

Industrielle varmepumper for høje temperaturer

et demonstrationsprojekt

Mogens Weel & Jens Mikkelsen

Weel & Sandvig
ENERGI OG PROCESINNOVATION

Diplomvej, Bygning 377-stuen, 2800 Kgs. Lyngby

Telefon: 2671 0045 eller 2671 0046

email: weel-sandvig@weel-sandvig.dk

web: www.weel-sandvig.dk

Weel & Sandvig Energi og procesinnovation

- Mindre niche firma inden for procesoptimering af termiske industrielle processer og energitekniske anlæg
- Firma startede i 2003
- 4 fuldtidsansatte
- Lokalitet : Scion DTU
- Hoved produkter og ydelser:
 - Simulatorer til forbrændingsanlæg, kraftværker & dampturbiner
 - Performance Monitoring systemer til gasturbiner og dampturbiner
 - Predictive emissions overvågning til gasturbiner og kedler
 - New energy concepts & Process Integration HEX optimering
 - Conceptuel designs with small high speed turbo compressors & turbines (ORC cycles, Heat Pumps, Turbo charger based micro gas turbines, manure combustion systems etc. since 1984)

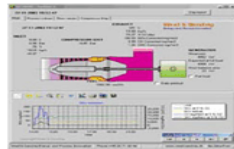
Kunder

PEMS & Performance Monitoring: Oil & Gas industri (Oxy, Gasco, Bunduq, Saudi Aramco, Hess, Dong)

Simulators: Vattenfall, Vestforbrænding, Amagerforbr., TAS, Ege, BW-Volund, Sønderborg KVV etc

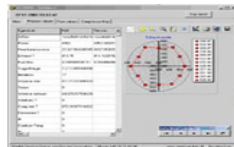
Energy opti: Novozymes, statoil, Dong, Topsøe, Novo Nordisk, CPKelco, Junckers, DEA (Energinet.dk, etc)

Weel & Sandvig offers simulators tailored for specific processes and plants. We have developed dynamic simulators for a complete waste-to-energy plant, steam turbine system, predictive emission monitoring system (PEMS) for gas turbines and performance monitoring systems for gas turbines as well as steam turbines.



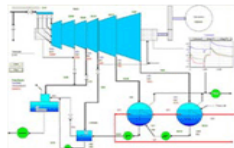
WS.GT-PEMS

Online predictive emission monitoring system (PEMS) for gas turbines.



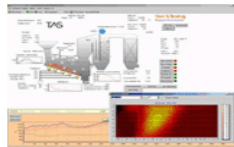
WS.PerformS

System for on- or off-line performance monitoring of gas and steam turbines. Does your power plant cycle fulfil the expected power output? When is the optimal time to wash? Does your turbine have small defects that might develop to critical defects?



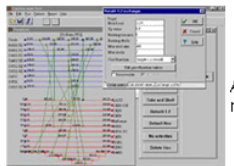
WS.Steam Turb-simulator

Comprehensive dynamic simulator developed for steam turbines including feed water train heaters and condensers. The model describes among others the governor control valves, the inertia of momentum, major aerodynamic losses in the steam turbine expansion path and the full control system.



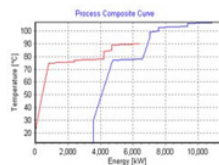
WS.WTE-simulator

Comprehensive dynamic simulation of grate fired boilers for municipality solid waste (MSW), biomass and coal. Developed for education and training of operational staff and optimisation of plant operation.



WS.HEN-Explorer

Advanced design tool for the economic optimal configuration of heat exchanger networks (HENs) and integration of processes and utilities.



WS.Pinch

Targeting tool (Pinch program) for calculation of the potential for heat recovery and a systematic tool for process integration analyses.

Agenda

- Anvendelsesmuligheder og økonomi (eksempel).
- Kort om den teknologiske løsning.
- Forventet kompressorperformance med vanddamp ift. luft.
- Opbygning og afprøvning af industriel forsøgsopstilling.
- Demonstrationsforsøg under industriel drift.
- Resultater og erfaringer fra forsøget.

Grund ide

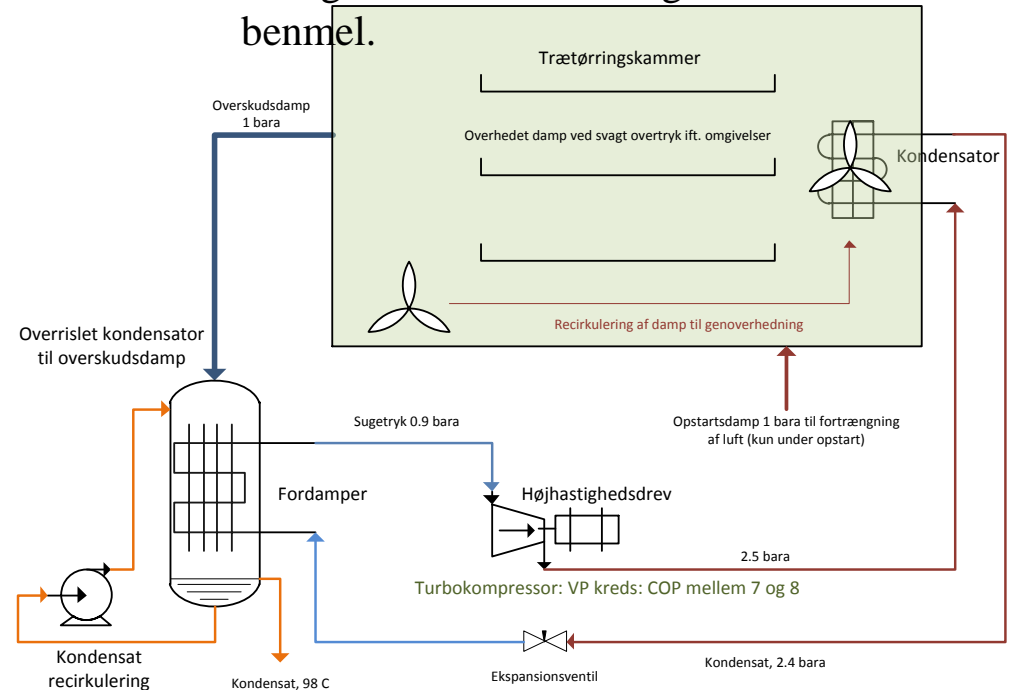
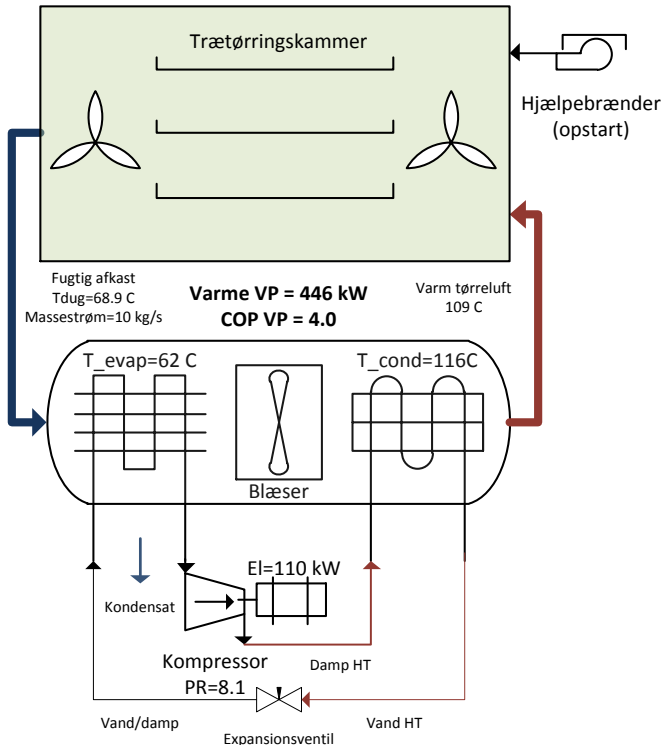
- Anvende vanddamp i varmepumpe for at kunne opnå høje temperaturer > 100 C.
- Bruge vanddamp i højhastigheds radial kompressor.
- Anvende kompressor fra bilindustrien da den er produceret i stort styk tal og dermed meget billig
- Område fra 300 kW – 5 MW "Heat effect"
- Gear/kompressor fra Rotrex (multiple units)



industrien

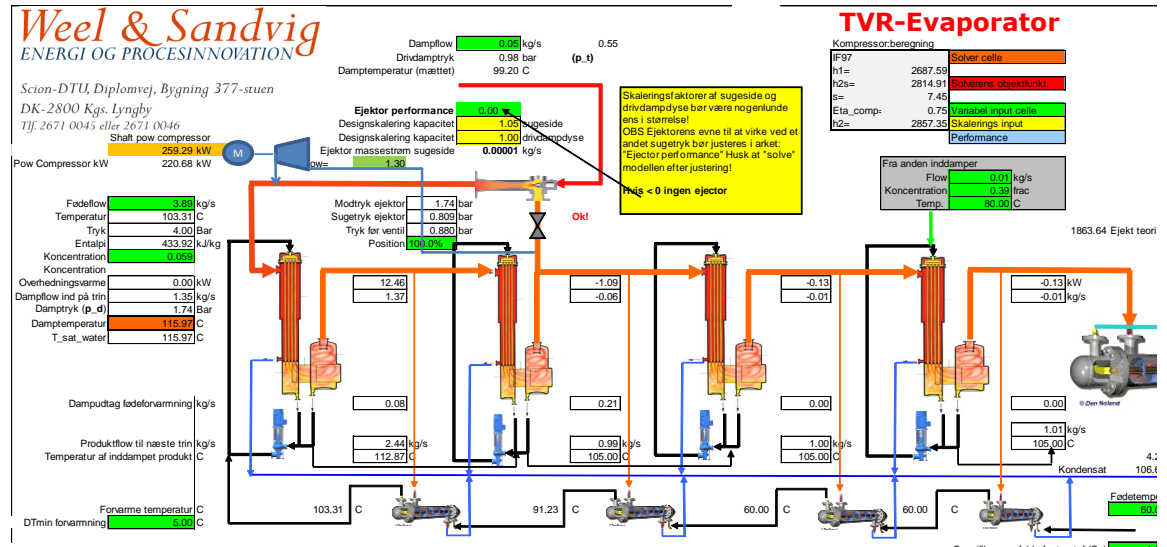
- Vanddamp som arbejdsmedium.
- Primært temperaturområde: 70°C til 150°C.
- Oplagt til integration i eksisterende/nye dampsystemer.
 - mulighed for sænkning eller lavere tryk i hovedforsyning => højere kedelvirkningsgrad.
 - hvis dampforsyning involverer dampturbine: lavere forsyningstryk => ekstra kraftproduktion.

- Bryggerier (evt. også malterier).
- Andre fødevarerproducenter med kogeprocesser.
- Destillationsprocesser generelt.
- Inddamperanlæg (mindre fx. gylleinddampning).
- Tørningsprocesser (fx trætørring).
- Autoklave, sterilisation.
- Slagterier, kødforædlingsindustrier, kød & benmel.



inddamper

- Ombygning af 4-trins inddamper med TVR over første 2 trin til 2x2 MVR inddamper.



Driftsøkonomi ved ombygning af TVR inddamper til Rotrex-baseret MVR på H. Topsøe inddamper

Forudsætninger:			TVR	MVR 2 x 2
Årlig driftstid	5000 timer	Dampforbrug	0.55 kg/s	0.05 kg/s
Brændværdi af naturgas	11 kWh/nm ³	Elforbrug		0.23 MW
Virkningsgrad dampkedel	0.9	COP ift TVR		6.0
Varmebehov dampproduktion	2.5 MJ/kg	Årlig energiforbrug til damp	7638.9	694.4 MWh
Pris for naturgas	2.8 kr/nm ³	Årlig elforbrug		1150 MWh e
Pris for el	650 kr/MWh	Udgift til gas	1.944	0.177 Mio.kr./år
		Udgift til el		0.748 Mio.kr./år
		Vedligehold af kompressor		0.100 Mio.kr./år
		Samlet driftsudgift	1.944	1.024 Mio.kr./år
		Besparelse ved ombygning til MVR		0.920 Mio.kr./år
		Anslået investering til kompressorer og ombygning af inddamper inkl. SRO:		1.0 Mio. kr.
		Tilbagebetalingstid (simpl)		1.1 År

Den teknologiske løsning

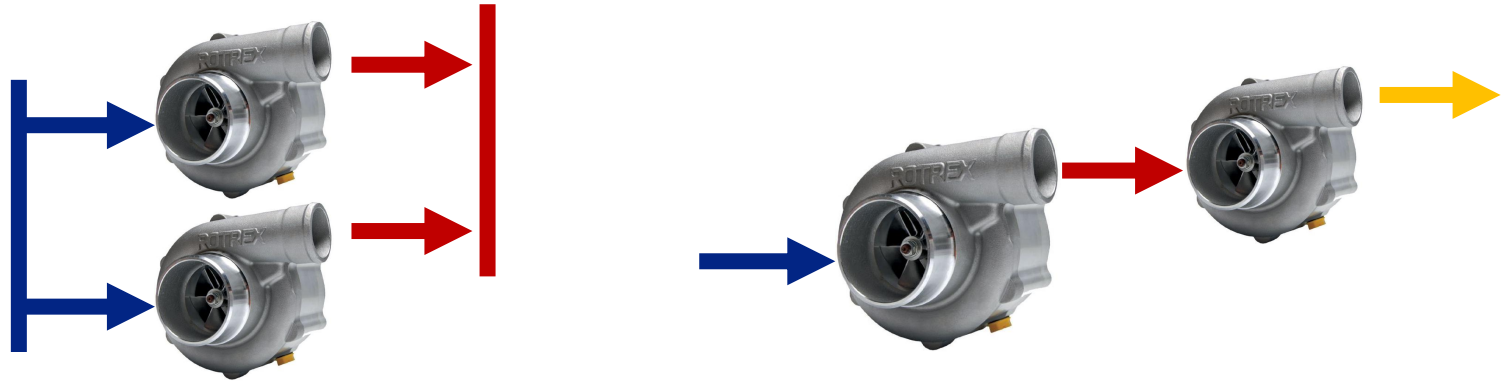
- Masseproduceret relativt billig kompressortechnologi fra bilindustrien, samt et danskudviklet højhastigheds friktionsgear (Rotrex).
- Modulært fleksibelt koncept, baseret på både parallel og seriel anvendelse af et begrænset antal kompressormodeller.
- I første omgang er drevet en traditionel frekvensreguleret elmotor via remtræk.
- Med tiden: direkte drev baseret på højhastigheds elmotor koblet til Rotrex gear.



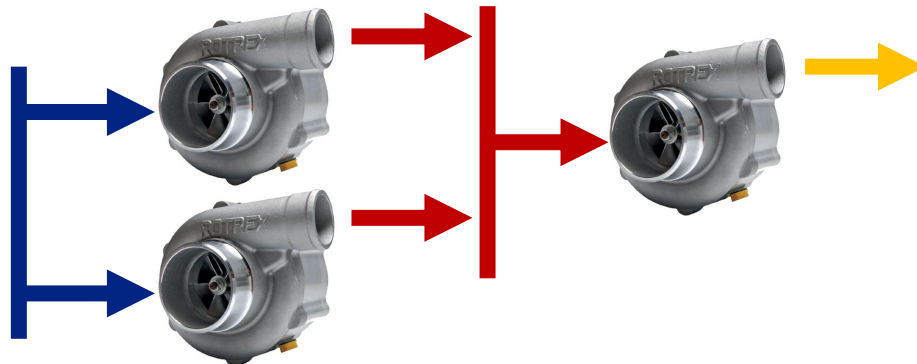
Modulært fleksibelt koncept

baseret på få kompressormodeller

- Parallel kobling (1-trins) og seriel kobling (flertrins)



- Seriel kobling (flertrins kompression) med samme type kompressor og parallel kobling

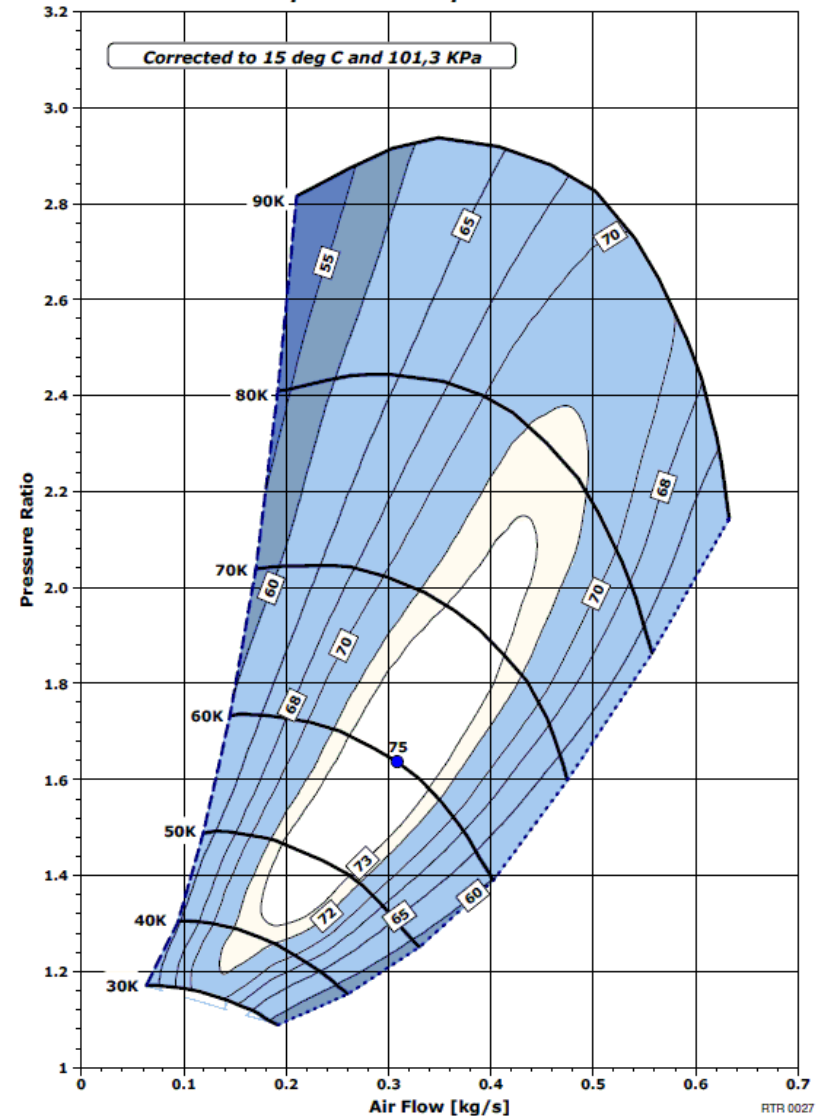


performance

- Transformation af map fra luft til vanddamp.
- Maps for forsk. sugetryk.
- Hurtig overblik: hvor opererer kompressoren under forsøget (bl.a. af hensyn til surge).
- Masseflow og virkningsgrad, hastighed og trykforhold.
- Virkningsgrad sammenlignes med beregning baseret på målte temperaturer og tryk før og efter kompressor.

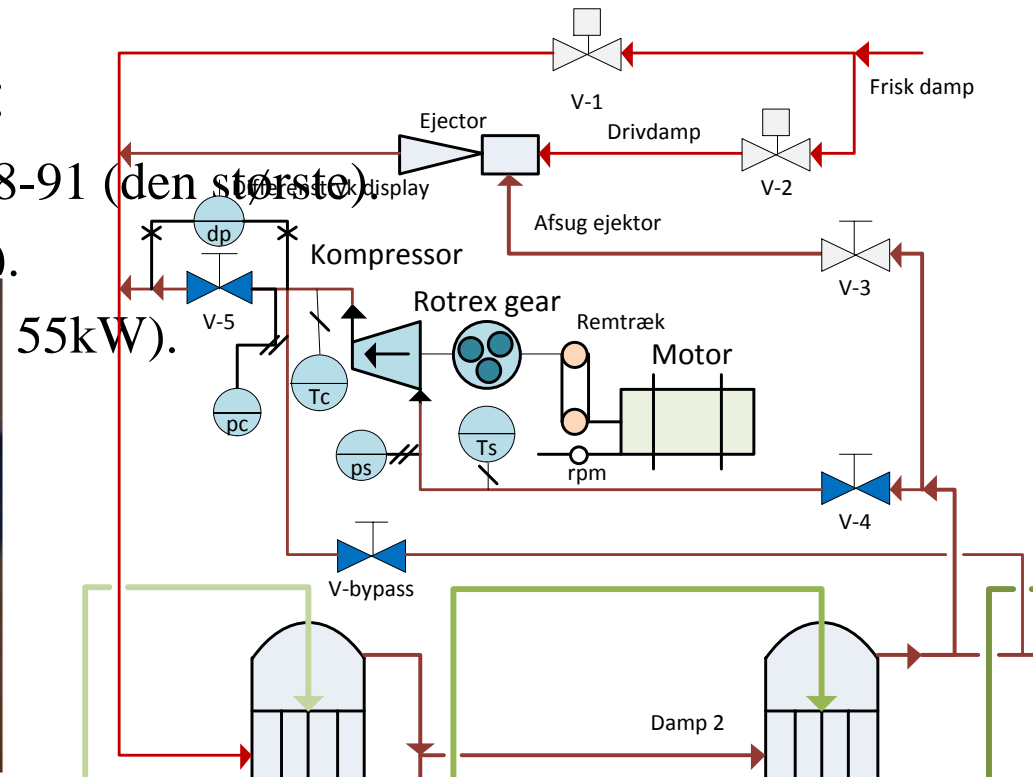
Technical Data Sheet	Product:	C38 range
	Version:	5.0
	Page:	6 of 7

C38-91/92 Compressor map



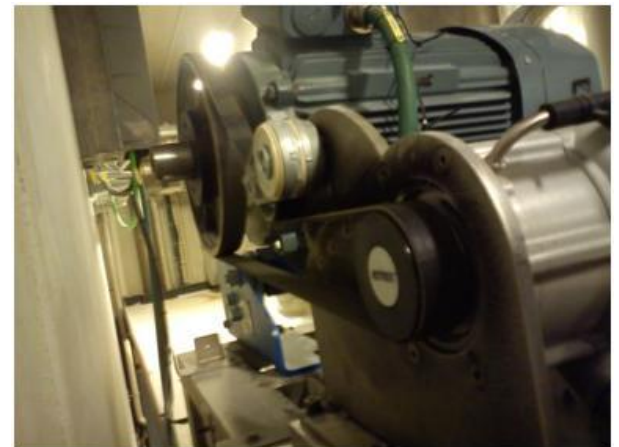
Industriell forsøgsopstilling

- Haldor Topsøe A/S. 4-trins inddamper med TVR.
- Forsøg: MVR parallelt med TVR over første 2 trin.
- Hovedkomponenter:
 - Rotrex kompressor: C38-91 (den største)
 - Elmotor (VEM. 37 kW).



Opbygning af drevet og tilslutning

- Haldor Topsøe (ankerman Bjarne Sørensen) i samarbejde med Weel & Sandvig.



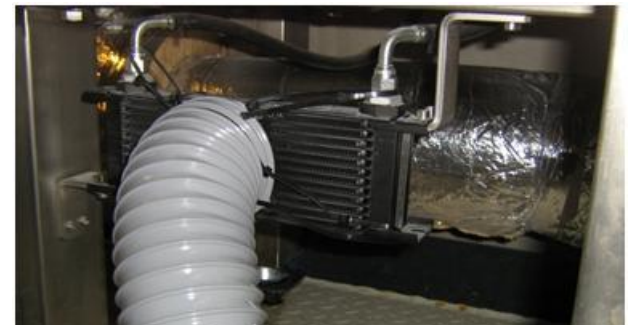
Instrumentering og regulering

- Afsugning efter 2. trin på inddamper. Trykledning videre til 1. inddampertrin, med bypass afgrening tilbage til sugepunktet (nedstrøms).
- Manuelle butterfly-ventiler i suge- bypass- og trykledning.
- Differenstrykmåling over ventil i trykledning.
- Tryk- og temperaturfølere i suge- og trykledning.



Oliekreds

- Friktionsolien i gearet køles i ekstern køler med køleluft fra centrifugalblæser.
- Intern vanepumpe i Rotrex-gearet.
- Fra oliebeholder via magnetfilter til gearet og tilbage til oliebeholder via oliekoøler.

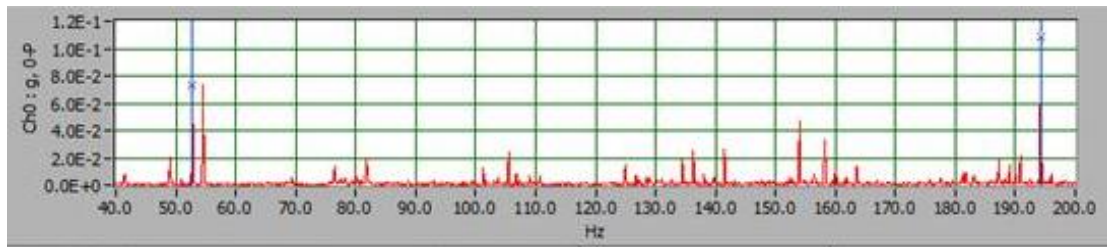


Forsøgsdrift

- Idriftsættelsesforsøg 21. dec. 2011.
 - Langsom opstart med fuld åbne ventiler i suge- og bypass ledning og lav kompressorhastighed i cirka 1 time. Hastigheden reguleres med frekvensdrevet.
 - Gradvis øgning af omløbstal til 68000 rpm og derefter drøvling på bypass-ventil.
 - Øgning til 78000 rpm og derefter åbning af bypassventil.
 - Øgning til 89000 rpm og derefter forskellige drøvlinger på bypassventil.
 - Da der er tilstrækkelig differenstryk (aflæses i satline) skiftes gradvist om til inddamperdrift. Godt en halv times drift på inddamper.
 - Derefter omskift til bypass-drift og nedkørsel af kompressor hastighed og kørsel ved lavt omløbstal for afkøling af olie, kompressor m.m.



Vibrationsmåling

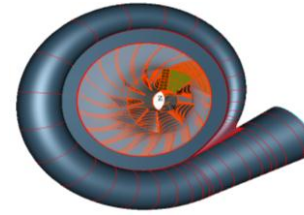


- Primært for at få en indikation af vibrationsniveauet og om der er frekvenser med bekymrende høje vibrationsniveauer. Fx. i forbindelse med surge på kompressor.
- Sekundært at kunne måle omløbstal på kompressor og dermed evt. kunne bestemme slip i gear og remdrev.
- Benyttet udstyr fra Colding¹⁶ A/S.

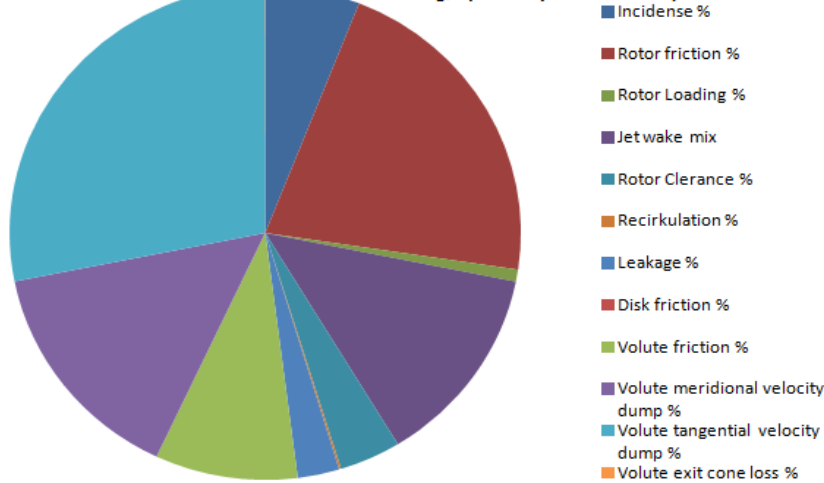


Kompressor performance med vanddamp

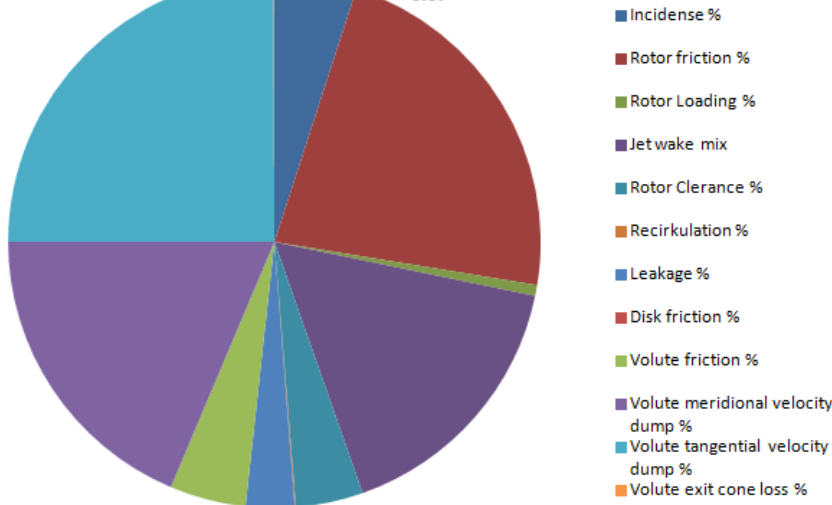
1-D (teoretisk)



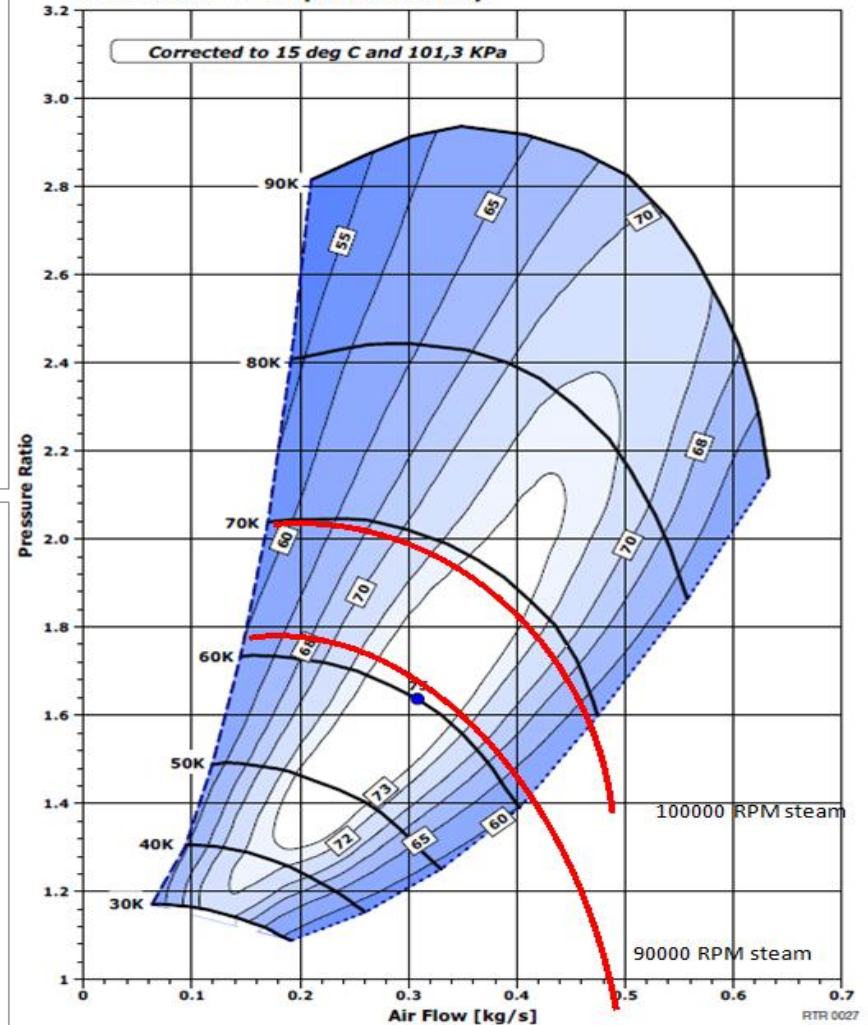
1-D beregning af tabsfordeling i Rotrex kompressor "Vanddamp" 101 kRPM.
Pr=1.92 & Eta = 0.67. Flow 0.24 kg/s (suction pressure 1 bara)

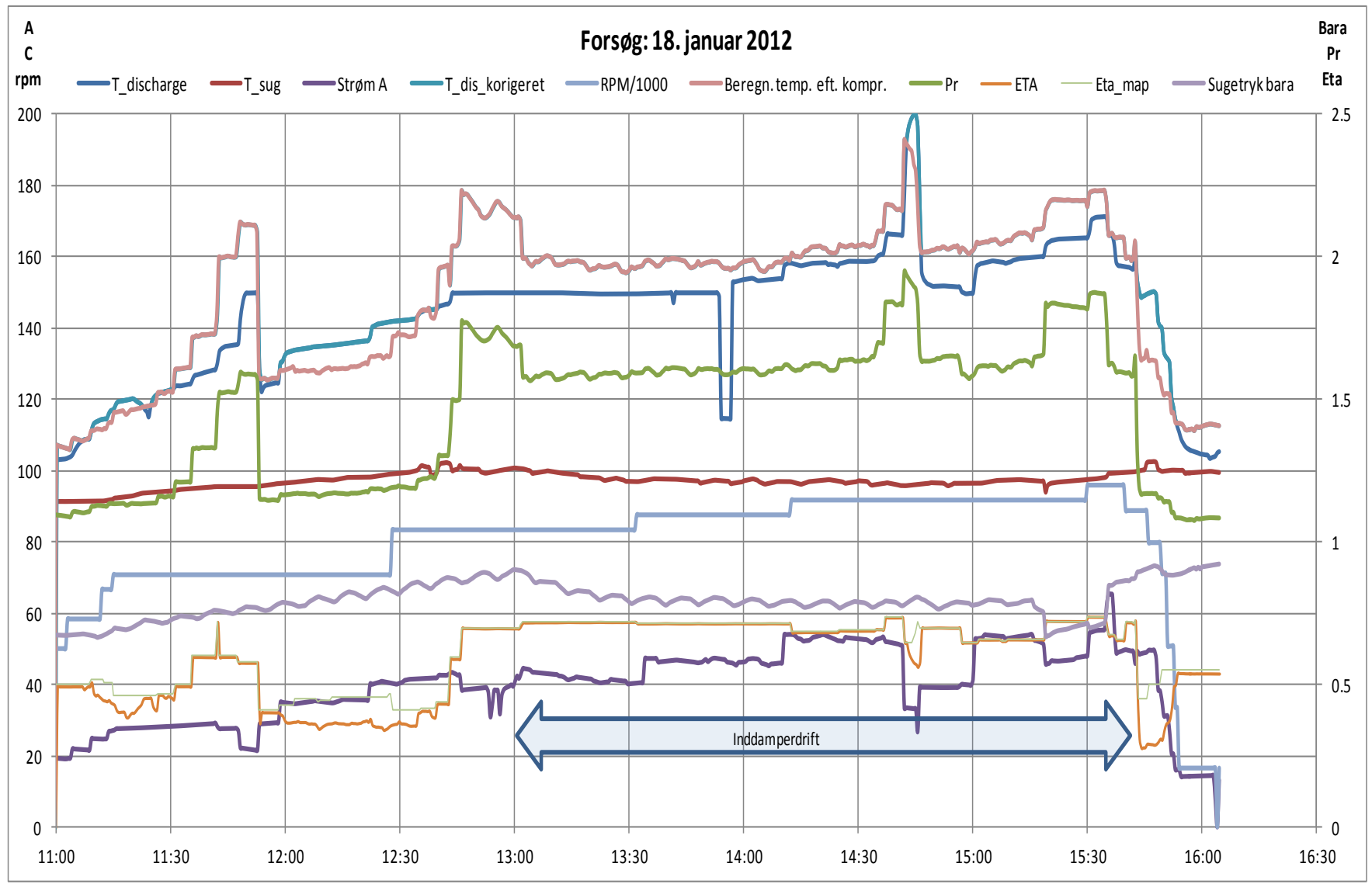


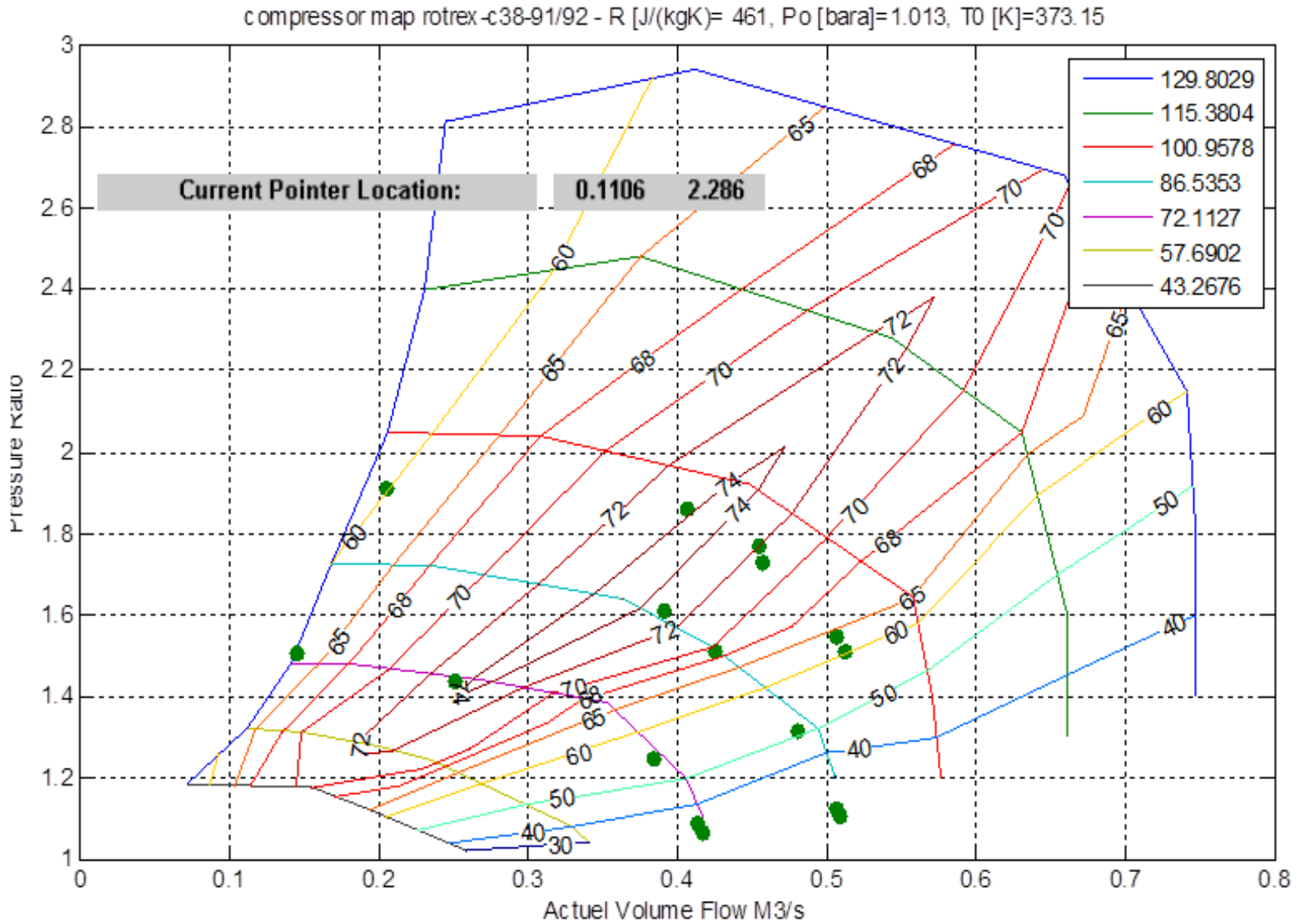
1-D beregning af tabsfordeling i Rotrex kompressor "Luft" 70 kRPM. Pr=1.93 & Eta = 0.67



C38-91/92 Compressor map







- Driftspunkter (Pr, rpm) for 70700, 83300, 87500, 91650 og 95800 rpm.

Beregning af usikkerhed på performance

Den målte virkningsgrad for kompressoren bestemmes som nævnt ovenfor ved udtrykket:

$$\text{Eta}_{\text{målt}} = (h_2 - h_1)/(h_{2s} - h_1) = (2785,6 - 2672,7)/(2785,4 - 2672,7) = 0,676.$$

Til sammenligning er virkningsgraden på mappen aflæst til 0,70. Forskellen i virkningsgrad ligger inden for den estimerede usikkerhed på denne parameter, som er beregnet til +/- 10,24 %,

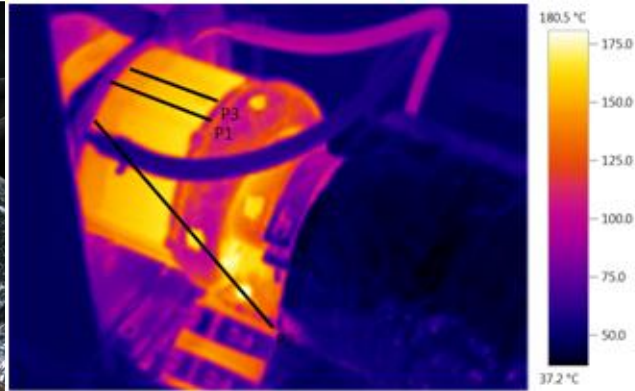
Usikkerhedsberegning på virkningsgraden Eta	Unbiased Pr = 1.5	Biased inlet pressure mbar	Biased inlet temp. K
Bias inlet press, mbar		20	
Bias inlet temp, K			1.5
T_inlet (T1), K	372	372	373.5
P_inlet (P1), mbar	800	820	800
T_disch_measured (T2), K	423	423	423
P_disch (P2), mbar	1200	1200	1200
Pr	1.50	1.46	1.50
DT_isen, K	37.46	35.08	37.61
Eta	0.73	0.69	0.76
Error Eta	0.00%	6.37%	-3.45%
Sum usikkerhed Eta		10.24%	
Usikkerhed tryk		1.98%	
Usikkerhed temperatur		1.52%	

Tabel 1. Usikkerhedsberegning på virkningsgraden af kompressoren.

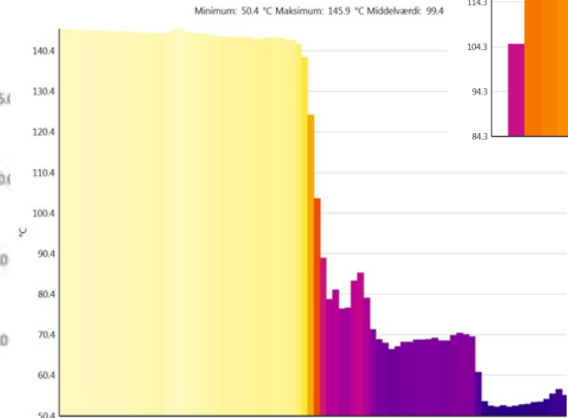
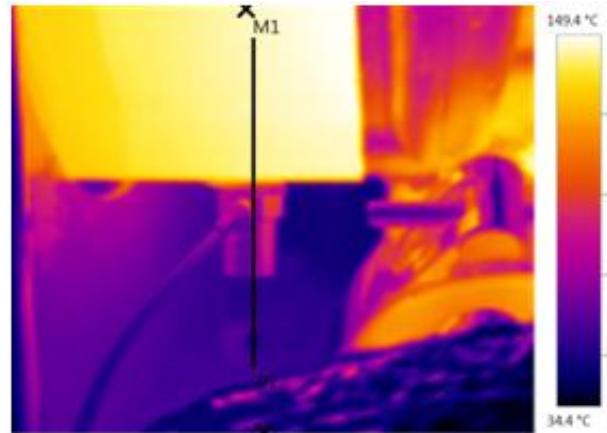
kamera

Forsøg 18. januar 2012

- Løbende vibrationsmålinger på underside af Rotrex-gearet og temperaturovervågning med IR-kamera.
- Accelerometeret (max 120°C).

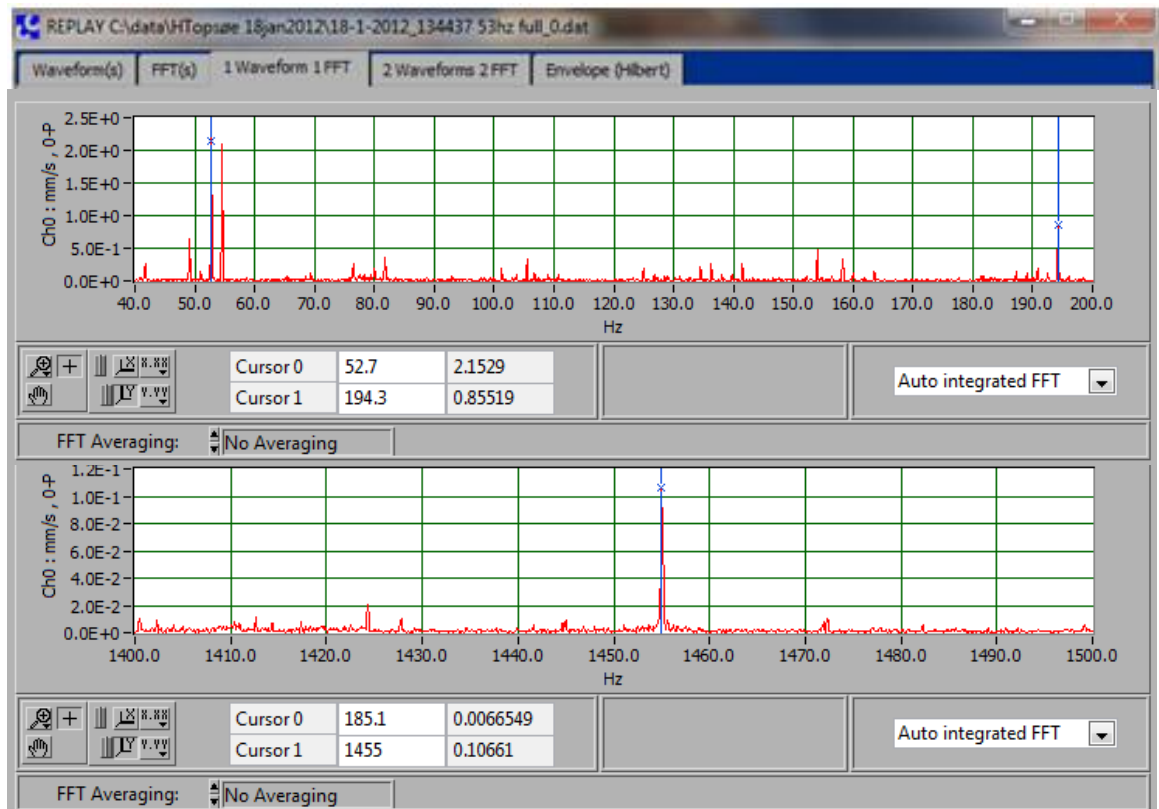
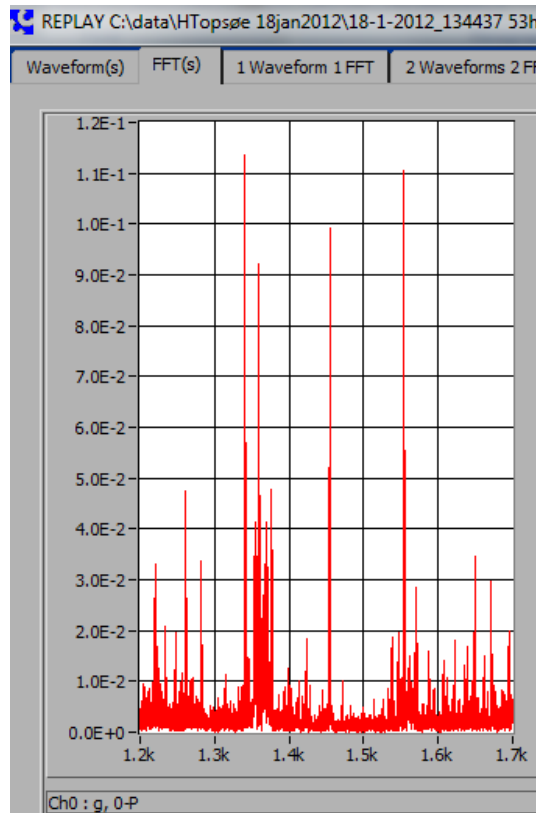


Minimum: 84.3 °C Maksimum: 165.7 °C Middeleværdi: 147.7 °C



Frekvensanalyse af vibrationer

- Motorfrekvens 52.7 Hz
- Pulley-hastighed på 194.3 Hz (11658 rpm)
- Gearudveksl. 7.5: Kompressor 1457.3 Hz (87435



Resultater - konklusion

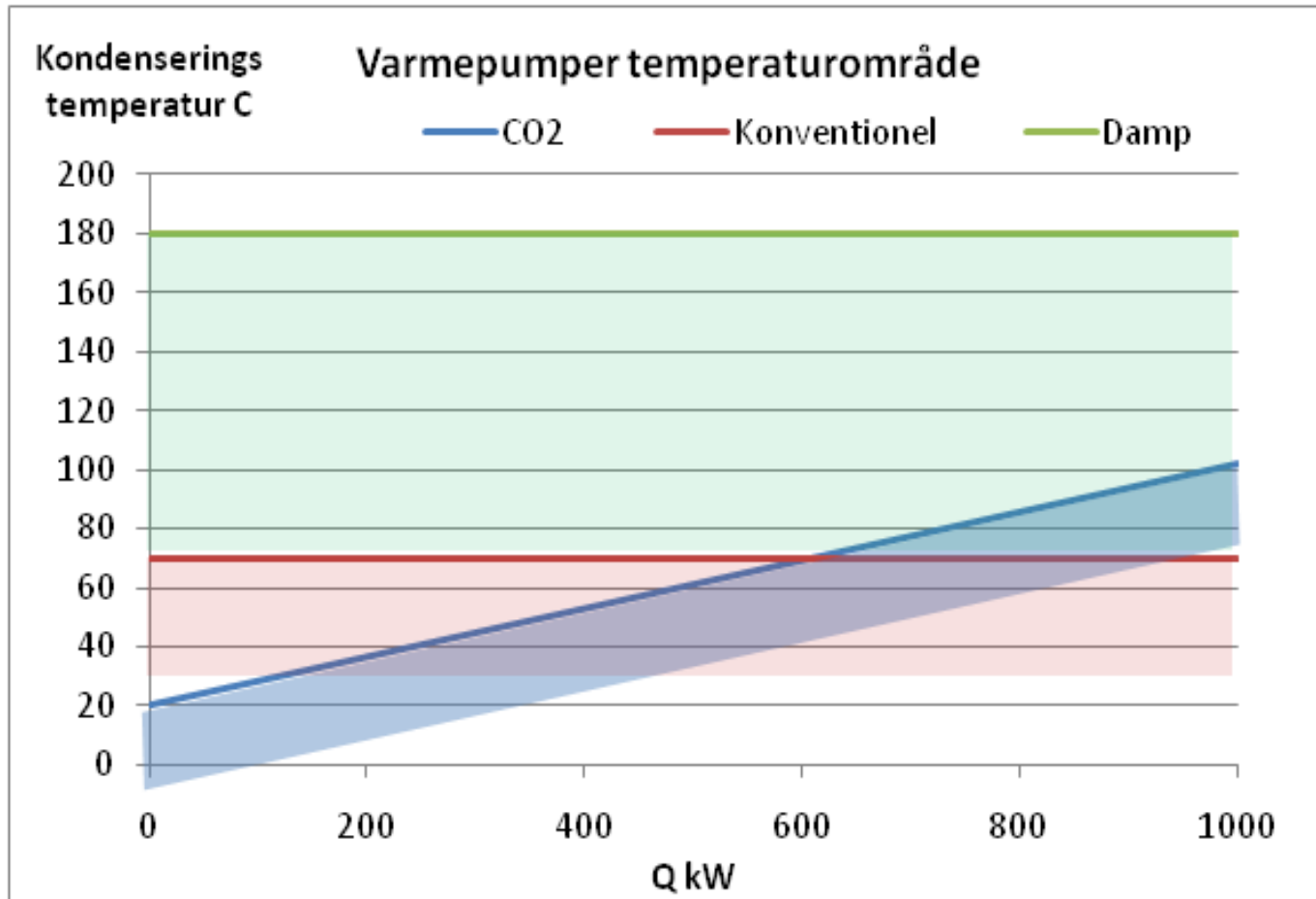
- Opbygget demonstrationsanlæg med Rotrex kompressor C38-91 på et størrere inddampningsanlæg hos Topsøe.
- Demonstreret drift på Rotrex-kompressor i vanddamp i 18 timer.
- Mere end 10 timers industriel inddamperdrift med en varmeeffekt på ca. 450 kW . Pr ca. 1,6- 1.8. COP ca. 30. (Kompressoren sider over 2 trin).
- Tilfredsstillende drift – ingen væsentlige problemer er observeret. Ingen umiddelbare tegn på olielækage eller vand i olie.
- Den målte virkningsgrad og flow for kompressor i vanddamp er inden for den estimerede usikkerhed.
- Tab i drevet (elmotor, remdrev og gear) er lidt større end forventet og kan ikke umiddelbart forklares.

Videre forløb

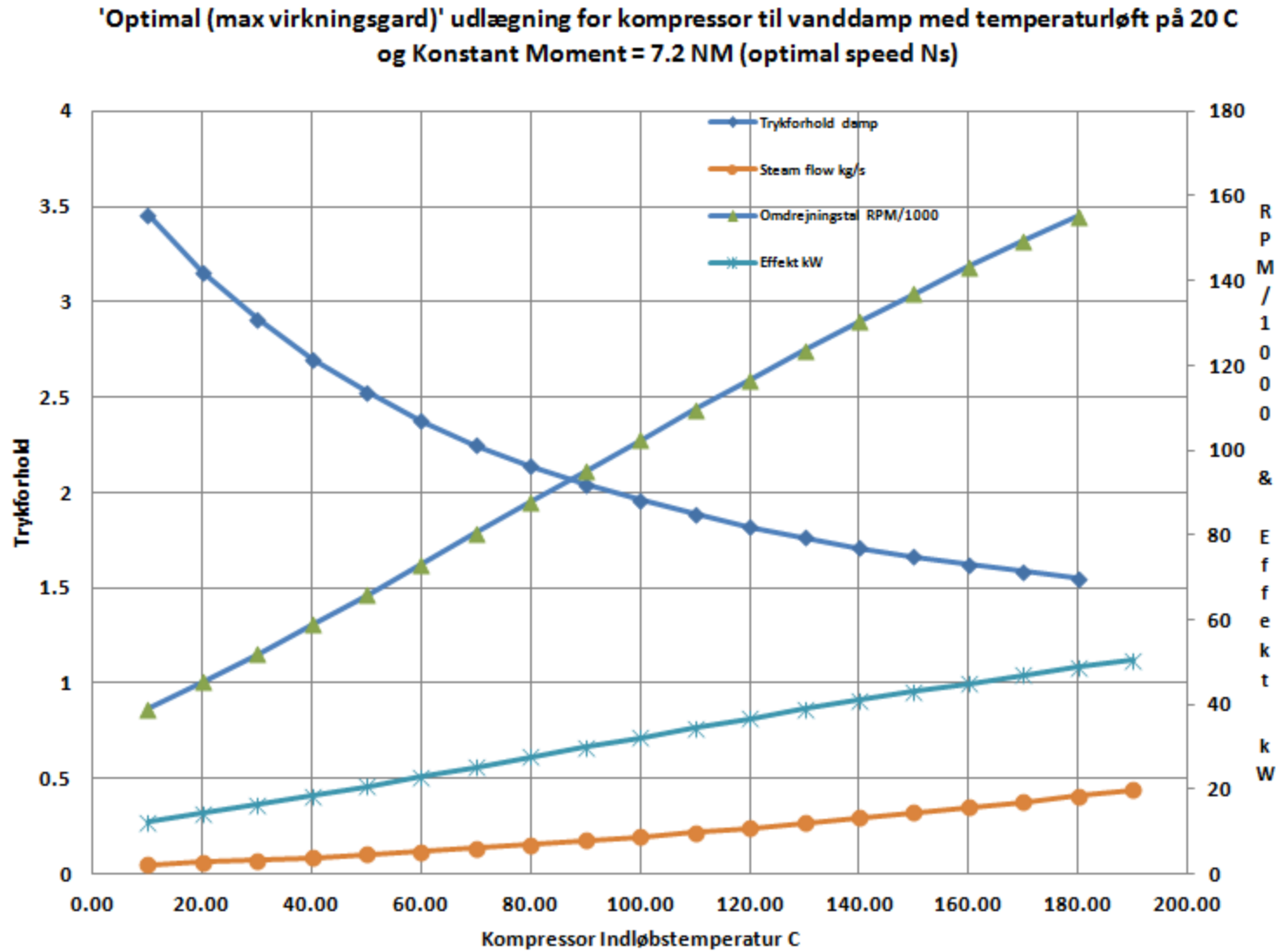
- Nyt design af kompressor med trykforhold på 3 og titan rotor (Projekt i samarbejde med TI, Rotrex m.fl.)
- Langtidstest med automatiseret styring nødvendig, hvis holdbarheden skal undersøges nærmere.

Industriens Temperaturbehov og varmepumpe medie

- Ofte > 100 C og ved konstant temperatur

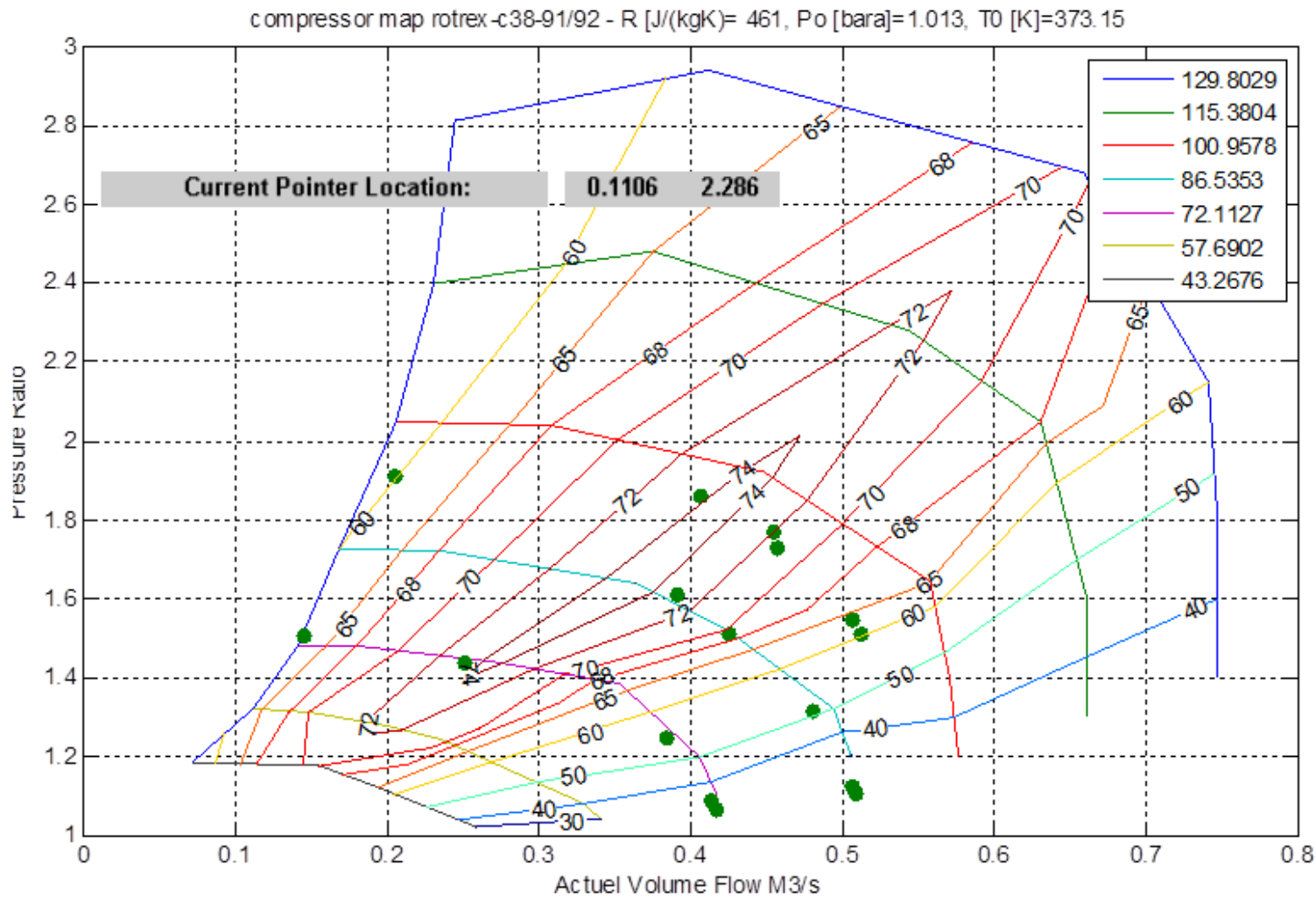


Optimal compressor design versus inlet conditions



vanddamp

gældende for sugetryk ved atmosfæretryk og med målte driftspunkter fra forsøg 18. januar 2012



Data fra nyt forsøg med flow måler den 2/4 2012

86500 RPM, psug= 0,64 bara, Tsug = 88,4 C									
Pr	V_map	Rho	m_map	m_målt_p	Eta_map	Eta_målt	afvigelse	afvigelse	
	m3/s	kg/m3	kg/s	kg/s	frac	frac	d-eta %	d-flow %	
1.72	0.2388	0.389	0.092893	0.11	0.685	0.74	-7.43243	-15.5516	
1.41	0.4635	0.377	0.17474	0.172	0.6	0.59	1.694915	1.592733	
1.21	0.4965	0.389	0.193139	0.178	0.37	0.34	8.823529	8.504775	

Usikkerhed af flow aflæst på map er stor når "speed" linien er vandret.

