SKOGSINDUSTRIELLA PROGRAMMET 912

Verifiering av verkningsgrad för spiralfläkt

Bert Thuresson

värmeforsk
VÄRMETEKNISK FORSKNING OCH UTVECKLING

Verifiering av verkningsgrad hos spiralfläkt

Verifying of Efficiency and Sound Pressure Level for Spiralfan

Bert Thuresson

S4-406

VÄRMEFORSK Service AB
101 53 STOCKHOLM · Tel 08-677 25 80
Mars 2005
ISSN 0282-3772

Abstract

Mätning enligt ISO 5081, utförd vid SP i Borås 2004-03-16 – 2004-03-30, har visat att en fläkt designad enligt Bengt-Olof Drugges metod ger verkningsgraden 90 %.
Ljudnivån ligger på 72,5 dB(A) 1 meter från fläkten.

Sammanfattning

Bakgrund: Uppdraget var att genomföra en mätning på SP för att verifiera verkningsgraden och ljudnivåer. Tidigare har goda resultat erhållits, dock ej i ett certifierat testhus.

Syfte: En verifiering av en ny typ av fläkt har därför genomförts i syfte att påvisa dess användbarhet.

Mål och målgrupp: I första hand skogs-, gruv- och kemi- och processindustri men spiralfläkten kan även användas för fastighetsventilation.

Projektgenomförande: Testerna utfördes av SP. Verkningsgraden testades 2004-03-16 – 2004-03-30 och ljudet 2004-06-17,18 och 21.

Resultat och slutsatser: Testet har visat uppmätta flöden och tryck stämmer med beräknade. Verkningsgraden 90 % är det högsta värdet uppmätt för denna storlek och typ av fläkt.
Ljudnivån är låg samt utan utstickande toner.

Nyhetsvärde och användning: Fläktteknologi anses vara en mogen bransch. Drugge har trots detta visat att det finns förbättringar att göra. Nytt är den höga verkningsgraden, låga ljudnivån samt den korta utvecklingstiden, ca 10 veckor, av en skräddarsydd fläkt mot en specifik arbetspunkt.

Måluppfyllelse: Verkningsgraden 90 % ligger i nivå med lägsta förväntade resultat. Trots att det är högt kan förmodligen fläktar konstrueras med ännu högre verkningsgrad med Drugges metod.

Sökord. Energibesparande, spiralfläkt, verkningsgrad, ljudnivå, utvecklingstid

SUMMARY

Generally: The object of the project was to verify the efficiency of the fan. Measurements have been done earlier with good results, but not in a certified test house
Intention: Measurement of a new type of spiralfan to verify how useful this fan is.

Objective: Measurement of a new type of centrifugal fan to verify its usefulness.

Purpose and target group: Primarily pulp and paper, mining, chemical and process industry but the fan can also be used for ventilation.

Realization of the project: The test was carried out by SP in Borås 2004-03-16 – 2004-03-30 for the efficiency and 2004-06-17, 18 and 21 for the acustic test.

Result and conclusions: The obtained value of flow and pressure correspond well to those calculated. The efficiency 90 % is the highest ever for this type and size of fan.
SPL is low and without fluctuation or modulation.

What is new and how can it be used: Fan design is considered as a mature technology. Mr. Drugge's invention shows that improvement is still possible. Advantages are the high efficiency, low noise level and the short time for design, about 10 weeks, for a fan modified for a specific working point.

Accomplishment: 90 % is in the lower range of expected efficiency. There is a conviction that fans of even higher efficiency can be built.

Keyword: Energysaving, spiralfan, efficiency, sound pressure level, development time

Innehållsförteckning

1 BAKGRUND 1

2 TEORI 2

3 RESULTATREDOVISNING..... 5

4 RESULTATANALYS .... .13

5 REKOMMENDATIONER OCH ANVÄNDNING..... .17

6 LJUDMÄTNING 24

6.1 BAKGRUND..... 24
6.2 PSYKOAKUSTIK..... 25
6.3 MÄTMETOD..... 27
6.4 RESULTAT..... 27
6.5 BENCH MARKING..... 29
6.6 PPROTOKOLL..... ... .30

7 FÖRSLAG TILL FORTSATT FORSKNINGSARBET.....31

7.1 VERKNINGSGRAD VID OLIKA VARVTAL..... 31
7.2 LJUDMÄTNING..... 32
7.3 VIBRATIONSMÄTNING..... 32
7.4 LAGERBELASTNING..... 32
7.5 SLITAGE..... 32

8 TILLVERKNINGSKOSTNAD.....33

1 Bakgrund

Drugge har utvecklat en ny metod att designa fläktar för att nå hög verkningsgrad.
En fläkt av samma typ är installerad i LKABs Gästgruva i Kiruna. Hög verkningsgrad och lågt ljud är omvittnat. [1]
Den fläkt som har testats av SP har tidigare testats av Tekniska Universitet i Luleå. Även då uppmättes hög verkningsgrad.
I Danmark har en kampanj, Spareventilator, drivits i ett par år. De har en databas som är åtkomlig på Internet, http://www.spareventilator.dk, som listar verkningsgraden för de fabrikat som har godkända fläktar. Godkänd nivå för den testade fläktens prestanda är 80 %. De bästa jämförbara uppnår 85 %. Stora fläktar, >100 kW, kan dock nå högre.
På uppdrag av Värmeforsk har en verifiering av verkningsgraden utförts av SP som konstaterat att den är 90 %.

[1]Referenspersoner är Åke Skoglind och Lennart Kruuka LKAB telnr:0980-71000

2 Teori

Metoden bygger på bl.a. följande antaganden:

(a) Genomströmningshastigheten i en centrifugalfläkt med konstant genomloppsarea kan inte överskrida maximal periferihastighet hos fläkthjulet.

(b) Maximal genomströmningshastighet uppnås i de fall där tangentialhastigheten vid början av vingen är minst lika stor som den radiella hastigheten, där vingen formas och hastighetsskillnaden mellan tangentialhastigheterna är minst lika stor som den radiella hastigheten. Vingarna i fläkten skall överlappa varandra.

Fläktar för test och installationer har tagits fram. Höga värden på verkningsgrad och låga ljudnivåer har noterats. Dock har inga mätningar gjorts i certifierat testhus.

Följande avsnitt ur Energiläroboken ”Energi, Curt Ulvås, Skolförlaget 1967” är av stor betydelse för teorin.

”Detta är *centrifugalpumpens,* l:a *huvudekvation* i *allmän form.* Den gäller under förutsättning av ett oändligt antal tunna skovlar, som medför en absolut likformig deviation av vätskeströmningen utefter varje strömlinje. Det tryck, som motsvarar uppfordringshöjden *H,* är $p=\varrho\, g\, H$ N/m^2, varför l:a huvudekvationen också kan skrivas
$P_{teor} \infty = \varrho\,(u_2\, c_{2u} - u_1\, c_{1u})$ N/m^2

Ett annat sätt att skriva huvudekvationen erhålls med hjälp av hastighets-parallellogrammerna vid utloppet och inloppet (fig. 2: 20)
$w_2^2 = u_2^2 + c_2^2 - 2\, u_2\, c_2 \cdot \cos \alpha_2$
$w_1^2 = u_1^2 + c_1^2 - 2\, u_1\, c_1 \cdot \cos \alpha_1$

Alltså är
$u_2\, c_2 \cdot \cos \alpha_2 = u_2\, c_{2u} = (u_2^2 + c_2^2 - w_2^2)/2$
och
$u_1\, c_1 \cdot \cos \alpha_1 = u_1\, c_{1u} = (u_1^2 + c_1^2 - w_1^2)/2$
Insättning i l:a huvudekvationen ger då

$$H_{teor} \infty = (c_2^2 - c_1^2/2g + u_2^2 - u_1^2/2g + w_1^2 - w_2^2)/2g$$

eller

$$p_{teor} \infty = \varrho/2(c_2^2 - c_1^2) + \varrho/2(u_2^2 - u_1^2) + \varrho/2(w_1^2 - w_2^2) \text{ N/m}^2$$

som kallas 2:a huvudekvationen.
Den första termen i högra ledet av tryckekvationen representerar ökning i *dynamiskt tryck,* som uppkommer på grund av att vätskan vid sin passage genom hjulet bibringas en ökad

absolut hastighet.[2] Detta deltryck brukar ofta omvandlas till statiskt tryck i ett lämpligt utfört spiralhus.
Den andra termen betyder *statisk tryckökning* på grund av centrifugalkraftens inverkan. Denna tryckstegring är förlustfri, då den inte är förenad med någon strömning, och man kan vänta sig högre verkningsgrad ju större procentuell del av den totala tryckökningen, som denna förlustfria statiska tryckökning utgör.[3]
Den tredje termen slutligen representerar *statisk tryckvinst* genom diffusorverkan i skovelkanalen."

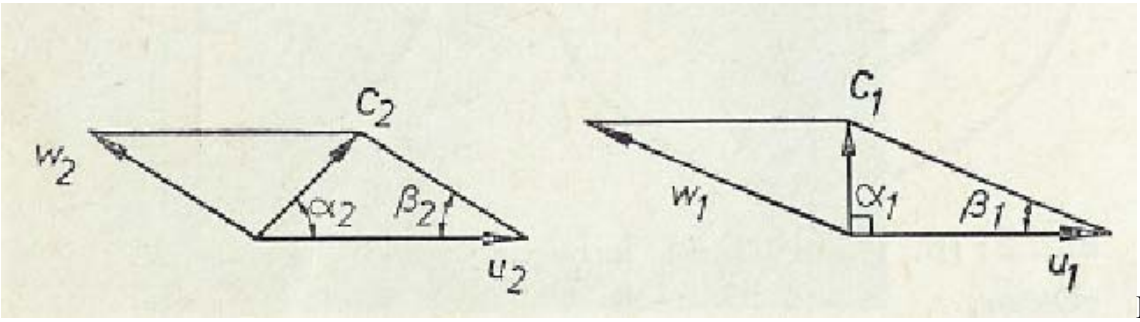


Fig. 2: 20, Hastighetsparallellogrammer.

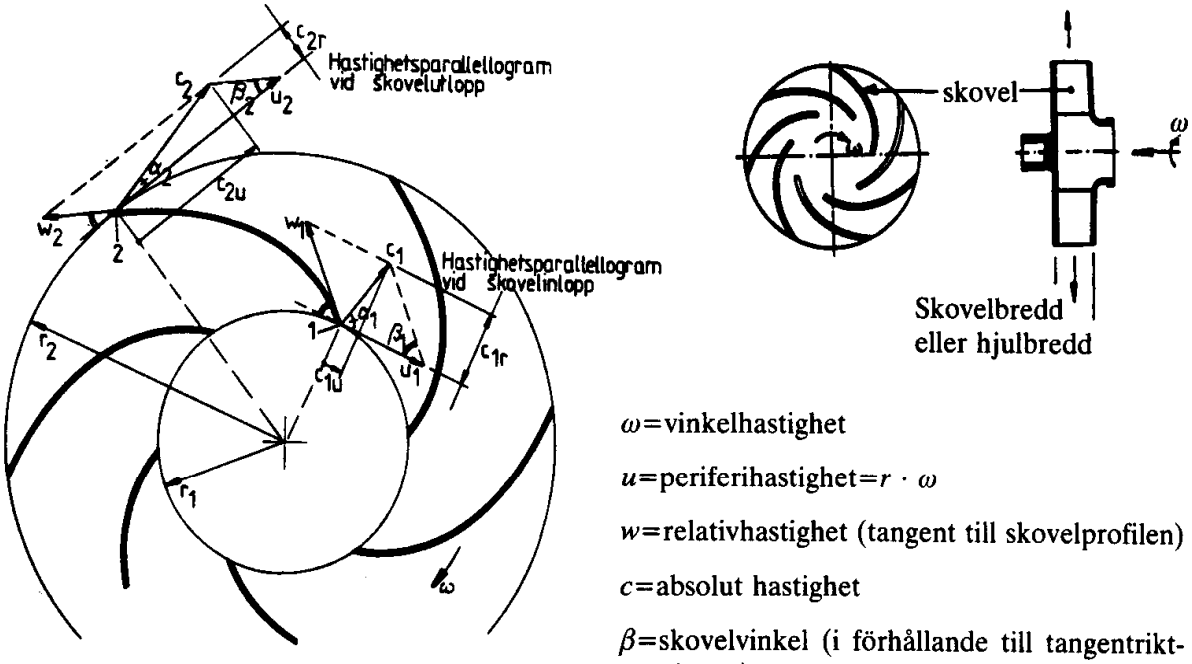
Ovanstående avsnitt beskriver pumpar. Teorin är alltså giltig för vätskor såväl som gaser. Gaser vid det tryck som förekommer vid denna mätning kan betraktas som inkompressibla. 1500 Pa är endast ca 1,5 % av atmosfärstrycket (101325 Pa).
Kanalarean i hjulet är konstant. Därför kan massabalans upprätthållas och ingen energi åtgår till att kompensera rubbningar i denna balans. Vid en vidgning av kanalareor stör man denna balans. För att minimera detta bör ökningen ej överstiga 7º. Övergången (stosen) från 450 mm i utloppet till 500 mm (SP:s standardkanaler) är således 408 mm lång.
Endast tryckökning från centrifugalkraftens inverkan finns i SP-fläkten vid optimal arbetspunkt. Som framgår av texten är den fri från förluster då den ej är förenad med strömning.
Detta är det nya i teorin. Det förklarar varför fläkten inte har lika hög kapacitet som motsvarande radialfläktar med samma inloppsdiameter. Det är således ingen "superfläkt" men det arbete den uträttar gör den, enligt teorin, förlustfritt.
Fläkten har ca 30 % större diameter än standardfläktar. Dock är fläktens bredd endast ca 50 % av motsvarande radialfläkt.
Spareventilator beskriver radialfläktar på följande sätt på sin hemsida: "Radialventilator med bagudkrummede skovle tilfører luften den væsentligste del af energien i form af statisk trykenergi. Det medføre små indre tab og dermed en relativ høj virkningsgrad, i visse tilfælde op til 85%."

[2] I vissa fall antages denna bli större än periferihastigheten och strider därmed mot antagandet a)

[3] Detta förhållande uppstår då SP-fläktens arbetspunkt ligger mitt på kurvan. Krafterna w och c tar då ut varandra och kvar blir u, som är förlustfri.

Fläkten kan dimensioneras för högre tryckuppsättning än den testade. Faktorer som bestämmer trycket är rotationshastighet, skillnad mellan inlopp och utlopp samt luftens densitet och omgivningstrycket. Vid tryck > 10 kPa är luften mer komprimerad och teorin stämmer ej. Hur mycket avvikelse som uppstår saknas erfarenhet av i dagsläget.
Flödet i fläkten kan varieras mellan 0,25 m^3/s och 2, 8 m^3/s genom att man varierar angreppsvinkeln på vingen vid samma tryck, ca 2 kPa och med lika hög verkningsgrad, 90 %, samma varvtal och dimensioner. Notera dock att nya fläktar måste tillverkas för varje flöde. Vingarna kan ej ställas om på samma individ.

Se nedanstående figur med förklaring på nomenklatur.



Figur 3.2-1 Hastighetskomposanter i ett skovelhjul. Radialhjul

ω=vinkelhastighet

u=periferihastighet=$r \cdot \omega$

w=relativhastighet (tangent till skovelprofilen)

c=absolut hastighet

β=skovelvinkel (i förhållande till tangentriktningen)

c_u=absoluta hastighetens tangentialkomposant

c_r=absoluta hastighetens radialkomposant

α=vinkeln mellan absoluta hastigheten och u-riktningen

b=skovelbredd

3 Resultatredovisning

SP har upprättat en rapport, ETv P4 00914. Se nästa sida.

RAPPORT

Sida
1 (3)

Silenco Ingenjörsfirma
Bert Thuresson
Skifferstigen 8
196 33 KUNGSÄNGEN

Handläggare, enhet
Tobias Törnström
Energiteknik
033-16 55 17, tobias.tornstrom@sp.se

Datum
2004-03-30
Reviderad 2004-04-15

Beteckning
ETv P4 00914

Kapacitetsprovning av fläkt

Uppdrag
Provning av 1 st radialfläkt avseende fläktens nominella arbetspunkt och dess totalverkningsgrad. Provningen utfördes i enlighet med den internationella standarden ISO 5801.

Provobjekt
Radialfläkt typ WIMA. Provobjektet ankom till SP 2004-03-18. Vid provstart av fläkten upptäcktes att manöverenheten inte fungerade. Därför beställdes i samråd med uppdragsgivaren att installera en ny manöverenhet. Provobjektet var direktdrivet med en trefas fläktmotor av fabrikat ABB Motors, typ M2 AA 112M (3G AA 112 001-ADA1) med A-koppling.



Tid och plats för provningen
Mätningarna utfördes på SP, enheten för Energiteknik 2004-03-22 tom 2004-03-30.

Provningsförfarande
Provningen utfördes enligt ISO 5801 med provuppställning typ D (kanalanslutet in- och utlopp). Provningsutrustningen kopplades upp enligt föreskrifter i standarden. På fläktens sugsida anslöts kanaler med samma dimension som fläktens inlopp (500 mm) där 9 diametrar anslöts före det statiska tryckuttaget och 3 diametrar mellan tryckuttaget och fläktens inlopp. På fläktens tryckside anslöts kanaler med dimensionen 500 mm

RAPPORT

Datum 2004-03-30 Reviderad 2004-04-15

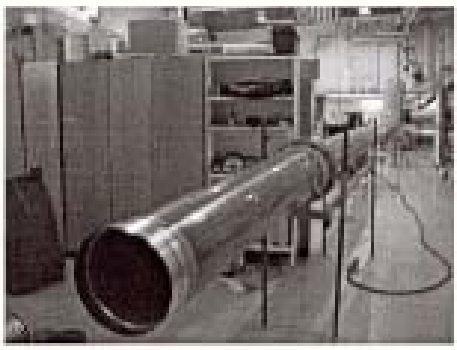
Databeteckning ETv P4 00914

Sida 2 (3)

(samma som fläktens dimension) och här användes 5 diametrar fram till tryckuttaget och ytterligare 7 efter uttaget. Därefter kopplades ett par 45° böjar in för att kunna ansluta flödesmätaren på en rimlig nivå. Cirka 20 diametrar anslöts innan flödesmätaren för att erhålla en jämn strömning i flödesmätaren. I slutet av anordningen monterades ett spjäll för att hålla ett motryck samt hjälpfläkt för att klara av de högsta flödena. Provobjektets fläktmotor anslöts via ett effektmätskåp till en 3-fas matning på 400 VAC.







Mätutrustning

Luftflödesmätare Dysa 5 (inv. nr 200 517)
Mikromanometer typ Furness FCO12 (inv.nr 201 687)
Mikromanometer typ Furness FCO12 (inv.nr 201 688)
Mikromanometer typ Furness FCO12 (inv.nr 202 626)
Mikromanometer typ Furness FCO16 (inv.nr 201 689)
Termometer typ Testo 635 (inv.nr 201 392)
Varvtalsmätare Lutron DT-2236 (inv.nr 201 590)
Eleffekt Eleffekskåp VV2 (inv.nr 200 450)
Totaltrycksmätare typ Druck DPI-260 (inv.nr 201 637)

RAPPORT

Datum 2004-03-30
Reviderad 2004-04-15

Beteckning ETv P4 00914

Sida 3 (3)

Resultat

Resultatet redovisas i form av tabeller och diagram i bilaga 1. Samtliga resultat har konverterats till standardiserade betingelser, d v s luft med en densitet på 1,20 kg/m^3, samt till ett fläktvarvtal på 1500 rpm. Använd nomenklatur förklaras i bilaga 2.

Angiven axeleffekt har beräknats utifrån uppmätt eleffekt och varvtal, samt de av uppdragsgivaren givna data för fläktmotorn.

Angiven axelverkningsgrad inkluderar friktionsförluster i fläktlhjulets lager.

Resultaten gäller endast för det provade objektet.

Mätosäkerhet

Mätosäkerheten under provningen har uppskattats enligt följande:

	Mätosäkerhet
Luftflöde	±1,5 %
Lufttemperatur	±0.3 °C
Luftfuktighet	±3 %RH
Totaltryck	±60 Pa
Differenstryck	+0.5 %
Varvtal	±5 rpm
Eleffekt	±0.5 %

Osäkerheten för total verkningsgrad (η_t) beräknas till ±1,8 % av beräknat värde.

Osäkerheten för givna motordata avseende verkningsgrad som funktion av varvtal är enligt uppdragsgivaren ±1 %. Men beroende på mätosäkerhet för uppmätt varvtal m.m. uppskattas den totala osäkerheten för beräknad axeleffekt till cirka +2 %.

Spårbarhet

Samtliga använda instrument har spårbarhet till riksmätplats eller motsvarande internationell organisation.

SP Sveriges Provnings- och Forskningsinstitut
Energiteknik - Ventilation och inneklimat

Sven H. Ruud
Teknisk ansvarig

Tobias Törnström
Teknisk handläggare

Bilagor.
1. Resultat avseende tryckfall/flöde och verkningsgrader (tabeller och diagram).
2. Beskrivning av använd nomenklatur (på engelska, enligt ISO 5801).

Bilaga 1

Datum/Date
2004-03-31
Reviderad 2004-06-15

Beteckning/Reference
ETs P4 00914

Sida/Page
1 (2)

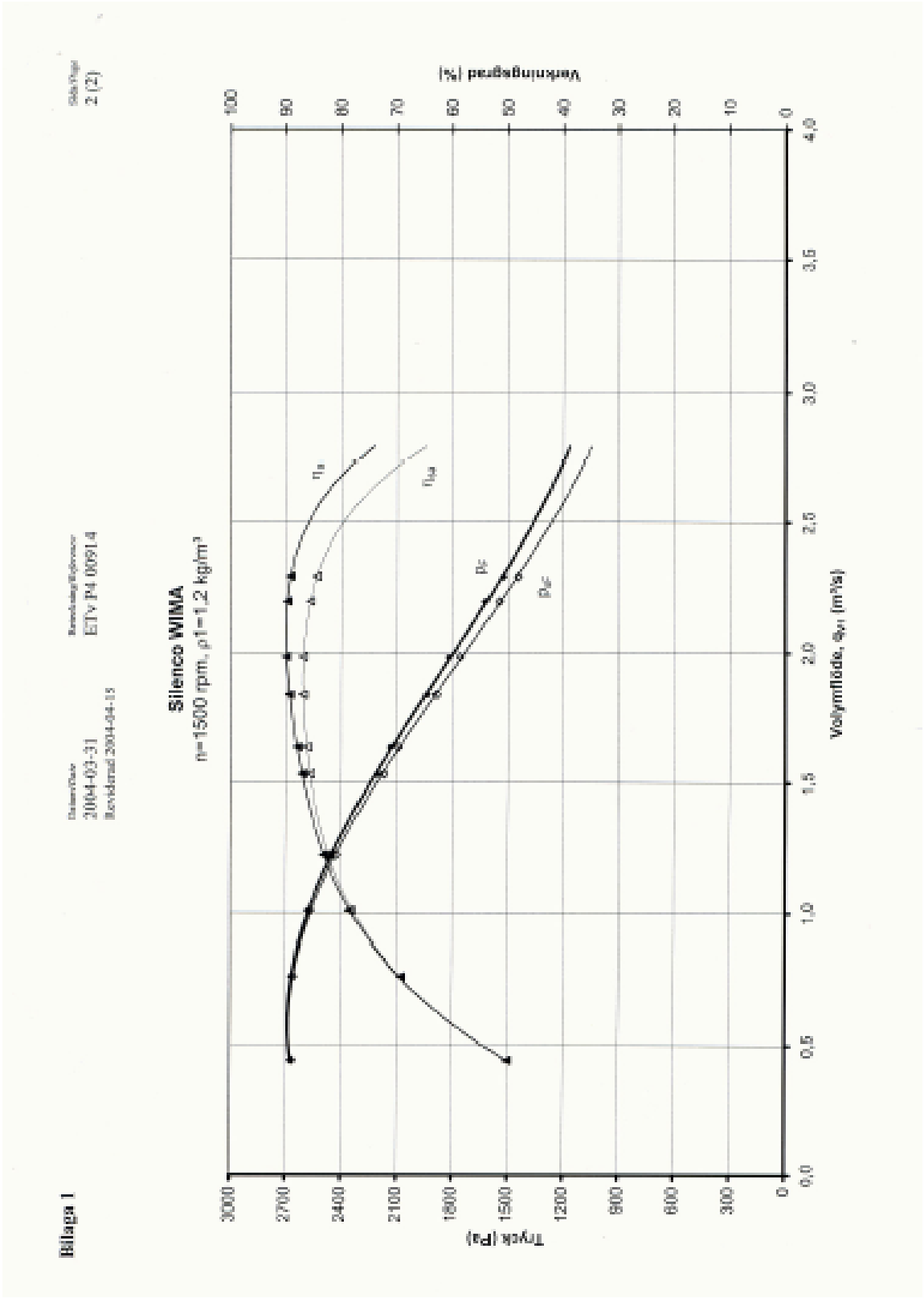
Tabell 1: Provade värden

P_{eTs} W	n_{Ts} rpm	t_{1Ts} °C	ρ_{1Ts} kg/m³	p_{1Ts} Pa	p_{2gTs} Pa	p_{2Ts} Pa	p_{3gTs} Pa	p_{3Ts} Pa	q_{mTs} kg/s	q_{v1Ts} m³/s	p_{rTs} Pa	p_{dyTs} Pa	P_{aTs} W	k_{pTs} -	P_{aTs} W	P_{wiTs} W	η_{LTs} %	η_{isoTs} %	η_{sTs} %
3992	1436	20,4	1,174	99238	99311	100604	100677	72	2,534	2,192	1386	1293	3341	0,9954	2980	2822	89,2	84,4	74,6
4025	1437	22,0	1,168	99250	99317	100697	100763	66	2,455	2,102	1446	1380	3371	0,9951	3025	2887	89,7	85,6	75,2
4061	1432	20,4	1,175	99278	99332	100899	100952	54	2,222	1,892	1620	1566	3389	0,9945	3048	2947	89,0	87,0	75,1
4060	1436	21,7	1,175	99283	99340	101031	101077	46	2,064	1,757	1737	1691	3398	0,9941	3034	2953	89,3	86,9	74,7
4009	1433	21,8	1,169	99318	99355	101215	101251	36	1,858	1,582	1896	1860	3348	0,9936	2942	2886	87,9	86,2	73,4
3935	1435	21,7	1,170	99327	99360	101296	101327	32	1,745	1,486	1967	1935	3291	0,9934	2865	2819	87,1	85,6	72,8
3864	1438	21,1	1,172	99353	99374	101552	101572	20	1,332	1,170	2198	2177	3071	0,9928	2553	2529	83,1	82,4	69,7
3413	1443	20,2	1,177	99368	99382	101711	101725	14	1,141	0,970	2343	2329	2870	0,9926	2256	2243	78,6	78,1	65,1
3039	1448	21,1	1,173	99381	99389	101811	101819	8	0,863	0,736	2430	2421	2582	0,9929	1775	1769	69,3	69,1	58,4
2505	1458	21,0	1,174	99393	99396	101861	101863	3	0,506	0,431	2468	2465	2111	0,9947	1058	1056	58,1	50,0	42,2

Tabell 2: Konverterade värden

n_{Ku} rpm	t_{1Ku} °C	ρ_{1Ku} kg/m³	p_{1Ku} Pa	p_{2gKu} Pa	p_{2Ku} Pa	p_{3gKu} Pa	p_{3Ku} Pa	q_{mKu} kg/s	q_{v1Ku} m³/s	p_{rKu} Pa	p_{dyKu} Pa	P_{aKu} W	k_{pKu} -	P_{aKu} W	P_{wiKu} W	η_{sKu} %	η_{isoKu} %
1500	20,0	1,200	101325	101407	102549	102930	81	2,748	**2,290**	**1523**	1443	**3893**	0,9949	3472	3287	**89,2**	84,4
1500	20,0	1,200	101325	101400	102946	103020	74	2,633	**2,194**	**1620**	1546	**3939**	0,9946	3535	3374	**89,7**	85,6
1500	20,0	1,200	101325	101386	103143	103203	60	2,378	**1,982**	**1817**	1757	**3980**	0,9939	3580	3461	**90,0**	87,0
1500	20,0	1,200	101325	101377	103263	103314	52	2,203	**1,836**	**1937**	1885	**3957**	0,9936	3533	3439	**89,3**	86,9
1500	20,0	1,200	101325	101367	103490	103500	41	1,982	**1,635**	**2134**	2093	**3942**	0,9930	3484	3398	**87,9**	86,2
1500	20,0	1,200	101325	101362	103531	103567	36	1,839	**1,533**	**2206**	2170	**3856**	0,9928	3357	3302	**87,1**	85,6
1500	20,0	1,200	101325	101348	103775	103797	23	1,465	**1,221**	**2449**	2426	**3568**	0,9922	2996	2939	**83,1**	82,4
1500	20,0	1,200	101325	101341	103909	103925	16	1,210	**1,009**	**2584**	2568	**3288**	0,9920	2585	2570	**78,6**	78,1
1500	20,0	1,200	101325	101334	103994	104003	9	0,915	**0,763**	**2669**	2660	**2914**	0,9924	2020	2013	**69,3**	69,1
1500	20,0	1,200	101325	101328	103996	103999	3	0,532	**0,443**	**2671**	2668	**2350**	0,9944	1177	1175	**50,1**	50,0

VÄRMEFORSK


Bilaga 1
2004-03-31
Revidenad 2004-04-15
ETv P4 00914
Silenco WIMA
n=1500 rpm, ρ1=1,2 kg/m³
Tryck (Pa)
Verkningsgrad (%)
Volymflöde, q_{v1} (m³/s)
η_s
η_{sa}
p_F
p_{sF}
2 (2)

Bilaga 2

Datum/Date	Beteckning/Reference	Sida/Page
2004-03-31	ETv P4 00914	1 (1)
Reviderad 2004-04-15		

Nomenclature

Symbols	Represented quantity	SI unit
P_e	Motor input power	W
n	Rotational speed of impeller	rpm
t	Air temperature	°C
ρ	Air density	kg/m³
p	Absolute pressure	Pa
p_{tg}	Absolute stagnation pressure	Pa
p_d	Dynamic pressure	Pa
q_m	Mass flowrate	kg/s
q_v	Volume flowrate	m³/s
p_f	Fan pressure	Pa
p_{sf}	Fan static pressure	Pa
P_s	Mechanical power supplied to the fan shaft	W
k_p	Compressibility coefficient	-
P_a	Fan air power	W
P_{sa}	Fan static power	W
η_s	Fan shaft efficiency	%
η_{ss}	Fan static shaft efficiency	%

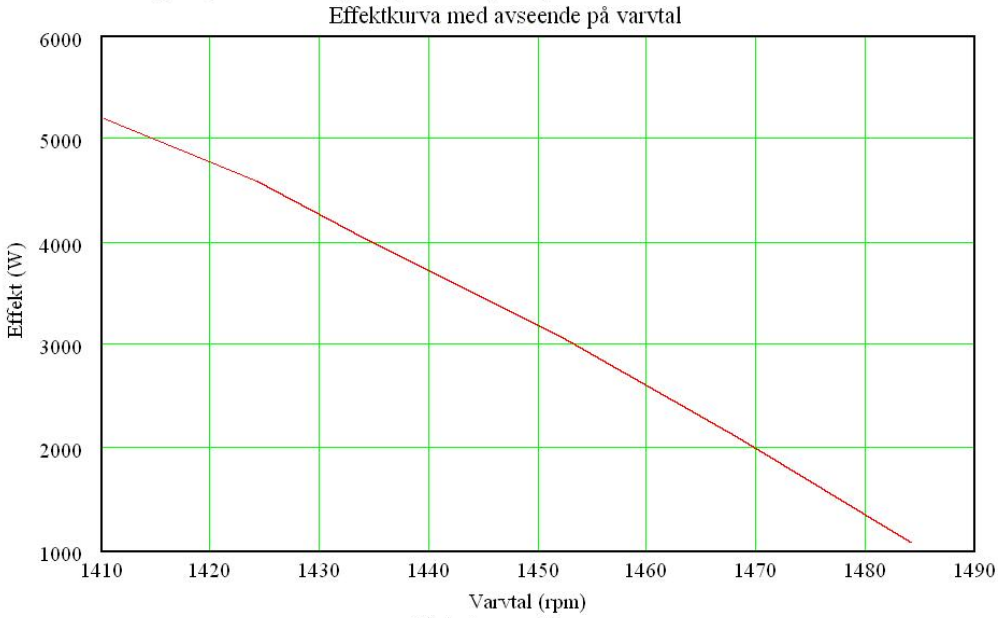
Subscripts

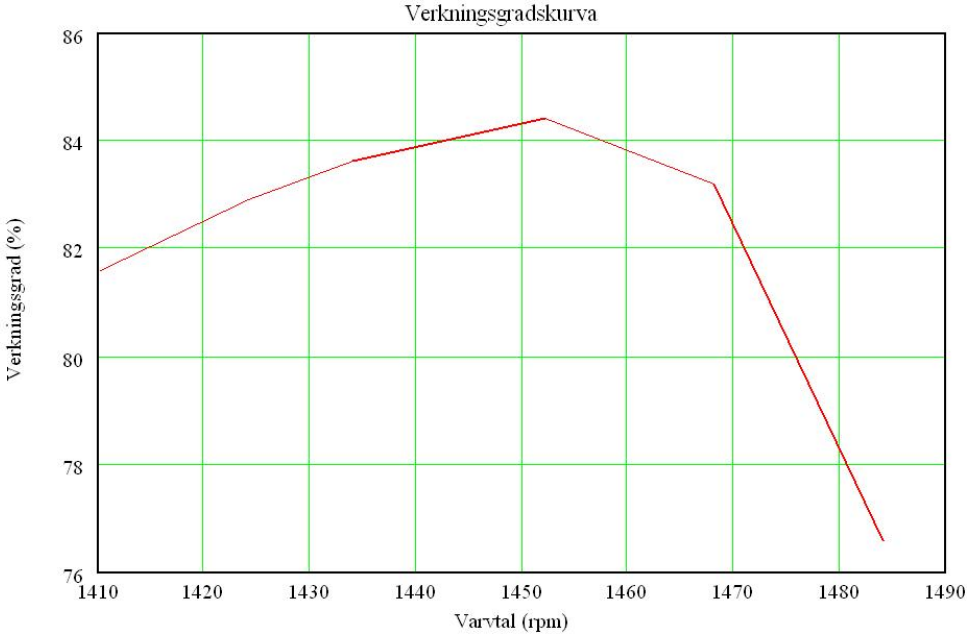
Te	Tested values
Gu	Converted values
1	Test fan inlet
2	Test fan outlet

Motordata från ABB Motor som visar verkningsgrad på motorn vid visst varvtal och axeleffekt.

SP har med hjälp av dessa räknat fram axeleffekt som fläkteffekten, [tryck * flöde] sedan dividerats med.

$i := 0..5$ $\eta := \begin{pmatrix} 76.6 \\ 83.2 \\ 84.4 \\ 83.6 \\ 82.9 \\ 81.6 \end{pmatrix}$ $n := \begin{pmatrix} 1484 \\ 1468 \\ 1452 \\ 1434 \\ 1424 \\ 1410 \end{pmatrix}$ $P := \begin{pmatrix} 1077 \\ 2104 \\ 3067 \\ 4035 \\ 4586 \\ 5193 \end{pmatrix}$





4 Resultanalys

Kommentar till SP mätrapport: Testen på SP har utförts med stor noggrannhet och hanteringen har varit förtroendeingivande.
Beskrivningen på förfarandet är heltäckande och mätningen uppfyller enligt min bedömning kraven i standard ISO 5801.
Mätvärden på tryck och flöden följer tidigare uppmätta. De överensstämmer väl med de predikterade värdena vilket understryker att teorin stämmer. Arbetspunkt för max verkningsgrad har med god precision predikterats.
Redovisningen visar att verkningsgraden är hög över ett brett arbetsområde. 85 % - 90 % - 85 % mellan 1,5 m^3/s – 2,5 m^3/s.
85 % betraktas idag som den högsta möjliga verkningsgrad för fläktat av motsvarande typ och storlek. ”Spareventilator har en förteckning över godkände fabrikat. Nedan bifogas en del av listan för Fläkt-Woods (ABB).

Spareventilatorliste

Fabrikant: Fläkt Woods A/S

Type		Maksimal ventilator	Akseleffekt i kW		Volumenstrøm (M3/s)		Trykstigning Pa (Pt)	
		Virknings-grad i %	Fra	Til	Fra	Til	Fra	Til
Fläkt Woods A/S EULB-30-3	radial	80,4	0,06	3	0,5	1,9	80	1170
Fläkt Woods A/S EULB-31-1	radial	80,4	0,06	3	0,5	1,9	80	1170
Fläkt Woods A/S EULB-31-2	radial	84,4	0,25	10	1	3,5	180	2210
Fläkt Woods A/S EULB-32-1	radial	84,4	0,25	10	1	3,5	180	2210
Fläkt Woods A/S EULB-40-1	radial	84,4	0,25	10	1	3,5	180	2210
Fläkt Woods A/S EULB-31-3	radial	84,6	0,18	15,95	1	4,6	125	2700
Fläkt Woods A/S EULB-32-2	radial	84,6	0,18	15,95	1	4,6	125	2700
Fläkt Woods A/S EULB-40-2	radial	84,6	0,18	15,95	1	4,6	125	2700
Fläkt Woods A/S EULB-41-1	radial	84,6	0,18	15,95	1	4,6	125	2700
Fläkt Woods A/S EULB-32-3	radial	85,6	0,11	21,73	1	6,1	80	2800
Fläkt Woods A/S EULB-40-3	radial	85,6	0,11	21,73	1	6,1	80	2800
Fläkt Woods A/S EULB-41-2	radial	85,6	0,11	21,73	1	6,1	80	2800
Fläkt Woods A/S EULB-42-1	radial	85,6	0,11	21,73	1	6,1	80	2800
Fläkt Woods A/S EULB-50-1	radial	85,6	0,11	21,73	1	6,1	80	2800

Buffalo Fan Engineering [4] har en motsvarande grafisk sammanställning över olika fläkttyper. Observera att Buffalo använder sig av specifikt varvtal och specifik diameter. Detta är en omräkningsmetod för att lättare kunna jämföra olika fläktar. Även här anges ca 85 % som högsta verkningsgrad.

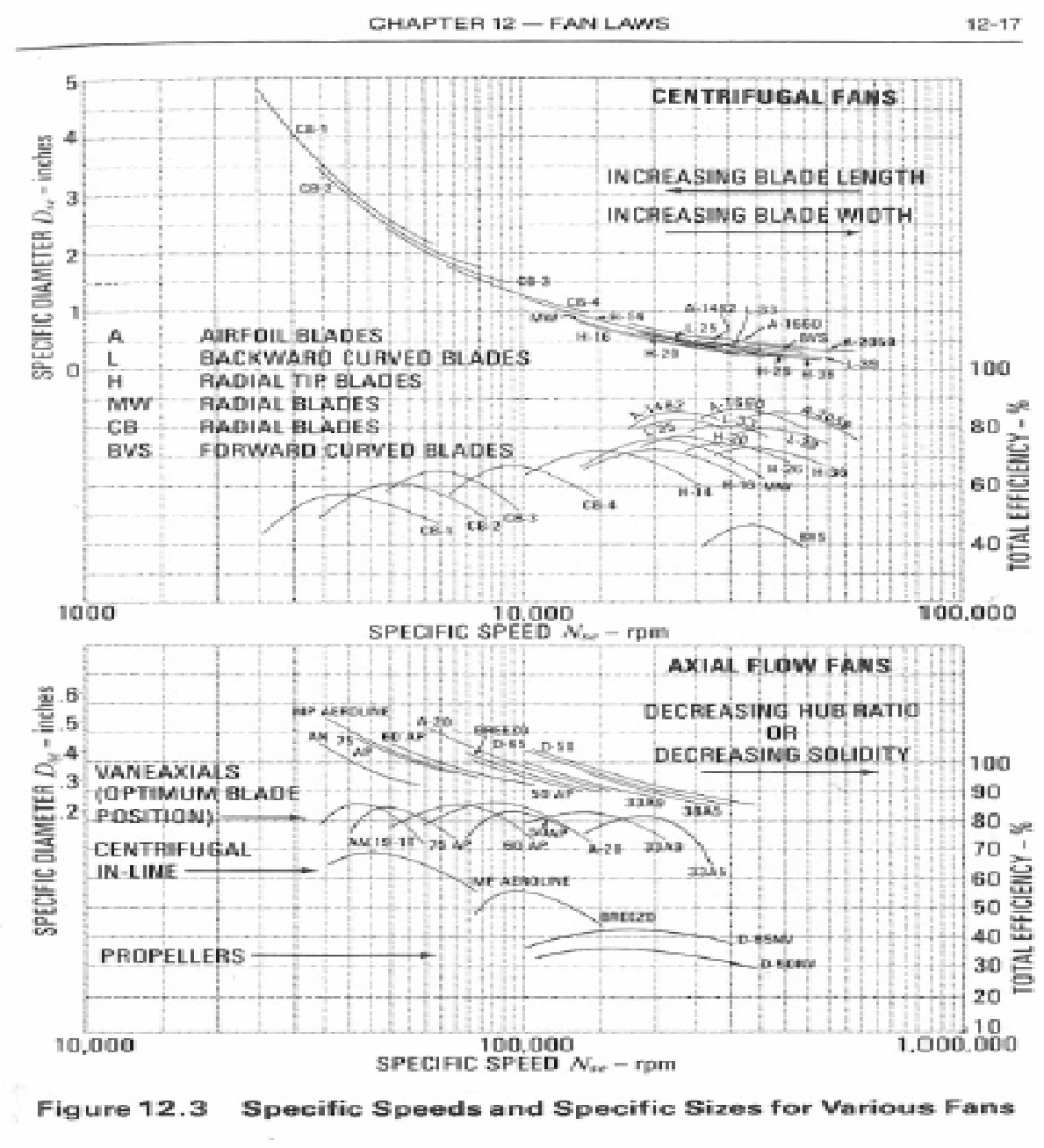
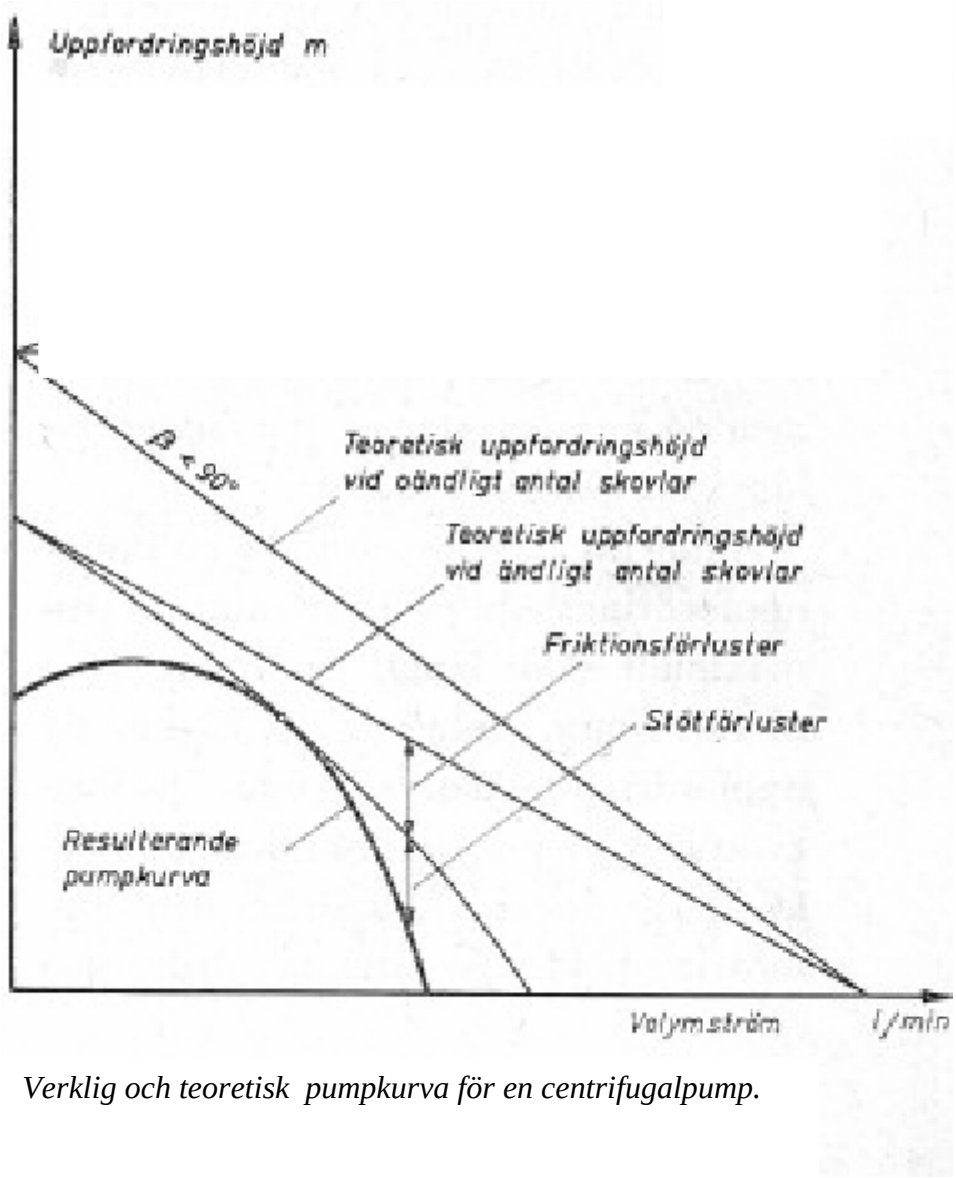


Figure 12.3 Specific Speeds and Specific Sizes for Various Fans

[4] Buffalo Fan Engineerings handbok betraktas som ”bibel” i fläktsammanhang.

Nedanstående bild ur Energiläroboken ”Energi Curt Ulvås” visar på förluster som förekommer i en fläkt.



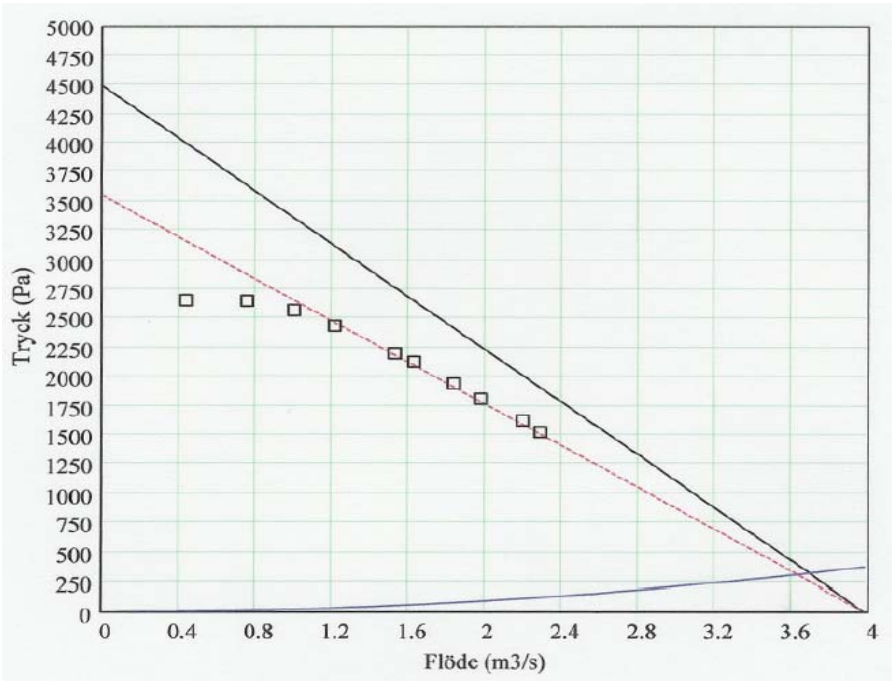
Verklig och teoretisk pumpkurva för en centrifugalpump.

β <90° representerar ett hjul med bakåtböjda skovlar. Den översta linjen beskriver teoretiska värden som erhålles om man har oändligt antal skovelblad. Kurvan under den beskriver resultatet med ändligt antal skovlar. Den är kompenserat för Slip som beräknas enligt Stodolas formel. Slip är en överlagrad strömning som uppstår inne i kanalen på grund av tryckskillnader på skovelbladens olika sidor. Slip är en virvel men skall ej betraktas som förlust. Dock medför slip en nedsättning i prestanda som medför att tillförd axeleffekt reduceras i motsvarande grad.
Friktion är dock uppenbara förluster men är marginella.
Stöt kan betraktas som koncentrationer av tryckökningar som ”exploderar” då de lämnar kanalen och kommer ut i en omgivning med lägre tryck. Metoder att beräkna stöt och

förluster förenade med dessa finns inte. Stöt är en väsentlig källa till buller. Nedanstående figur visar beräkningar för SP-fläkten. Den svarta heldragna linjen är framräknad enligt tidigare känd metod, huvudsats 2, och således absolut. Den rödstreckade linjen visar beräknad slip och de uppmätta värdena från SP. Med ledning av föregående bild kan man dra slutsatsen att inga påtagliga friktions- eller stötförluster förekommer vid optimal arbetspunkt. Lågt ljud är omvittnat av den tekniske handläggaren varför förluster i någon högre utsträckning ej kan tillföras stöt. Då skulle inte den kurva som redovisas erhållas. Vilka övriga förluster kan uppstå?

- Dålig nätkvalité? SP har ingen kontroll på spänningsnivåer, symmetri eller förekomst av harmonics i nätet. Är nätet osymmetriskt och man mäter huvudspänningen där den råkar vara störst och den fasström som är störst kan fel uppstå. Ett osymmetriskt nät gör att motorn inte arbetar vid förväntat verkningsgrad.
- Harmonics i nätet, speciellt 3:e övertonen, gör att verkningsgraden på motorn går ner.
- Läckage? Då skulle vi inte uppnå det tryck vi får.
- Ändra slipfaktor från 0.9 till 0.6 så att linjen höjs 10 %? Kan utredas. Notera att beräkning av slip ej är en strikt vetenskap utan baserad på erfarenheter. Lågt slip får man om man har låg utgångsvinkel, sin β, och stort antal skovlar.
- Verkningsgraden på motorn stämmer ej med de uppgivna? Kräver stämpling, dvs. uppmätning av varvtal vid specifik axeleffekt, uppmätt med momentvåg. Kostnad ca 10 000:- och görs på ABB Research.

Dessa felkällor torde dock ej motsvara de 400 W som är förlusterna. Noggrannare mätningar är nödvändiga om förlusterna ska kunna härledas .



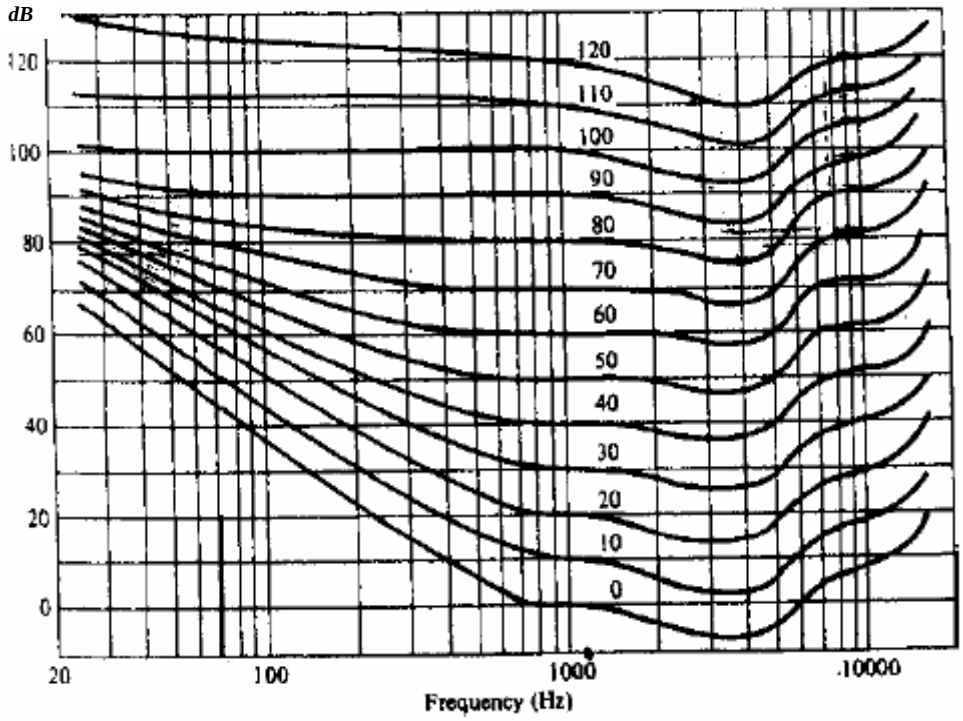
5 Rekommendationer och användning

Slutsats: Testresultatet från SP visar att fläktens verkningsgrad är mycket bra. Fläkten har tagits fram med små resurser. Den är 10 år gammal och har stått utomhus och rostat i regn och vind de senaste två åren. Det finns således goda möjligheter att bygga en ny fläkt med bättre verkningsgrad än den som har testats.
Förutom hög verkningsgrad är lågt ljud av stort intresse. Den ljudmätning som utförts bekräftar den höga verkningsgraden, eftersom lågt ljud och hög verkningsgrad hänger samman. Stora besparingar kan göras om man slipper använda ljuddämpare som dels kostar att tillverka, förbrukar energi och upptar utrymme.
Den elenergiintensiva industrin bör delges resultatet och provinstallationer göras. Mest intressant ur sparsynpunkt är stora fläktar > 100 kW.
Varje procent verkningsgradförlust i den totala svenska industrifläktsparken kostar ca 25 miljoner kronor per år.

6 Ljudmätning

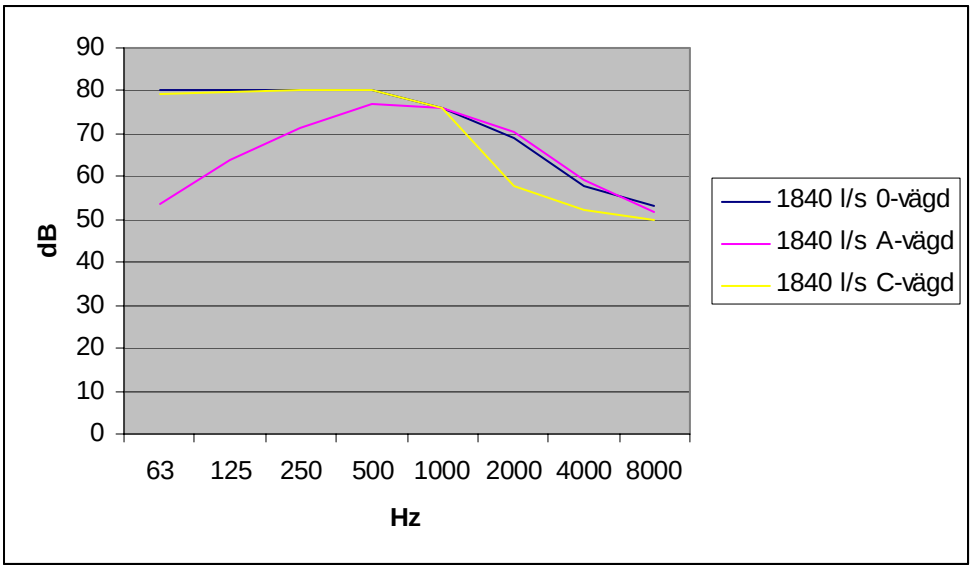
6.1 Bakgrund

Forskare är överens om att A-vägning (d.v.s. reducera de lågfrekventa oktaverna) är en bra metod att fastställa huruvida risk för bullerskador föreligger. Däremot säger inte A-vägda värden speciellt mycket om hur man uppfattar ljudet eller hur mycket obehag man har av det. Figur nedan visar hur ett öra uppfattar hörbarheten hos ljud med olika frekvenser.



Hörseltröskeln är satt till 0 dB vid 1000 Hz. Hörseltröskeln vid 30 Hz kräver en ljudstyrka på 63 dB, eller ca 2 miljoner gånger starkare signal. Vid 4 kHz är hörbarheten bäst. Ovanstående kurva ligger till grund vid A-vägning. De uppmätta värdena vid låga frekvenser reduceras i motsvarande grad som hörbarheten avtar.

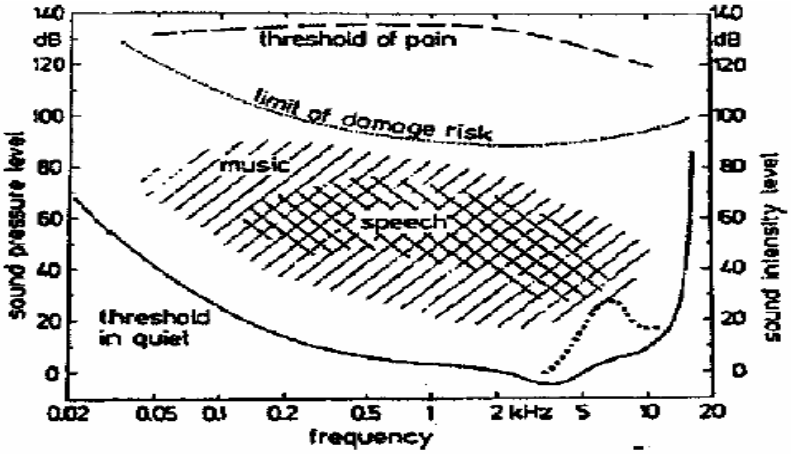
Frekvens Hz	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
Korrektion dB	-26,2	-16,1	-8,6	-3,2	0,0	1,2	1,0	-1,1



För att framhäva lågfrekvent ljud C-väger man värdena. Se diagram ovan.

6.2 Psykoakustik

En vetenskap har utarbetats som kallas Psykoakustik. Den beskriver hur människor upplever ljud.



Här ser vi frekvensens betydelse. Vi uppfattar lågfrekventa ljud som svaga, detta innebär inte att vi inte störs av dem, något som Dr Johanna Bengtsson vid Göteborgs Universitet visat i sin avhandling ”Low Frequency Noise During Work Effekts on Performance and Annonyance”.

Nedanstående tabell kallas Bark-skalan. Den visar när ljud uppfattas som ljud eller buller.

z	f_l	f_u	f_c	Δf	z	f_l	f_u	f_c	Δf
Bark	Hz	Hz	Hz	Hz	Bark	Hz	Hz	Hz	Hz
0	0	100	50	100	13	2000	2320	2150	320
1	100	200	150	100	14	2320	2700	2500	380
2	200	300	250	100	15	2700	3150	2900	450
3	300	400	350	100	16	3150	3700	3400	550
4	400	510	450	110	17	3700	4400	4000	700
5	510	630	570	120	18	4400	5300	4800	900
6	630	770	700	140	19	5300	6400	5800	1100
7	770	920	840	150	20	6400	7700	7000	1300
8	920	1080	1000	160	21	7700	9500	8500	1800
9	1080	1270	1170	190	22	9500	12000	10500	2500
10	1270	1480	1370	210	23	12000	15500	13500	3500
11	1480	1720	1600	240	24	15500			
12	1720	2000	1850	280					

För att ljud ska uppfattas som buller krävs en viss bandbredd på signalen. Hörselområdet indelas i 24 ”Bark” och bandbredden Δf anger den bandbredd som erfordras för att ”ISO-örat” skall uppfatta ljudet som buller. Vid lägsta ”Bark” är bandbredden 100 Hz, sedan blir de ca 20 % av grundtonen, som också kallas centerfrekvensen f_c .

Forskningen har utmynnat i olika mätmodeller för att kvantifiera ljuds olika sensoriska kvalitéer, nämligen:

- hörstyrka
- skarphet
- råhet
- fluktuationsgrad
- tonalitet

Hörstyrka mäts i enheten sone. 1 sone motsvaras av referenssignalen 1 kHz vid 40 dB. Hörstyrkan beräknas på ters-nivån (en tredjedels oktav).

Skarphet beskriver skillnaden mellan högfrekvent och lågfrekvent ljudkaraktär. Skarphet betecknas med enheten acum och definierar tyngdpunktsläget för arean under specifika hörstyrkekurvan. I beräkningen ges ljud över 16 bark (3.15 kHz) extra tyngd. En ren ton vid 1 kHz med nivån 60 dB motsvaras av 1 acum.

Råhet beskriver skillnaden mellan rå och mjuk ljudkaraktär. En beräkningsmodell för råhet beskriver graden av amplitud- och frekvensmodulation hos signalen. Råhet mäts med enheten asper. 1 asper motsvaras av en 1 kHz ton med nivån 60 dB som är 100% amplitud modulerad med f_{mod}= 70 Hz.

Fluktuationsgrad beskriver skillnaden mellan jämn och fluktuerande ljudkaraktär. Vid ca 4 Hz modulation är denna karakteristik mest tydlig. 1 vacil motsvaras av en 60 dB ren ton vid 1 kHz och som är 100% amplitudmodulerad vid 4 Hz .

Tonalitet beskriver upplevd tonkaraktär i en komplex ljudsignal. Modellen för tonalitet är dock omdiskuterad eftersom upplevelsen av tonalitet varierar från person till person.

Denna utredning är gjord för att visa att ljud kan ha olika innehåll och upplevas olika. För att få en fullständig bild av ljudet bör man FFT-mäta. Man delar upp ljudområdet i 1024 delar och mäter med en bandbredd av 4 %.
Akustik är ingen enkel vetenskap och hur människan uppfattar ljudet är ju det viktiga. Problemet är dock att individer upplever samma ljud på olika sätt och detta varierar från gång till annan beroende på humör och dagsform.

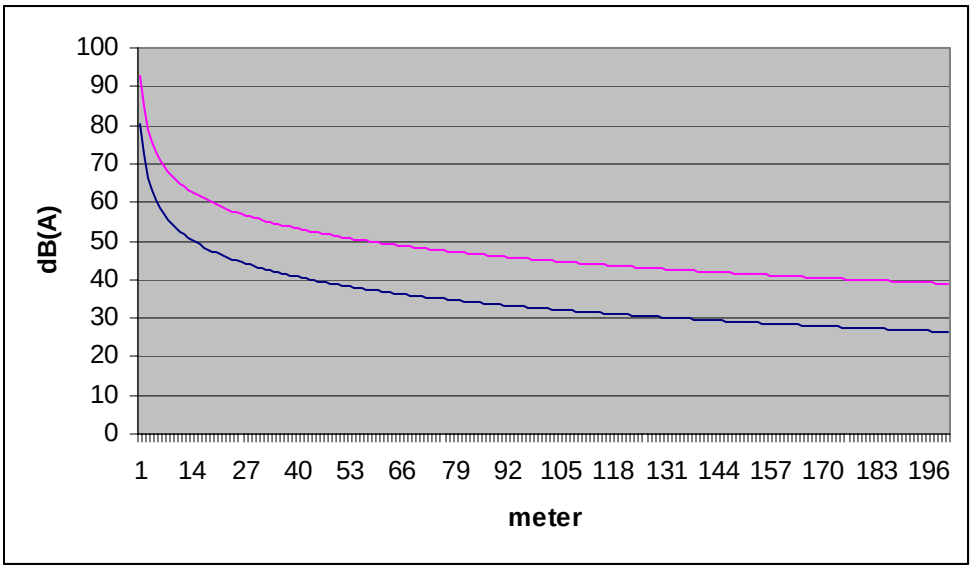
6.3 Mätmetod

Mätningen på SP är utförd enligt SS-EN-ISO 9614-2. Den kallas även Intensitetsmetoden. Med en specialmikrofon, två fasmatchade mikrofoner, och med en realtidsanalysator bestämdes medelljudsintensitetsnivån över mätytan. Mikrofonen sveptes över mätytan i jämn takt och på ca 20 cm avstånd till fläkten. Varje sida tog mellan 5 och 10 minuter att svepa.
Eftersom intensiteten är riktningskännande innebär detta att utifrån kommande buller neutraliseras. Med denna teknik kan ljudeffektnivån från en maskin bestämmas även om bakgrundsbullret är högre än det buller som mätobjektet alstrar. Ljudet var lika på båda sidorna på fläkten, d.v.s. motorsidan och inloppssidan.
Ljudeffektnivån beräknas genom att till ljudintensiteten addera 10_{log} för mätytan på lådan som tänkes omge fläkten, som i vårt fall var 13,1 m^2 = 11,17.

Värdena för pl-indikatorn är ett mått på mätkvalitén. Av protokollet framgår att de hållits inom normalvärdena.

6.4 Resultat

Resultatet, 80,5 dB(A) är bra. Detta är den totala ljudstyrkan från fläkten. Om fläkten placeras på en öppen yta, utan omgivande ekoalstrande objekt, skall den A-vägda nivån minskas med 10_{log} 2π (=8) - 20_{log} * avståndet i meter. På 1 meters avstånd minskar man med 8 dB (log 1 är ju=0). Värdet är då 72,5 dB(A). 40 dB(A) är ofta en gräns för det buller man kan utsätta omgivningen för. På 42 meters avstånd har ljudet avklingat till 40 dB(A). Motsvarande sträcka för en standardfläkt, (85 dB(A) /1 m), är 178 meter.



Föregående avsnitt om psykoakustik visar att ett dB-värde inte säger allt.
Det är intressant att ingen ton sticker ut vid mätningen vid 1840 l/s. De 5 lägsta oktaverna ligger på 80 dB och detta innebär att ljudstyrkan halveras för varje frekvens. Detta är karakteristiskt för pink noise, eller rosa ljud. Rosa ljud brukar karakteriseras som välbalanserat och neutralt. Havsbrus sägs ha denna karaktär.

Jag har bett olika auktoriteter på området att kommentera resultatet. Från Lars Landström, Ingemansson Consulting, inkom följande ”fläkten verkar vara mycket tyst”. Då jag bad om en kommentar angående det rosa ljudet skrev han ”detta visar att ljudet är flödesinducerat, det är bra” till skillnad från turbulensinducerat.

Dr Johanna Bengtsson, forskare vid Göteborgs Universitet, hade följande synpunkt: ”Den jämna fördelningen av ljudet över oktaverna torde innebära att ljudet är välbalanserat och fritt från modulation.” ”Det är en mycket intressant fläkt.”

6.5 Bench marking

Få tillverkare redovisar ljudmätningar. Och om de gör det framgår inte alltid mot vilken standard eller hur spektrat ser ut.
FanAm redovisar för en fläkt av samma typ 80 dB(A). Detta vid en sjättedel av kapaciteten. För System-Air och Östberg gäller samma förhållande. Dock är en rättvis bedömning inte helt lätt att göra. Värden för en fläkt med motsvarande kapacitet har jag inte lyckats hitta.
Utvecklingschefen för System-Air, Mats Sandor, samt Stellan Åkesson, Fläkt-Woods, medger att såväl verkningsgrad som ljudnivå är faktorer som talar till fläktens fördel.

6.6 SP-protokoll

SWEDAC ACKREDITERING 1002 ISO 17025

REPORT

issued by an Accredited Laboratory

SP PROVNING · FORSKNING

Värmeforsk Service AB
Raziyeh Khodayari
Olof Palmes gata 31
101 53 STOCKHOLM

Handled by, department
Joachim Stadig
Acoustics
+46 33 16 54 29, joachim.stadig@sp.se

Date
July 5, 2004

Reference
P401953

Determination of sound power level from a spiral fan – Intensity measurement according to SS-EN ISO 9614-2

Test object

A spiral fan designated: "WIMA-Fläkt".

Place of measurement

The upper hall at SP-acoustics.

Date of measurement

June 17, 18 and 21, 2004

Results

The A-weighted sound power level (L_{WA}), stated to the nearest half decibel, is given in table 1. The sound power levels (L_W) for each octave band is given in table 2. The flow rates are normalized to the reference condition 1,2 kg/m^3.

The results are valid for the tested object only.

Table 1 - "WIMA-Fläkt"

Flow rate (l/s)	A-weighted sound power level, (L_{WA}) (dB)
400	84,5
1150	80,5
1840	80,5
2180	81,0

SP Swedish National Testing and Research Institute

Postal address
SP
Box 857
SE-501 15 Borås
SWEDEN

Phone / Fax / E-mail
+46 33 16 50 00
+46 33 13 55 02
info@sp.se

Reg.number
556464-6874

Laboratories are accredited by the Swedish Board for Accreditation and Conformity Assessment (SWEDAC) under the terms of Swedish legislation. This report may not be reproduced other than in full, except with the prior written approval of SP.

SP 302

REPORT

Date
July 5, 2004

Reference
P401953

Table 2 – "WIMA-Fläkt"

Flow rate (l/s)	Sound power levels (L_W) in decibels (dB) for the octave band frequencies in Hertz (Hz) below: 63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
400	86	94	85	84	77	70	61	58
1150	82	86	81	79	75	70	58	53
1840	80	80	80	80	76	69	58	53
2180	80	82	81	80	76	70	59	54

Measurement method

The measurements have been carried out according to SS-EN ISO 9614-2 by using sound intensity technique, engineering method (grade 2). The mean sound intensity level has been measured by scanning over 5 measurement surfaces around the source. The total scanned area (S) was 13,1 m^2. The result is the mean value of two scans. The sound power level has been calculated using the equation:

$L_W = L_I + 10 \log S/S_0$ (dB)

where

L_W	= Sound power level of the test object.	(dB)
L_I	= Measured sound intensity level of the measurement area.	(dB)
S	= Area of measurement surface.	(m^2)
S_0	= Reference area 1 m^2	

Measurement uncertainty

The field indicator F_{pI} were <10 dB for all frequencies at and above 80 Hz. The frequencies below 80 Hz do no not influence the A-weighted values. The difference between the pressure-residual intensity index and the field indicators were larger than 10 dB for all frequencies which influence the A-weighted values.

The standard deviation of the reproducibility (s_R) for A-weighted values is according to the standard 1,5 dB in this test. With expanded measurement uncertainty with a coverage factor of 2 which provides a level of confidence of approximately 95 %, the sound power level will be in the interval $\pm 1{,}96 * s_R$.

1/3-octave bands (Hz)	Standard deviation (s_R)
63-125	3
250	2
500-4000	1,5
A-weighted	1,5

SP 302

REPORT

Date
July 5, 2004

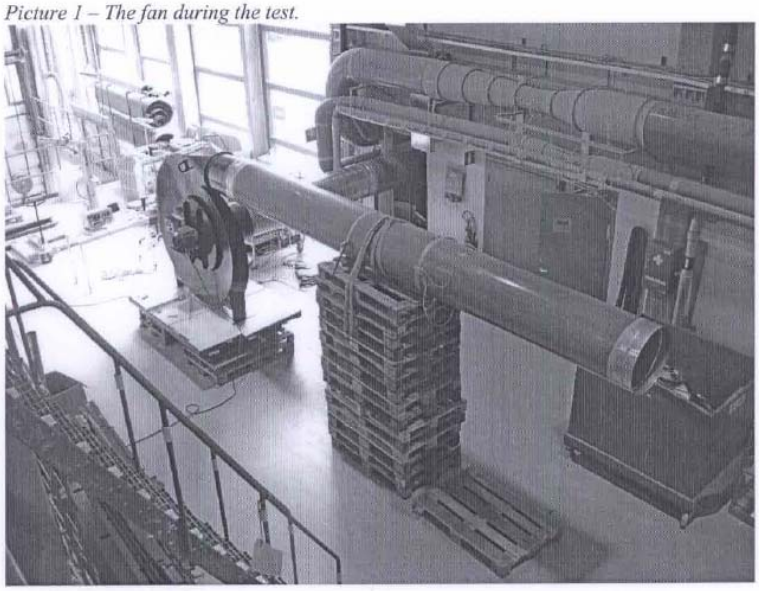
Reference
P401953

Operational condition

The fan was running on three-phase alternating current, 380 V, 50 Hz.

Pictures of the test object

Picture 1 – The fan during the test.



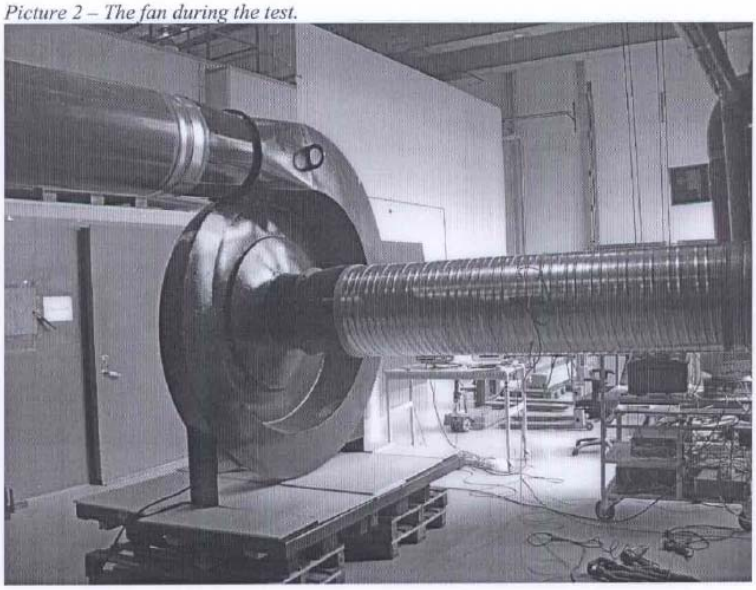
SP 302

REPORT

Date
July 5, 2004

Reference
P401953

Picture 2 – The fan during the test.



List of instruments

Instrument	*Manufacturer*	*Type*	*Serial/SP no.*
Intensity measurement probe	Brüel & Kjaer	3548	1792223
Intensity calibration set	Brüel & Kjaer	3541	1389390
Analyser	Norsonic	830	10765

SP Swedish National Testing and Research Institute
Energy Technology - Acoustics

Hans Jonasson
Technical Manager

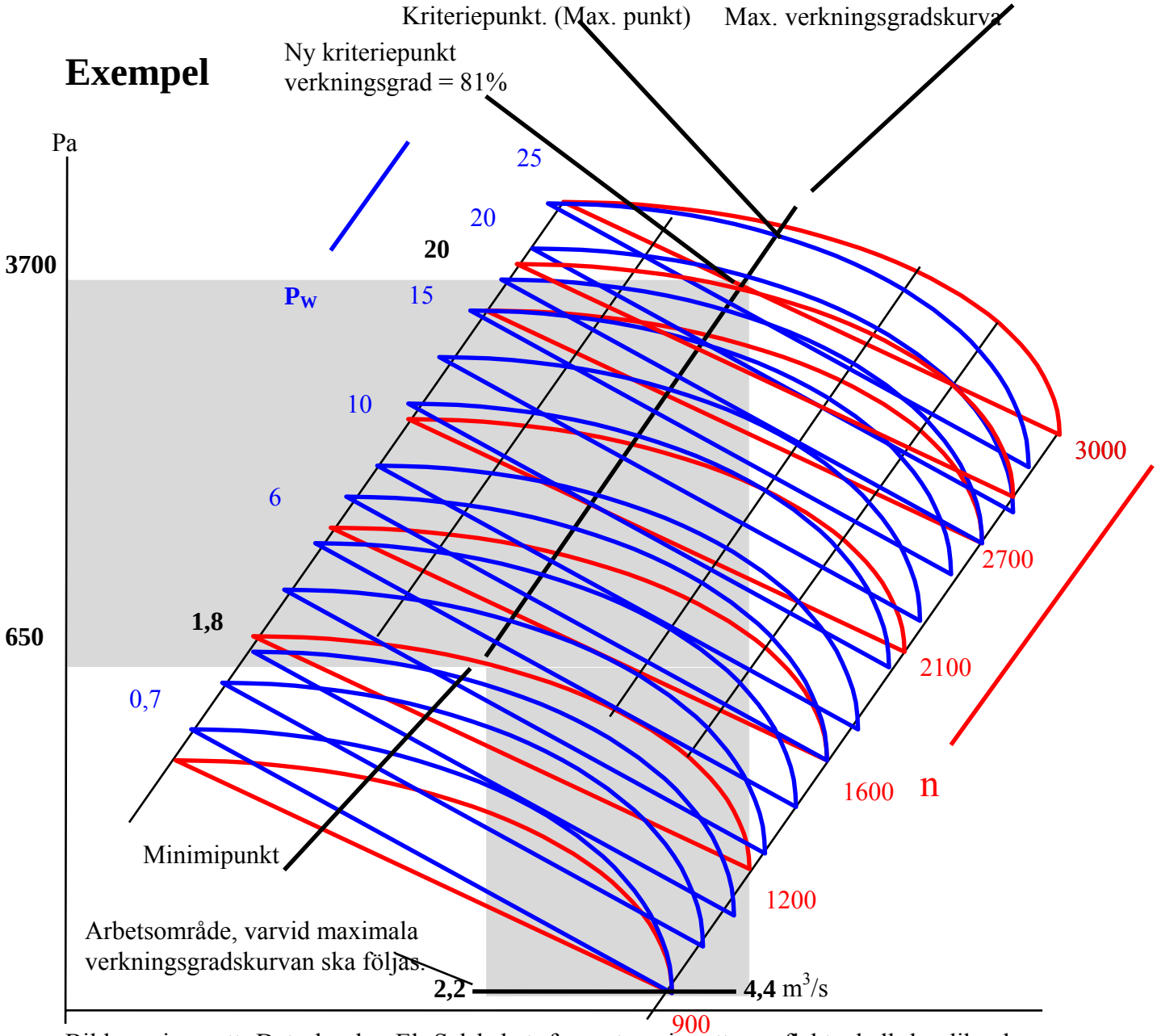
Joachim Stadig
Technical Officer

SP 302

7 Förslag till fortsatt forskningsarbete

7.1 Verkningsgrad vid olika varvtal

Verifiering av att verkningsgraden är konstant ner till halva varvtalet bör göras. Då uppfylls de danska kraven för ”Spare Vent”.
Affinitetslagarna gäller för denna fläkt varför inga problem med att uppfylla kravet är kända.
För att kunna genomföra denna mätning krävs att motorn ”stämplas” vid olika varvtal. En sådan mätning kan göras på ABB Research i Västerås och kostar ca 10 000:- per ”varvtal”.



Bilden visar att Det danske El Selskabet förväntar sig att en fläkt skall ha lika hög verkningsgrad även om varvtalet, och därmed flödet, dras ner till hälften. Detta för att det

skall vara ekonomiskt att varvtalsstyra fläktar. Affinitetslagarna säger att om varvtalet ökar till det dubbla så ökar

flödet med det dubbla	2^1	= 2	
trycket i kvadrat	2^2	= 4	
effekten i kubik	2^3	= 8	
ljudet med penta	2^5	= 32	eller 15 dB

7.2 Ljudmätning

Ytterligare ljudmätningar för att undersöka de psykoakustiska egenskaperna bör ej utföras inom detta projekt.

7.3 Vibrationsmätning

Fläktens driftsäkerhet är beroende på hur mycket lagren slits. En fläkt utan avlösningar på vingarna bör ge mindre vibrationer. För att mäta detta krävs en balanserad fläkt, vilket inte SP-fläkten är.

7.4 Lagerbelastning

Eftersom vi inte behöver så stor motor kan man befara att det desto större, och tyngre, fläkthjulet belastar motorlagret mer än motsvarande fläkt med större motor och motoraxel.
Å andra sidan är vårt fläkthjul kortare och ger kortare momentarm till lagret. Det bör emellertid utredas om ökad haverifrekvens kan befaras.

7.5 Slitage

Orsakar vingformen ett större slitage? Kommer beläggningar på vingarna, som skapar obalans, att bli större än normalt? De erfarenheter som finns från LKAB:s gästgruva i Kiruna tyder inte på det men har aldrig närmare analyserats.

8 Tillverkningskostnad

GEMA Industri AB i Gällivare, har tillverkat fläkten till LKAB:s gästgruva i Kiruna. De tillverkar även standardfläktar till LKAB. Roger Paulsson, VD på GEMA, anser att det inte finns några svårigheter som kan leda till fördyring vid tillverkning av hjulet. Eftersom bladen är jämtjocka och tillvalsningen av formen kan ske maskinellt åtgår ingen längre arbetstid. Dock är underlaget som erfarenheterna baseras på begränsade.
När det gäller fläkthuset är tillverkningen i stycketal mer komplicerad än ett standardfläkthus. Detta på grund av att inga symmetriska mått förekommer. Vid en serietillverkning kan dessa problem hanteras. Enligt Paulsson är det inga svårigheter, men ”lite besvärligare”. En duktig svetsare är dock nödvändig.
Framtagningstiden på en skräddarsydd fläkt ligger på 8-10 veckor. Då får man en fläkt som arbetar med maximal verkningsgrad vid den specifika arbetspunkten. Piken för verkningsgraden kan breddas om fläkthuset förses med inbyggd diffusor. Detta om man önskar att fläkten delvis ska arbeta vid annan arbetspunkt än den optimala eller om variationer i driftsförhållanden råder såsom olika temperaturer, bemängda filter osv. Den testade fläkten är försedd med sådan diffusor och att den har ett brett arbetsområde framgår av SP-rapporten.
Man får även en korrekt dimensionerad motor.
Vid tillämpningar där arbetet sker på sugsidan är fläkthus ej nödvändigt.
Förklaringen till de korta utvecklingstiderna finns i de kraftfulla beräknings- och dimensioneringsverktyg som Drugge tagit fram.[5]

För tillverkning krävs förutom ”standardutrustning” följande:

- Laserskärmaskin som kan arbeta med olika CAD-3D format ex.vis AutoCad, Pro-Engineering, Solid Works
- Valsmaskin och profilmall
- Lyftanordningar ex.vis truck och travers
- El- och gassvets
- Slipverktyg
- Svarv och fräs

[5] SmartFans för beräkning av hjulet och Super Fold. Det senare är ett CAD-program som används av bl.a. Svensk Gruvteknik (SGT) i Gällivare och Volvo.

Värmeforsk är ett organ för industrisamverkan inom värmeteknisk forskning och utveckling. Forskningsprogrammet är tillämpningsinriktat och fokuseras på energi- och processindustriernas behov och problem.

Bakom Värmeforsk står följande huvudmän:

- Elforsk
- Svenska Fjärrvärmeföreningen
- Skogsindustrin
- Övrig industri

VÄRMEFORSK SAMARBETAR MED STATENS ENERGIMYNDIGHET



S4-406

912

VÄRMEFORSK SERVICE AB
101 53 Stockholm
Tel 08-677 25 80
Fax 08-677 25 35
www.varmeforsk.se

Beställning av trycksaker
Fax 08-677 25 35