaskinen for å kontrollmåle.	Ja	Ja
Steg 10	Start ubalanse målingen.	Ja	Ja
Steg 11	Løsne rotoren igjen hvis den er i toleranse, eller fortsett igjen med trinn 6 til 10 hvis rotoren ikke er i toleranse.	Ja	Ja
Steg 12	Legg neste rotor av samme rotortype på maskinen og sentrer / klem den fast og fortsett med balansering.	Ja	Ja

#### 4.6 Hva følger med løsningen?

Etter å ha vært i kontakt med en av Schenck sine kontaktpersoner, har vi fått tildelt et eksempel på et tilbud med både hvilke komponenter som følger med og hvilke tilleggskomponenter som kan legges til ved bestilling.

Tabell 5: Komponent liste over ESD (schenck, 2021)

Antall	Hva	Beskrivelse
1	Balanseringsenhet ESD	Med flens og en stor vinkelskala. Vekt: 20kg og diameter: 1500 mm
1	Måleenhet CAB920 statisk	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Digital behandling av målte data for høy nøyaktighet.</li> <li>▪ Et farget og tydelig display som viser ubalanse.</li> <li>▪ Ergonomisk betjeningskonsept og datainngang via berøringsskjerm.</li> <li>▪ Flere programvaremoduler for universelle og spesielle balanseringsoppgaver.</li> </ul>
1	Maskinhus, stativ	Balanseringsenheten må plasseres på et kraftig bord, ikke i trekkluft eller i kjørebanelen til gaffeltrucker.
1	Støtte til keyboard, samt keyboard og datamus	Tastaturbrett montert på CAB-enheten med integrert datamus og USB-tilkobling.
1	Transport og pakking av utstyr	Leveringstid på ca. 16-18 uker fra Darmstadt.
1	Installasjon, igangkjøring og opplæring	Kontroll av installasjon og igangkjøring av balanseringsmaskinen samt opplæring av driftspersonalet til en av Schenck sine serviceteknikere.
1	Kabler	Alle kabler inkludert.

En har også mulighet for å legge til følgende komponenter ved bestilling hos Schenck:

- Programvare «Drilling correction» for CAB 920, for omberegning av ubalansemengden til boreddybde og antall hull inkl.
- Testplate for ESD (1,5kg), som er egnet for kalibrering og kontroll av maskinen.
- cenTec® balanseringsverktøy fra Schenck.
- Utvidelse av forsikring, 12 mnd – 24 mnd.
- 2 programvarer, et for balansering av store impellere og det andre er for å bestemme vinkelområder som ikke er tillatt for ubalansekorreksjon.

#### 4.7 Arbeidsområde

I tegningene av balanseringsmaskinen ESD i kapittel 7 kan man se at utstyret ikke er veldig plasskrevende. Maskinen vil kunne stå i et område i arbeidshallen sammen med andre maskiner og annet utstyr som brukes i prosessen. ESD måleenheten har et areal på ca. 0,16 m<sup>2</sup>, og datamaskinen et areal på ca. 0,25 m<sup>2</sup> (Schenck-rotec, 2021). Komponentene er med andre ord forholdsvis små, så et bord eller en form for støtte/ stativ vil holde som en arbeidsbenk for dette utstyret som en kan se på figur 30. Selv om et bord vil kunne ta mer plass enn systemet i seg selv, vil det ikke overskride noe større område enn 2 m<sup>2</sup>. Ettersom størrelsen på impellerne Ydra AS balanserer er nokså små, vil heller ikke disse ha noen innvirkning på arbeidsområdet.



Figur 30: Eksempel på hvordan arbeidsområde vil se ut (Schenck, 2021)

#### 4.8 Økonomi

For å kunne fatte en beslutning når de mulige løsningene ble sammenlignet og drøftet opp mot hverandre, var økonomi et viktig valggrunnlag. I den forbindelse gjorde prisen i sammen med andre valggrunnlag som kvalitet, funksjon og effektivitet at den endte løsningen kom på Schenck sin statiske balanseringsmaskin ESD.

Startprisen for denne balanseringsmaskin med balansenhet og måleenhet starter på litt over 400.000 NOK, men dersom man ønsker ekstra utstyr til programvaren for eksempel, eller annet tilbehør kan prisen variere +/- 90.000 NOK (Schenck-rotec, 2021).

Andre balanseringsmaskiner vi har vurdert, slik som Cimat sin CMT-30V1FW som er en mer omstendelig og større maskin enn ESD, har en startpris på 1,3 millioner NOK (Cimat, 2021). Men samtidig vil denne maskinen være en del større enn Schenck sin, og i prinsippet for stor til å passe inn i Ydra sin arbeidshall.

Precibalance sin V10-1S har en lav pris på 76.000 NOK, men oppfyller ikke alle de kravene som er definert (Precibalance, 2021).

Om en skulle kjøpe ESD vil Schenck sine serviceteknikere hjelpe med installasjon og igangkjøringen av produktet, samt sørge for opplæring av driftspersonalet. Videre vil de også hjelpe til med klargjøringen av adaptere, hjelpeverktøy og installasjon av minst en rotorfil til testformål.

Med denne balanseringsmaskinen vil ikke bare prosessen forenkles, den vil også være med på å effektivisere den, det vil si det vil kunne bli avbalansert mye flere impellere på kortere tid enn i dag, som igjen vil være svært positivt for bedriftens ønske om vekst i dette markedet. Operatøren vil derimot ikke bli helt frigjort fra denne delen av prosessen, men vil kunne avlastes i større grad, da det nå vil gå forttere å balansere. Dersom man også legger opp til å balansere flere batcher samtidig, vil det bli frigjort tid for operatøren for annet viktig arbeid.

Bruken av et patentert, nøyaktig målesystem gjør det mulig å måle ubalanse uten rotasjon. Dette er noen av fordelene dette vil gi:

- Lang levetid på grunn av liten slitasje og vedlikeholdsfri drift.
- Enkel og kostnadseffektiv automatisering ved enkel tilgjengelighet.
- Økonomisk rotorverktøy, da ingen dreiemomentoverføring er nødvendig.
- Tids- og kostnadsbesparelse ved eliminering av kalibreringsløp: Når de geometriske dataene til en rotor er angitt, tillater det permanente kalibrerte målesystemet effektivt arbeid med presise målinger (Schenck-rotec, 2021).

## 5. Verifikasjon

Innenfor svært mange områder finnes det standarder som brukes i en rekke situasjoner i samfunnet. En standards oppgave er å beskrive viktige sider av varer, arbeidsprosesser eller tjenester. Denne typen dokument blir utarbeidet gjennom en interessegruppe og blir godkjent av et anerkjent organ som beskriver felles regler, retningslinjer og egenskaper ved produkter og arbeidsprosesser (Ravnestad, 2021). I utgangspunktet er standarder frivillige å bruke, men likevel blir standarder ofte brukt som et krav for kvalitet på produktet i avtaler og kontrakter som inngås. De er også til for å gi regler for hvordan sertifisering, prøving og akkreditering skal utføres (NDLA, 2021).

### 5.1 ISO

ISO er et verdensomspennende forbund av nasjonale standardiseringsorganer. Arbeidet med å utarbeide og publisere internasjonale standarder utføres normalt gjennom ISO's tekniske komiteer (Snl, 2021). Flesteparten av deres standarder dreier seg om tekniske spesifikasjoner eller retningslinjer for å sikre at materialer, varer, prosesser og tjenester er gode nok for det formålet de er tenkt å ha (Standard Norge, 2021). En standard kan være alt fra noe som omhandler risikostyring til å være for eksempel en måleenhet.

ISO 2858 - Horizontal End Suction Centrifugal Pump (Max. pressure – 16 bar), Designation, nominal duty point and dimensions ISO 9905 – Single / multistage, vertical, close coupled Centrifugal pump - class 1 (most severe) ISO 5199 - Single / multistage, vertical, close coupled Centrifugal pump - class 2 ISO 9908 - Single / multistage, vertical, close coupled Centrifugal pump - class 3 (least severe) ISO 13709 – It is the same as API 610 ISO 15783 – Sealless Centrifugal pump
ISO 2858 – 1975 / 2010 ISO 9905 – 1994 / 2011 ISO 5199 – 1986 / 2002 ISO 9908 – 1993 / 2011 ISO 13709 – 2003 / 2009 ISO 15783 – 2002 / 2008
ISO 5199 + ISO 2858
34
125, 160, 200, 250, 315, 400 mm
16
3 mm
ISO 1940, G6.3
50
Customized to manufacturer
17500
> 0.5 m
137% < x < 110%
10
0.05 mm
4.8 mm/sec < 200 kW 5.6 mm/sec > 200 kW

Figur 31: Sammenligning av standarder (Norsk standard, 2021)



## 5.2 Standard ISO 21940-11

Balanseringsteknologien i dag kan redusere ubalanser til svært lave grenser, men ettersom det ikke vil være kostnadseffektivt å balansere til minste grense, er det derfor nødvendig å finne ut hvilket kvalitetskrav som passer for en balanserings oppgave. Avbalansering av impeller er en prosedyre der fordelingen av massen til hjulet kontrolleres, og om det er nødvendig blir den balansert etter ønsket toleranse. Standarden ISO 21940-11 gir regler for å beregne en akseptabel gjenværende ubalanse og har følgende egenskaper: Grove mangler ved ubalanse unngås, nytteløse og dyre balanseringsarbeider er unngått (ISO 21940-11, 2003). Ifølge denne standarden, er alle rotor klassifisert, avhengig av balanseringskravet. Balansering kvalitet G er et tall som definerer balanseringsnøyaktigheten som kreves for en impeller. Gradene er basert på maskindesign og er angitt i henhold til produktets størrelse, hvor impeller massen er en viss brøkdel av massen til den komplette maskinen (ISO 21940-11, 2003).

Tabell 6: Balanseringsgradene (Cimat, 2017)

Maskintyper (eksempler)	Balanse kvalitet (G)	Magnitude ( $e_{per-\Omega}$ mm/s)
-Landbruksmaskiner -Knusemaskiner -Drivaksel -Veivaksel	G 16	16
-Vifter -Pumper -Fly gassturbiner -Sentrifuger (impeller) -Marine turbiner -Etc.	G 6,3	6,3
-Kompressorer -Maskinverktøy -Elektriske motorer og generatorer -Gassturbiner -Etc.	G 2,5	2,5

Toleransen på den tillatte ubalansen i impelleren bestemmes på grunnlag av fem ulike metoder, som er basert på:

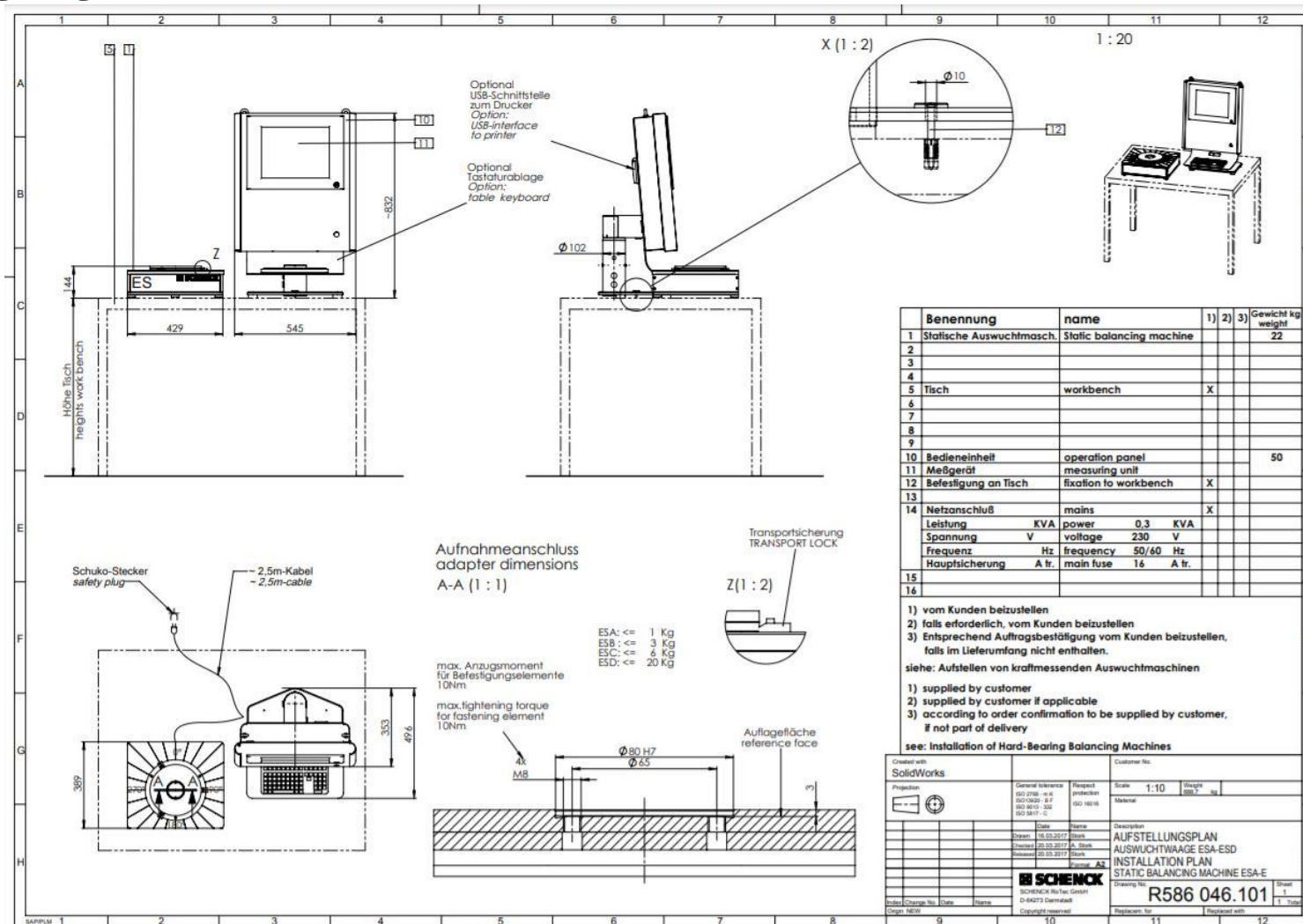
- Etablert erfaring med balanse toleranser.
- Begrensede vibrasjoner på grunn av ubalanse.
- Eksperimentell evaluering av tillatte gjenværende ubalanse.
- Begrensede bærekrefter på grunn av ubalanse.
- De ulike kvalitetsgradene, hentet fra langvarig praktisk erfaring med et stort antall forskjellige impellere.

(ISO 21940-11, 2003)

Disse balansekvalitetsgradene muliggjør beregning av tillatte gjenværende ubalanser.

Erfaring har vist at dette vil resultere i tilfredsstillende drift av impelleren i drift. Vi kan se ut ifra tabell 6 at klasse G 6,3 er mest relevant for Ydra AS som skal balansere impellere i sentrifugalpumpene sine, og har valgt en avbalanseringsmaskin deretter. Teknologien for balanseringsmaskiner er i stadig utvikling og forbedring. Impellere kan balanseres på flere plan, alt etter behov. I dette tilfellet er det blitt valgt en maskin som avbalanserer i ett plan, da vi sammen med Schenck har funnet at ett-plans balansering av de definerte impellerne til Ydra kan gjøres innenfor definert toleranse.

### 6. Tegninger og skisser

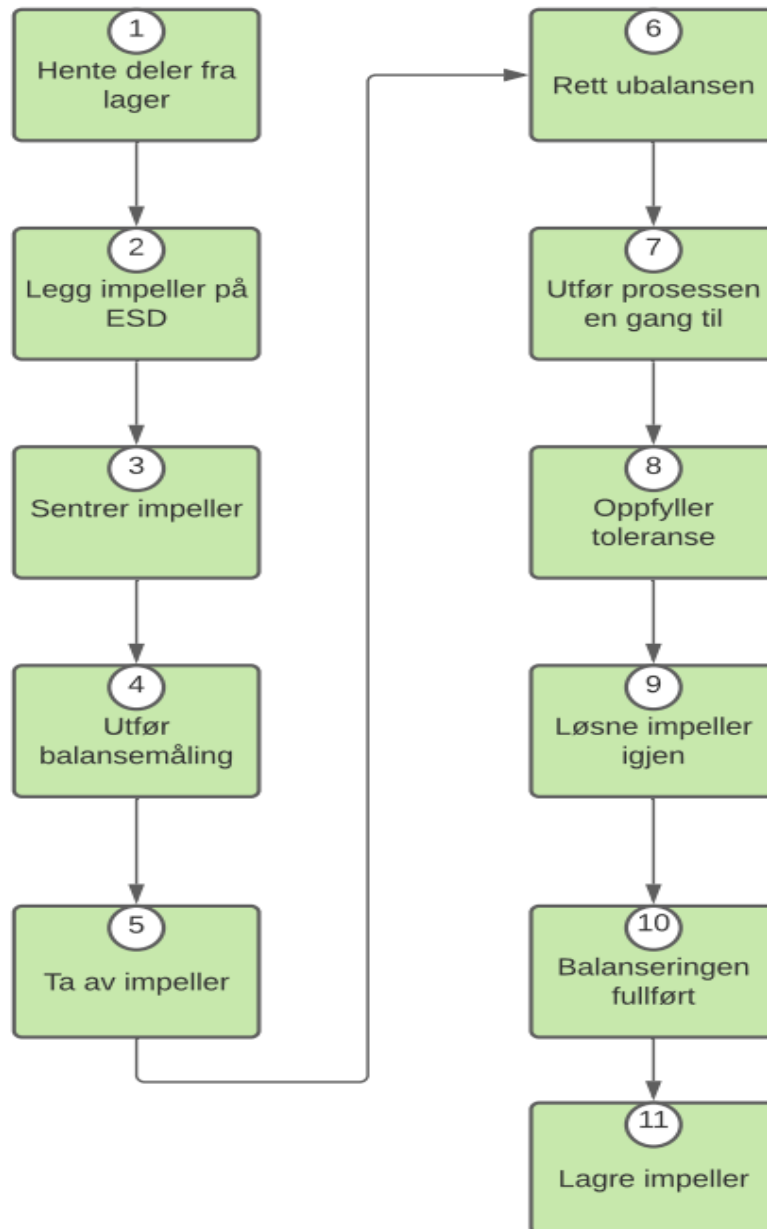


Figur 32: Tegninger av ESD maskinen (Schenck, 2021)

## 7. Løsningens virkemåte

### 7.1 Arbeidsprosess

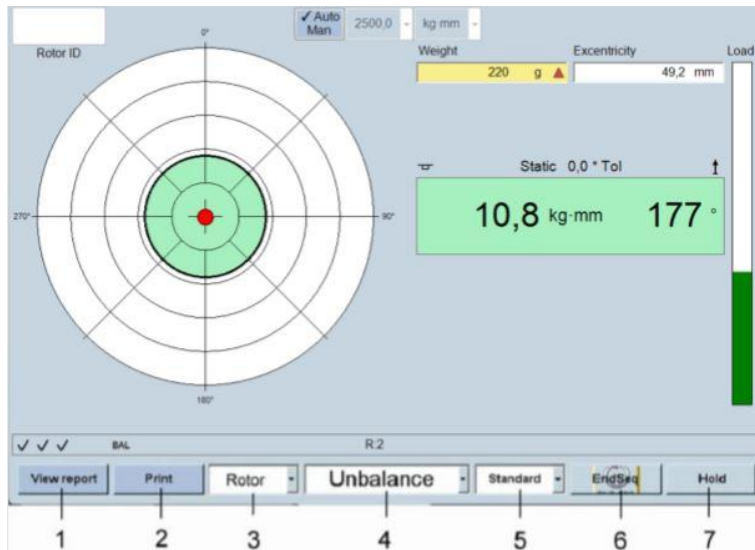
Impellerne vil fortsatt avbalanseres ved hjelp av søyleborremaskinen slik som i dag, men nå kan det gjøres i samarbeid med balanseringsmaskinen ESD. Flytskjemaet nedenfor viser en mulig metode til hvordan prosessen kan gjennomføres.



Figur 33: Flytskjema av prosess med ESD, figur: Yadu Nath Baral

## 7.2 Ulike data

I dette kapitlet blir det lagt frem ulike display. Det vil bli lagt frem noen enkle forklaringer til disse displayene og litt enkel informasjon av oppsett av sidene. På denne måten kan en bedre forstå produktet og man får et bedre innblikk av hvordan selve prosessen vil foregå. Dessuten blir man litt bedre kjent med oppsett og diverse funksjoner. I figurene under vil det bli vist displays med nummeringer, hvor det vil forklares nærmere hva de ulike tingene er til.



Figur 34: Measuring display (Schenck, 2021)

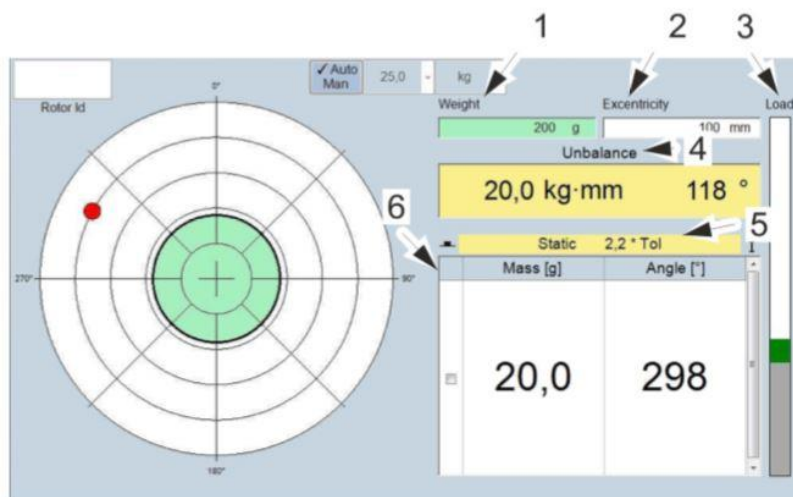
Her vil bare noen av disse funksjonene bli forklart, da ikke alt er like viktig for forståelsen:

2. Print: Her kan du printe ut din siste måling, inkludert dataen du har valgt i menyen.

4. Ubalanse: Her er det et lite utvalg av displayer, du kan velge mellom “unbalance”, “correction” og “measuring value table”.

7. Hold: med hold stoppes den nåværende målingen og måleverdien låses.

(Schenck-rotec, 2021)



Figur 35: Correction display (Schenck, 2021)

1. Her vises vekten til arbeidsstykket, peker pilen oppover er den under øvre vekt toleranse og peker den nedover er den under lavere vekt toleranse.
2. Eksentrisitet: arbeidsstykkets eksentrisitet i forhold til veieinstrumentets geometriske sentrum.
3. Last indikator: er den grønn, er den ok. Er den rød, er lasten overskredet.
4. Enhet: her vil ubalansen bli vist i gram eller i gmm.
5. Her blir det vist hvilken type toleranse som blir brukt og resultat.
6. Resultat: korreksjonsinstruksjoner på hvordan en skal få arbeidsstykket balansert. (Schenck-rotec, 2021)

### 7.3 Lagring av data

Med ESD er det mange spennende funksjoner, som vil komme hendig når man skal balansere. En av disse funksjonene er “Rotor file”, hvor man kan hente tidligere rotordata for ulike typer impellere, slik at man slipper å lage helt nye innstillinger for hver impeller en skal balansere (Schenck-rotec, 2021). Dette betyr med andre ord at det er mulig å bruke eksisterende rotorfiler som mal og en trenger bare å endre en liten mengde data om en skal bruke en ny impellertype.

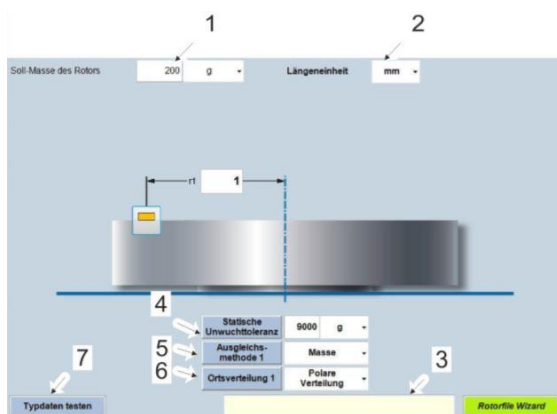
I ESD maskinen brukes det et filsystem til å administrere rotordata for hver impellertype, og før måling av disse impellertypene må justeringsprosedyrer utføres. Som en huske regel bør man bruke eksisterende data som mal når man skal lage en ny rotor fil, men med et nytt navn (Schenck-rotec, 2021). Ved å bruke en allerede eksisterende fil betyr dette at en stor mengde data relatert til den nye rotortypen allerede er lagt inn, og innlegging av ny data blir mindre omfattende.

Tabell 7: Hvordan lage en Rotor fil (Schenck, 2021)

Antall Steg	Beskrivelse av stegene
1	Lag en ny rotortype. Med menyen "Rotordata → open" her får du opp en liste over eksisterende rotortyper.
2	Velger så en rotortype fra listen som kan brukes som grunnlag for den nye rotortypen. Trykk på [OK] for å levere dataene. Du kan se de allerede lagrede dataene i kategoriene "Rotor settings" og "Rotor options".
3	Med "Rotor data → Save as" lagrer du dataene under navnet på den nye rotortypen. Og dataene vil nå være tilgjengelige for justering til den nye rotortypen.
4	Skriv inn dataene for den nye rotortypen. Du kan legge inn dataene i kategoriene "Rotor settings" og "Rotor options". Når dataene endres, vises en stjerne etter filnavnet ved siden av fanen "Measurement". Dette betyr at dataene er endret, men ennå ikke lagret i filsystemet.
5	Med menyen "Rotor data → save" lagres den nye dataen i datafilen. Og du har nå laget en nye rotor fil.

Av sikkerhetsmessige grunner anbefales det å foreta planlagt sikkerhetskopiering av dataene. Ved tap av data kan dataene gjenopprettes fra sikkerhetskopien. Regelmessig sikkerhetskopiering av visse data vil forhindre tap av viktig data. Konfigurasjonsdata, maskininnstillinger og rotorfiler samt nødvendige midlertidige filer for måleinstrumentet CAB920 er lagret i dataindeksen (Schenck-rotec, 2021).

Rotorfil display:



Figur 36: Eksempel på hva som må legges inn i en «rotorfil» (Schenck, 2021)

1. Her legges massen til arbeidsstykket inn.
  2. Enhet for lengde oppføres.
  3. Når man angir numeriske verdier, vil det tillatte verdiområdet vises.
  4. Her legges toleransen inn.
  5. Det må velges korreksjonsmetode
  6. Mens det her må velges ubalansfordeling.
- (Schenck-rotec, 2021)

## 7.4 Simulering av prosess

For å vise bedre hvordan prosessen gjennomføres, er det lagt til flere bilder med forklarende tekst under. Kontaktpersonen vår fra Schenck har laget en film om hvordan man enkelt kan avbalansere impelleren med balanseringsmaskinen ESD. For å simulere balanseringsprosessen er det brukt et testobjekt som impeller, impellerne vil vanligvis ha en mer variert fordeling av masse.

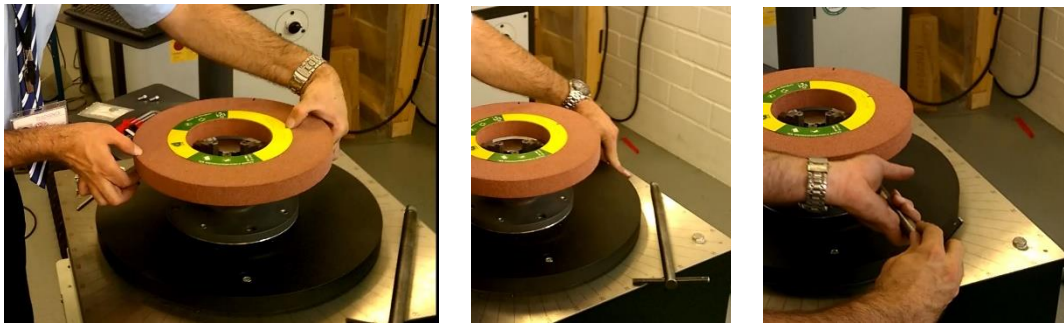


Figur 37: Impeller settes fast og sentreres med en type nøkkel (schenck, 2021)





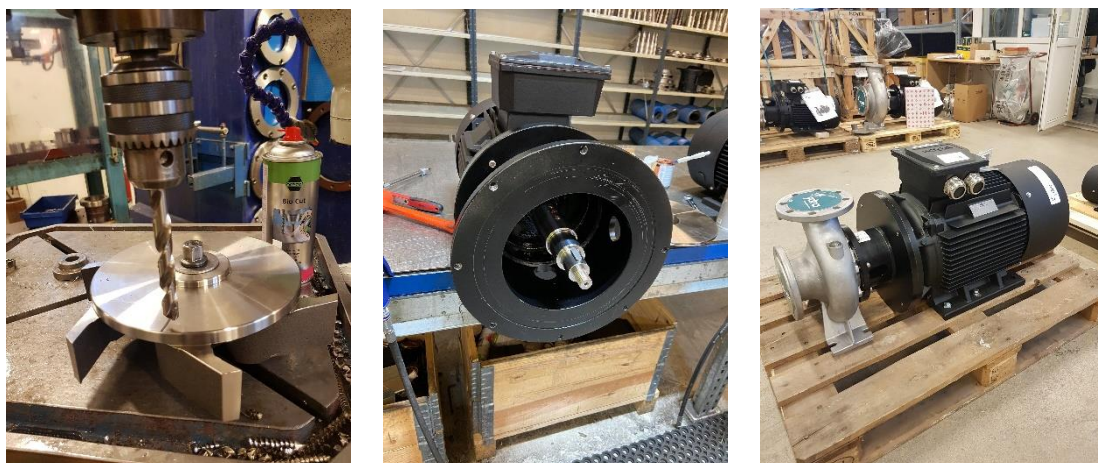
Figur 38: Her kan tidligere impellere med samme ID hentes ut, hvor innstillinger allerede er blitt lagt inn fra "rotorfiles" (Schenck, 2021)



Figur 39: Balanseringsprosedyren fortsettes for å eliminere innflytelse på maskinen (Schenck, 2021)



Figur 40: Målingen blir så gjennomført, resultatet blir deretter vist på displayet (Schenck, 2021)



Figur 41: Med resultatene kan man rette opp ubalansen, når impelleren er balansert kan man sette den inn i sentrifugalpumpen (Schenck, 2021)

## 7.5 Vedlikehold

Maskiner og utstyr representerer store verdier i dagens industribedrifter og er i mange tilfeller svært kostbart å kjøpe inn. En maskin består av mange ulike komponenter, og vi kaller gjerne de ulike mekaniske delene for maskinelementer. Maskinelementene kan deles inn i tre hovedgrupper: Brytere og måleinstrumenter, deler som overfører bevegelse og konstruksjonsdeler (NDLA, 2021). Vedlikehold av anlegg, utstyr, maskiner og arbeidsplasser er avgjørende for å fjerne farer på arbeidsplassen og skape et sikkert arbeidsmiljø.

Vedlikehold kan involvere inspeksjon, testing, service, justering, reparasjon eller utskiftning.

Vedlikehold av balanseringsmaskinen ESD omfatter ekstern rengjøring av lett tilgjengelige punkter og en grundig intern rengjøring, som også krever demontering av deler, forsyning av smøresteder med smøremiddel og endring av smøremiddel, samt periodisk inspeksjon, dvs. planlagt inspeksjon for å oppdage feil eller mangler som har skjedd eller er nært forestående (Schenck-rotec, 2021). Det er viktig å følge retningslinjene for produktsikkerhet når en håndterer olje, fett eller andre kjemiske stoffer. På grunn av muligheten for forbrenning, bruk varmt drivstoff og væsker med forsiktighet.

Tabell 8: Før en skal gjøre vedlikehold (Schenck, 2021)

metode	Hva må en gjøre?
Rengjør	Rengjør maskineriet / installasjonen, spesielt rørforbindelser og koblingsstykker, fra olje, drivstoff eller vaskemiddel.
Isolere	Isoler maskinen fra en hvilken som helst energikilde og beskytt den mot utilsiktet reaktivering: <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ koble maskinen eller utstyret fra hvilken som helst energiforsyning</li> <li>▪ Lås hovedkontrollenheter og trekk ut nøkkelen og / eller legg faresignal på hovedbryteren / hovedkontrollpanelet.</li> </ul>

Enkelt vedlikehold av maskin:

**Rengjøring:** Det er viktig å holde maskinen og arbeidsområdet i ren og ryddig tilstand, da oljelekkasjer eller fint sandslipepestøv kan danne en meget farlig og glatt overflate. Rengjør maskinen, spesielt koblinger og gjengede forbindelser for spor av olje, drivstoff eller konserveringsmidler før du utfører vedlikehold / reparasjon. Ikke bruk aggressive vaskemidler, bruk heller lofrie rengjøringskluter.

**Fuktighet:** Man bør passe på at alle maskindelene, spesielt strømførende komponenter, beskyttes mot fuktighet. Utsettes komponentene til maskinen for vann til tross for alle

forholdsregler, må man umiddelbart stoppe strømforsyningen til maskinen ved å aktivere hovedbryteren.

Data: For at datamaskinen skal opprettholde en god standard, er det viktig at den beskyttes mot spon, støv, fuktighet, støt, vibrasjoner og høye og lave temperaturer.

(Schenck-rotec, 2021)

## 7.6 Kalibrering

Ettersom dette er en målemaskin, bør den kalibreres med jevne mellomrom i henhold til kravene i ISO 9001. Kalibreringen av balanseringsmaskinen er en nødvendighet da man ønsker å vite om målenøyaktigheten til utstyret må justeres for å kunne avbalansere i henhold til ønsket standard. Typisk er det en årlig kalibrering for produksjonsutstyr. Da Schenck allerede har en vedlikeholds- og kalibreringskontrakt med en annen kunde i Haugesund, kan den årlige kalibreringsrunden samordnes i tid for å spare penger. Den årlige kalibreringen er til for å unngå måleavvik og feil i maskininnstillingene. Det utføres da en inspeksjon av maskinfunksjon og en grunnleggende test av målesystemet med mulig justering av maskin. Om en signerer en slik servicekontrakt med Schenck vil normalt gjelde i en periode på 2 år fra inngåelse. Hvis ingen av partene sier opp kontrakten minst 3 måneder før utløpet av kontraktperioden, vil den automatisk bli forlenget med et år (Schenck-rotec, 2021).

Med dagens målesystemer har ikke Schenck regelmessige programvareoppdateringer inkludert, men de tilbyr forskjellige oppgraderingspakker avhengig av enhetens alder. De har flere programvarealternativer som kan kjøpes i tillegg om ønskelig. For å kunne installere disse programmene sender de filer som må installeres på målesystemet (Schenck-rotec, 2021).

The screenshot shows a software interface titled 'Calibrations'. It contains two tables. The first table, 'Permanent calibration', has columns: M, Method, Method, Values, Values, Valid, and Req. It lists four methods: Position reference generator, Unbalance Calibration Data, Position Mass, and Position Drilling. Each method has 'Execute', 'Show', and 'Change' buttons, and 'Valid' and 'Req' checkboxes, all of which are checked. The second table, 'Typespecific calibration', has the same columns but only lists 'Unbalance Calibration Data' with 'Show', 'Valid', and 'Req' checkboxes, which are currently unchecked.

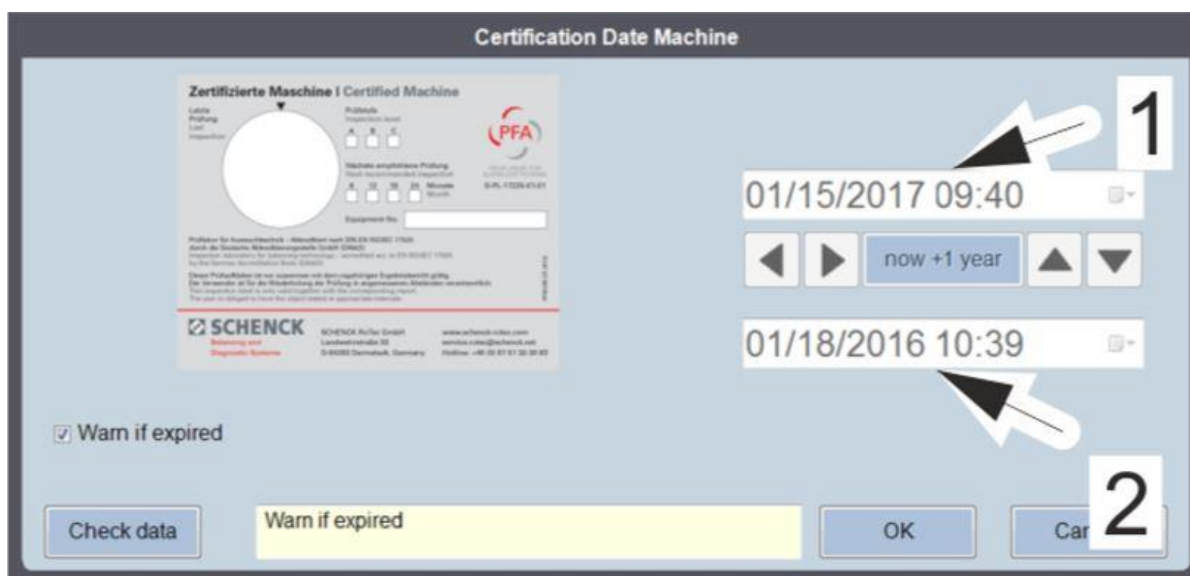
M	Method	Method	Values	Values	Valid	Req
<input checked="" type="checkbox"/>	Position reference generator	Execute	Show	Change	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
<input checked="" type="checkbox"/>	Unbalance Calibration Data	Execute	Show	Change	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
<input checked="" type="checkbox"/>	Position Mass	Execute	Show	Change	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
<input checked="" type="checkbox"/>	Position Drilling	Execute	Show	Change	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>

M	Method	Method	Values	Values	Valid	Req
<input type="checkbox"/>	Unbalance Calibration Data		Show		<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
<input type="checkbox"/>					<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
<input type="checkbox"/>					<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
<input type="checkbox"/>					<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

Figur 42: oversikt over ulike kalibrerings muligheter (Schenck, 2021).

Forskjellige kalibreringer er nødvendige for å betjene maskinen og balansere impellerne. Hvor status for nødvendige kalibreringer vil vises i en oversiktstabell, som vist i figur 42.



Figur 43: Neste kalibrering (Schenck, 2021).

Datoen for neste sertifisering av maskinen vises i det øvre tidsvinduet (1) og det nedre tidsvinduet (2) viser gjeldende dato. Datoen da maskinen skal sertifiseres, kan angis her av en Schenck RoTec-servicemedarbeider. Sertifiseringsdatoen vil også bli skrevet inn på klistremerket på maskinen (Schenck-rotec, 2021).

Før måling er det viktig å sjekke om alle utførte kalibreringsfunksjoner er gyldige og aktive. Det er også viktig å lagre rotortypedataene.

## **8. Helse, Miljø og Sikkerhet (HMS)**

HMS handler om å ta nødvendig hensyn til liv, helse, miljø og materiell. Det er derfor svært viktig at tiltakene som er knyttet til dette må opprettholdes før og under bruk.

### **8.1 Risikovurdering og Sikkerhetsinformasjon**

Sikkerhetsinstruksjonene beskriver generelle farer som kan oppstå i forbindelse med maskinen. Maskinen er designet slik at den holder etablerte standarder og sikkerhetsforskrifter. Ved feil bruk, feil betjening eller utilstrekkelig vedlikehold, kan maskinen bli en fare for personalet som jobber innen drift, installasjon eller service. Maskinen skal kun brukes til den tiltenkte oppgaven, samtidig som man er klar over de ulike sikkerhetstiltakene (Schenck-rotec, 2021).

Det er viktig at maskinen brukes i tråd med bruksanvisningen og at en er klar over sikkerhet og risiko forbundet med maskinen. Feil som kan bringe sikkerheten i fare må unngås. Det er brukerens ansvar å sørge for at sikkerhetskravene overholdes til alle tider. Alle som arbeider med eller rundt maskinen må være kjent med innholdet i den tekniske dokumentasjonen. Bedriften må sørge for at det er kun kvalifisert personell som bruker maskinen (Schenck-rotec, 2021). Dette gjelder i drift, håndtering av verktøy, service, vedlikehold og overvåking.

### **8.2 Standard**

For den type maskin som vi har valgt som løsning, er det satt mange strenge krav til hvilke sikkerhetstiltak som må opprettes for å bruke maskinen i sin produksjon. Det er nevnt noen viktige standarder nedenfor.

Verne- og sikkerhetssystemer:

Vi bruker standard ISO7475/DIN 45690 for verne- og sikkerhetssystemer. Spesifikke krav til beskyttelse for balanseringsmaskiner er fastsatt i denne standarden (Schenck-rotec, 2021).

Denne standarden beskriver Mekanisk vibrasjon, balanseringsmaskiner, kapslinger og andre beskyttende tiltak for målestasjon (Aenor, 2021).

Under drift:

Balanseringsmaskiner er måleinstrumenter og er derfor underlagt kravene i DIN ISO 10012. (Schenck-rotec, 2021). Denne standarden beskriver målehåndteringssystemer dvs. Krav til måleprosesser og måleutstyr. De spesifiserte kravene må oppfylles av operatøren for

kvalitetssikring av måleinstrumenter. Denne standarden kan også brukes når en setter opp systemet for måleinstrumenter (ISO, 2021).

Råd, service, reservedeler:

Testing og sertifisering av maskiner, maskindeler og arbeidsstandarder gjøres i henhold til ISO 9000 (Schenck-rotec, 2021). ISO 9000 er en beskrivelse av et kvalitetsstyringssystem. Kvalitetssikring av balansering og impeller gjøres i henhold til ISO 9001. ISO 9001-standarden er et dokument som beskriver alle kravene som trengs for å opprette og vedlikeholde et kvalitetsstyringssystem som beskrevet i ISO 9000 (Linford&Co, 2021).

### **8.3 Generelle forsiktighetsregler**

I alt arbeid relatert til drift, produksjon, montering, innstilling og sikkerhetsrelevante deler av maskinen skal gjøres som det er spesifisert i instruksene. Prosedyrer for inspeksjon, vedlikehold og reparasjon, aktivering og deaktivering må også gjøres med hensyn til instruksjonene (Schenck-rotec, 2021).

#### **Sikkerhetstiltak under drift**

Med drift menes det arbeidet som for eksempel å bytte deler, måling og testing, observasjon av testkjøring, samt mating og transport av arbeidsemner, materialer, verktøy osv. Det er viktig at bruksanvisningen overholdes under bruk av maskinen. Bortsett fra betjeningspersonalet, må ingen andre personer være til stede i nærheten av maskinen under drift (Schenck-rotec, 2021).

Før du slår på hovedbryteren og styrespenningen, er det viktig å kontrollere at:

- Alt personell er utenfor maskinens faresone.
- Alle delene er satt opp riktig.
- Påkrevd verneutstyr er i bruk.
- Alle skruene til balanseringsmaskinen, ubalansekorreksjon og drivenhetene er korrekte (Schenck-rotec, 2021).

#### **Sikkerhetstiltak i tilfelle problemer oppstår**

Avvik fra normal ytelse indikerer mulig svekkelse av funksjoner til en enhet. Typiske tegn på mulig feil er høyere strømforbruk, variasjoner i hastighet, høy temperatur i maskin, vibrasjoner, uvanlige lyder eller lukt, osv. (Schenck-rotec, 2021).

For å forhindre skader eller sammenbrudd, som kan føre til personskader eller materielle skader, må følgende tiltak gjøres:

- Slå av maskinen umiddelbart.
- Ta i bruk sikkerhets og risikotiltak, for å unngå maskin- eller personskader.
- Gi beskjed til ansvarlig vedlikeholds- eller reparasjonspersonell.

(Schenck-rotec, 2021)

### **Sikkerhetstiltak under vedlikeholdsarbeid**

Vedlikehold betyr rengjøring av lett tilgjengelige steder på maskinen og intern grundig rengjøring. Det kan også kreves demontering av deler. Det er viktig å overholde periodisk inspeksjon, dvs. planlagt inspeksjon for å oppdage feil eller mangler som har skjedd eller kan skje om ikke så lenge.

Bare kvalifiserte, instruerte og autoriserte personer må å utføre dette arbeidet. Det er viktig å gjøre noen tiltak før og under vedlikeholdsarbeid (Schenck-rotec, 2021). Under er noen av tiltakene som må gjøres:

Før vedlikeholdsarbeid:

- Rengjør maskin, spesielt rørforbindelser og koblingsutstyr.
- Isoler maskinen fra alle energikilder og vær sikker på at det ikke plutselig blir aktivert igjen.

Under vedlikeholdsarbeid

- Verne- og sikkerhetsutstyr er installert og er klar til bruk.
- Alle har forlatt maskinens faresone

(Schenck-rotec, 2021)

## 8.4 Miljø

Det er spesielt viktig å håndtere måleenheten med forsiktighet, på grunn av dens høye følsomhet. For å sikre stor nøyaktighet i måleresultatene, er det viktig å følge følgende instruksjoner:

- Velg en stabil og flat arbeidsflate for å sette opp vekten.
- Plasser vekten på et sted der den ikke blir forstyrret av vibrasjon.
- Vekten må ikke utsettes for høy temperatur og fuktighet.
- Unngå lufttrekk under målingene, som for eksempel kan være forårsaket av åpne vinduer. Forsikre deg om at skalaen er dekket når det er nødvendig.
- Unngå vibrasjoner ved opplasting og når vekten tas av.

(Schenck-rotec, 2021)



## 9. Konklusjon

Målsettingen for oppgaven var å foreslå en forbedret metode av dagens løsning slik at balanseringsprosessen ved balansering av impellere hos Ydra AS ble mer effektiv og fremdeles utført i henhold til definert standard. For å nå formålet om å øke effektiviteten, samt spare tid og utføre prosessen etter en gitt toleranse, er det blitt anbefalt en løsning på bakgrunn av kvalitet, funksjon og økonomi. Dette arbeidet er innarbeidet i denne rapporten, hvor den foreslåtte løsningen er forklart og dokumentert.

Ut ifra de mulige løsningene som er diskutert i denne rapporten, utmerker den statiske balanseringsmaskinen ESD fra Schenck seg. Vi har gjennom vårt arbeide vært i kontakt med ulike leverandører av forskjellige typer balanseringsmaskiner, og har utarbeidet en løsning som anbefales for Ydra AS.

ESD statisk balanseringsmaskin fra Schenck er anbefalt utfra:

- Ivaretar toleransekravene, høyere presisjon enn dagens balanseringsmetode hos Ydra
- Ivaretar balansering av Ydra's produktspekter av impellere
- Statisk balansering betyr mer robuste maskiner med lite bevegelige deler, og dermed lang levetid, lite behov for større vedlikehold, samt gir høy oppetid
- Enkel betjening – krever ikke mye opplæring
- Lite plasskrevende, kan installeres enkelt i nåværende arbeidsområde
- Balanseringen kan gjøres på kort tid, som frigir personell til annet arbeid, og samtidig ivaretar Ydra's ambisjon om vekst i dette markedet med produksjon og service av impellere (sentrifugalpumper)
- Forholdsvis lav anskaffelseskostnad
- Liten sikkerhetsrisiko for de som opererer maskinen da den ikke har bevegelige deler, samt at den i liten grad påvirker eller påvirkes av arbeidsmiljø
- Eksisterende utstyr som søyleboremaskin kan brukes i det videre arbeid

## 10. Veien videre

Vi har gjennom vår rapport framskaffet en del underlag som danner grunnlaget for den løsningen vi har anbefalt. Før en eventuelt går til anskaffelse av ESD fra Schenck bør følgende arbeid gjøres for å underbygge valg av endelig løsning. Dette bør som et minimum omfatte følgende:

- Videreføre kontakt med Schenck for videre detaljering av behov og krav.
- Avklare leveringstid, og rutiner for vedlikehold og service.
- Gjøre en kost-nytte-analyse for å vurdere besparelser i tid og arbeidskostnader ved å bruke nytt utstyr, sett i forhold til anskaffelseskostnaden av utstyret.
- Om mulig, sjekke referanser for å tilegne seg erfaringer fra andre som bruker dette produktet.
- Etablere en plan for anskaffelse, installasjon, opplæring og bruk av nytt balanseringsutstyr.
- Når utstyret har vært i bruk en periode anbefales det at det gjøres en analyse hvor en vurderer om utstyret har ivaretatt de mål som ble satt. I tillegg bør det vurderes å lage en erfaringsrapport for å kunne analysere brukernes erfaring med det nye utstyret. Slike erfaringsrapporter er nyttige for å vurdere måloppnåelse samt gi viktige innspill ved vurdering og kjøp av eventuelt annet utstyr.

## 11. Bibliografi

- Aenor.* (2021, april 14). Hentet fra DIN ISO 7475: <https://www.aenor.com/normas-y-libros/buscador-de-normas/din?c=69486128>
- Ahrinet.* (2021, mars 2). Hentet fra Mechanical balancing of impellers: [https://ahrinet.org/App\\_Content/ahri/files/Guidelines/AHRI\\_Guideline\\_G\\_IP\\_2016.pdf](https://ahrinet.org/App_Content/ahri/files/Guidelines/AHRI_Guideline_G_IP_2016.pdf)
- Al-Obaidi, A. (2018). Experimental and numerical investigations on the cavitation phenomenon in a centrifugal pump. *Cavitation*.
- Anagnostopoulos, J. S. (2006). Numerical calculation of the flow in a centrifugal pump impeller using cartesian grid. *Numerical method*, ss. 124-126.
- Anspach, J. (2011, April 17). *Solving a cavitation problem*. Hentet fra Jacpump: <https://jaccpump.wordpress.com/2011/04/17/solving-a-cavitation-problem/>
- Avtopilot-center.* (2021, mars 2). Hentet fra Balanserer roterende deler. Hvordan dynamisk balansering kan øke motorens levetid: <https://avtopilot-center.ru/no/balansirovka-vrashchayushchih-sya-detalei-kak-dinamicheskaya-balansirovka-sposobna-uvlechit-resurs-raboty-dvi.html>
- Axflow.* (2021, februar 16). Hentet fra Sentrifugalpumper: <https://www.axflow.com/nb-no/katalog/produkter/pumper/sentrifugalpumper>
- Bachus, L. &. (2003). *Know and understand centrifugal pumps*. Amsterdam: Elsevier.
- Bhaskar, A. K. (2012). Dynamic balancing of centrifugal pump impeller. *International journal of emerging technology and advanced engineering*, ss. 409-413. Hentet fra Dynamic balancing of centrifugal pump impeller.
- Castlepumps.* (2021, februar 23). Hentet fra Pump impellers - The types & their impact: <https://www.castlepumps.com/info-hub/pump-impellers-the-types-their-impact/>
- CCOHS.* (2021, april 13). Hentet fra Vibration - introduction: [https://www.ccohs.ca/oshanswers/phys\\_agents/vibration/vibration\\_intro.html#:~:text=A%20complete%20cycle%20of%20vibration,equal%20one%20cycle%20per%20second](https://www.ccohs.ca/oshanswers/phys_agents/vibration/vibration_intro.html#:~:text=A%20complete%20cycle%20of%20vibration,equal%20one%20cycle%20per%20second)
- Chong-Won, L. (1993). *Vibration analysis for rotors*. Springer Science & business media.
- Cimat.* (2021, mars 10). Hentet fra About us: <https://www.cimat-balancing.com/about-us/>
- Cimat.* (2021). *Operation manual*, 10-67.
- Deuschle. (2021). *Balancing Service*. Hentet fra Deuschle: [http://www.deuschle.co.kr/en/?page\\_id=17](http://www.deuschle.co.kr/en/?page_id=17)
- Empoweringpumps.* (2021, april 15). Hentet fra Vibration: ANSI centrifugal pump: : <https://empoweringpumps.com/psg-griswold-vibration-ansi-centrifugal-pump/>
- Fluidhandling. (2019). *Pump Cavitation What Happens and What Causes It?* Hentet fra Fluidhandlingpro: <https://fluidhandlingpro.com/pump-cavitation-what-happens-and-what-causes-it/>
- Gary K. Grim, J. W. (2021, mars 5). The basics of balancing. *Balance technology*. Hentet fra <https://balancetechnology.com/wp-content/uploads/2014/02/Basics-of-Balancing-202.pdf>

- Hamnøy.* (2021, januar 28). Hentet fra Ydra AS: <https://hamnøy.no/bedrifter/hatteland/ydra-as/>
- Hines industries.* (2021, april 19). Hentet fra Balancing pump impellers: <https://www.hinesindustries.com/resources/articles/164-balancing-pump-impellers>
- Holt, D. (2021, februar 17). *Docplayer.* Hentet fra Kjemiprosessfag roterende utstyr: <https://docplayer.me/9593928-Kjemiprosessfag-roterende-utstyr.html>
- ISO. (2021, april 14). Hentet fra ISO 10012:2003: <https://www.iso.org/standard/26033.html>
- ISO 21940-11. (2003). *Mechanical vibration — Balance quality requirements for rotors in a constant (rigid) state, Part 1: specification and verification of balance tolerances. ISO 21940-11.*
- JAES-Company (Regissør). (2019). *How do CENTRIFUGAL PUMPS work? Application of the Bernoulli Equation* [Film].
- JP-balancing.* (2021, april 25). Hentet fra Company profile: <https://www.jp-balancer.com/menu/company-profile.html>
- JP-balancing. (2021). *PHLD-16*, 1.
- King, M. (2021, april 9). *Fluidflow.* Hentet fra Operation efficiency of centrifugal pumps: <https://fluidflowinfo.com/operating-efficiency-of-centrifugal-pumps/>
- Larsen, D. (2021, februar 19). *Bedriftsblogg.* Hentet fra Pumper: <http://taf12-david.blogspot.com/p/pumper.html>
- Linford&Co.* (2021, april 14). Hentet fra What is ISO 9000?: <https://linfordco.com/blog/what-is-iso-9000/>
- Mechanical balance of impellers . (2021, mars 2). *balancing methods*, ss. 4-5. Hentet fra [https://ahrinet.org/App\\_Content/ahri/files/Guidelines/AHRI\\_Guideline\\_G\\_IP\\_2016.pdf](https://ahrinet.org/App_Content/ahri/files/Guidelines/AHRI_Guideline_G_IP_2016.pdf)
- NDLA. (2021, mars 4). Hentet fra Standardisering: <https://ndla.no/subject:28/topic:bba17699-e3e1-448d-8a0c-52c15f24ef4a/topic:1:58274/resource:1:58315?filters=urn:filter:29212872-62d6-4555-89fd-b85e7f3f9411>
- NDLA. (2021, mars 30). Hentet fra Produksjon og tjenester: <https://ndla.no/nb/subject:28/topic:1:105763/topic:1:82792?filters=urn:filter:84d4651b-fc52-4876-a066-f8567ecf79a6>
- NDLA. (2021, april 15). Hentet fra Sentrifugalpumpe: <https://ndla.no/subject:28/topic:58141a86-a9d7-4789-b6f9-958d1d8af05e/topic:1:53805/topic:1:121943/resource:d1a548c7-aea3-4199-be47-9ea59c122ec8?filters=urn:filter:5a5cac3f-46ff-4f4d-ba95-b256a706ec48>
- Norfield, D. (2011). *Practical balancing of rotating machinery.* Elsevier.
- Notmywar.* (2021, mars 2). Hentet fra Hva er dynamisk balansering?: <https://www.notmywar.com/hva-er-dynamisk-balansering/>
- Nuclear-power.* (2021, april 29). Hentet fra Pump theory - euler turbomachine equations: <https://www.nuclear-power.net/nuclear-engineering/fluid-dynamics/centrifugal-pumps/eulers-turbomachine-equations/>

- Pajkovic, A. (2021, mars 4). *Pumpengineer*. Hentet fra Improving balancing processes: <https://www.pumpengineer.net/webarticles/2019/02/12/improving-balancing-processes.html>
- Powerzone*. (2021, februar 22). Hentet fra Centrifugal pump: <https://www.powerzone.com/resources/glossary/centrifugal-pump>
- Precibalance*. (2021, februar 11). Hentet fra Flywheel balancing machine: <https://www.precibalance.com/flywheel-balancing-machine/>
- Precibalance*. (2021). *Technical specifications V10-1S*, 1-2.
- PrecisionBalancing*. (2021, Februar 9). Hentet fra What is balancing?: <http://www.precisionbalancing.com.au/dynamic-static-balancing.html>
- Pumpman*. (2021, februar 28). Hentet fra Maintain pumps operation with impeller balancing: <https://pumpman.com/maintain-pumps-operation-with-impeller-balancing/>
- Pumps&systems*. (2021, april 8). Hentet fra The role efficiency in pump selection: <https://www.pumpsandsystems.com/role-efficiency-pump-selection-part-1>
- Pumps&systems*. (2021, april 8). Hentet fra Centrifugal pump efficiency - when is efficiency important?: <https://www.pumpsandsystems.com/centrifugal-pump-efficiency-when-efficiency-important>
- Ravnestad, B. (2021, mars 4). *Ravnestad*. Hentet fra Hva er en standard?: <https://ravnestad.net/2014/09/05/hva-er-en-standard/>
- Schenck-rotec*. (2021, mars 17). Hentet fra History: <https://schenck-rotec.com/company/about-schenck-rotec/history.html>
- Schenck-rotec*. (2021). *Static balancing systems*, 1-5.
- Schenck-rotec*. (2021). *Vertical balancing systems*, 1-2.
- Schenck-rotec*. (2021). *Technical documentation*.
- Schenck-rotec*. (2021). *Eksempel på tilbud fra Schenck*.
- Schenck-rotec*. (2021). *Eksempel på service kontrakt*.
- Snl*. (2021, mars 4). Hentet fra ISO: <https://snl.no/ISO>
- Standard Norge*. (2021, mars 4). Hentet fra ISO-standarder: <https://www.standard.no/standardisering/iso-standarder/>
- Static balancing systems*. (2021). *Schenck*.
- Techplayon*. (2021). *Wavelength, Frequency, Amplitude and phase – defining Waves !* Hentet fra Techplayon: <https://www.techplayon.com/wavelength-frequency-amplitude-phase-defining-waves/>
- Ydra*. (2021, januar 28). Hentet fra Om Ydra: <https://www.ydra.no/om-ydra>
- Yedidiah, S. (1996). *Centrifugal pump users guidebook*. Chapman & hall.

Yunus A. Cengel, J. M. (2014). *Fluid mechanics - fundamentals and applications 3rd edition*. New York: McGraw Hill Education.

Øwre-Johnsen. (2021, februar 17). Hentet fra Sentrifugalpumper: <https://owre-johnsen.no/pumper/sentrifugalpumper/>

## Vedlegg

### Vedlegg 1 – Liste over impellere

#### OVERSIKT OVER PRODUKSJONTEGNINGER (DCD=DIM. HULLSIRKEL, Ø DIA = YTRE DIAMETER)

50 Hz VRG:	kW / Pol		AKSLING	IMPEL.	MELLOMSTYKKER				PAKKBOKS	PUMPEH.
					Lengde	DCD M.	DCD P.	Ø DIA.		
VRG 101	0,75	2p	19/32tetn.	115 x 7	L=73	M=165	P=161	200/180	-INGEN-	161 x 4stk
VRG 101,5	1	2p	19/32tetn.	115 x 13	L=73	M=165	P=161	200/180	-INGEN-	161 x 4stk
VRG 102	1,5	2p	24/32tetn.	115 x 17	L=73	M=165	P=161	200/180	-INGEN-	161 x 4stk
VRG 103	2,2	2p	24/32tetn.	125 x 19	L=73	M=165	P=161	200/180	-INGEN-	161 x 4stk
VRG 204	3	2p	28/35tetn.	131 x 20	L=114	M=215	P=182	250/205	Ø151,5/ø55	182 x 3stk
VRG 205	4	2p	28/35tetn.	135 x 22	L=114	M=215	P=182	250/205	Ø151,5/ø55	182 x 3stk
VRG 207	5,5	2p	38/35tetn.	141 x 22	L=127	M=265	P=190	300/215	Ø155/ø55	190 x 4stk
VRG 210	7,5	2p	38/35tetn.	148 x 27	L=127	M=265	P=190	300/215	Ø155/ø55	190 x 4stk
VRG 307	5,5	2p	38/35tetn.	141 x 23	L=127	M=265	P=237	300/265	Ø206/ø55	237 x 4stk
VRG 310	7,5	2p	38/35tetn.	151 x 24	L=127	M=265	P=237	300/265	Ø206/ø55	237 x 4stk
VRG 315	11	2p	42/35tetn.	160 x 24	L=161	M=300	P=237	350/265	Ø206/ø55	237 x 4stk
VRG 320	15	2p	42/35tetn.	171 x 27	L=161	M=300	P=237	350/265	Ø206/ø55	237 x 4stk
VRG 325	18,5	2p	42/35tetn.	181 x 27	L=161	M=300	P=237	350/265	Ø206/ø55	237 x 4stk
VRG 325-7	5,5	4p	38/35tetn.	181 x 27	L=127	M=265	P=237	300/265	Ø206/ø55	237 x 4stk
VRG 407	5,5	4p	38/35tetn.	188 x 40	L=127	M=265	P=284	300/320	Ø256/ø55	284 x 7stk
VRG 410	7,5	4p	38/35tetn.	208 x 40	L=127	M=265	P=284	300/320	Ø256/ø55	284 x 7stk
VRG 415	11	4p	42/35tetn.	231 x 38	L=161	M=300	P=284	350/320	Ø256/ø55	284 x 7stk
VRG 440	30	2p	55/50tetn.	182 x 40	L=173	M=350	P=284	400/320	Ø256/ø80	284 x 7stk
VRG 460	45	2p	55/50tetn.	204 x 39	L=173	M=400	P=284	450/320	Ø256/ø80	284 x 7stk
VRG 515	11	4p	42/50tetn.	224 x 46	L=173	M=300	P=350	350/370	Ø306/ø80	350 x 7stk
VRG 520	15	4p	42/50tetn.	234 x 45	L=173	M=300	P=350	350/370	Ø306/ø80	350 x 7stk
VRG 525	18,5	4p	48/50tetn.	245 x 43	L=173	M=300	P=350	350/370	Ø306/ø80	350 x 7stk
VRG 530	22	4p	48/50tetn.	261 x 43	L=173	M=300	P=350	350/370	Ø306/ø80	350 x 7stk
VRG 530-10	7,5	6p	42/50tetn.	261 x 43	L=173	M=300	P=350	300/370	Ø306/ø80	350 x 7stk
VRG 575	55	2p	60/50tetn.	205 x 45	L=204	M=500	P=350	550/370	Ø306/ø80	350 x 7stk

60 Hz VRG:	kW / Pol		AKSLING	IMPEL.	MELLOMSTYKKER				PAKKBOKS	PUMPEH.
					Lengde	DCD M.	DCD P.	Ø DIA.		
VRG 101-2	1,5	2p	24/32tetn.	115 x 7	L=73	M=165	P=161	200/180	-INGEN-	161 x 4stk
VRG 101,5-3	2,2	2p	24/32tetn.	115 x 13	L=73	M=165	P=161	200/180	-INGEN-	161 x 4stk
VRG 102-4	3	2p	28/35tetn.	115 x 17	L=122,5	M=215	P=161	250/182	Ø133,5/ø55	161 x 4stk
VRG 103-5	4	2p	28/35tetn.	125 x 19	L=122,5	M=215	P=161	250/182	Ø133,5/ø55	161 x 4stk
VRG 204-7	5,5	2p	38/35tetn.	131 x 20	L=128	M=265	P=182	300/205	Ø151,5/ø55	182 x 3stk
VRG 205-10	7,5	2p	38/35tetn.	135 x 22	L=128	M=265	P=182	300/205	Ø151,5/ø55	182 x 3stk
VRG 207-15	11	2p	42/35tetn.	141 x 22	L=161	M=300	P=190	350/210	Ø155/ø55	190 x 4stk
VRG 210-20	15	2p	42/35tetn.	148 x 27	L=161	M=300	P=190	350/210	Ø155/ø55	190 x 4stk
VRG 307-15	11	2p	42/35tetn.	141 x 23	L=161	M=300	P=237	350/265	Ø206/ø55	237 x 4stk
VRG 310-20	15	2p	42/35tetn.	151 x 24	L=161	M=300	P=237	350/265	Ø206/ø55	237 x 4stk
VRG 315-25	18,5	2p	42/35tetn.	160 x 24	L=161	M=300	P=237	350/265	Ø206/ø55	237 x 4stk
VRG 320-40	30	2p	55/50tetn.	171 x 27	L=173	M=350	P=237	400/265	Ø206/ø80	237 x 4stk
VRG 325-15	11	4p	42/35tetn.	181 x 27	L=161	M=300	P=237	350/265	Ø206/ø55	237 x 4stk
VRG 325-40	30	2p	55/50tetn.	181 x 27	L=173	M=350	P=237	400/265	Ø206/ø80	237 x 4stk
VRG 407-15	11	4p	42/35tetn.	188 x 40	L=161	M=300	P=284	350/320	Ø256/ø55	284 x 7stk
VRG 410-20	15	4p	42/35tetn.	208 x 40	L=161	M=300	P=284	350/320	Ø256/ø55	284 x 7stk
VRG 415-25	18,5	4p	42/35tetn.	231 x 38	L=161	M=300	P=284	350/320	Ø256/ø55	284 x 7stk
VRG 440-75	55	2p	60/50tetn.	182 x 40	L=204	M=500	P=284	550/320	Ø256/ø80	284 x 7stk
VRG 515-25	18,5	4p	48/50tetn.	224 x 46	L=173	M=300	P=350	350/370	Ø306/ø80	350 x 7stk
VRG 520-40	30	4p	55/50tetn.	234 x 45	L=173	M=350	P=350	400/370	Ø306/ø80	350 x 7stk
VRG 525-40	30	4p	55/50tetn.	245 x 43	L=173	M=350	P=350	400/370	Ø306/ø80	350 x 7stk
VRG 530-20	15	6p	48/50tetn.	261 x 43	L=173	M=300	P=350	350/370	Ø306/ø80	350 x 7stk
VRG 530-50	37	4p	60/50tetn.	261 x 43	L=204	M=400	P=350	450/370	Ø306/ø80	350 x 7stk

## Høytrykkspumper:

50 Hz VRF:	kW / Pol		AKSLING	IMPEL.	MELLOMSTYKKER				PAKKBOKS	PUMPEHUS
					Lengde	DCD M.	DCD P.	Ø DIA.		
VRF 305N	4	2p	28/35tetn.	175 x 6	L=114	M=215	P=237	250/260	Ø206/ø55	237 x 4stk
VRF 307N	5,5	2p	38/35tetn.	186 x 7	L=127	M=265	P=237	300/260	Ø206/ø55	237 x 4stk
VRF 310	7,5	2p	38/35tetn.	192 x 8	L=127	M=265	P=237	300/260	Ø206/ø55	237 x 4stk
VRF 310N	7,5	2p	38/35tetn.	196 x 12	L=127	M=265	P=237	300/260	Ø206/ø55	237 x 4stk
VRF 315	11	2p	42/35tetn.	196 x 12	L=161	M=300	P=237	350/260	Ø206/ø55	237 x 4stk
VRF 415	11	2p	42/35tetn.	230 x 5	L=161	M=300	P=284	350/315	Ø249,5/ø55	284 x 8stk
VRF 420	15	2p	42/35tetn.	243 x 6,5	L=161	M=300	P=284	350/315	Ø249,5/ø55	284 x 8stk
VRF 425	18,5	2p	42/35tetn.	243 x 8,5	L=161	M=300	P=284	350/315	Ø249,5/ø55	284 x 8stk
VRF 430	22	2p	48/50tetn.	240 x 14	L=173	M=300	P=297	350/315	Ø256/ø80	297 x 8stk
VRF 440	30	2p	55/50tetn.	248 x 14	L=173	M=350	P=297	400/320	Ø256/ø80	297 x 8stk
VRF 575	55	2p	60/50tetn.	278 x 13	L=204	M=500	P=350	550/370	Ø306/ø80	350 x 8stk
VRF 575S	55	2p	60/50tetn.	260 x 14,5	L=204	M=500	P=350	550/370	Ø306/ø80	350 x 8stk

60 Hz VRF:	kW / Pol		AKSLING	IMPEL.	MELLOMSTYKKER				PAKKBOKS	PUMPEHUS
					Lengde	DCD M.	DCD P.	Ø DIA.		
VRF 305N-7	5,5	2p	38/35tetn.	175 x 6	L=127	M=265	P=237	300/260	Ø206/ø55	237 x 4stk
VRF 307N-10	7,5	2p	38/35tetn.	186 x 7	L=127	M=265	P=237	300/260	Ø206/ø55	237 x 4stk
VRF 310-20	15	2p	42/35tetn.	192 x 8	L=161	M=300	P=237	350/260	Ø206/ø55	237 x 4stk
VRF 310N-20	15	2p	42/35tetn.	196 x 12	L=161	M=300	P=237	350/260	Ø206/ø55	237 x 4stk
VRF 315-25	18,5	2p	42/35tetn.	196 x 12	L=161	M=300	P=237	350/260	Ø206/ø55	237 x 4stk
VRF 415-25	18,5	2p	42/35tetn.	230 x 5	L=161	M=300	P=284	350/315	Ø249,5/ø55	284 x 8stk
VRF 420-40	30	2p	55/50tetn.	243 x 6,5	L=173	M=350	P=284	400/320	Ø249,5/ø80	284 x 8stk
VRF 425-40	30	2p	55/50tetn.	243 x 8,5	L=173	M=350	P=284	400/320	Ø249,5/ø80	284 x 8stk
VRF 430-50	37	2p	55/50tetn.	240 x 14	L=173	M=350	P=297	400/320	Ø256/ø80	297 x 8stk
VRF 440-75	55	2p	60/50tetn.	248 x 14	L=204	M=500	P=297	550/320	Ø256/ø80	297 x 8stk
VRF 575-125	90	2p	65/50tetn.	278 x 13	L=204	M=500	P=350	550/370	Ø306/ø80	350 x 8stk
VRF 575S-125	90	2p	65/50tetn.	260 x 14,5	L=204	M=500	P=350	550/370	Ø306/ø80	350 x 8stk

Sist oppdatert: 13.12-2018