

# **UTVÄRDERING AV GASTURBIN GTX100 I HELSINGBORG - ETAPP 2**

©Svenskt Gastekniskt Center - Juni 2003



Edt. Tord Torisson, Mohsen Assadi, Jens Klingmann  
INST. FÖR VÄRME- OCH KRAFTTEKNIK, LTH

Agne Karlsson  
ALSTOM POWER SWEDEN

## SGC:s FÖRORD

FUD-projekt inom Svenskt Gastekniskt Center AB avrapporteras normalt i rapporter som är fritt tillgängliga för envar intresserad.

SGC svarar för utgivningen av rapporterna medan uppdragstagarna för respektive projekt eller rapportförfattarna svarar för rapporternas innehåll. Den som utnyttjar eventuella beskrivningar, resultat e dyl i rapporterna gör detta helt på eget ansvar. Delar av rapport får återges med angivande av källan.

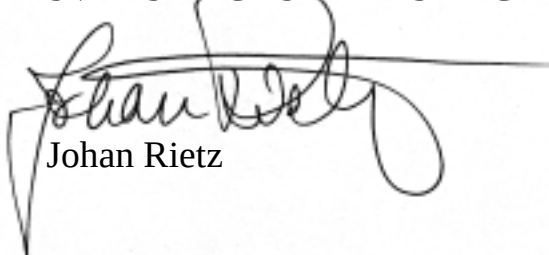
En förteckning över hittills utgivna SGC-rapporter finns på SGC's hemsida [www.sgc.se](http://www.sgc.se).

Svenskt Gastekniskt Center AB (SGC) är ett samarbetsorgan för företag verksamma inom energigasområdet. Dess främsta uppgift är att samordna och effektivisera intressenternas insatser inom områdena forskning, utveckling och demonstration (FUD). SGC har följande delägare: Svenska Gasföreningen, Sydkraft Gas AB, Sydkraft AB, Lunds Energi AB, Göteborg Energi AB, och Öresundskraft AB.

Följande parter har gjort det möjligt att genomföra detta utvecklingsprojekt:

ALSTOM Power Sweden AB  
GasTurbinKraft i Helsingborg HB  
Statens Energimyndighet

SVENSKT GASTEKNISKT CENTER AB



Johan Rietz

## Innehållsförteckning

|                                                                     |    |
|---------------------------------------------------------------------|----|
| 1. Inledning .....                                                  | 1  |
| 1.1 Syfte .....                                                     | 1  |
| 2. Västhamnsverket .....                                            | 2  |
| 2.1 Gasturbinen GTX100 .....                                        | 2  |
| 3. Maskinprov i Helsingborg .....                                   | 3  |
| 3.1 Prototypprov GTX100 Helsingborg .....                           | 3  |
| 3.2 Inspektioner GTX100 Helsingborg .....                           | 5  |
| 4. Konditionsövervakning ( CMS, Condition Monitoring System ) ..... | 6  |
| 4.1. Datalagringsmodulen .....                                      | 6  |
| 4.2. Prestandaövervakningsmodulen .....                             | 6  |
| 4.3. Emissionsövervakningsmodulen .....                             | 7  |
| 4.4. Vibrationsövervakningsmodulen .....                            | 7  |
| 4.5. Support & analys .....                                         | 7  |
| 4.6. Ekonomi & driftsoptimeringsmodulen .....                       | 7  |
| 4.7. Konditionsbaserat underhåll .....                              | 7  |
| 5. ANN för Hybrid Anläggningen i Helsingborg .....                  | 8  |
| 5.1. Bakgrund .....                                                 | 8  |
| 5.2. Syfte .....                                                    | 8  |
| 5.3. Arbetsgrupp .....                                              | 8  |
| 5.4. Projektbeskrivning och status .....                            | 9  |
| 5.4.1. Arbetsmetodik .....                                          | 9  |
| 5.4.2. Projektstatus .....                                          | 9  |
| 5.4.3. Arbetets nyhetsvärde .....                                   | 10 |
| 6. Validering av modell för beräkning av kyllda gasturbiner .....   | 11 |
| 6.1. Bakgrund .....                                                 | 11 |
| 6.2. Kylmodell matchad mot data för GTX100 .....                    | 11 |
| 6.3. Projektstatus .....                                            | 11 |
| 7. Kompressortvätt procedur .....                                   | 13 |
| 7.1. Tvättprov i Helsingborg .....                                  | 14 |
| 7.2. Arbetsmetodik .....                                            | 15 |
| 7.3. Status .....                                                   | 15 |
| 7.4. Arbetsgrupp .....                                              | 17 |
| Referenser .....                                                    | 18 |

## **SAMMANFATTNING**

Föreliggande rapport är slutrapporten inom uppföljningsprojektet GTX100 i Helsingborg som finansieras av Svenskt Gastekniskt Center (SGC) och ALSTOM Power Sweden. Rapporten sammanställer resultat från installation och drifttagning av ALSTOM Power's gasturbin i 50 MW klassen (GTX100), i Västhamnsverket i Helsingborg. Gasturbinen och dess avgaspanna har integrerats i den befintliga fastbränsle eldade kraftverksanläggning och systemlösning är unik.

Projektet har pågått i tre år, 2000-2002. Huvudsyftet med projektet var att följa upp den moderna hybridanläggningen och kartlägga eventuella problem i samband med driften, och även kartlägga långtidsdegraderingseffekterna. Anläggningen är väl instrumenterad och insamlad mätdata används i samband med utveckling och validering av nya och befintliga analys- och diagnostiks verktyg.

Institutionen för värme- och kraftteknik deltog också i projektet för att:

- utveckla verktyg för övervakning och diagnostik baserad på Artificiella Neurala Nätverk (ANN). Verktöget avsågs också användas för kartläggning av långtidsdegradering.
- validera befintligt verktyg för beräkning av gasturbinkylningens inverkan på anläggningsprestanda.
- genomföra litteraturstudie och sammanfatta publicerat material om kompressortvätt tillgängligt i öppen litteratur, samt bidra till kunskapsutveckling inom området m.h.a. experiment och CFD-beräkningar (Computational Fluid Dynamics).

# 1. INLEDNING

Gasturbinteknik utgör ett strategiskt nyckelområde inom modern kraftproduktion på det globala planet. Andelen gasturbinbaserad kraftgenerering har ökat markant på bekostnad av konventionell ångkraftteknik under de senaste åren. Drivkraften ligger främst i ökad verkningsgrad och låga utsläpp samt låga installationskostnader och korta byggtider. Ytterligare en faktor är den ökade tillgängligheten på naturgas, vilket är det klart dominerande bränslet för dessa typer av anläggningar.

Öresundskrafts gasturbinanläggning vid Västhamnsverket i Helsingborg är ett så kallat gaskombikraftverk, vilket innebär att gasturbinen utöver att leverera kraft till en elgenerator, utnyttjas avgasvärmen för att generera ånga till en ångturbin.

Västhamnsverket är en hybrid mellan ett gaskombikraftverk och ett fastbränsleeldat kraftvärmeverk i det att ångturbinen förses med ånga både från en fastbränsleeldad panna och från gasturbinens avgaspanna.

Gasturbinen, GTX100, vid Västhamnsverket är en nykonstruktion levererad av ALSTOM Power Sweden AB. För att erhålla hög elverkningsgrad och utsläppsnivåer i världsklass har ny teknik tagits i anspråk på en rad olika punkter. Gasturbinen vid Västhamnsverket var den första levererade GTX100, och även den första av sitt slag i världen.

Med ny teknik följer också viktig kunskapsuppbyggnad i branschen, hos operatören/ägaren och hos leverantören. Det är dessutom av största vikt att erfarenheter, såväl från prototypprov som verklig produktion, tas tillvara och läggs som grund för fortsatt utveckling/forskning. Inte minst gäller det den högklassiga gasturbinrelaterade forskningen som bedrivs vid landets högskolor.

## 1.1 Syfte

Huvudmålsättningen är att följa upp och utvärdera gasturbinprototypen GTX100 under en längre drifttid för att identifiera signifikanta egenskaper hos maskinen som verifierar dess konstruktionsdata, degenerering och driftsegenskaper samt föreslå, införa och utvärdera förbättringar i process och hårdvara. För att nå dessa mål drivs projektet som ett samarbete mellan Öresundskraft, Lunds tekniska högskola och ALSTOM. Projektet är uppdelat i ett antal delprojekt:

- Verifiering av gasturbinen och anläggningens prestanda
- Uppföljning av Gasturbinanläggningen under längre tid m.a.p. prestanda och tillförlitlighet.
- Regelbundna, detaljerade inspektioner för att följa ev. degradering
- Införande och verifiering av förbättringar i anläggningen
- Utvärdering av framdragning av naturgasledning i tätbebyggt område (avslutat, se SGC arbetsrapport A28).
- Utveckling av konditionsövervakningssystem. Dels via CMS ( Condition Monitoring system ) och dels via ANN ( Artificial Neural Network ).
- Utveckling av turbinskovelkylning
- Optimering av kompressortvättprocedur.

## 2. VÄSTHAMNSVERKET

Västhamnsverket i Helsingborg är ett ångkraftverk för el och värmeproduktion med en fastbränslepanna för kol, träpellets och olja samt en ångturbin med värmeavtappning. Före tillbyggnaden hade verket en kapacitet av  $64\text{MW}_e$  och  $132\text{MW}_v$ , vilket gav ett alfavärde på 0.48. Vidare finns en eldriven värmepump med 29 MW värmeeffekt samt en hetvattenackumulator med en kapacitet av 1500 MWh.

Tillbyggnaden av gasturbinanläggningen med avgaspannan ökar värmeverkets kapacitet för el och värmeproduktion. Ångan från avgaspannan leds till fastbränslepannans ångturbin, vilken uppgraderats för det ökade ångflödet. Lösningen med hopkopplad avgaspanna och fastbränslepanna är unik.

Totaleffekten är efter tillbyggnaden  $126,7\text{MW}_e$  och  $186\text{MW}_v$ . Alfavärdet har därigenom ökats till 0.68, vilket innebär en väsentlig effektivisering och bättre utnyttjande av fjärrvärmenätet för elproduktion.

### 2.1 Gasturbinen GTX100

GTX100 är en enaxlig gasturbin med en nominell eleffekt på  $43\text{MW}_e$  och termisk verkningsgrad på 37 %. Gasturbinen är optimerad för kombicykler, med relativt hög avgastemperatur, och konstruerad för att kunna köras på både olja och gas med mycket låga emissionsnivåer ( $< 15\text{ ppm NO}_x$  vid 15 %  $\text{O}_2$ ) utan vatteninsprutning.

Kompressorn består av 15 steg med tryckförhållandet 20 och massflödet ca 122 kg/s. Brännkammaren är annulär med 30 st. dubbelbränslebrännare. Turbinen består av 3 steg, varav de två första är kylta för att begränsa metalltemperaturen. Den första GTX100 (produktionsprototypen) levererades till Helsingborg under 1999 och togs i drift för de första verifieringsproven under senhösten 1999.

För närvarande, december 2002, finns det 10 st. GTX100 i kommersiell drift, varav två med mer än 8 000 timmars drifttid. Den sammanlagda drifttiden är ca 45 000 timmar.



Figur 1. Gasturbinen GTX100

### **3. MASKINPROV I HELSINGBORG**

Gasturbinanläggningen i Helsingborg har, förutom ren energiproduktion, utnyttjats för verifikationsprov av den nyutvecklade gasturbinen, GTX100, samt för utveckling och verifikation av förbättringar. Grundproven genomfördes under åren 1999 – 2000, varefter ett antal kompletterande prov utförts. Ytterligare kompletteringsprov planeras för år 2003/04.

Maskinen har provats under alla de normala lastfall som förutses och för både gasbränsle och flytande bränsle. Mätresultaten har dels utvärderats kontinuerligt under pågående mätning dels sparats för framtida utvärdering och som referens. Mätningarna har också varvats med inspektioner för att komplettera mätresultat och för att verifiera komponenternas status.

Den totala energiproduktionstiden för gasturbinanläggningen i Helsingborg har, på grund av energiekonomiska orsaker, varit kort. Detta har medfört att den planerade studien av långtidseffekter, degradering etc. av gasturbinen i Helsingborg, blivit något begränsad.

#### **3.1 Prototypprov GTX100 Helsingborg**

Under utveckling av en ny gasturbin genomförs en rad beräkningar, simuleringar och prov av såväl komponenter som delsystem. Den extremt höga belastningen av materialen och komplexitetsgraden hos systemen (kylning, förbränning etc.) medför trots detta att den kompletta maskinen/systemet måste slutgiltigt verifieras via fullskaleprov.

Huvudmotiven till dessa fullskaleprov är att verifiera start- och driftparametrar, styr-, regler- och hjälpsystemens funktion samt att verifiera belastning och livslängd på gasturbinens ingående komponenter.

Drifftagningen av gasturbinen påbörjades under september 1999 och den egentliga prototypprovningen startade under december 1999. Under hösten 1999 genomfördes en rad installationsprov på gasturbinen, generatoren, styrsystemen, startsekvens mm. Vidare genomfördes prover på den omfattande prototypmätinstrumenteringen.

Under prototypproven var gasturbinen försedd med mer än 1800 mätpunkter utöver standardmätutrustningen. Den extra instrumenteringen omfattade mätning av processparametrar, temperaturer, strukturbelastningar, dynamiska egenskaper, förbränningskaraktistik mm. All mätdata lagrades, och lagras, kontinuerligt för utvärdering och för framtida bruk. Prototypmätsystemet omfattade:

- Strukturmätningar (temperaturmätningar på alla komponenter, vibrationsmätning på skovlar, rotor, hus växel mm, rotordynamiska mätningar av gasturbin, växel och generator mm.)
- Prestanda och aerodynamikmätningar (t.ex. tryck i gaskanal och sekundärluftsystem, luft- och bränsleflöden, strömningsvinklar, toppspelsmätningar m.m.)
- Förbränningsmätningar (flamtemperaturer, bränsle, pulsationsmätning mm.)
- Emissionsmätning (NO<sub>x</sub>, CO, CO<sub>2</sub>, O<sub>2</sub>, UHC mm.)
- Standard driftinstrument

De inledande prototypproven omfattade:

- Prov av startsystem upp till tomgång
- Drifttagningsprov av generatoren och dess system
- Lastprov till fullast på gas- respektive oljebränsle
- Övervarvsprov
- Prestandaprov
- Förbränningsprov för alla laster
- Transientprov (regleringskaraktäristik)

De inledande prototypproven avslöjade inga allvarliga problem med maskinen, utöver de man kan förvänta sig av en nyutvecklad konstruktion av denna komplexitetsgrad. I stort har förväntningarna på maskinen uppfyllts eller överträffats. Mätresultaten avseende processdata, tryck, temperaturer och vibrationsnivåer etc. bekräftar de analyser som gjorts för maskinen. Projektmålen avseende prestanda och emissioner (  $\text{NO}_x$ , CO och UHC, unburned hydro carbon) har också verifierats [3, 4]. Flödeskapaciteten är dock något högre än design vilket gör att effekten är ca 3.5% högre än design.

Under provperioden har några avvikelser från förväntat resultat dock observerats, vilket föranlett att maskinen demonterats för noggrann inspektion och för att införa korrigerande åtgärder. Nedanstående avvikelser, i huvudsak relaterade till brännkammар- och turbinområdet, har föranlett större insatser [1].

- Vissa avvikelser i sekundärluftsytet (kyluftsytet för heta delar i och nära gaskanalen), vilket gav lokalt förhöjd temperatur i några turbinkomponenter.
- Något för hög vibrationsnivå på växel och startmotorväxel samt ett av kompressorledskenesegmenten under start.
- Skador på inaktiv back i axiallagret samt läckage i en kompressorfläns.

Genom ett antal smärre modifieringar och följande verifieringsprov under år 2000 – 2001 har dessa avvikelser kunnat rättas till.

Under proven noterades också att brännkammарpulsationerna var höga under vissa driftförhållanden. [1]. Ett av de största problemen med att nå låga emissionsnivåer utan tillsats av vatten är att erhålla en stabil förbränning, vilket kan leda till tryckpulsationer i brännkammaren, vilket i sin tur stör förbränningen och kan ge skador på strukturen. Genom optimering av brännare och förbränningsprocessen har pulsationsnivåerna kunnat reduceras till väl under acceptabla nivåer för alla driftsfall och emissionsmålen nåtts och överträffats [2].

Under sommaren 2000 genomfördes även ett 500 timmars prov med kontinuerlig drift. Utöver dessa prov genomfördes även vissa standardprov som exempel ljudnivåmätningar och verifiering enligt API ( American Petroleum Institute standard för gasturbinbranschen ).

Det egentliga prototypprovet avslutades sommaren 2001. Vid den tidpunkten hade gasturbinen körts 200 starter och 955 drifttimmar (3872 ekvivalenta drifttimmar) samt producerat 30964MWh. Efter prototypproven togs vissa delar av den extra mätutrustningen bort för att inte äventyra maskinens framtida driftsäkerhet/tillgänglighet.

Huvuddelen av de kompletterande proven under 2000-2002 har avsett förbränningen.



### **3.2 Inspektioner GTX100 Helsingborg**

För att fastställa och följa degraderingen hos, framförallt de heta, delarna i gasturbinen har gasturbinen demonterats helt eller delvis vid ett antal tillfällen [5-13]. I vissa av dessa tillfällen har extra inspektion genomförts i samband med att någon modifiering införts.

Minst en gång årligen har maskinen demonterats och undersökts i detalj på ALSTOM's verkstad. Vid dessa inspektioner har samtliga ingående delar inspekterats visuellt med avseende på eventuella avvikelser. Speciellt har turbinskovlar, ledskenor, brännare och brännkammare undersökts och provats med avseende på defekter, oxidation, korrosion, försmutsning och nötning/förslitning. Vidare har någon/några skovlar/ledskenor från vart turbinstege tagits ur för förstörande materialprov/undersökning.

Sammanfattat kan sägas att komponenternas kondition vid alla tillfällen varit mycket god och att degraderingen varit försumbar. Med tanke på den korta drifttiden, endast 2300 timmar och 395 starter fram till augusti 2002, är heller inget annat att vänta.

Dessa inspektioner, tillsammans med motsvarande inspektioner på andra GTX100, har utnyttjats för att verifiera beräknad degradering och livslängder.

## **4. KONDITIONSÖVERVAKNING ( CMS, CONDITION MONITORING SYSTEM )**

Inom ramen för uppföljningsprojektet har ett system för hantering och utvärdering av driftsparametrar utvecklats. Avsikten med systemet är att via analys av mätdata:

- Detektera degradering och andra avvikelser i funktionen för planering av service och underhåll. ( t.ex. kompressortvätt )
- Ge underlag för driftsoptimering av anläggningen
- Ge underlag för prediktering av komponenters förbrukade och kvarvarande livslängd, baserat på faktisk driftprofil.

Systemet är uppdelat i ett antal moduler. Grundmodulen består av ett datalagringsystem vilket läser och lagrar alla driftmätvärden och signaler. Vidare omfattar systemet ett antal analysmoduler. Analysmodulerna baseras på analytiska metoder för prediktering av prestanda, emissioner, vibrationer etc. Via modulerna kan man bl.a. generera ett antal standardrapporter, utföra trendanalyser och studera normaliserade data [14,15]. Inom pågående projekt är endast de tre första modulerna planerade att vara färdigställda.

Systemet är tänkt att övervaka och lagra data under hela anläggningens livslängd. Detta ställer mycket höga krav på databasens rutiner för sampling och kompression av lagrade data, utan att förlora mätnoggrannhet. Den ursprungligt använda databasen visade sig inte fullt uppfylla målen, varför CMS-databasen bytts ut. Systemet i Helsingborg har dock kvar den äldre databasen.

### **4.1. Datalagringsmodulen**

Grundmodulen i CMS är datalagringsmodulen vilken läser och lagrar mätdata från alla driftinstrument och signaler, totalt ca 300 mätvärden samt ca 900 till/från signaler. Grundmodulen kan även hantera kommunikation av mät- och analysdata till operatören eller leverantören via tele eller datanätet.

Modulen innehåller även en enklare form av analysverktyg i form av visualisering av trender mellan olika signaler etc. Grundmodulen är färdigutvecklad och i drift.

### **4.2. Prestandaövervakningsmodulen**

I prestandamodulen beräknas och övervakas maskinens prestanda i form av verkningsgrad, massflöde, gastemperatur mm. Dessa data utnyttjas för att avgöra degradering och behov av service (t.ex. kompressortvätt), samt som underlag för ekonomisk driftsoptimering [16].

Modulen baseras på traditionella mass- och värmebalansmetoder samt geometri och karaktäristika för GTX100. Genom att analysen baseras på ALSTOM Power's konstruktionsunderlag för GTX100, kan inte bara totalprestanda utvärderas, utan även degradering eller avvikelser i prestanda hos de enskilda komponenterna. Prestandaövervakningsmodulen finns färdigutvecklad och i drift.

### **4.3. Emissionsövervakningsmodulen**

I emissionsmodulen beräknas och övervakas maskinens emissionsprestanda i termer av  $\text{NO}_x$ , CO,  $\text{CO}_2$  och  $\text{O}_2$  [17]. Emissionsmodulen finns färdigutvecklad och i drift.

### **4.4. Vibrationsövervakningsmodulen**

I vibrationsmodulen beräknas och övervakas maskinens rotordynamiska egenskaper. I grundmodulen lagras endast grundläggande vibrationsdata som totalnivåer. I vibrationsmodulen utförs en utökad analys av signalerna från vibrationsgivarna som t.ex. amplitud och fasinnehåll, FFT analys och harmoniska komponenter [18]. Dessa data, kombinerat med ALSTOM Power's underlag för GTX100, medger att inte bara ändringar i vibrationsnivåer kan detekteras, utan även att orsaken kan identifieras. Modulen är under utveckling.

### **4.5. Support & analys**

Support & analys omfattar huvudsakligen en serviceorganisation och ett antal analysverktyg hos ALSTOM Power för att via datalänk till CMS-systemet analysera driftdata, lagrade såväl som i realtid, för problemlösning och/eller rådgivning till kund. Support & analysfunktionen finns i drift.

### **4.6. Ekonomi & driftsoptimeringsmodulen**

Med kännedom om yttre kostnader/intäkter ( bränslepris, el-pris, emissionsavgifter etc. ) kan en ekonomiskt optimal drift beräknas baserat på analyserade data från övriga moduler i CMS-systemet som anläggningens aktuella prestanda, degradering/slitage som funktion av driftprofil etc. Denna modul är ännu i planeringsstadiet.

### **4.7. Konditionsbaserat underhåll**

Service och underhåll av gasturbinanläggningen baseras idag huvudsakligen på drifttimmar och antal starter (ekvivalenta drifttimmar) samt inspektion av enskilda komponenter i samband med dessa servicetillfällen. Varje enskild komponents degradering beror dock av körprofilen, andel dellaster och nivåer, cykling mellan laster, starter, stop, trip samt bränslekvalitet, omgivningstemperatur etc.. Med kännedom om driftdata, vilka lagras och utvärderas via CMS-systemet, samt ALSTOM Power's konstruktionsunderlag och erfarenheter för GTX100, kan såväl förbrukad som kvarvarande livslängd hos varje enskild komponent predikteras. Med kännedom om kvarvarande livslängder kan servicetillfällen och servicekostnader optimeras med hänsyn till planerad drift. Alternativt kan körprofilen justeras för att erhålla optimal driftsekonomi. Denna modul är ännu i planeringsstadiet.

## **5. ANN FÖR HYBRID ANLÄGGNINGEN I HELSINGBORG**

### **5.1. Bakgrund**

Dagens avreglerade elmarknad ställer högre krav på tillgänglighet, samtidigt som komponenterna i moderna kraftverksanläggningar belastas allt hårdare för att nå högre verkningsgrad. För att klara av dessa krav, behövs tillförlitliga övervaknings- och diagnostiseringssystem där processernas tillstånd samt nödvändiga åtgärder för upprätthållande av den höga verkningsgraden kan styras m.h.a. mätdata. Idag baseras de vanligaste övervakningssystemen på värme- och massbalansprogram med fysikaliska modeller av komponenterna. Tillverknings-specifika data används för ökad noggrannhet i beräkningar vilket i sin tur leder till säkrare diagnos.

En annan viktig aspekt är anläggningarnas prestandadegradering. Efter en tids drift försämras anläggningsprestandan på grund av slitage, försmutsning samt termiska och mekaniska belastningar. Vad som behövs är ett intelligent system för kontinuerlig övervakning och diagnostisering som kan anpassas till de nya förhållandena. Artificiella Neurala Nätverk (ANN) har visats vara ett värdefullt verktyg för denna applikation.

Uppmärksamheten kring ANN och dess möjligheter att utgöra grunden i ett expertsystem ökar kontinuerligt. Därför erbjuder SGC/ALSTOM-projektet en unik möjlighet för LTH att validera ANN-verktyget mot en verklig anläggning som hybridanläggningen i Helsingborg. Hybridanläggningen består av en GTX100 gasturbin och en tillhörande avgaspanna, där ånga genereras med hjälp av varma avgaser från gasturbinen. Ånga från den gamla ångcykeln blandas med ånga från avgaspannan som sedan expanderar i den gemensamma ångturbinen. Det primära målet med ANN-studierna är att utvärdera ANN-verktygets möjligheter och begränsningar beträffande anläggningsövervakning, prestandabestämning, sensorvalidering och feldiagnostisering.

### **5.2. Syfte**

Det övergripande syftet för detta delprojekt har varit utveckling och anpassning av ANN-verktyg till gasturbinen i hybridanläggningen i Helsingborg. Genom jämförelse med mätdata samt mer konventionella övervakningsverktyg, t.ex. Condition Monitoring System (CMS), kan ANN-verktyget valideras och dess eventuella begränsningar belysas. Målet är att utveckla ett verktyg för kraftverkstillämpningar för att få effektivare, enklare och billigare övervakning och underhåll, samt en säkrare drift. Eftersom resultaten från ANN-studien varit mycket positiva, är det angeläget att fortsätta studien i syfte att utveckla verktyget så att det omfattar hela hybridanläggningen.

### **5.3. Arbetsgrupp**

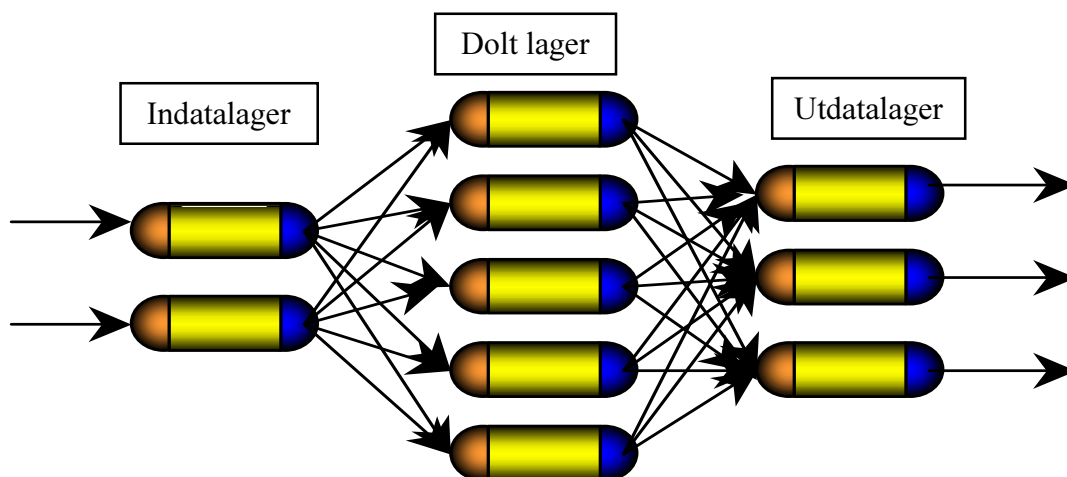
Arbetsgruppen från LTH består av Jaime Arriagada (doktorand), Pernilla Olausson (doktorand) och Mohsen Assadi (handledare).

## 5.4. Projektbeskrivning och status

### 5.4.1. Arbetsmetodik

Arbetsmetodiken har varit en kombination av teoretiska studier, utveckling av egna ANN-modeller och användning av kommersiella ANN-program. Projektet inleddes med en omfattande litteraturstudie inom området, som resulterade i en bred och djup förståelse för den matematiska bakgrunden [19]. Litteraturstudien har sedan fortsatt under hela projektiden. ANN-studien omfattade optimering av utvecklade modeller, utvärdering av kommersiella verktyg samt tillämpning och validering av ANN-modellen på kraftverkskomponenter.

På grund av områdets omfattning har arbetet på LTH begränsats till en viss typ av ANN, ”feedforward neural networks”, som anses vara lämpligast för kraftverksapplikationer. Olika algoritmer och inlärningsmetoder har testats och de olika parametrarnas inverkan på konvergenstid och lösningens noggrannhet undersökts [20, 21].



Figur 2: Exempel på dataflöde i ett ”feedforward neural network”, med 2 neuroner i indatalageret, 5 neuroner i det dolda lagret och 3 neuroner i utdatalageret.

### 5.4.2. Projektstatus

Parallellt med den omfattande litteraturstudien, har projektgruppen utvärderat kommersiella datorprogram för ANN-beräkningar. Utvärderingen resulterade i anskaffning av ett kommersiellt program, Neuro Solutions, för att komplettera datorprogrammet Matlab som användes för utveckling av egna ANN modeller. Användning av Matlab Neural Toolbox för utveckling av ANN-modell för ALSTOM gasturbiner har också studerats i ett examensarbete [22]. Resultaten från ANN-modelleringen applicerad på ALSTOM's GTX100 har varit mycket positiva. Eftersom gasturbinen i Helsingborg har ackumulerat begränsat antal driftstimmar, har data för ANN-modellering också genererats med ALSTOM's utlägningsprogram för gasturbiner, GT21 [23]. Uppmuntrade av de positiva resultaten, avser projektgruppen utvidga tillämpningen av ANN till att den omfattar hela hybridanläggningen. Som första steg har ett examensarbete påbörjats för att utveckla och skräddarsy ett värmebalansprogram för hela hybridanläggningen. Programmet ska kunna kommunicera med mätdatasystemet för inhämtning av mätvärden nödvändiga för simulering.

I en förstudie har ANN-verktygets användning för feldiagnostisering demonstrerats på en ångcykel [24]. Som uppföljning av denna studie har mätdata från en dieselmotor används för utvärdering av olika ANN-baserade feldiagnostiseringsmetoder [25]. Erfarenheterna från studien tillsammans med feldata genererade med hjälp av ALSTOM's simuleringsverktyg för GTX100, GT21, används för utvärdering av feldiagnostisering på gasturbiner.

För att identifiera synergieffekter som kan uppstå när ANN- och CMS-verktygen kombineras, kommer båda verktygen att användas för uppföljning av gasturbinen. Avsikten är att identifiera de tillämpningsområden där kombinationen av ANN och CMS ger säkrare diagnostik.

### **5.4.3. Arbetets nyhetsvärde**

Projektets nyhetsvärde ligger i integreringen av ANN-tekniken med energiapplikationer. ANN-tekniken har haft en stark utveckling de senaste tio åren och har tillämpats på många olika områden. Först nu börjar tekniken bli allmänt accepterad även i energisammanhang. Några exempel på ANN-verktygets tillämpningar i energisammanhang är presenterade i referenserna 26, 27 och 28.

## **6. VALIDERING AV MODELL FÖR BERÄKNING AV KYLDA GASTURBINER**

### **6.1. Bakgrund**

Många termodynamiska studier görs ständigt runtom i världen för att beskriva och utvärdera olika gasturbinbaserade kraftverkskoncept. En stor del av dessa studerade cykler använder alternativa arbetsmedier (t.ex. fuktig luft eller koldioxid) och/eller alternativa kylmedier för skovelkylning (t.ex. ånga, fuktig luft eller koldioxid). Det är därför i detta sammanhang viktigt att kunna ta hänsyn till den inverkan som t.ex. kylningen av gasturbinens skovlar har på processverkningsgraden, och i förlängningen även på en tänkt anläggnings ekonomi och livslängd.

Vid institutionen för Värme- och Kraftteknik pågår sedan några år tillbaka arbete med att ta fram en enkel, hanterbar och tillförlitlig modell för termodynamiska beräkningar av kyllda gasturbiner. Modellen är validerad mot data tillgängliga i den öppna litteraturen, något som bara kan ge grova, men hittills med studerade data väl överensstämmande, resultat rörande modellens förmåga att beskriva expansionen i en kyld gasturbin.

### **6.2. Kylmodell matchad mot data för GTX100**

Att validera modellen mot data från GTX100 i Helsingborg har inneburit en unik möjlighet att utvärdera modellens egenskaper och utöka kunskapen om ingående modellparametrar. Detta kommer i sin tur att leda till ökad tillförlitlighet i framtida studier av gasturbincykler, vilket anses vara en ovedersäglig fördel jämfört med de allra flesta andra akademiska studier av samma art, där brister i kunskaper rörande prestanda hos verkliga gasturbiner ofta förekommer.

### **6.3. Projektstatus**

Mätdata från ett fullastfall för GTX100 i Helsingborg har erhållits från ALSTOM 2000-12-07. Dels har temperaturmätningar från ett stort antal punkter på bl.a. skovlar och diskar i turbinen erhållits, dels har massflöden och temperaturer på kylflöden och varma gaser erhållits. Detta har inneburit att funktionen av kylmodellen har kunnat demonstreras, dvs. det var möjligt att demonstrera att syftet med en kylmodell är just att uppskatta kylmediets massflöde, medan expansionsmodellen uppskattar hur kylningen påverkar effektuttaget från turbinen.

Då fullständiga mass- och värmebalanser, samt ett stort antal yttemperaturer var tillgängliga för första ledskenan för GTX100, var det möjligt att utvärdera mer i detalj kylmodellens beteende. Det är möjligt att uppfylla samma mass- och energibalans med olika kombinationer av indata i modellen, men tack vare kända data var det möjligt att fastställa vad som är lämpliga indata, något som också borde betyda säkrare användning av modellen i framtiden.

Även en fullständig modellering av GTX100 gjordes i värmebalansprogrammet IPSEpro. P.g.a. de stora mängderna indata var denna modellering mycket enkel att göra, och gav värdefulla kunskaper för den referensgasturbin (RefGT) som användes för de termodynamiska cykelstudierna i avhandlingen.

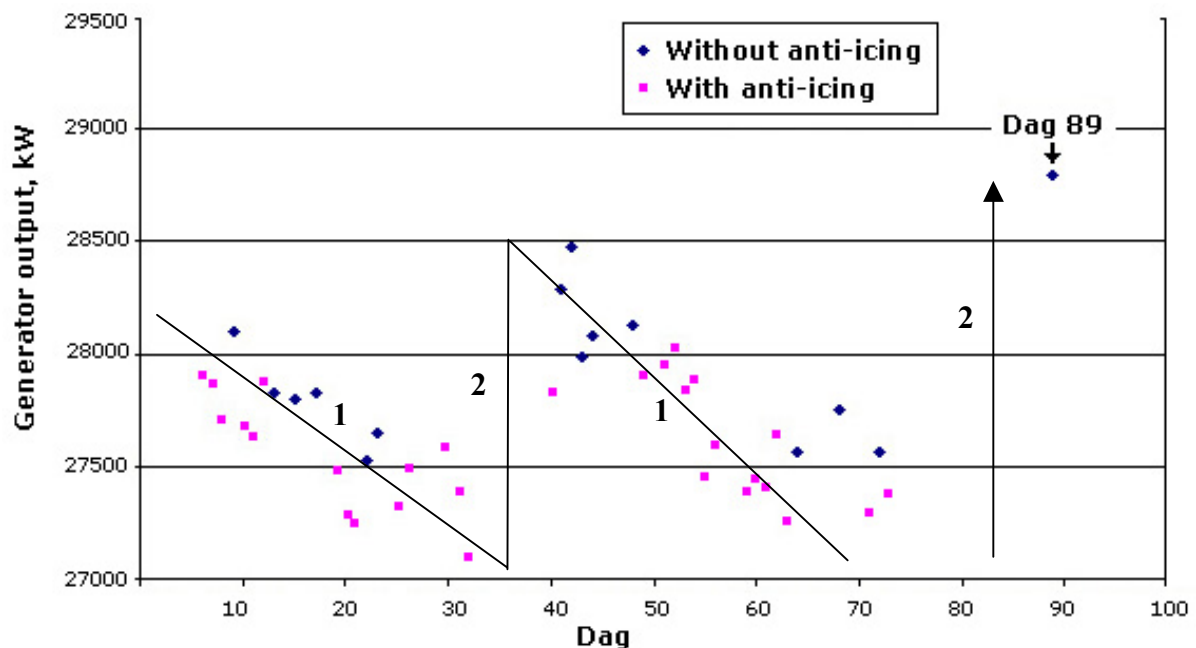
Indata för RefGT är inte identiska med indata för modellen av GTX100, men inte desto mindre har erfarenheterna från modelleringen av GTX100 ökat tillförlitligheten på resultaten från de termodynamiska studierna.

Resultat från dessa studier presenteras i Jordals doktorsavhandling [29], där modellbeskrivning, validering och tillämpningar ingår.



## 7. KOMPRESSORTVÄTT PROCEDUR

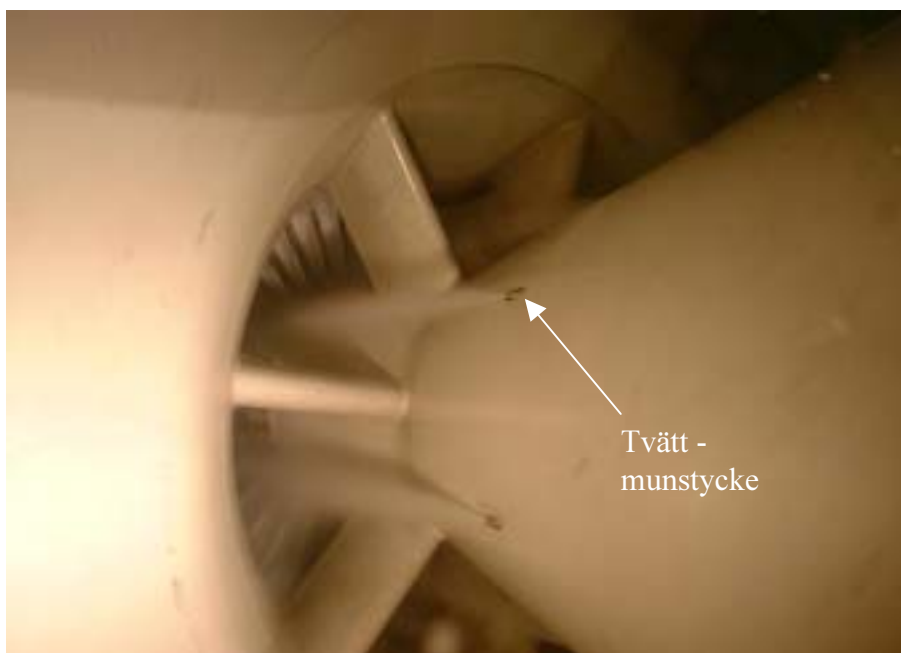
En gasturbin utsätts under drift för olika luftburna föroreningar, t.ex. salter, organiska ämnen, sot mm. Dessa avlagras bland annat på kompressorbeskovlingen vilket medför försämrad aerodynamik vilket i sin tur leder till prestandaförlust och risk för pumpning. Försmutsningen ökar också risken för korrosion och igensättning av kylflödeskanaler, speciellt i turbinbeskovlingen. Genom regelbunden tvätt kan maskinens prestanda återställas. Detta under förutsättning att tvätten blir effektiv.



Figur3: Generator effekt för en gasturbin som funktion av tiden vid degradering (1) och tvättning (2).

Tvättning kan utföras under drift eller under kallkörning/baxning ('on-line' resp. 'off-line'). Tvättning under drift ökar risken för att smutsen, vilken avsätts kraftigast i början av kompressorn, transporteras in längre i maskinen och att den avlagras i de heta, mest känsliga, delarna då vattnet avdunstar. Å andra sidan påverkar 'on-line' tvätt inte dyrbar produktionstid.

Avsikten med delprojektet är att ta fram en optimal tvättmetod med avseende på tvätteffekt, typ och placering av munstycken, tvättsekvens, tidsåtgång mm. Optimering av kompressortvättproceduren genomförs dels via grundläggande undersökningar och dels via praktiska fullskaleförsök.



Figur 4: Insprutning av tvättvätska under proven i Helsingborg

### 7.1. Tvättprov i Helsingborg

En serie prov för att utvärdera avsvainingstider och tvättprocedurer har genomförts på GTX100 i Helsingborg [30]. För att förhindra att tvättvattnet avdunstar mot heta delar och lämnar kvar smutsen, måste alla ytor tillåtas kallna/kylas tillräckligt före tvätt. Inledningsvis utfördes några prov för att minimera tidsåtgång och verifiera avsvainingsproceduren.

Tvättproven genomfördes som 'off-line' tvätt. D.v.s. insprutning av tvättvätska och tvättning utförs under relativt långsam rotation, baxning, av turbinen. Under tvätt leds tvättvattnet ut via ett antal avtappningar längs maskinen. Mängd och kvalitet, innehåll av tensider, partiklar, PH och ledningsvärde, registrerades för varje avtappning vid varje prov. Baserat på detta kan vattnets inträngning i maskinen och effekten av tvätten bestämmas som funktion av tvättproceduren.



Figur 5: Offlinetvätt.

I takt med att datorernas prestanda har ökat under 1990-talet, har det blivit möjligt att med CFD (Computational Fluid Dynamics) studera 3-dimensionella strömningsfält i både en och två faser (t.ex. luft och vatten) i industriella tillämpningar. Detta görs lämpligast i kommersiella CFD-beräkningsprogram (t.ex. Star-Cd). Denna teknik har aldrig tidigare prövats i kompressortvättsammanhang.

## 7.2. Arbetsmetodik

Inloppsgeometrin för GTX100 som tillhandahålls av ALSTOM Power har använts för modellering av kompressorinloppet. CFD-beräkningar utförs på kompressorinloppet under off-linetvätt. Beräkningarna syftar till att undersöka om tvättproceduren kan förbättras, genom att detaljstudera tvättmunstyckenas placering och funktion.

Sprayberäkningar i CFD program vilar i stor utsträckning på empiriska eller semi-empiriska modeller för spraybildning mm. En viktig del i denna undersökning utgör därför att undersöka CFD's begränsningar i problem av denna typ.

Beräkningarna stöttas med experiment (lasermätningsskärmetoder av typen PIV och mie-spridning) i en spray-rigg. Detta syftar i första hand till att generera randvillkor till CFD men även att testa de sub-modeller som används i spraymodelleringen.

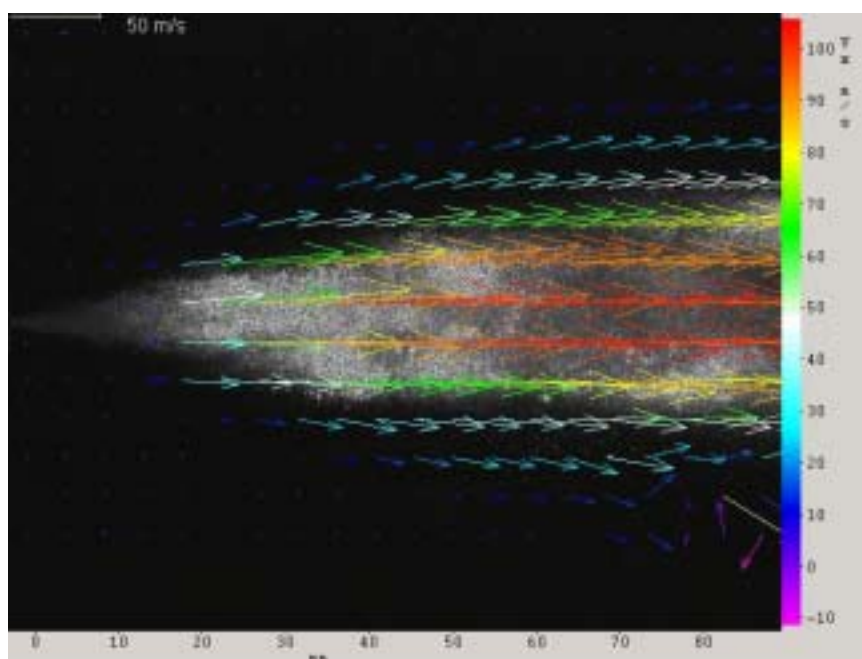
## 7.3. Status

Fältstudier i kompressortvätt har genomförts på både en GT10 i Mariager och på GTX100 i Helsingborg, [30, 31]. Två examensarbeten har genomförts, med syfte att studera både experimentella och beräkningsmässiga möjligheter och begränsningar, [32, 33].

Ett spraymunstycke från tvättutrustningen har monterats i en enkel försöksuppställning, se figur 6, och hastighetsmätningar har genomförts. Figur 7 visar resultaten från en PIV mätning. Droppstorleksbestämning pågår med hjälp av Mie-spridning och konventionella metoder (flödesmätning och "patternation").

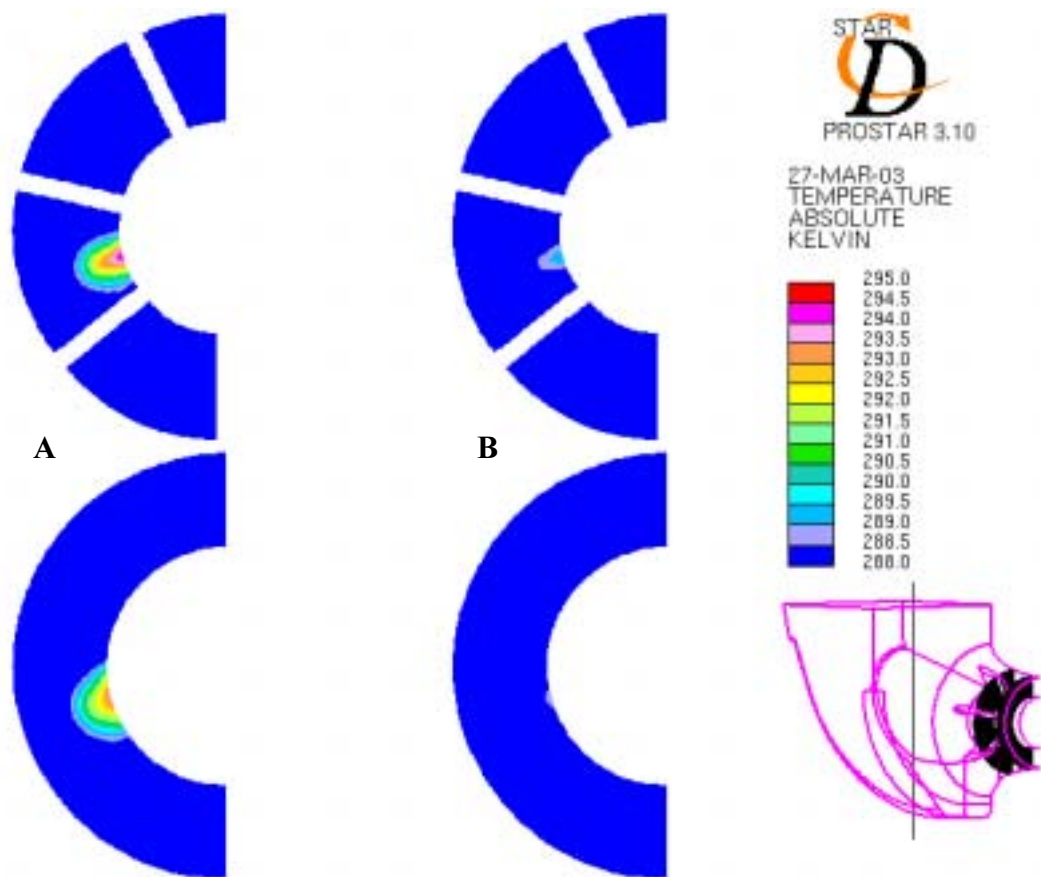


Figur 6: Experimentuppställning för undersökning av sprayer.



Figur 7: Hastighetsmätning av spray med PIV. Bakgrunden visar obearbetad Mie-spridning som kan antas proportionell mot partikeldensiteten multiplicerad med  $D[2,0]$  (ytmedelvärde).

Geometrin för kompressorinloppet har implementerats i CFD-programmet Star-Cd och de första preliminära beräkningarna är genomförda. Beräkningar för att utreda beräkningarnas känslighet för randvillkor, numeriska parametrar mm pågår. Figur 8 visar utdata från beräkningar som adresserar frågan om betydelsen av att värma vattnet före tvätten.



Figur 8: Lufttemperaturfördelning i kompressorinloppet för två olika snitt under off-linetvätt förhållanden. Jämförelse mellan två olika vattentemperaturer med ett munstycke aktiverat; A:  $T_{\text{vatten}}=330$  K, B:  $T_{\text{vatten}}=300$  K (lufttemperatur =288 K).

#### 7.4. Arbetsgrupp

Arbetsgruppen består av Ulf Engdar (doktorand), Fredrik Hermann (doktorand) och Jens Klingmann (handledare).

## REFERENSER

1. RT T10C 63/01, GTX100, Prototype test report, Engine B520 Helsingborg, ALSTOM Power Sweden AB, 2001
2. RT T10C 68/02, GTX100, B520 Helsingborg - Test report summer 2002, ALSTOM Power Sweden AB, 2002
3. RT T10C 60/01, Summary of performance of engine B520 in Helsingborg, ALSTOM Power Sweden AB, 2001
4. RT LXP 8/02, Prestandaprov på anläggning B687, GTX100 B520 samt den uppgraderade ångturbinen B3504, ALSTOM Power Sweden AB, 2002
5. RT SP 13/00, RT SP 13/00 - B0520 Helsingborg Inspektion i verkstaden i Finspång, ALSTOM Power Sweden AB, 2000
6. RT SP 12/01, RT SP 12/01. Inspektion av spridare, B520 Helsingborg, brännarsats B523. ALSTOM Power Sweden AB, 2001
7. RT SP 33/01, RT SP 33/01 - B000520 Helsingborg, ALSTOM Power Sweden AB, 2001
8. RT LFA 42/01, Inspektions rapport av B000520 Helsingborg, GTX 100-A, ALSTOM Power Sweden AB, 2001
9. RT SP 98/01, Inspektions rapport av B000520 Helsingborg, GTX 100-A i Alstom's verkstad , ALSTOM Power Sweden AB, 2001
10. RT SP 125/01, Inspektion av GTX 100 spridare, Helsingborg ALSTOM Power Sweden AB, 2001
11. RT SP 78/02, RT SP 78/02. Inspection report GTX100-A, B000520 Helsingborg ALSTOM Power Sweden AB, 2002
12. RT SP 106/02, Inspektions rapport av B520 Helsingborg, GTX 100-A ALSTOM Power Sweden AB, 2002
13. 1CS30893, GTX100 Level-A inspection report. B000520 Helsingborg ALSTOM Power Sweden AB, 2002
14. 1CS 6 243, Kravspecifikation Condition Monitoring System (CMS), Service ALSTOM Power Sweden AB, 1998
15. 1CS10983, Condition monitoring system – CMS, ALSTOM Power Sweden AB, 1999
16. 1CS14625, Specifikation CMS GTX100 modul 1 (prestanda) ALSTOM Power Sweden AB, 2000
17. RT RT 2/02, Specifikation of ECMS for CMS, ALSTOM Power Sweden AB, 2002

18. RT RDV 48/02, Förstudieresultat CMS Modul 3 "Basic"  
ALSTOM Power Sweden AB, 2002
19. Olausson P., Arriagada J.; "General Overview of the Artificial Neural Network Engineering for Energy System Applications", ISRN/LUTMDN/TMVK-3193-SE, Dept. of Heat and Power Engineering, Lund, 2000.
20. Arriagada, J., "Introduction of Intelligent Tools for Gas Turbine Based, Small-Scale Cogeneration". Thesis for Degree of Licentiate in Engineering. ISRN LUTMDN/TMVK-99/7053-se, 2001.
21. Olausson, P., "Tools for Environmental Design and Operation of Heat and Power Plants". Thesis for Degree of Licentiate in Engineering. ISRN LUTMDN/TMVK-99/7052-se, 2001.
22. Cabrejas P.; "Artificial Neural Networks: A Novel Tool for Analyze and Control of Modern Energy Systems", ISRN/LUTMDN/TMVK—5345—SE, Lund, 2001.
23. Olausson P., Arriagada J.; "Case study for evaluation of an ANN-model generated in Matlab Neural Toolbox, applied to GTX100", Lund, 2001.
24. Mesbahi E., Genrup M., Assadi M., "Fault Prediction, Diagnosis and Sensor Validation Technique for a Steam Power Plant", Submitted to ENERGY - The International Journal, 2003.
25. Mesbahi E., Arriagada J., Ghorban, "Diesel Engine Fault Diagnosis by Means of ANNs: A Comparison Between Fault Pattern and Residual Method", Submitted for publication in Journal of Heat Transfer, 2003.
26. Assadi M., Mesbahi E., Torisson T., Lindquist T., Arriagada J., Olausson P., "A Novel Correction Technique for Simple Gas Turbine Parameters", ASME TURBOEXPO 2001, New Orleans, USA.
27. Mesbahi E., Assadi M., Torisson T., Lindquist T., "A Unique Correction Technique for Evaporative Gas Turbine (EvGT) Parameters", ASME TURBOEXPO 2001, New Orleans, USA.
28. Mesbahi E., Assadi M., Torisson T.; "An online and Remote Sensor Validation and Condition Monitoring System for Power Plants ", CIMAC 2001, Germany.
29. Jordal K., 2001, "Modeling and Performance of Gas Turbine Cycles with Various Means of Blade Cooling", Doctoral Thesis, Department of Heat and Power Engineering, Lund University, ISRN LUTMDN/TMVK—1027—SE.
30. RT RGP 14/02, Prov av kompressortvätt GTX100 i april 2002  
ALSTOM Power Sweden AB, 2002
31. Engdar U., Genrup M., Hermann F.; "Compressor Washing Off-Line", Dept. of Heat and Power Engineering, Lund, 2000.

32. E. Marin-Lamellet "Fluid Dynamic Computations of a Liquid Jet in a Cross-Flow of Air" LUTMDN/TMHP – 02/3003 -- SE, 2002.
33. P. Johansson, "Experimental examination of sprays related to washing in gas turbine compressors ", LUTMDN/TMVK – 5339-SE, 2001.





**SE-205 09 MALMÖ • TEL 040-24 43 10 • FAX 040-24 43 14**  
**Hemsida [www.sgc.se](http://www.sgc.se) • epost [info@sgc.se](mailto:info@sgc.se)**

---