

Niklas Bratt
Nichlas Johansson

Konstruktion och utvärdering av en miljökammare för kalibrering av temperatur- och tryckgivare till laserinterferometrar

SP
Swedish National Testing and Research Institute
Mått och Vikt
SP RAPPORT 1993:05



Abstract

Construction and evaluation of an environmental chamber for calibration of temperature and pressure sensors for laser interferometers

To be able to calculate the wavelength of the light used in laser interferometer measurements the temperature and the pressure must be known. Therefore the laser interferometers are equipped with temperature and pressure sensors. To be able to calibrate these sensors a chamber with adjustable temperature in the interval 15-25 °C and adjustable pressure in the interval 920-1050 mbar has been constructed and evaluated.

The temperature of the chamber is regulated by means of an electrical PD-regulator, where the desired temperature is set manually. The air pressure of the chamber is regulated with manual valves and a vacuum pump with one blow and one suck side.

The temperature in the environmental chamber is measured with Pt-100 sensors, which are connected to a temperature instrument and the absolute air pressure is measured with a digital barometer.

The accuracy of the air pressure calibrations is able to be done at $\pm 0,1$ mbar and the accuracy of the air temperature and the material temperature is $\pm 0,03$ °C and $\pm 0,010$ °C, respectively.

There are some temperature gradients in the chamber, but if one places the sensors in appropriate spots and close to each other one can minimize the existing gradients and very accurate measurements can be done. Thanks to the small size of the chamber, only 0,1 m³, the air pressure gradients are neglected.

Key words: laser, interferometer, environmental chamber, calibration, measurement, peltier, regulator, sensor

SP
SP Rapport 1993:05
ISBN 91-7848-388-3
ISSN 0284-5172
Borås 1993

Swedish National Testing and Research Institute
SP REPORT 1993:05

Postal address:
Box 857, S-501 15 BORÅS,
Sweden
Telephone + 46 33 16 50 00
Telex 36252 Testing S
Telefax + 46 33 13 55 02

Innehållsförteckning

Abstract	2
Construction and evaluation of an environmental chamber for calibration of temperature and pressure sensors for laser interferometers	2
Innehållsförteckning	3
Förord	5
Sammanfattning	6
1 Inledning	7
2 Laserinterferometersystemet	8
2.1 Allmänt om laserinterferometersystemet	8
2.2 Brytningsindex inverkan på mätnoggrannheten	9
2.3 Laserinterferometerns miljösensorer	10
3 Miljökammaren	12
3.1 Krav på miljökammare	12
3.2 Beskrivning och konstruktion av miljökammare	12
4 Temperaturreglering	17
4.1 Peltierelement	17
4.1.1 Allmänt om peltierelement	17
4.1.2 Användning av peltierelement	17
4.2 Val av regulator	19
4.3 Styrellektronik	20
4.3.1 Nättaggregat	20
4.3.2 Ingångssteg	21
4.3.3 Regulator	22
4.3.4 Slutsteg	23
5 Tryckregleringen	24
5.1 Tryckreglersystemets uppbyggnad	24
5.2 Användning av tryckreglersystemet	25
6 Utvärdering av miljökammaren	26
6.1 Uppvärmnings- och nedkylningsförlopp	26
6.2 Temperaturstabilitet	28
6.3 Temperaturgradienter	29
6.4 Tryckstabilitet	30
7 Mätmetoder	32
8 Förslag på automatisering	33

9	Mätsäkerhetsanalys	35
9.1	Kalibrering av Pt-100 givare och instrument	35
9.2	Pt-100 givarnas egenuppvärming	35
9.3	Årlig drift hos Pt-100 givare och instrument	37
9.4	Temperaturens tidsvariationer	37
9.5	Temperaturgradienter	38
9.6	Påverkning av andra givare	38
9.7	Kalibrering av barometer	39
9.8	Årlig drift hos barometer	39
9.9	Tryckgradienter	39
9.10	Totala mätsäkerheten	40
10	Avslutning	41
	Referenser	42
	Appendix	43
A	Förteckning över anslutningar till elektronikenheten	43
B	Kretsschema för hela elektroniken	46
C	Komponenter	48
C1	Komponentplacering på kretskorten	48
C2	Komponentförteckning	49
D	Datablad	50
D1	Effektoperationsförstärkare LM12CLK	50
D2	Operationsförstärkare 741	53
D3	Spänningsregulator 7812, 7815	57
D3	Spänningsregulator 7915	59
D4	Peltierelement	60

Förord

Arbetet med att konstruera och utvärdera en miljökammare, vilket behandlas i den här rapporten, har utförts av Nichlas Johansson och Niklas Bratt från Elektrotekniklinjen på Chalmers Tekniska Högskola i form av ett examensarbete på SP i Borås.

SP är Sveriges centrala institution för teknisk utvärdering, mätteknik och provning. Här finns de flesta av landets primärnormaler, det vill säga de normaler som definierar olika storheter i Sverige. På riksmätplatsen för längd finns till exempel den svenska metern.

Konstruktions- och utvärderingsarbetet har skett i samråd med Mikael Frennberg och Ulf Kärn och övrig personal på riksmätplatsen för längd, som hjälpt till med lösningar på både teoretiska och praktiska problem.

Examinator på CTH har varit Ingemar Johansson på Institutionen för Opto-elektronik och Elektrisk Mätteknik.

Vi skulle vilja passa på att tacka våra handledare Mikael Frennberg och Ulf Kärn för all hjälp samt även Håkan Skoogh för alla instrument vi har fått låna.

Sammanfattning

För att vid laserinterferometri kunna ange ljusväglängden måste lufttemperaturen och lufttrycket var kända. Laserinterferometrar är därför utrustade med temperatur- och tryckgivare. För att kunna kalibrera dessa givare har en kammare med temperaturen varierbar i intervallet 15- 25 °C och trycket varierbart i intervallet 920-1050 mbar konstruerats och utvärderats.

Temperaturen i kammaren regleras med hjälp av en elektrisk PD-regulator där önskad temperatur ställs in manuellt. Lufttrycket i kammaren regleras med manuella ventiler och en vakuumpump med en blås- och en sugingång.

Temperaturen i miljökammaren mäts med Pt-100 givare som är kopplade till ett temperaturmätinstrument och lufttrycket mäts med en digital barometer.

Noggrannheten på kalibreringarna i miljökammaren kan för lufttryckskalibrering göras med $\pm 0,1$ mbär, för lufttemperaturkalibrering med $\pm 0,03$ °C och för materialtemperaturkalibrering med $\pm 0,010$ °C.

Vissa temperaturgradienter har uppmäts i kammaren, men placerar man givarna på lämpliga ställen och nära varandra kan man minimera temperaturgradienterna och noggranna kalibreringar kan göras. Tack vare att miljökammaren är liten, ca 0,1 m³, kan tryckgradienterna försummas.

1 Inledning

Laserinterferometriska mätningar bygger på en noggrann bestämning av laserljusets våglängd. Detta kräver att brytningsindex i den aktuella miljön kan räknas ut med stor noggrannhet. Då brytningsindex huvudsakligen bestäms av [2] lufttemperatur och absolut lufttryck måste dessa båda storheter kunna mäts noggrant.

Nuvarande laserinterferometersystem är försedda med sensorer för mätning av temperatur och tryck. Tidigare har dessa givare endast kalibrerats vid rådande miljö i komparationsrummet, det vill säga vid ca 20 °C och atmosfärtryck.

Med denna nya miljökammare, där lufttryck och lufttemperatur kan regleras, kan givarna kalibreras över hela arbetsområdet och man får större kunskaper om givarnas prestanda. Olinjäriteter hos givarna kan på så sätt kontrolleras. Dessutom kan man undersöka om givarna påverkas av en sekundär parameter, det vill säga om temperaturgivarna är tryckberoende och om tryckgivarna är temperaturberoende.

2 Laserinterferometersystemet

2.1 Allmänt om laserinterferometersystemet

Den laserinterferometer som för närvarande är mest dominerande på den svenska marknaden är av fabrikat Hewlett Packard (HP). Apparaten är, vad beträffar de optiska komponenterna, en Michelson tvåstråleinterferometer [1]. Principen för interferometerns mekaniska och optiska konstruktion framgår av figur 2.1, som visar användning av interferometern i ett mätsystem för mätning av skalor.

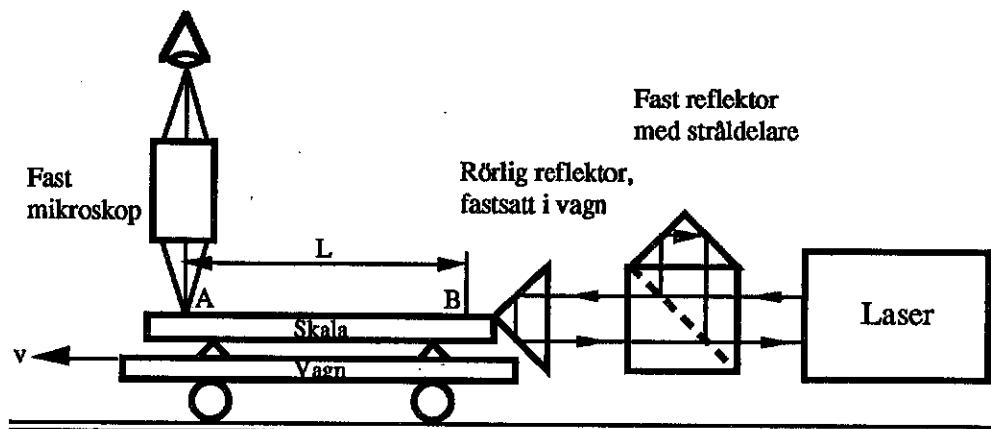


Fig 2.1 Principen för laserinterferometrisk mätning av streckmått.

Mätsystemet utgörs av en rörlig vagn på räls och av laserinterferometern. Vagnen bär upp längdskalan, som är utförd som ett streckmått. Med hjälp av ett mätmikroskop, fastsatt i apparatens fundament, bringas mikroskopets hårkors att sammanfalla med längdskalans delstreck. Laserinterferometern består av laserljuskälla, stråldelare och reflektorer. I lasern finns även en detektor inbyggd. Ljusstrålen från lasern delas i stråldelaren i två delar. Stråldelaren består av en halvreflekterande spegelyta ställd under 45° vinkel mot den infallande strålen.

Den ena delen av strålen går till den rörliga reflektorn monterad på vagnen i samma höjd som skalan samt i linje med denna (mätarmen). Dessutom är det av stor betydelse att vagnens rörelse sammanfaller med strålens riktning. Den andra stråldelen (referensarmen) går till den fasta reflektorn. Efter att ha återkastats i de bågge reflektorerna förenar sig strålarna vid passagen genom stråldelaren och faller slutligen på den fotokänsliga detektorn. Ljusvågorna i mätarmen och i referensarmen är således koherenta och kan interferera med varandra. Stråldelaren tillsammans med den fasta reflektorn är stabil lagrade i samma fundament, där även mikroskopet sitter. Avståndet mellan stråldelaren och mikroskopet får inte ändra sig under mätning om mätfelen skall minimeras.

Mätning av längd L grundar sig på indikering av den rörliga reflektorns rörelse i antalet våglängder, det vill säga man registrerar antalet intensitetsfluktuationer som funktion av skalans förflyttning, vilken ju är samma som sträckan för reflektorns rörelse.

I position A inställs det vänstra delstrecket under mikroskopets hårkors varvid laserns digitala enhet ställs på 0, $p_A = 0$. Därefter förflyttas vagnen tillsammans med skalan och reflektorn till position B och det högra delstrecket inställs under samma hårkors och $p_B = M$ avläses. Förflyttning av reflektorn, som är lika med L , kan relateras direkt till 1/4-våglängder i luft:

$$L = \frac{1}{4} \frac{\lambda_0}{n} M$$

Där M är antalet kvartsvåglängder i luft, λ_0 är laserljusets vakuumvåglängd och n betecknar luftens brytningsindex.

Laserinterferometern har fått ett mycket stort användningsområde och man kan förutom längdmätningar göra mätningar av rakhet, planhet, hastighet, vinklar med mera.

2.2 Brytningsindex inverkan på mätnoggrannheten

Av ekvationen ovan framgår att noggrann kännedom om brytningsindex, n , är av synnerligen stor betydelse vid all interferometrisk längdmätning. Ett relativt bra värde på luftens brytningsindex kan erhållas genom beräkning ur Edléns formler, där n i detta fall dels beror på korrektheten hos den empiriska modellen för formeln, dels på noggrannheten vid bestämning av luftens temperatur, tryck samt relativ fuktighet.

Brytningsindex, n , beroende av lufttemperaturen och av luftrycket kan för torr luft enligt B. Edlén [2] beskrivas som :

$$(n_{tp} - 1) = \frac{p(n_s - 1)}{720,775} \times \frac{1 + p(0,817 - 0,0133t)10^{-6}}{1 + 0,003661t}$$

där p är luftrycket i torr, t är lufttemperaturen i $^{\circ}\text{C}$, n_{tp} är brytningsindex vid trycket p och temperaturen t samt n_s är brytningsindex i standardluft (760 torr och 15°C). Brytningsindex i standardluft är [2] :

$$(n_s - 1)10^8 = 8342,13 + \frac{2406030}{130 - \frac{1}{(\lambda_0)^2}} + \frac{15997}{38,9 - \frac{1}{(\lambda_0)^2}}$$

Där λ_0 är vakuumvåglängden i μm .

Som exempel kan vi se hur luftrycket och lufttemperaturen vid miljökammarens gränser påverkar brytningsindex. Antag att en He-Ne laser med $\lambda_0 = 0,633 \mu\text{m}$ används. Då får vi:

Luftrycket 1050 mbar (≈ 788 torr) och lufttemperaturen 15°C :

$$n_{tp} = 1,000287 \Rightarrow n_{tp} \text{ är } 0,0010 \% \text{ större än vid standardluft.}$$

Luftrycket 920 mbar (≈ 690 torr) och lufttemperaturen 25°C :

$$n_{tp} = 1,000243 \Rightarrow n_{tp} \text{ är } 0,0034 \% \text{ mindre än vid standardluft.}$$

Vid noggranna lasermätningar är denna brytningsindexändring så stor att man måste ta hänsyn till denna ändring.

Även luftens fuktighet påverkar brytningsindex. B. Edlén beskrev år 1966 ett samband [2] som visar hur luftfuktigheten påverkar brytningsindex. Detta samband modifierades år 1988 av K. P. Birch och M. J. Downs [3] och ser ut som följer :

$$(n_{tpf} - 1) - (n_{tp} - 1) = -f \left(3,7209 - 0,0343 \frac{1}{(\lambda_0)^2} \right) 10^{-10}$$

där f är vattenångans partialtryck i Pa, λ_0 är vakuumväglängden i μm , n_{tpf} är brytningsindex i fuktig luft vid temperaturen, t , och luftrycket, p , samt n_{tp} är brytningsindex i torr luft vid samma tryck, p , och temperatur, t .

För att se hur mycket luftfuktigheten påverkar brytningsindex kan vi göra korrektsberäkningar vid några olika luftfuktigheter. Antag att en He-Ne laser med $\lambda_0 = 0,633 \mu\text{m}$ används. Vid temperaturen = 20 °C och luftrycket = 1000 mbar får vi :

Relativ luftfuktighet 10 % ($\approx 234 \text{ Pa}$) \Rightarrow

$\Rightarrow n_{tpf}$ är 0,000 0085 % större än vid torr luft.

Relativ luftfuktighet 50 % ($\approx 1172 \text{ Pa}$) \Rightarrow

$\Rightarrow n_{tpf}$ är 0,000 043 % större än vid torr luft.

Relativ luftfuktighet 100 % ($\approx 2344 \text{ Pa}$) \Rightarrow

$\Rightarrow n_{tpf}$ är 0,000 085 % större än vid torr luft.

Man ser att luftfuktighetens variationer påverkar brytningsindex lite i jämförelse med lufttemperaturen och luftrycket. Det räcker därför med att kalibrera luftfuktighetsgivarna i en mätpunkt.

Luftens sammansättning, tex CO₂-halten, påverkar också brytningsindex, men denna påverkan är försumbart liten [2] i normala miljöer.

2.3 Laserinterferometerns miljösensorer

Till varje laserinterferometer finns det miljösensorer, det vill säga sensorer som mäter lufttryck, lufttemperatur, materialtemperatur och luftfuktighet. Utformningen av dessa sensorer varierar avsevärt för olika laserinterferometrar. I vårt projekt har vi tagit hänsyn till den praktiska utformningen hos tre fabrikat på marknaden. De aktuella laserinterferometrarna är Hewlett Packard (HP), Renishaw och Spindler & Höyer. Figuren nedan visar konfigurationen för dessa tre laserinterferometrar.

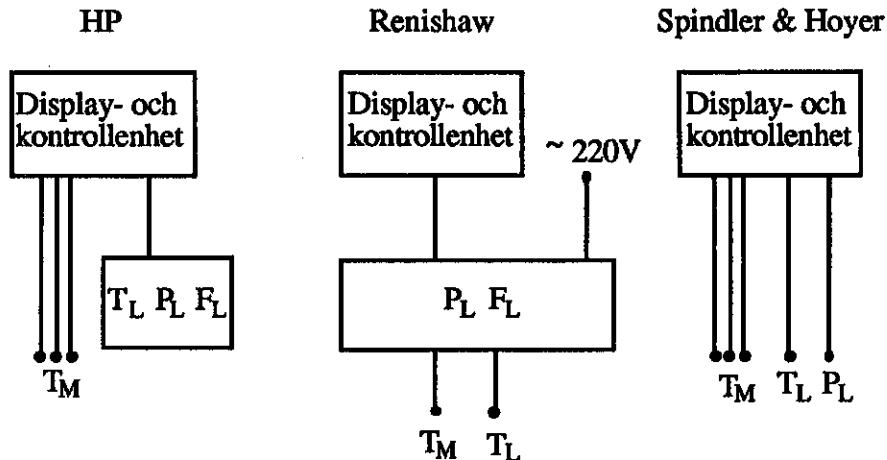


Fig 2.2 Givarkonfigurationen hos tre laserinterferometrar.

Display- och kontrollenheten är själva hjärnan i laserinterferometersystemet och här görs avläsningarna och inställningar för mätprocessen. P_L är lufttryck, T_L är lufttemperatur, T_M är materialtemperatur och F_L är luftfuktighet.

Inverkan av den relativ luftfuktigheten är mycket liten och mätningen av densamma är väldigt grov. Kalibreringen görs i regel endast i en mätpunkt och luftfuktighetsgivarna har därför helt lämnats utanför vårt examensarbete.

HP har en stor luftsensor för lufttryck och lufttemperatur. Luftsensorn skall monteras vertikalt och den fästs med hjälp av en magnet på baksidan. HP har 1–3 ytmonterade magnetiska materialtemperaturgivare. Den av fabrikanten utlovade toleransen hos lufttrycksgivaren är $\pm 2,9$ mbar och dess arbetsområde är 690 – 1034 mbar. Lufttemperaturgivaren har toleransen $\pm 0,60$ °C i området 15 – 25 °C och materialtemperaturgivaren har toleransen $\pm 0,10$ °C i området 0 – 40 °C.

Renishaw har en stor svart låda med en givare för lufttryck, en lufttemperaturgivare, som fästs i en hållare och en ytmonterad magnetisk materialtemperaturgivare. Toleransen hos lufttrycksgivaren är $\pm 2,25$ mbar och dess arbetsområde är 660 – 1060 mbar. Lufttemperaturgivaren har toleransen $\pm 0,5$ °C i området 0 – 40 °C och materialtemperaturgivaren har toleransen $\pm 0,1$ °C i området 0 – 40 °C.

Spindler & Hoyer har fem separata och kompakta givare. En givare för lufttryck, en lufttemperaturgivare som fästs med magnet och tre stycken ytmonterade magnetiska materialtemperaturgivare. Toleransen hos materialtemperaturgivarna är $\pm 0,3$ °C.

3 Miljökammaren

3.1 Krav på miljökammare

Målsättningen med miljökammaren är att den skall klara av att arbeta i temperaturområdet 15 – 25 °C och tryckområdet 920 – 1050 mbar absoluttryck. Inom dessa områden skall man kunna ställa in önskade värden både för temperatur och tryck. Både temperatur och tryck skall vara långtidsstabilas och ha små grader.

Beträffande mättnoggrannheten är målsättningen att göra mätningarna i miljökammaren en tiopotens bättre än vad laserinterferometersystemets miljösensorer klarar av att mäta. Detta innebär för temperaturmätningarna att man bör ha en noggrannhet på 0,05 °C eller bättre för lufttemperaturmätningarna och en noggrannhet på 0,01 °C eller bättre för materialtemperaturmätningarna. Mätningarna av lufttrycket i miljökammaren bör göras med noggrannheten 0,2 mbar eller bättre.

För utformningen av själva miljökammaren är flexibilitet ett nyckelord. Miljökammaren skall kunna användas för kalibrering av de tre laserinterferometer-systemen Hewlett Packard, Renishaw och Spindler & Hoyer samt eventuella nya laserinterferometersystem. Detta ställer stora krav på flexibilitet hos miljökammaren, då varje system har sina speciella sensorer, kontakter och sladdar.

3.2 Beskrivning och konstruktion av miljökammare

Utgångspunkten för själva konstruktionen av miljökammaren var hur stor del av laserinterferometersystemet, som skulle inneslutas av kammaren, det vill säga hur stor miljökammaren skulle göras. Man hade då tre huvudalternativ att ta ställning till. Alternativ 1 var att innesluta hela laserinterferometersystemet, det vill säga miljösensorer, displayenheter och lasern. Alternativ 2 innebar att miljösensorer och displayenheter skulle inneslutas av miljökammaren och slutligen alternativ 3, som innebar att endast miljösensorerna skulle inneslutas av kammaren. Att bygga miljökammaren för alternativ 1 och 2 skulle innebära att kammaren blev väldigt stor och den skulle vara mycket opraktisk att hantera. Med motiveringen att kammaren skulle vara praktiskt hanterbar och att inverkan av variationer i lufttemperatur och lufttryck på displayenheterna kan försummas valdes alternativ 3.

Miljökammarens botten och väggar är gjorda av 8 mm aluminiumplåt, som är sammansvetsad utväntigt. Valet av material till miljökammaren stod mellan aluminium, stål och koppar. Då en kammare gjord av aluminium har bättre värmeledningsegenskaper än en kammare gjord av stål eller koppar samt att aluminium har betydligt lägre densitet än både stål och koppar, vilket är viktigt med tanke på hanterbarheten av miljökammaren, valdes aluminium.

Nedan görs en jämförelse av hur mycket energi som man måste tillföra kammaren för att höja temperaturen 1 °C för 8 mm aluminiumplåt, 6 mm kopparplåt och 6 mm stålplåt. Det framgår då att energiåtgången blir minst vid valet av aluminiumplåt.

$$\frac{\Delta Q}{\Delta T_{Al}} = m_{Al}c_{Al} = 22,68 \times 903 = 20,5 \text{ kJ}/\text{°C}$$

$$\frac{\Delta Q}{\Delta T_{Cu}} = m_{Cu}c_{Cu} = 56,45 \times 385 = 21,7 \text{ kJ}/\text{°C}$$

$$\frac{\Delta Q}{\Delta T_{stål}} = m_{stål}c_{stål} = 49,52 \times 450 = 22,3 \text{ kJ}/\text{°C}$$

där ΔQ är den energi som måste tillföras för att höja temperaturen ΔT °C, m är materialets massa och c är materialets specifika värme.

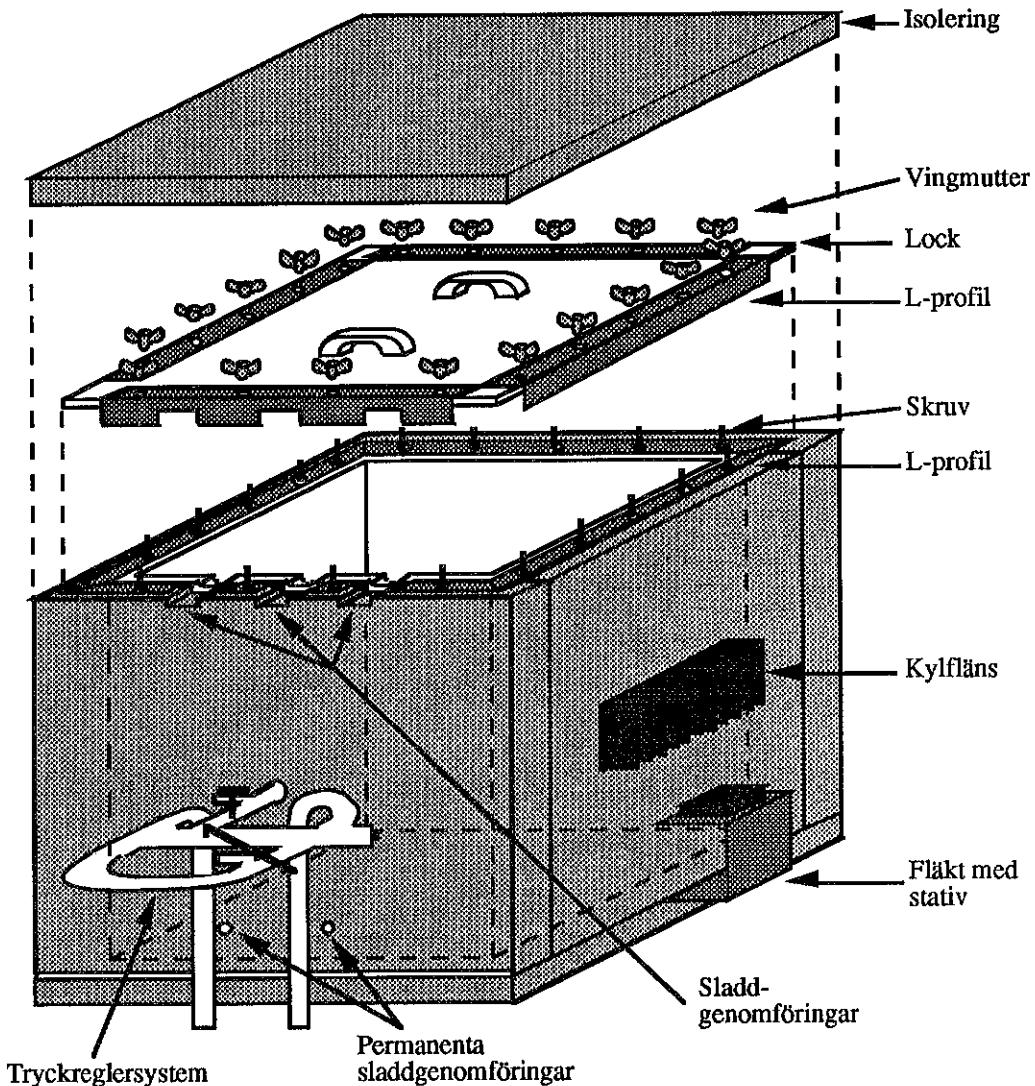


Fig 3.1 Ritning på miljökammaren

Värming och kyling av miljökammaren görs med hjälp av fyra stycken peltierelement, som sitter på utsidan av två motstående väggar. Peltierelementen sitter parvis fastmonterade i ett klämförband mellan väggen och en specialtillverkad aluminiumkropp. På aluminiumkroppen är sedan en kylfläns fastmonterad med ett skruförband. Det är mycket viktigt att det är bra termisk kontakt mellan peltierelementen och kammarsväggen, peltierelementen och aluminiumkroppen samt mellan kylflänsen och aluminiumkroppen. Därför har termisk pasta applicerats på samtliga dessa ytor. För att peltierelementen skall fungera på ett tillfredsställande sätt är det viktigt att kylflänsarnas temperatur hålls nära rumstemperaturen och för att öka värmeutbytet mellan kylflänsarna och luften har en fläkt monterats under vardera kylfläns.

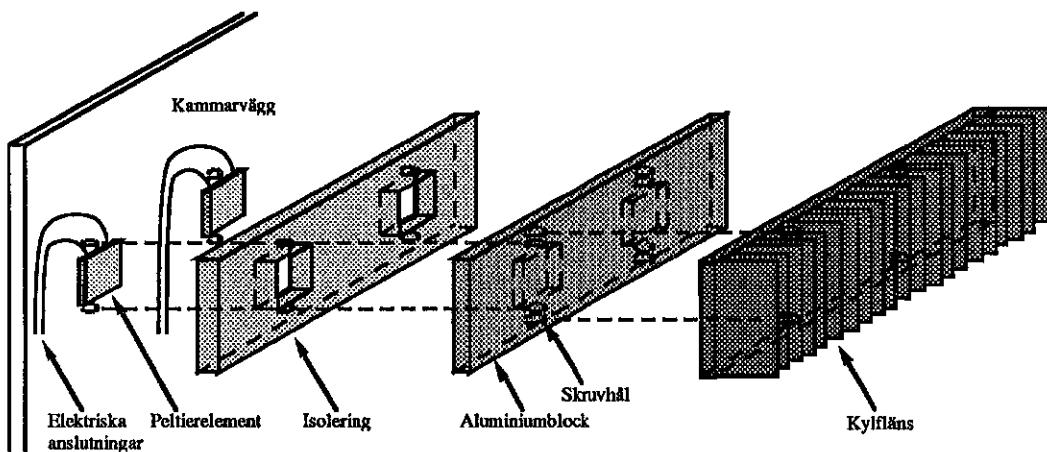


Fig 3.2 Ritning på montaget av peltierelementen.

Hela miljökammaren är isolerad med 5 cm ljusblå styrencellplast för att minimera energiutbytet mellan kammarens väggar och omgivningen. Det är även isolerat med 1 cm styrencellplast runt omkring peltierelementen, det vill säga mellan väggen och aluminiumkroppen för att minska värmeutbytet mellan kylelementet/aluminiumkroppen och kammarväggen.

Den maximala effektförlusten i kammaren fås vid temperaturskillnaden, $\Delta T = 5^\circ\text{C}$ och är:

$$P_{\text{Förl.}} = S \frac{\Delta T}{\frac{\Delta x}{\lambda} + \frac{1}{h}}$$

där S är isoleringens yta, Δx är isoleringens tjocklek, λ är värmeisoleringfaktor med värdet 0,03 för styrencellplast och h är värmegenomföringskoefficient med värdet 10 i normal rumsluft.

$$P_{\text{Lock}} = P_{\text{Botten}} = 0,25 \frac{5}{\frac{0,05}{0,03} + \frac{1}{10}} = 0,71 \text{ W}$$

$$P_{\text{Sida utan peltierelement}} = 0,20 \frac{5}{\frac{0,05}{0,03} + \frac{1}{10}} = 0,57 \text{ W}$$

$$P_{\text{Sida med peltierelement}} = 0,17 \frac{5}{\frac{0,05}{0,03} + \frac{1}{10}} + 0,03 \frac{5}{\frac{0,01}{0,03} + \frac{1}{10}} = 0,83 \text{ W}$$

$$P_{\text{Tot}} = 2 \times 0,71 + 2 \times 0,57 + 2 \times 0,83 \approx 5 \text{ W}$$

I lådans överkant är en L-profil i aluminium fastskruvad i kammarväggen och den tjänar två syften. Dels stabiliseras den kammarväggen överkant och dels fungerar den som infästning för locket. Både L-profilen och kylkroppen ovan är tillverkade i aluminium liksom kammaren. Detta innebär att spänningarna i skruvförbanden på grund av att olika material har olika längdutvidgningskoefficient kan elimineras.

Locket är tillverkat i 10 mm plexiglas för att möjliggöra insyn i miljökammaren och försett med två handtag för att enkelt kunna lyftas av och sättas på. Locket skruvas

fast i profilen med hjälp av vingmuttrar för snabb och enkel montering. På lockets kanter sitter lösa L-profiler av aluminium som gör att lockets kanter förstärks och locket tätar därför bättre.

I framsidans överkant är tre små grunda hål utfrästa och dessa hål fungerar som elektriska genomföringar. Hål 1 används till laserinterferometersystemets sensor-sladdar, hål 2 används för våra egna referensgivare och hål 3 användes vid utvärderingen av kammaren då flera givare användes. Dessa hål tätas med ett rött vax, som vid bearbetning är mjukt men som stelnar med tiden.

För att få locket riktigt tätt mot kammaren gjordes tätningen med silikon. Silikonet applicerades i en sträng på kammarväggarnas kanter och innan locket lades på fästes plastfolie helt slätt på lockets undersida för att inte locket skulle fastna i silikonen. Efter det att locket lagts på fick silikonet härdna i två dygn innan locket lyftes av och plastfolien togs bort.

I miljökammaren finns också två fasta elektriska genomföringar, en nätsladd för Renishaws sensorenhet och en sladd till fläkten som sitter i kammaren. Dessa genomföringar är först tätade med silikon och sedan med det röda vaxet.

Skarvarna mellan väggarna och mellan väggarna och botten med svetsfogar på utsidan var i sig inte tätta utan även dessa tätades med silikon. Silikonet i skarvarna smetades ut mycket omsorgsfullt varefter locket skruvades fast. Trycket i miljökammaren höjdes därefter till ca 70 mbar övertryck, vilket gjorde att silikonet kröp in i de otäta porerna i svetsfogarna innan silikonet började att härdna. Kammaren stod med övertryck i två hela dygn innan locket skruvades av.

Fläkten i miljökammaren är en lågvarvig, lågeffekts likströmsfläkt och är monterad mitt på baksidan. Fläkten fyller två funktioner i kammaren. Den får luften att cirkulera inuti kammaren, vilket avsevärt minskar temperaturgradienterna och samtidigt ökar energiutbytet mellan kammarväggarna och luften i kammaren, vilket innebär att både uppvärmning och nedkyllning av kammarluften går betydligt fortare.

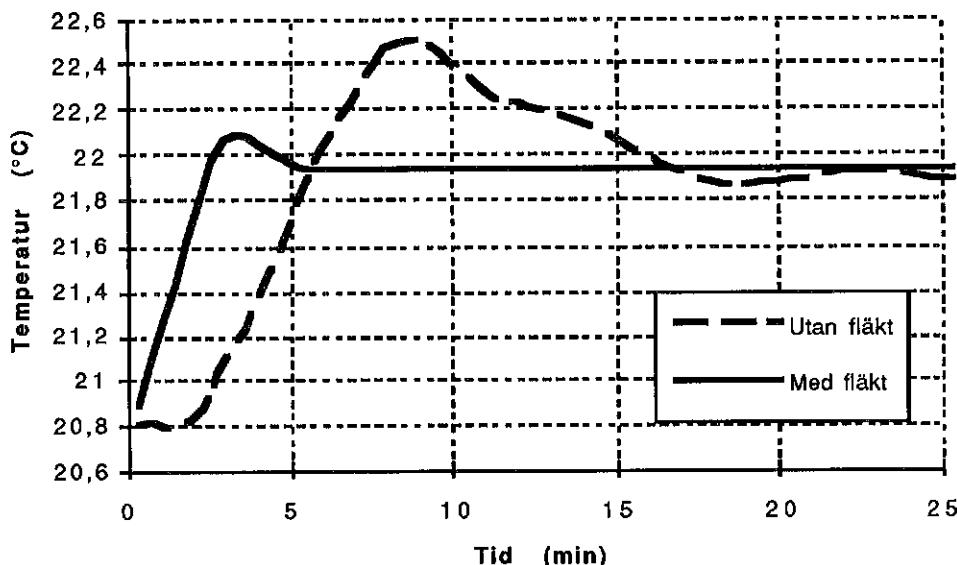


Fig 3.3 Uppvärmning med och utan fläkt. En P-regulator med $K=500$ användes i båda fallen.

Inuti kammaren finns två stativ som båda är tillverkade av stålplåt och har värmeisolerande fötter av bakelit. Det ena stativet har en vertikal del på vilken HP:s magnetiska luftsensor kan fästas och armar i vilka klämmor är fastmonterade. Dessa klämmor används för att hålla fast lufttemperaturgivarna. Tack vare stativets flexibilitet kan mätpunkter för givarna väljas i hela miljökammaren. Det andra stativet består av en horisontell platta, som är avsedd för materialtemperaturgivarna. Våra två referensgivare är fastskruvade i mitten av plattan och de olika laserinterferometersystemens magnetiska materialtemperaturgivare fästs på plattan. Anledningen till att vi valt att använda två stativ är att man inte kan bortse från inverkan av HP:s luftsensors egenuppvärmning. HP:s luftsensor värmer via infästningen upp stativet, vilket innebär att materialtemperaturgivarna skulle värmas upp på ett okontrollerat sätt av HP:s luftsensor vilket vi vill undvika.

I kammarens framsida sitter tryckreglersystemet, där själva rörsystemet är gjort av vakuumkomponenter. Rörsystemet är fastskruvat i kammarväggen med hjälp av fyra spänklackar och tätat med en gummicentrerring. De fyra hålen för spänklackarna är dessutom tätade med silikon.

Samtliga genomgående hål i kammarväggarna för skruvförband är tätade med silikon.

4 Temperaturreglering

4.1 Peltierelement

4.1.1 Allmänt om peltierelement

År 1834 fann den franske fysikern Jean Charles Peltier [4] att om en ström passerar genom en kontaktpunkt av två olika metaller, blev lödstället kallare än omgivningen. Denna effekt var dock ganska liten, men har tack vare halvledarmaterialens upptäckt på senare år fått en kommersiell tillämpning.

Genom att seriekoppla N- och P-dopade halvledarstavar får man en "varm" och en "kall" sida när man låter en likström flyta genom peltierelementet. Byter man riktning på strömmen byter den "varma" och den "kalla" sidan plats. Desto större likströmmen genom peltierelementet är desto större blir uppvärmingseffekten respektive nedkyllningseffekten beroende på om likströmmen är positiv eller negativ. Man behöver alltså endast reglera strömstyrkan för att variera kylnings- och värmningseffekten, vilket innebär att peltierelementen är mycket lättreglerade.

För ett peltierelement gäller följande effektsamband:

$$P_v = UI + P_k$$

där P_v är uppvärmingseffekten, P_k är kylningseffekten, U är spänningen över peltierelementet och I är strömmen genom peltierelementet.

Detta innebär att peltierelementet ger en större uppvärmingseffekt än kylningseffekt, eftersom peltierelementet har en viss egenuppvärmning.

4.1.2 Användning av peltierelement

Peltierelementens stora fördelar är att de är lättreglerade och reverserbara, samt att de är små och lätt att hantera. I jämförelse med andra typer av uppvärmnings- och nedkyllningssystem, som exempelvis ett vattenburet system, talade dessa fördelar för användandet av peltierelement till temperaturregleringen. Nackdelen med peltierelement är att de kräver en mycket god värmetransport från respektive till den sidan på peltierelementet som inte sitter mot kammarväggen, beroende på om kammaren kyls respektive värmes. Denna värmetransport är allra viktigast vid kylning av kammaren. Om den "varma" sidan blir för varm innebär det att peltierelementet mister sin kylförmåga.

För att kunna utnytta peltierelementets maximala kapacitet krävs alltså att energiutbytet mellan peltierelementets utsida och omgivningsluften är mycket effektivt. Denna effektiva värmeöverföring uppnåddes genom att montera stora flätkylda kylflänsar på peltierelementen (se 3.2).

Tiden det tar att värma upp kammaren (aluminiumväggarna och kammarluften) från $T=T_0$ till $T=T_0+1$ °C med N st peltierelement beräknas enligt följande:

$$dQ_{luft} = m_{luft} c_{v,luft} dT_{luft} \quad (1)$$

$$dQ_{luft} = d(P_{luft}) = dP_{luft,t} + P_{luft,dt} \quad (2)$$

där dQ_{luft} är den energimängd som tillförs kammarluften och som ger upphov till temperaturändringen dT_{luft} , m_{luft} är kammarluftens massa och $c_{v,luft}$ är kammarluftens specifika värme vid konstant volym.

$$P_{luft} = hS_{Al} (T_{Al} - T_{luft}) \quad (3)$$

$$dP_{luft} = hS_{Al} (dT_{Al} - dT_{luft}) \quad (4)$$

där P_{luft} är den överförd effekten från aluminiumplåtarna till kammarluften, h är värmeöverföringstalet, S_{Al} är aluminiumplåtarnas yta och T_{Al} är aluminiumplåtarnas temperatur.

$$dQ_{Al} = m_{Al}c_{v,Al}dT_{Al} \quad (5)$$

$$dQ_{Al} = d(P_{Al}t) = dP_{Al}t + P_{Al}dt = P_{Al}dt \quad (6)$$

$$P_{Al} = NP_{Pelt} \quad (7)$$

där dQ_{Al} är den energimängd som tillförs aluminiumplåtarna och som ger upphov till temperaturändringen dT_{Al} , m_{Al} är aluminiumplåtarnas massa och $c_{v,Al}$ är aluminiumets specifika värme. P_{Al} är den effekt som tillförs aluminiumplåtarna, N är antalet peltierelement och P_{Pelt} är den effekt som ett peltierelement överför till aluminiumplåtarna.

Ekv (5), (6) och (7) ger

$$dT_{Al} = \frac{NP_{Pelt}}{m_{Al}c_{v,Al}} dt \quad (8)$$

Ekv (8) integreras enligt

$$\int_{T_0}^{T_{Al}} dT_{Al} = \int_0^t \frac{NP_{Pelt}}{m_{Al}c_{v,Al}} dt$$

vilket ger

$$T_{Al} = T_0 + \frac{NP_{Pelt}}{m_{Al}c_{v,Al}} t \quad (9)$$

Ekv (8) och (9) insättes i ekv (3) och (4) varefter dessa insättes i ekv (2), som tillsammans med ekv (1) ger

$$\frac{dT_{luft}}{dt} + \frac{T_{luft}}{\frac{m_{luft}c_{v,luft}}{hS_{Al}} + t} = \frac{T_0 + \frac{NP_{Pelt}}{m_{Al}c_{v,Al}} (1 + t)}{\frac{m_{luft}c_{v,luft}}{hS_{Al}} + t}$$

Detta är en differentialekvation av 1:a ordningen vars lösning är

$$T_{luft}(t) = \frac{\frac{NP_{Pelt}}{m_{Al}c_{v,Al}} t (1 + \frac{t}{2})}{\frac{m_{luft}c_{v,luft}}{hS_{Al}} + t} + T_0 \quad (10)$$

I ekv (10) införs numeriska värden enligt följande:

$$P_{Pelt} = \frac{IU}{I_{max}U_{max}} P_{max} = \frac{4 \times 13}{6 \times 15,4} 51,4 \approx 30 \text{ W}$$

där I_{max} , U_{max} och P_{max} är maxvärdien enligt datablad och I och U är de värden vår elektronik klarar av att leverera.

$$m_{A1} = 22,68 \text{ kg}$$

$$c_{v,A1} = 903 \text{ J/(kg K)}$$

$$m_{luft} = \rho_{luft} V_{luft} = 1,293 \times 0,1 = 0,1293 \text{ kg}$$

$$c_{v,luft} = \frac{c_{p,luft}}{c_{p,luft}/c_{v,luft}} = \frac{1,01 \times 10^3}{1,40} = 721 \text{ J/(kg K)}$$

$$h = 10$$

$$S_{A1} = 1,05 \text{ m}^2$$

Tiden, t , det tar att varma upp kammarluften från $T=T_0$ till $T=T_0+1 \text{ }^\circ\text{C}$ fås för olika N enligt:

$$t = 12 \text{ min för } N = 2$$

$$t = 6 \text{ min för } N = 4$$

$$t = 3 \text{ min för } N = 8$$

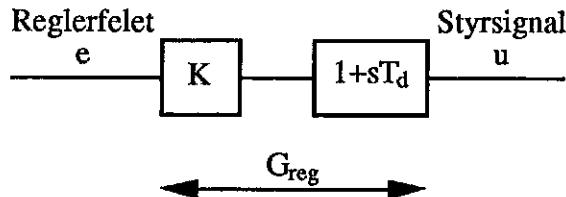
För att erhålla någorlunda snabbhet hos systemet valde vi att använda fyra stycken peltierelement, som tillsammans gav en maximal värmeeffekt på ca 120 W. Den maximala kyleffekten är något mindre. Att vi inte valde fler peltierelement än fyra beror på att effektförbrukningen då skulle bli för stor.

4.2 Val av regulator

Avsikten med regleringen är att kunna ställa in en bestämd temperatur i intervallet 15 - 25 $^\circ\text{C}$ och sedan kunna hålla den "stabil" under så lång tid att alla givare hinner stabilisera sig och att temperaturgradienterna hinner försvinna, så att goda mätningar kan göras. En viss snabbhet krävs alltså för att temperaturändringen inte ska ta alltför lång tid. Detta åstadkomms med en proportionell regulator med hög förstärkning. Att bara använda sig av en P-regulator fungerade mycket bra, men för att ytterligare förbättra temperaturstabiliteten använde vi oss även av en differentierande del och erhöll således en PD-regulator.

Anledningen till att inte en integrerande del användes var att I-delen vill att det kvarstående reglerfelet skall vara noll, men för att temperaturen skall hålla sig stabil i vår kammare krävs det att regulatorn lägger ut en liten spänning för att kompensera för värmeförluster.

PD-regulatorns blockschema ser ut enligt följande



där K är regulatorns förstärkning och T_d är regulatorns tidskonstant.

PD-regulatorns överföringsfunktion blir således

$$G_{reg} = K(1+sT_d)$$

4.3 Styrellektronik

4.3.1 Nättaggregat

Valet av nättaggregat stod mellan en transformator med likriktarbrygga glättad med stora elektrolytkondensatorer och ett switchat nättaggregat. Den störningskänsliga miljön i SPs komparationsrum, där miljökammaren ska användas, gjorde att ett switchat nättaggregat inte var så lyckat.

På grund av den stora effekten till peltierelementen (ca 200 Watt vid full belastning) fick vi problem med att kondensatorerna inte lyckades hålla utspänningen konstant. Vid maximalt uttagen effekt fick vi ett rippel på 9 V på matningsspänningen till elektronikens slutsteg. Detta gjorde att kondensatorerna blev för varma. Problemet lösades genom att vi monterade två extra elektrolytkondensatorer parallellt med de första två. Ripplet minskade då till 6 V. Vi satte även kondensatorerna på ett separat kretskort och kylde dem med fläkten som användes till elektronikens slutsteg.

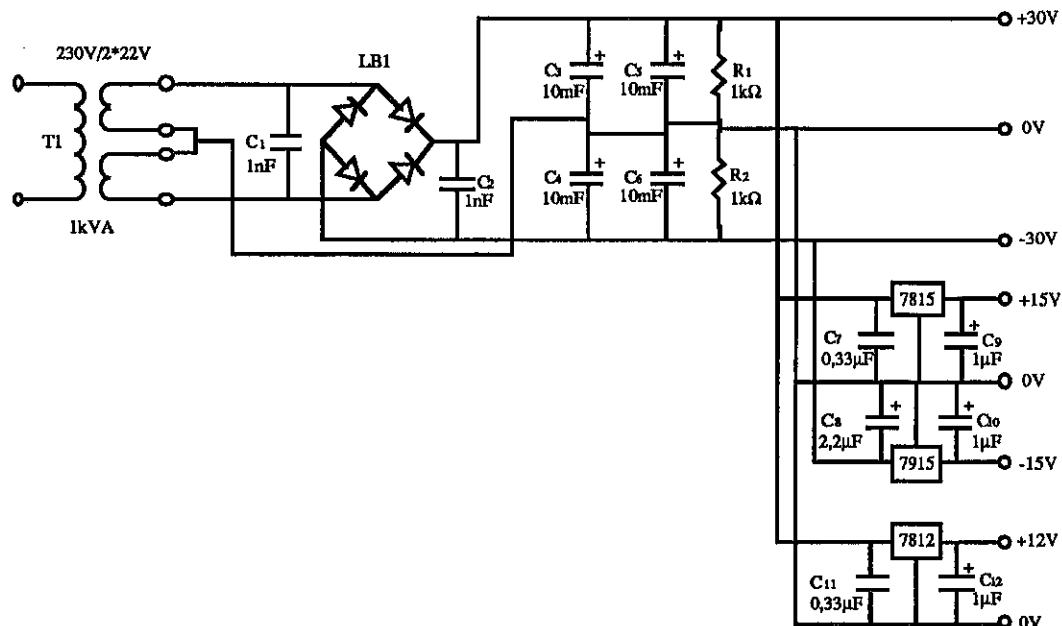


Fig 4.1 Nättaggregatets kretsschema

4.3.2 Ingångssteg

Insignalen till regulatorn kommer från en temperaturgivare, modell Pt-100, som sitter inuti miljökammaren. Via ett temperaturmätnstrument, Systemteknik S1228, som är kopplat till temperaturgivaren fås en elektrisk spänning som motsvarar temperaturen inuti kammaren och där $1^{\circ}\text{C} \Leftrightarrow 0,1\text{ V}$. Styrelektronikens ingångssteg blir därför enkelt och består av en differensförstärkare, som förstärker skillnads-spänningen mellan temperaturens börvärde och ärvärde tio gånger för att minska inverkan av brus och för att få en lämplig signalnivå till regulatorn.

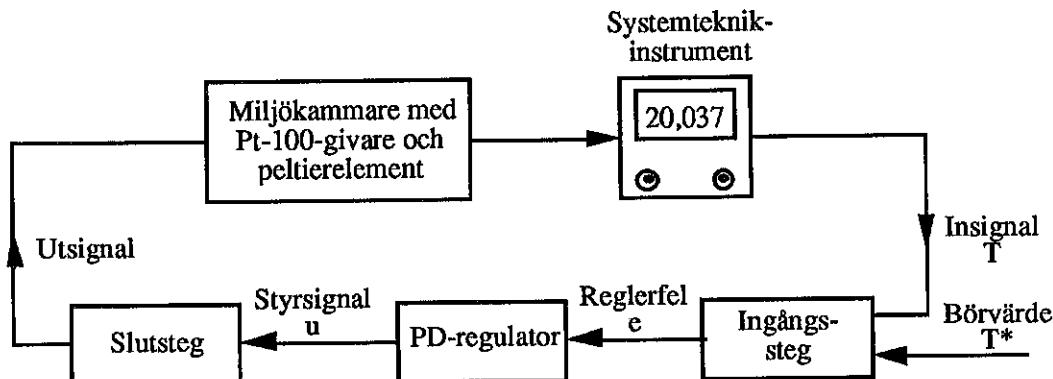


Fig 4.2 Reglersystemet

Ingångssteget är byggt kring en operationsförstärkare och har överföringsfunktionen

$$G_{in} = \frac{R_2}{R_1}(T^* - T)$$

där T^* är önskad temperatur, det vill säga temperaturens börvärde, i kammaren och ställs in med potentiometern R_p .

På ingångarna sitter RC-filter för att minska inkommende störningar.
Operationsförstärkaren har en offsetjustering, som kan justeras manuellt.

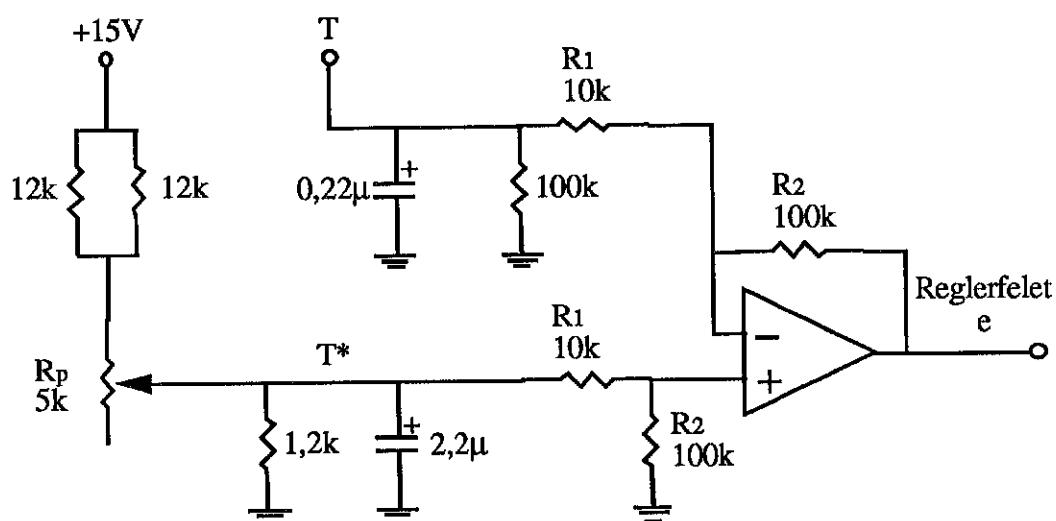


Fig 4.3 Ingångsstegets kretsschema.

4.3.3 Regulator

Regulatorn som användes var en PD-regulator som vi byggde själva kring tre stycken operationsförstärkare. En differentierande del och två förstärkardelar.

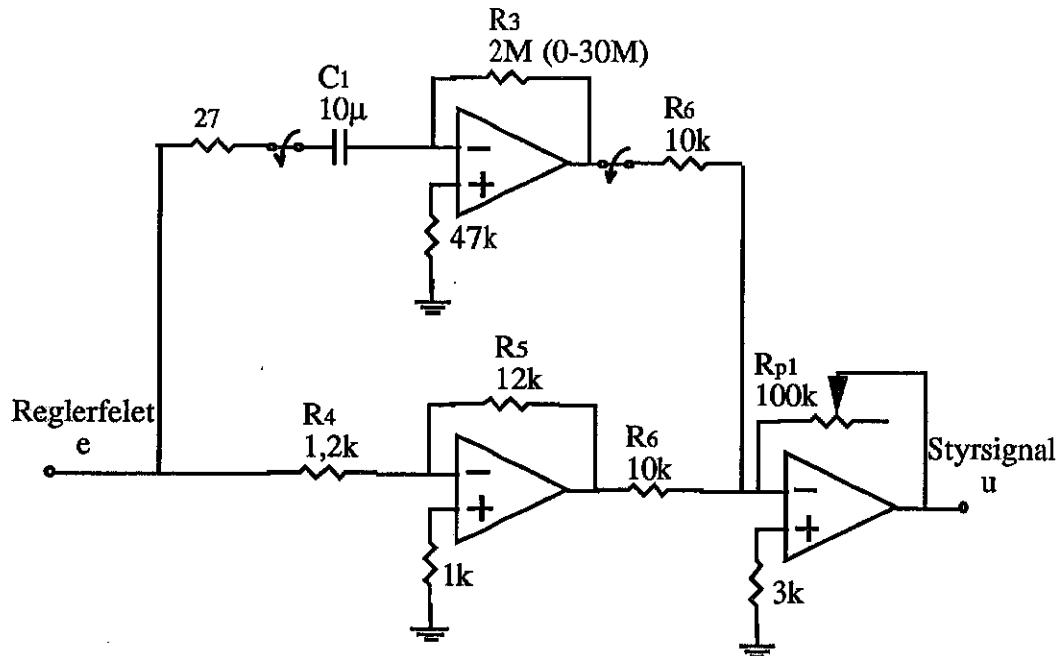


Fig 4.4 Regulatorn kretsschema.

Regulatorn totala överföringsfunktion blir:

$$G_{\text{reg}} = \frac{R_{p1}}{R_6} \frac{R_2}{R_1} \left(\frac{R_5}{R_4} + sC_1 R_3 \right)$$

där $\frac{R_2}{R_1} = 10$ ggr och $\frac{R_5}{R_4} = 10$ ggr vilket ger regulatornens överföringsfunktion till:

$$G_{\text{reg}} = \frac{R_{p1}}{R_6} 10(10 + sC_1 R_3)$$

Detta gör att man kan ändra förstärkningen för sig och deriveringstiden för sig.

På regulatornens utgång, före slutsteget, sitter ett aktivt lågpassfilter som minskar bruset på styrsignalen. Det aktiva filtret är byggt kring en operationsförstärkare.

Den totala förstärkningen är uppdelad i tre delar för att minska inverkan av brus och för att minska risken för självsvängningar.

4.3.4 Slutsteg

Styrellektronikens slutsteg består av fyra stycken effektoperationsförstärkare, modell LM12CLK, en till varje peltierelement. Operationsförstärkarna matas med ± 30 V från nätaggregatet. Denna spänning har ett rippel på ca 6 V vid maximalt uttagen effekt, men det påverkar inte utsignalen till peltierelementen. Problemet med att använda operationsförstärkare som slutsteg är att mycket effekt försätts som värme vid hård belastning, vilket gör att operationsförstärkarna blir mycket varma. Detta problem lösades genom att sätta operationsförstärkarna på stora separata kylflänsar, som kyls med en liten fläkt.

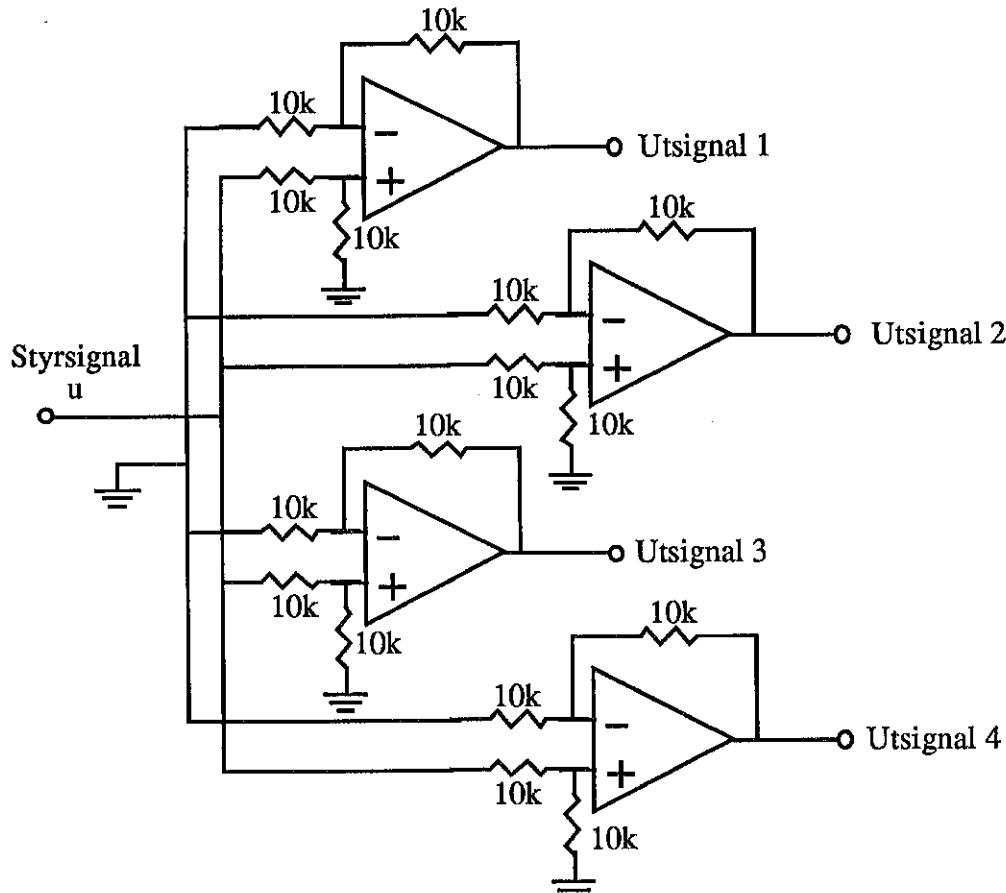


Fig 4.5 Slutstegets kretsschema.

5 Tryckregleringen

5.1 Tryckreglersystemets uppbyggnad

Tryckreglersystemet är i sin helhet uppbyggt av vakuumrör detaljer, som är ihopmonterade med spänningar och centrerringar. Systemet består av en membranvakuumpump med en blås- och en sugingång. Pumpen är via två bälgslangar ansluten till själva rörsystemet. Med hjälp av två stycken trevägs kulventiler kan man välja om pumpen ska suga ut eller blåsa in luft i miljökammaren, det vill säga välja om man vill ha under- eller övertryck i kammaren. Närmast kammaren sitter en manuell reglerventil, med vilken man styr flödet av luft in i och ut ur kammaren.

I tryckreglersystemet finns även en övertrycksventil för att skydda pumpen för det stora övertryck som kan uppstå i rörsystemet vid oförsiktig användning. En barometer av märket Vaisala PA 11 är via en gummislang ansluten till en nippel i rörsystemet och mäter lufttrycket inne i kammaren.

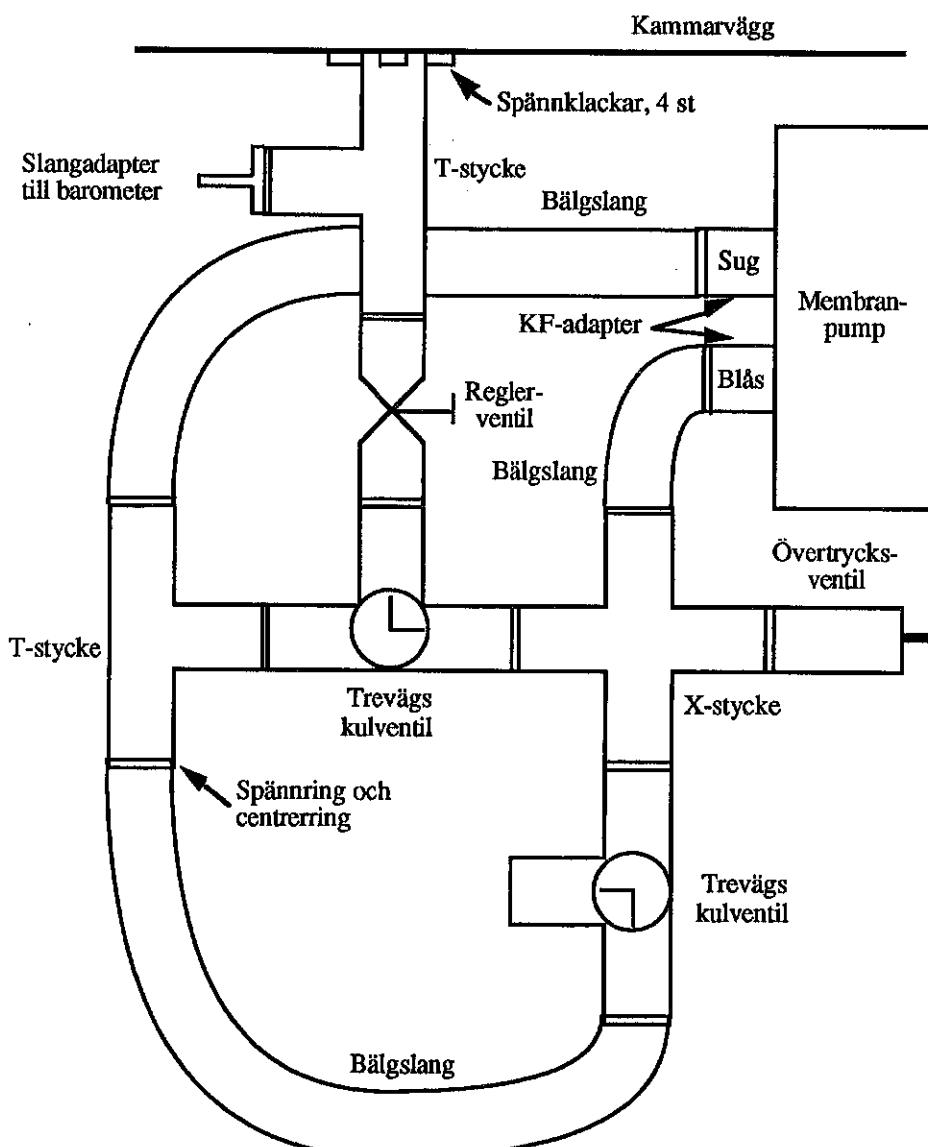


Fig 5.1 Tryckregleringsystemet

5.2 Användning av tryckreglersystemet

När lufttrycket i kammaren skall ändras ställer man först in de två trevägs kulventilerna i antingen sug- eller blåsläge. Vakuumpumpen startas sedan och med hjälp av den manuella reglerventilen bestämmer man luftflödet in eller ut ur kammaren. När önskat tryck har nåtts skruvas reglerventilen åt och vakuumpumpen kan stängas av. Efter ca 5 min har trycket i miljökammaren stabiliserats och mätningar kan göras.

Då reglerventilen är helt öppen och pumpen är på ändras trycket i kammaren med ca 4 mbar/s. Detta gäller både i sug- och blåsläge.

När man redan har en tryckskillnad mellan kammarluften och omgivningens luft kan denna skillnad enkelt minskas genom att först vrida en av de två trevägs kulventilerna och sedan öppna reglerventilen. Luft strömmar då genom reglerventilen tack vare tryckskillnaden och pumpen behöver då inte sättas på.

6 Utvärdering av miljökammaren

6.1 Uppvärmnings- och nedkylningsförlopp

Temperaturen i miljökammaren regleras med en PD-regulator som får sin insignal från en temperaturgivare, modell Pt-100 (se 4.3). Denna givare sitter ungefär mitt i kammaren. Med detta utförande kommer temperaturen mitt i kammaren att stabilisera sig kring önskat, i förväg inställt, värde. De uppvärmnings- och nedkylningsförlopp som beskrivs här är uppmättta med denna temperaturgivare. När det gäller temperaturer i andra punkter i kammaren se 6.3.

På grund av att peltierelementen inte kyler lika bra som de värmmer (se 4.1) kan inte samma förstärkning hos PD-regulatorn användas vid kylning som vid värmning. Tiden för kylning blir också mycket längre än för värmning. Regulatornens parametrar har valts till:

$$\begin{array}{ll} \text{Värmning:} & K = 750 \text{ ggr och } T_d = 20 \text{ sekunder.} \\ \text{Kylning:} & K = 1000 \text{ ggr och } T_d = 20 \text{ sekunder.} \end{array}$$

Dessa parametrar har vi provat oss fram till på grund av att miljökammarens överföringsfunktion var mycket svårberäknad.

Uppvärmnings- och nedkylningsförloppen har studerats i två olika fall. Ändring 1°C i taget respektive ändring från 20°C till 15°C och sedan till 25°C . Det senare fallet är den mätmetod som rekommenderas av oss, men även ändring 1°C i taget kan komma att bli intressant då man undersöker olinjäriteter hos de givare som ska kalibreras.

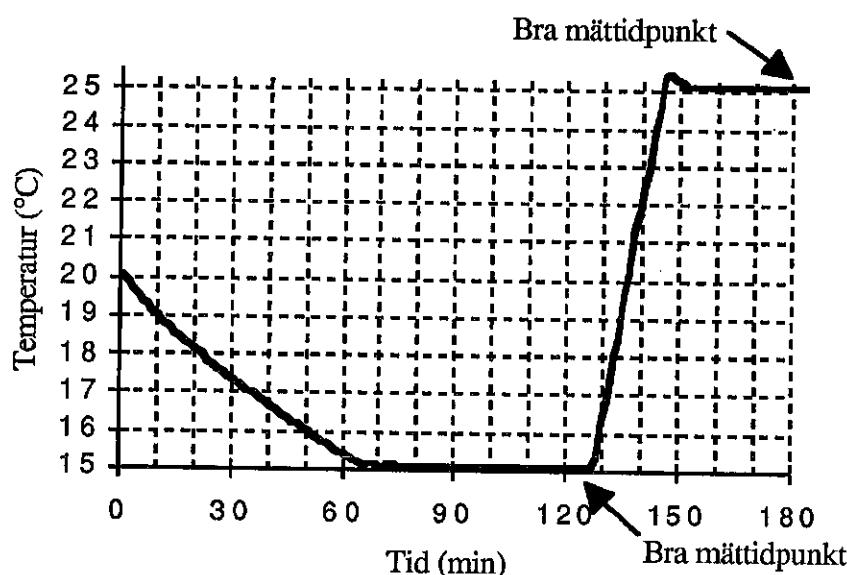


Fig 6.1 Nedkylning från 20°C till 15°C och uppvärmning från 15°C till 25°C .

Som framgår av figur 6.1 så tar det mer än dubbelt så lång tid att kyla från 20°C till 15°C , än det tar att varma från 15°C till 25°C . Vid värmning får man en översväng hos temperaturen som man i stort sett slipper vid kylning. Man ser också att om man väntar i ca 120 minuter från det att kylningen startas vid 20°C har god stabilitet vid 15°C nåtts. Vid värmning från 15°C till 25°C nås god stabilitet efter ca 50 minuter.

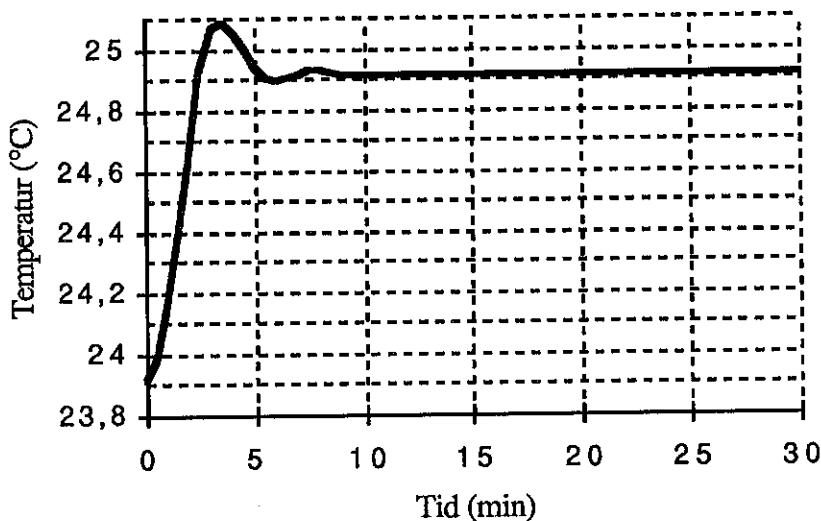


Fig 6.2 Uppvärmningsförlopp från 24 till 25 $^{\circ}\text{C}$.

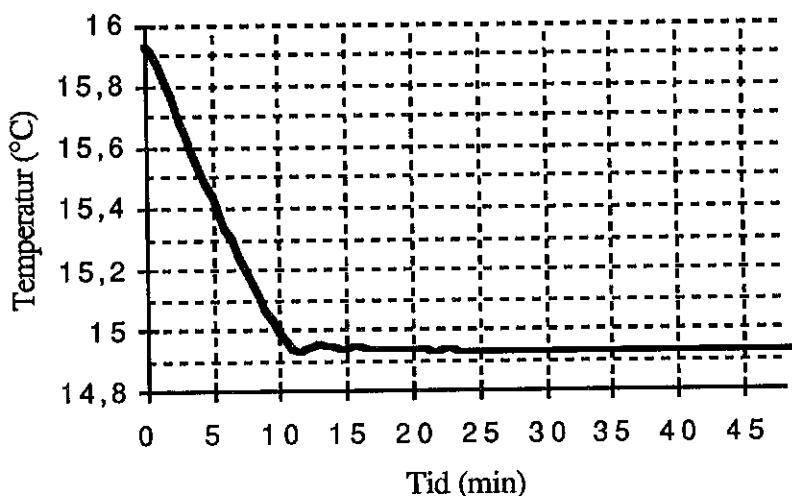


Fig 6.3 Nedkylningsförlopp från 16 till 15 $^{\circ}\text{C}$.

De två extremfallen, kylning vid lägsta temperatur och värmning vid högsta temperatur, visas i figur 6.2 och 6.3. Precis som vid värmning från 15°C till 25°C fås en översväng av temperaturen vid värmning från 24°C till 25°C. Dock lite mindre. Även vid ändring 1°C i taget ser man att det tar längre tid vid kylning än vid värmning. Kylningen går däremot förhållandevis snabbare 1°C än från 20°C till 15°C. Detta beror på att peltierelementens kylflänsar inte hinner bli lika varma när man endast kyler 1°C och kyleffekten blir därför bättre.

Man ser att godtagbar stabilitet vid 15°C har nåtts efter 25 minuter och att det tar 15 minuter att nå godtagbar stabilitet vid 25°C. Dessa tider gäller vid sämsta tänkbara förhållanden varför värmning respektive kylning vid andra temperaturer går något snabbare.

6.2 Temperaturstabilitet

På samma sätt som uppvärmnings- och nedkylningsförloppen endast studerades i en punkt (se 6.1), ungefär mitt i kammaren, har temperaturens tidsstabilitet också studerats i denna enda punkt. Samma PD-regulator med samma parametrar har används.

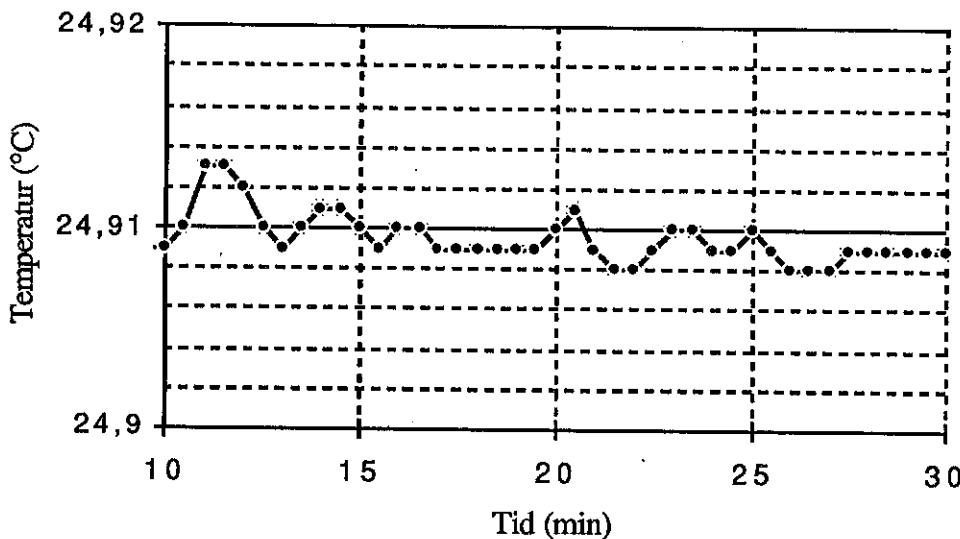


Fig 6.4 Temperaturens tidsstabilitet vid uppvärmning från 24 till 25 °C.

Som man ser i figur 6.4 är stabiliteten mycket god. Temperaturen ändrar sig endast någon tusendels grad per minut och någon trend kan knappast urskiljas.

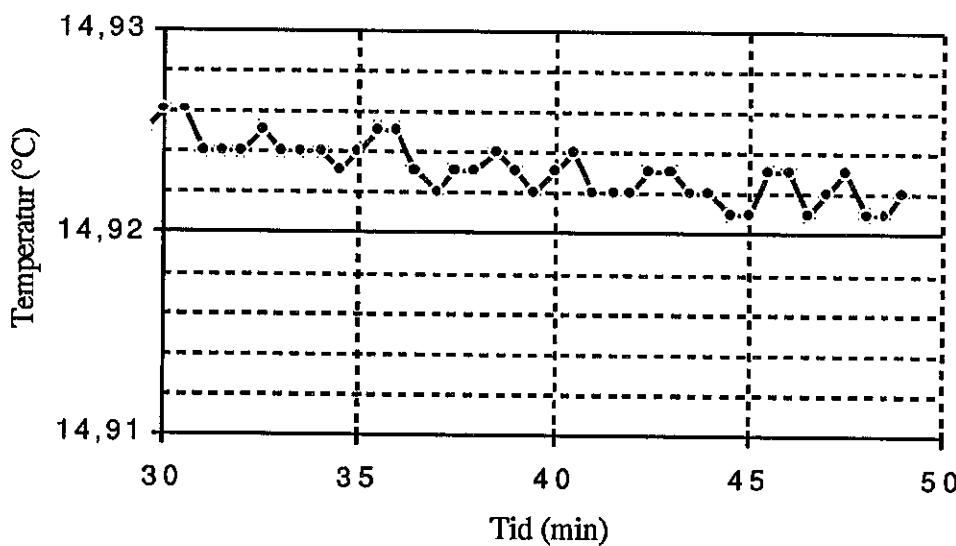


Fig 6.5 Temperaturens tidsstabilitet vid kyling från 16 till 15 °C.

Vid kylning ser man i figur 6.5 att stabiliteten är lika bra som vid värmning men en liten trend på ca $0,003^{\circ}\text{C}$ under 20 minuter kan urskiljas. Temperaturtrenden beror på att peltierelementens kylflänsar blir varma när man kyler mycket och eftersom kylflänsarna inte är helt isolerade från kammarväggen värmer de upp kammaren lite. Kylflänsarna svalnar med tiden och värmer därför kammaren mindre och mindre och en liten trend uppstår. Temperaturstabiliteten är trots detta mycket god och temperaturändringen är endast någon tusendels grad per minut.

Detta är de två extremfallen, värmning vid högst temperatur och kylning vid lägst temperatur, varför temperaturstabiliteten är något bättre vid andra temperaturer.

6.3 Temperaturgradienter

I miljökammaren görs mätningar av både lufttemperatur och materialtemperatur. Lufttemperaturgivarna och materialtemperaturgivarna är fastsatta i två olika stativ (se 3.2).

För att minska temperaturgradienterna i kammaren har vi monterat in en fläkt. Fläkten är placerad så att god luftcirkulation erhålls framför peltierelementen. Detta för att påskynda och förbättra temperaturregleringen. Någon optimering av fläktens kapacitet och luftströmningarna i kammaren har inte gjorts.

Vid mätningarna använde vi oss av Systemtekniks instrument S1226 med en manuell växlare S1203 med 12 olika kanaler och Systemtekniks instrument S1228.

Vi började med att placera ut 8 stycken Pt-100-givare på olika ställen i kammaren för att undersöka hur snabbt temperaturen stabiliseras sig i olika punkter. Av mätningarna framgick att temperaturen stabiliseras sig bra i de flesta punkterna. De punkter som inte stabiliseras sig är direkt olämpliga att placera givarna i vid kalibreringen och till dessa hör kammarens hörn, högt upp nära locket, framför peltierelementen och nära fläkten.

Att placera givarna högt upp är inte heller lämpligt, även om lufttemperaturen stabiliseras sig, då temperaturavvikelsen är betydande.

Nästa steg var att undersöka om det fanns några grader i det aktuella mätområdet precis framför stativet och vi placerade då 7 stycken Pt-100 givare inuti en kub med 15 cm sida. Vi utförde mätningarna vid 25°C och vi lät temperaturen stabilisera sig ordentligt innan avläsningarna gjordes. För att undvika kalibreringsproblemen bytte vi sedan plats på alla givarna utom referensgivaren, det vill säga den givare som ger temperaturens ärvärde till regulatorn, och gjorde en ny mätning. Då varken referensgivaren eller referenstemperaturen ändrades mellan mätningarna antog vi att dessa båda mätningar kunde likställas. Vid studium av mätresultaten visade det sig att avvikelsen mellan referenstemperaturen i de två fallen var mindre än $0,004^{\circ}\text{C}$, vilket är mindre än mätosäkerheten. Den största temperaturskillnaden var $0,04^{\circ}\text{C}$ och uppmättes i höjdled. För givarna i samma plan uppmättes temperaturskillnaderna till mindre än $0,02^{\circ}\text{C}$.

För att undersöka grader i materialtemperaturen använde vi två stycken Pt-100 givare avsedda för att mäta materialtemperatur. De båda givarna monterades först intill varandra mitt på stativet för materialtemperaturmätningar och sedan flyttades den ena givaren till kanterna på stativet. Dessa mätningar gjordes vid 25°C och då temperaturen hade stabiliseras i stativet. Mätningarna visade att graderna vid materialtemperaturmätning blev som sämst $0,003^{\circ}\text{C}$ vilket ligger inom mätosäkerheten.

6.4 Tryckstabilitet

När en tryckändring har gjorts i miljökammaren tar det ca 5 min innan trycket har stabiliseras, vilket beror på att barometern är ansluten till kammaren med en cirka 1 m lång slang. I denna slang uppstår det luftpendlingar innan trycket stabiliseras. Figurerna nedan visar lufttryckets insvägningsförlopp dels vid sänkning av trycket och dels vid höjning av trycket.

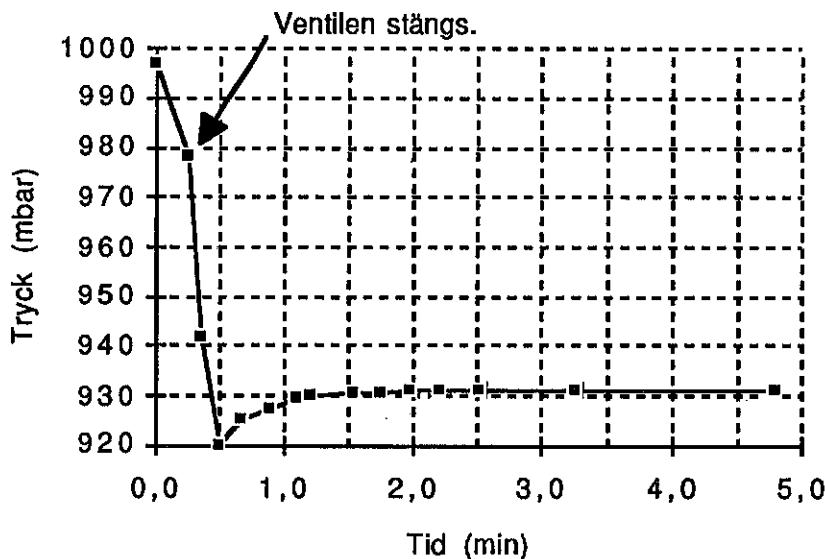


Fig 6.6 Insvägningsförlopp vid sänkning av lufttrycket med ca 60 mbar.

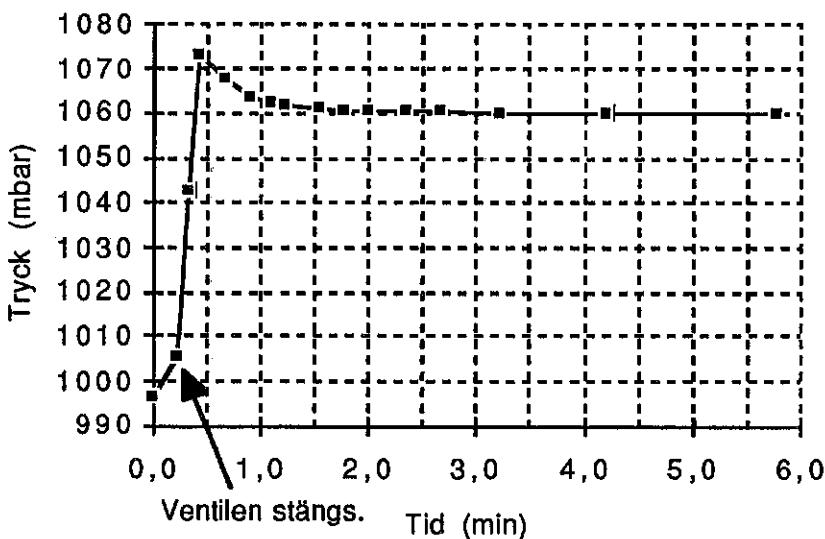


Fig 6.7 Insvägningsförlopp vid höjning av lufttrycket med ca 60 mbar.

Kurvornas underliga utseende beror på att digitalbarometern inte hänger med riktigt när trycket ändras snabbt.

För att noggranna tryck-kalibreringar ska kunna göras måste tryckstabiliteten vara god. En tryckändring på mindre än 1 mbar på 10 minuter bör uppnås för att referensbarometern ska ge korrekta värden. Tryckstabiliteten i vår miljökammare är bra och naturligtvis bättre ju mindre tryckskillnaden är.

Stabilitetsmätningar gjordes vid övertryck och undertryck. Vid 85 mbar övertryck i kammaren sjönk trycket dä 1 mbar på 13 min. Vid 75 mbar undertryck steg trycket i kammaren med 1 mbar på 22 min.

7 Mätmetoder

I miljökammaren kan tre typer av givare kalibreras. Givare för lufttemperatur, givare för materialtemperatur och givare för lufttryck. Som referenser används två stycken Pt-100-givare för lufttemperatur, två stycken Pt-100-givare för materialtemperatur fastskruvade i ett stativ samt en digital barometer, modell Vaisala PA 11, för mätning av lufttryck.

Det är meningen att temperatur- och tryckgivarna ska kalibreras samtidigt i miljökammaren. Genom att mäta vid olika tryck och vid olika temperaturer kan man upptäcka om givarna påverkas av en sekundär parameter, det vill säga om temperaturgivarna är tryckberoende eller om tryckgivarna är temperaturberoende. Man kan även klargöra om det finns några olinjäriteter hos givarna.

Den mätprocedur som vi rekommenderar går ut på att kalibreingen görs vid de tre olika temperaturerna 15 °C, 20 °C och 25 °C, samt att man vid dessa temperaturer även ändrar trycket till tre olika värden. Vi föreslår att det absoluta lufttrycket ställs in till 920 mbar, 1000 mbar och 1050 mbar eller till strax innanför tryckgivarnas gränsvärden. Om givarna kalibreras på detta sätt kan man se om tryckgivarna är temperaturberoende och om temperaturgivarna är tryckberoende. Man kan också upptäcka eventuella olinjäriteter hos givarna. Vid olinjäriteter föreslår vi att givarna kalibreras i fler punkter, det vill säga man gör mätningar vid flera temperaturer eller tryck. Lämpligt är då att mäta temperaturen vid varje °C från 15-25 °C och att mäta lufttrycket vid var tionde mbar från 920-1050 mbar.

8 Förslag på automatisering

Eftersom en mätprocedur tar lång tid att göra, på grund av att man måste vänta på att en godtagbar stabilitet i miljökammaren har uppnåtts, vore en automatisering av mätproceduren att rekommendera. Detta ligger tyvärr ej inom ramen för vårt examensarbete, men här följer några förslag.

Den enklaste biten att automatisera är temperaturregleringen. Det enda man behöver göra är att se till att önskad temperatur i miljökammaren ändras vid rätt tillfälle och till rätt värde. Regulatorn ser sedan till så att denna temperatur ställer in sig i miljökammaren. Önskad temperatur väljs genom att man ändrar den likspänning, som ligger på differensförstärkarens positiva ingång (se bild nedan). Detta sker i nuläget med hjälp av en potentiometer. Kopplar man istället en D/A-omvandlare, som styrs av en dator till denna ingång kan man styra önskad temperatur automatiskt.

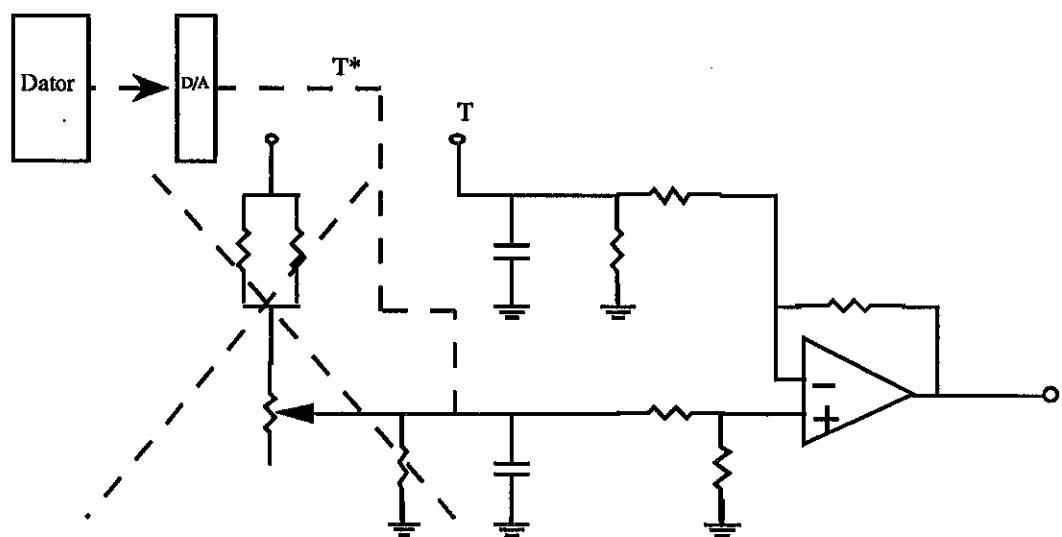


Fig 8.1 Automatisering av ingångssteget till temperaturregleringen.

För att kunna styra trycket automatiskt krävs att den manuella reglerventilen som sitter i miljökammarens ena vägg byts ut mot en reglerventil som går att styra elektriskt. Vakuumpumpen måste också kunna startas och stoppas på elektrisk väg, förslagsvis med ett relä. Görs dessa ändringar kan trycket i miljökammaren regleras automatiskt antingen över eller under omgivningens lufttryck. Detta beror på att ändringen mellan blås och sug görs manuellt med två stycken trevägs kulventiler. Även dessa ventiler bör bytas ut mot elektriska för att en bra mätmetod ska kunna användas.

Vi föreslår att man gör någon av följande två automatiseringar.

Automatisera temperaturregleringen och sköt tryckregleringen manuellt.
Mätmetoden blir då så att man får ställa in trycket i kammaren till 1000 mbar och låta temperaturregleringen automatiskt reglera in temperaturerna 20 °C, 15 °C och 25 °C. Därefter ställer man in trycket 1050 mbar och låter temperaturregleringen reglera in temperaturerna 20 °C, 15 °C och 25 °C. Slutligen ställer man in trycket 920 mbar och låter återigen temperaturregleringen reglera in temperaturerna 20 °C, 15 °C och 25 °C.

Nackdelen med denna metod är att mätproceduren tar mycket lång tid att genomföra samt att när temperaturen ändras ändras även trycket. Trycket i kammaren kommer därför inte att bli det samma vid de tre olika temperaturerna.

Allmänna gaslagen ger:

$$pV=nRT \quad \Rightarrow \quad p = \text{konst} \times T$$

$$\text{konst} = \frac{p_{15}}{T_{15}} = \frac{p_{25}}{T_{25}} \quad \Rightarrow \quad p_{25} = p_{15} \frac{T_{25}}{T_{15}}$$

$$\Delta p = p_{25} - p_{15} = p_{15} \left(\frac{T_{25}}{T_{15}} - 1 \right) \approx 1000 \left(\frac{25+273}{15+273} - 1 \right) \approx 35 \text{ mbar.}$$

Skillnaden i tryck vid temperaturen 15 °C och vid temperaturen 25 °C blir enligt ovan ca 35 mbar.

Vårt andra förslag på automatisering bygger på att både temperaturregleringen och tryckregleringen automatiseras. Denna automatisering är betydligt dyrare och arbetsammare än den föregående. Fördelarna är att hela mätproceduren blir automatisk och den mätmetod som föreslogs i kapitel 7 kan användas.

9 Mätsäkerhetsanalys

Noggrannheten vid kalibrering i miljökammaren påverkas av några olika faktorer som beskrivs i detta kapitel.

Vid temperaturkalibrering införs följande fel:

9.1 Kalibrering av Pt-100 givare och instrument

Referensgivarna kalibreras årligen tillsammans med temperaturmästinstrumentet, Systemteknik S1228, vid avdelningen för temperaturmätning på SP i Borås. Denna kalibrering görs i vattenbad och med ett maximalt fel:

$$\Delta T_{\text{kalibrering}} = \pm 0,005 \text{ } ^\circ\text{C}.$$

I detta fel är inbakat Pt-100 givarnas osäkerhet och osäkerheten hos temperaturmästinstrumentet, Systemteknik S1228.

9.2 Pt-100 givarnas egenuppvärmning

På grund av att en liten ström går genom Pt-100 givarna när temperaturen mäts kommer en oönskad uppvärmning av Pt-100 givarna att ske.

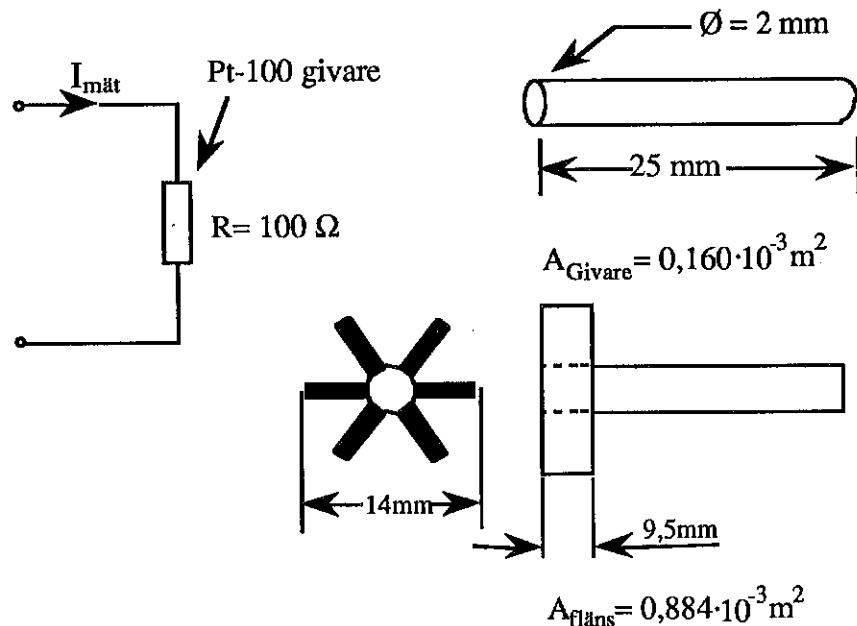


Fig 9.1 Pt-100 givare med och utan kylfläns.

Mätströmmen $I_{\text{mät}}$ är 0,6 mA och utvecklad värmeeffekt i Pt-100 givaren blir:

$$P_{\text{in}} = R(I_{\text{mät}})^2 = 100(0,6 \times 10^{-3})^2 = 36 \mu\text{W}$$

Avgiven effekt från Pt-100 givaren på grund av konvektion:

$$P_{\text{ut}} = hA(T - T_0)$$

Där h är värmeefföringstalet som i rumsluft kan sättas till 10, A är givarens yta i m^2 , T är givarens temperatur i $^\circ\text{C}$ och T_0 är omgivningens temperatur i $^\circ\text{C}$.

För att höja en kropps temperatur från T till $T+dT$ åtgår en värmemängd dQ och sambandet nedan gäller.

$$dQ = c_v m dT$$

Där c_v är givarens specifika värme och m är givarens massa i kg.

$$dQ = d(P_{in}t - P_{ut}t) = d(P_{in}t - hA(T - T_0)t) = c_v m dT \Rightarrow$$

$$P_{in}dt - hAtdT - hA(T - T_0)dt = c_v m dT \Rightarrow$$

$$(c_v m + hAt)dt = (P_{in} - hA(T - T_0))dt \Rightarrow$$

$$\frac{dT}{P_{in} - hA(T - T_0)} = \frac{dt}{c_v m + hAt} \quad (\text{integrera}) \Rightarrow$$

$$\left| T - T_0 - \frac{P_{in}}{hA} \right| = \frac{P_{in}c_v m}{hA(t + c_v m)}$$

Om givaren har samma temperatur som omgivningen innan mätningen börjar vid tiden $t = 0$ fås:

$$T - T_0 = \frac{P_{in}}{hA} \left(1 - \frac{c_v m}{t + c_v m} \right)$$

Låter man $t \rightarrow \infty$ så får givarens egenuppvärmning:

$$\Delta T = T - T_0 = \frac{P_{in}}{hA}$$

För våra lufttemperaturgivare utan kylfläns fås:

$$A_{givare} = 0,160 \times 10^{-3} \text{ m}^2$$

$$\Delta T_{givare} = \frac{P_{in}}{hA} = \frac{36 \times 10^{-6}}{10 \times 0,160 \times 10^{-3}} = \underline{0,023 \text{ } ^\circ\text{C}}$$

För våra lufttemperaturgivare med kylfläns fås:

$$A_{med \ kylfläns} = 0,844 \times 10^{-3} \text{ m}^2$$

$$\Delta T_{givare} = \frac{P_{in}}{hA} = \frac{36 \times 10^{-6}}{10 \times 0,844 \times 10^{-3}} = \underline{0,005 \text{ } ^\circ\text{C}}$$

Enligt tidigare praktiska försök kan man anse att en viss del av egenuppvärmningen kalibreras bort vid kalibreringen i vattenbad. Maximala felet på grund av givarnas egenuppvärmning kan för lufttemperaturgivarna uppskattas till:

$$\Delta T_{egenuppv.} = + 0,003 \text{ } ^\circ\text{C.}$$

Egenuppvärmningen för materialtemperaturgivarna kan försummas tack vare att de sitter monterade på ett stativ av stål som har bra värmeförmåga.

9.3 Årlig drift hos Pt-100 givare och instrument

Enligt datablad driver temperaturmätnstrumentet, Systemteknik S1228, maximalt $\pm 0,003\text{ }^{\circ}\text{C}$ per år. De tre senaste årens kalibreringar av Pt-100 givare och temperaturmätnstrumentet visas nedan.

Kalibreringsdatum	Kanal A	Kanal B	Drift kanal A	Drift kanal B
920219	-0,085 $^{\circ}\text{C}$	-0,002 $^{\circ}\text{C}$	-0,008 $^{\circ}\text{C}$	+0,001 $^{\circ}\text{C}$
910328	-0,077 $^{\circ}\text{C}$	-0,003 $^{\circ}\text{C}$	-0,005 $^{\circ}\text{C}$	$\pm 0,000\text{ }^{\circ}\text{C}$
900314	-0,072 $^{\circ}\text{C}$	-0,003 $^{\circ}\text{C}$		

Som man ser i tabellen ovan har driften under de tre senaste åren varit maximalt $0,008\text{ }^{\circ}\text{C}$. Osäkerheten i kalibreringarna är $\pm 0,005\text{ }^{\circ}\text{C}$ så en viss drift existerar. Det maximala felet på grund av årlig drift hos Pt-100 givare och instrument kan uppskattas till:

$$\Delta T_{\text{drift}} = \pm 0,004\text{ }^{\circ}\text{C}.$$

9.4 Temperaturens tidsvariationer

Temperaturen i miljökammaren regleras med en PD-regulator som bidrar till att temperaturen kommer att svänga upp och ner något.

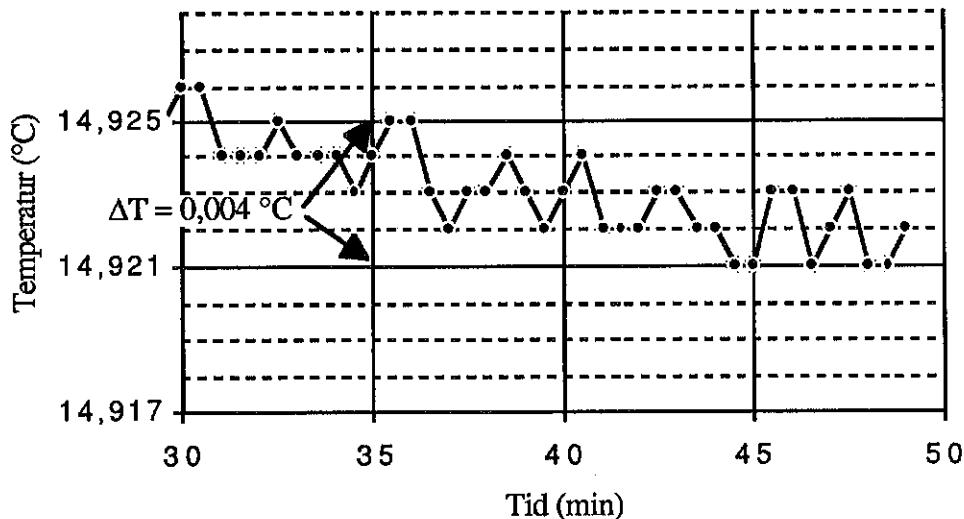


Fig 9.1 Rippel i lufttemperaturen vid kylning från 16-15 $^{\circ}\text{C}$.

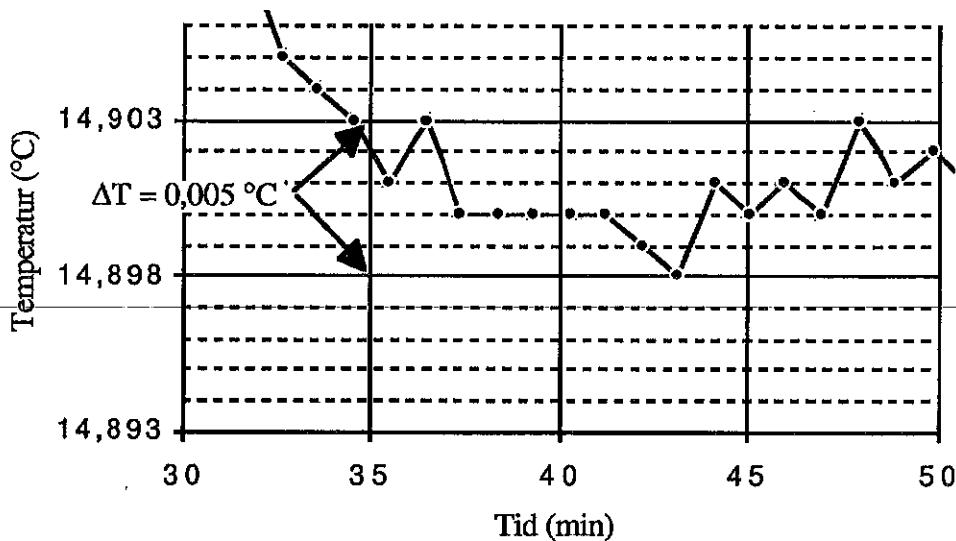


Fig 9.2 Rippel i materialtemperaturen vid kylning från 16-15 °C.

Dessa diagram visar sämsta fallet, kylning vid lägst temperatur. Ur diagrammen får att temperaturen svänger inom intervallet 0,005 °C för både luft- och materialtemperatur. Tack vare att givarna är snabba och att avläsningarna görs under en kort tidsperiod kan det maximala felet på grund av temperatursvängningarna uppskattas till:

$$\Delta T_{\text{svängningar}} = \pm 0,001 \text{ °C}.$$

9.5 Temperaturgradienter

Referensgivarna och de givare som ska kalibreras sitter nära varandra men inte i exakt samma punkt. Detta medför att temperaturen vid referensgivarna inte behöver vara samma som temperaturen vid givarna som ska kalibreras. Detta fel har vi uppskattat till maximalt $\pm 0,015 \text{ °C}$ om man sätter givarna nära varandra (se 6.3).

$$\Delta T_{\text{gradienter}} = \pm 0,015 \text{ °C}.$$

9.6 Påverkan från andra givare

När givarna sitter nära varandra kommer de att påverka varandra. Eventuellt kommer givarnas egenuppvärmning att väarma upp de andra givarna. Denna och andra eventuella påverkningar har försummats.

9.7 Kalibrering av barometer

Referensbarometern, Vaisala PA11, kalibreras årligen vid Flygtekniska Försöksanstalten i Bromma. Kalibreringen görs vid sju olika tryck och resultatet från senaste kalibreringen 921214 var i enheten mbar:

Normal	Vaisala	Differens
932,02	932,7	0,68
952,73	953,4	0,67
969,99	970,6	0,61
990,70	991,3	0,60
1011,41	1012,0	0,59
1032,12	1032,7	0,58
1052,83	1053,3	0,47

Denna kalibrering görs med ett maximalt fel :

$$\Delta p_{\text{kalibrering}} = \pm 0,016 \text{ mbar.}$$

Vi använder oss av tre korrigeringar i tre olika intervall enligt följande:

Intervall	Korrigering
920-960	0,7
960-1040	0,6
1040-1050	0,5

Om man extrapolerar räta linjer mellan kalibreringspunkterna får man en maximal avvikelse från korrigeringen:

$$\Delta p_{\text{korrigering}} = \pm 0,06 \text{ mbar.}$$

9.8 Årlig drift hos barometer

De tre senaste årens kalibreringar visas nedan.

Kalibreringsdatum	Korrigering
921214	0,60 mbar
911128	0,60 mbar
901219	0,56 mbar

Från de tre senaste årens kalibreringar som visas ovan ser man att driften hos barometern, Vaisala PA11, är mycket liten och att instrumentet under de två senaste åren har stabilisering. Driften hos barometern försummas därför.

9.9 Tryckgradienter

Tryckgradienter i kammaren skulle kunna förekomma. Kammarens volym, ca $0,1 \text{ m}^3$, är dock så liten att tryckgradienterna har försummats.

9.10 Totala mätsäkerheten

Det totala maximala felet vid lufttemperaturkalibrering blir:

$$\Delta T_{\text{tot}} = \Delta T_{\text{kalibrering}} - \Delta T_{\text{egenuppv.}} + \Delta T_{\text{drift}} + \Delta T_{\text{svängningar}} + \Delta T_{\text{gradienter}}$$

$$\Delta T_{\text{tot}} = \pm 0,005 - 0,003 \pm 0,004 \pm 0,001 \pm 0,015 \quad \Rightarrow$$

$$\Delta T_{\text{tot}} = \begin{cases} + 0,022 \text{ } ^\circ\text{C} \\ - 0,028 \text{ } ^\circ\text{C} \end{cases} \approx \pm 0,03 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Det totala maximala felet vid materialtemperaturkalibrering blir:

$$\Delta T_{\text{tot}} = \Delta T_{\text{kalibrering}} + \Delta T_{\text{drift}} + \Delta T_{\text{svängningar}}$$

$$\Delta T_{\text{tot}} = \pm 0,005 \pm 0,004 \pm 0,001 = \pm 0,010 \text{ } ^\circ\text{C}.$$

Det totala maximala felet vid tryck-kalibrering blir:

$$\Delta p_{\text{tot}} = \Delta p_{\text{kalibrering}} + \Delta p_{\text{korrigerings}} = \pm 0,016 \pm 0,06 \approx \pm 0,1 \text{ mbar.}$$

10 Avslutning

Vi har i miljökammaren lyckats reglera trycket och temperaturen inom i förväg fastställda gränser. Trycket kan regleras inom intervallet 920 - 1050 mbar och temperaturen kan regleras inom intervallet 15 - 25 °C.

För att kunna kalibrera miljögivarna till de aktuella laserinterferometersystemen, HP, Renishaw och Spindler & Hoyer var målsättningen att kalibreringarna skulle ske med en noggrannhet som var en tiondel av givarnas egna tolerans. Detta motsvarar en kalibreringsnoggrannhet för lufttryck på $\pm 0,2$ mbar, för lufttemperatur på $\pm 0,05$ °C och för materialtemperatur på $\pm 0,01$ °C.

Vi lyckades uppnå en noggrannhet på kalibreringarna i miljökammaren som för lufttryck var $\pm 0,1$ mbar, för lufttemperatur var $\pm 0,03$ °C och för materialtemperatur var $\pm 0,010$ °C. Den uppnådda noggrannheten vid lufttemperatur-, materialtemperatur- och lufttryckskalibreringarna ligger alltså inom målsättningen.

Miljökammaren styrs i nuläget helt manuellt. Ett fortsatt arbete skulle kunna vara att automatisera mätproceduren vilket, vad gäller temperaturregleringen, är ganska enkelt.

Referenser

- [1] Neuhaus H.: Laserinterferometriska metoder inom längdmetrologin: Elementa 59 (1976): 3, s 136-142
- [2] Edlén B.: The refractive index of air: Metrologia, vol 2, 1966, s 71-80
- [3] Birch K. P., Downs M.J.: The results of a comparison between calculated and measured values of the refractive index of air: J. Phys. E: Sci Instrum., vol 21, 1988, s 694-695
- [4] Ekelöf S., Rosell G.: Kompendium i Elhistoria : 1991, s 3:5

Appendix

A Förteckning över anslutningar till elektronik-enheten

Kontakt	Position	Ansluten signal
Nättaggregat	4	+30V
	6	
	8	GND
	10	
	12	-30V
	14	-30V
	16	+12V
	18	+30V
	20	GND
	22	
	24	+15V
	26	
	28	GND
	30	
	32	-15V
Regulator	4	
	6	+15V ut
	8	+15V in
	10	
	12	0V in
	14	
	16	-15V in
	18	GND
	20	u styrsignal
	22	
	24	GND (styrsignal)
	26	
	28	
	30	
	32	
Slutsteg	4	+30V in
	6	+30V ut
	8	+30V ut
	10	+30V ut
	12	+30V ut
	14	GND in
	16	GND signaljord
	18	
	20	u styrsignal
	22	
	24	-30V ut
	26	-30V ut
	28	-30V ut
	30	-30V ut
	32	-30V in

Kontakt	Position	Ansluten signal
Elektrolytkondensator	4	GND in
	6	+12V
	8	
	10	GND fläkt 2
	12	+30V
	14	+12V fläkt 1
	16	+12V fläkt 2
	18	GND fläkt 1
	20	-30V
	22	
	24	
	26	GND fläkt 3
	28	GND
	30	+12V fläkt 3
	32	GND peltierelement
Fläkt	4	
	6	
	8	
	10	
	12	
	14	
	16	
	18	
	20	
	22	
	24	
	26	+15V
	28	
	30	
	32	GND
Utsignal	4	
	6	utsignal
	8	
	10	utsignal
	12	
	14	utsignal
	16	
	18	utsignal
	20	
	22	
	24	
	26	
	28	
	30	
	32	

Kontakt	Position	Ansluten signal
Effekt OP-AMP	4	-IN
	6	
	8	+IN
	10	
	12	-IN
	14	
	16	+IN
	18	
	20	-IN
	22	
	24	+IN
	26	
	28	-IN
	30	
	32	+IN

B Kretsschema för hela elektroniken

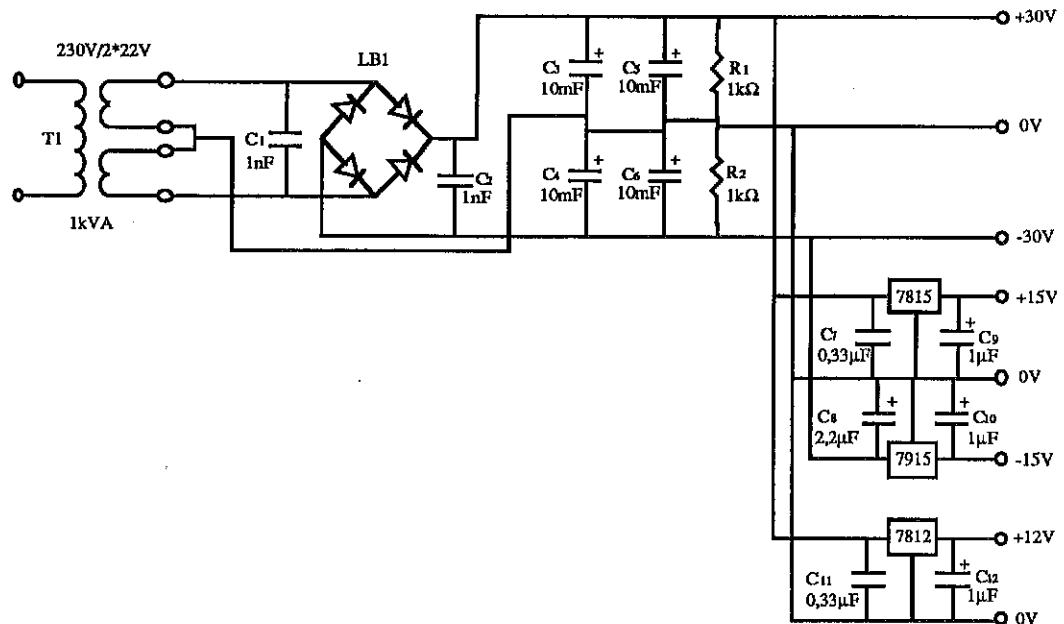


Fig B.1 Nättaggregat.

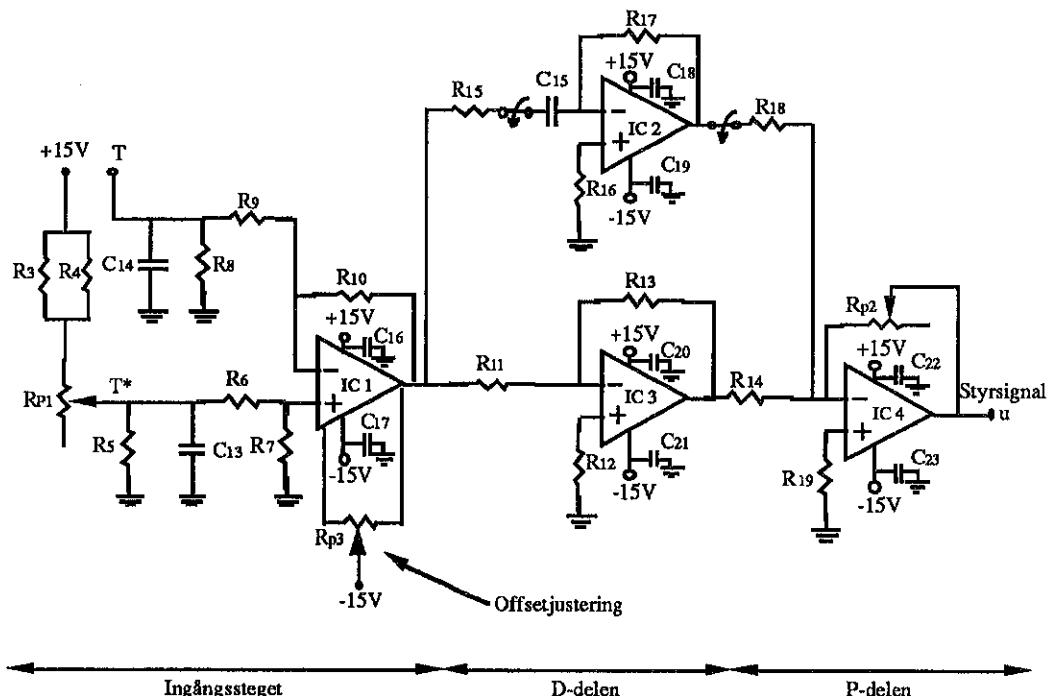


Fig B.2 Styrellektronik.

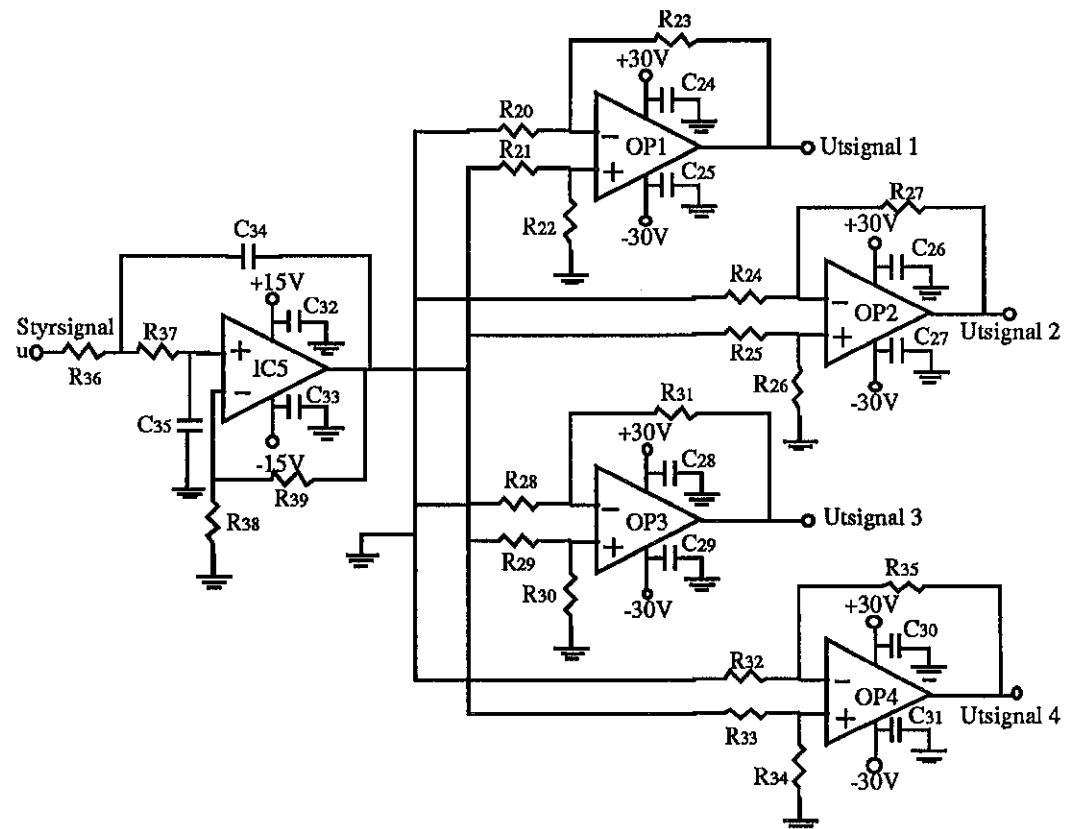
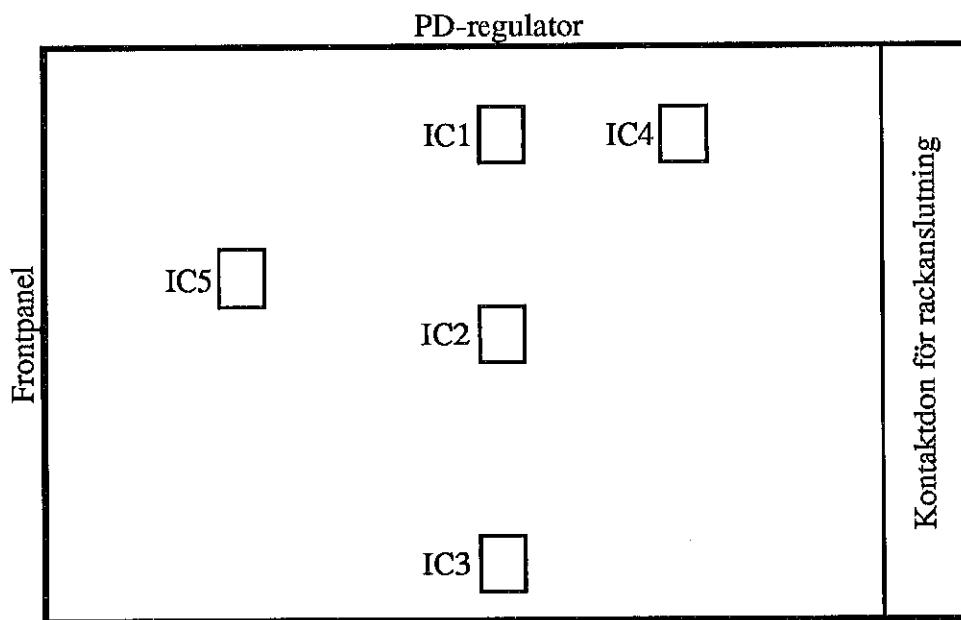
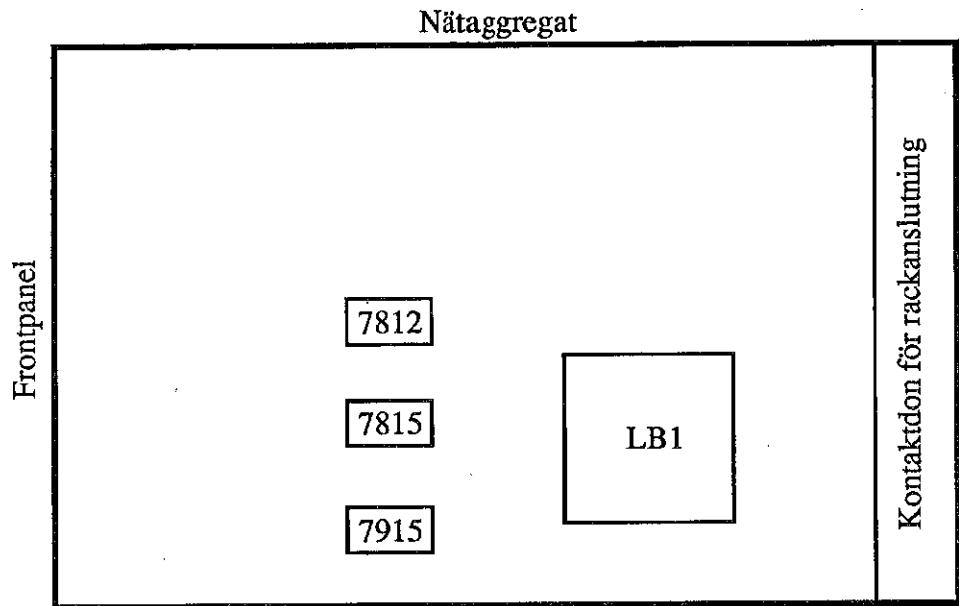


Fig B.3 Slutsteg med aktivt filter.

C Komponenter

C1 Komponentplacering på kretskorten



C2 Komponentförteckning

<u>Motstånd</u>	<u>Kondensatorer</u>	<u>IC-kretsar</u>
R1 - 1 kΩ	C1 - 1 nF	IC1 - CA741E
R2 - 1 kΩ	C2 - 1 nF	IC2 - CA741E
R3 - 12 kΩ	C3 - 10 mF	IC3 - CA741E
R4 - 12 kΩ	C4 - 10 mF	IC4 - CA741E
R5 - 1,2 kΩ	C5 - 10 mF	IC5 - CA741E
R6 - 10 kΩ	C6 - 10 mF	
R7 - 100 kΩ	C7 - 0,33 µF	<u>Spänningsregulatorer</u>
R8 - 100 kΩ	C8 - 2,2 µF	7812 - L7812CV
R9 - 10 kΩ	C9 - 1 µF	7815 - L7815CV
R10 - 100 kΩ	C10 - 1 µF	7915 - L7915CV
R11 - 1,2 kΩ	C11 - 0,33 µF	
R12 - 1 kΩ	C12 - 1 µF	<u>Effektoperationsförst.</u>
R13 - 12 kΩ	C13 - 2,2 µF	
R14 - 10 kΩ	C14 - 0,22 µF	OP1 - LM12CLK
R15 - 27 Ω	C15 - 10 µF	OP2 - LM12CLK
R16 - 47 kΩ	C16 - 0,1 µF	OP3 - LM12CLK
R17 - 2 MΩ (0-30 MΩ)	C17 - 0,1 µF	OP4 - LM12CLK
R18 - 10 kΩ	C18 - 0,1 µF	
R19 - 3 kΩ	C19 - 0,1 µF	<u>Likriktarbrygga</u>
R20 - 10 kΩ	C20 - 0,1 µF	LB1 - 2502
R21 - 10 kΩ	C21 - 0,1 µF	
R22 - 10 kΩ	C22 - 0,1 µF	<u>Transformator</u>
R23 - 10 kΩ	C23 - 0,1 µF	
R24 - 10 kΩ	C24 - 47 µF	T1 - 230V/2*22V 1kVA
R25 - 10 kΩ	C25 - 47 µF	
R26 - 10 kΩ	C26 - 47 µF	
R27 - 10 kΩ	C27 - 47 µF	
R28 - 10 kΩ	C28 - 47 µF	
R29 - 10 kΩ	C29 - 47 µF	
R30 - 10 kΩ	C30 - 47 µF	
R31 - 10 kΩ	C31 - 47 µF	
R32 - 10 kΩ	C32 - 0,1 µF	
R33 - 10 kΩ	C33 - 0,1 µF	
R34 - 10 kΩ	C34 - 0,1 µF	
R35 - 10 kΩ	C35 - 0,1 µF	
R36 - 200 kΩ		
R37 - 200 kΩ		
R38 - 200 kΩ		
R39 - 1 kΩ		

Potentiometrar

Rp1 - 5 kΩ
Rp2 - 100 kΩ
Rp3 - 10 kΩ

D Datablad

D1 Effektoperationsförstärkare LM12CLK

Absolute Maximum Ratings

Specifications for Military/Aerospace products are not contained in this datasheet. Refer to the associated reliability electrical test specifications document.

total supply voltage	LM12/LM12C	100V	output current	internally limited
	LM12L/LM12CL	80V	junction temperature	Note 2
input voltage		Note 1	storage temperature range	-65°C to 150°C

lead temperature (soldering, 10 seconds)

300°C

ESD rating to be determined.

Electrical Characteristics (Note 3)

Parameter	Conditions	Typ 25°C	LM12	LM12C	Units
			LM12L	LM12CL	
input offset voltage	$\pm 10V \leq V_S \leq \pm 0.5V_{MAX}$, $V_{CM} = 0$	2	7/15	15/20	mV (max)
input bias current	$V^- + 4V \leq V_{CM} \leq V^+ - 2V$	0.15	0.3/1.0	0.7/1.0	μA (max)
input offset current	$V^- + 4V \leq V_{CM} \leq V^+ - 2V$	0.03	0.1/0.3	0.2/0.3	μA (max)
common mode rejection	$V^- + 4V \leq V_{CM} \leq V^+ - 2V$	86	75/70	70/65	dB (min)
power supply rejection	$V^+ = 0.5V_{MAX}$, $-6V \leq V^- \leq -0.5V_{MAX}$ $V^- = -0.5V_{MAX}$, $6V \leq V^+ \leq 0.5V_{MAX}$	90 110	75/70 80/75	70/65 75/70	dB (min)
output saturation threshold	$I_{ON} = 1\text{ ms}$, $\Delta V_{IN} = 5(10)\text{ mV}$, $I_{OUT} = 1A$ 8A 10A	1.8 4 5	2.2/2.5 5/7 8	2.2/2.5 5/7	V (max) V (max) V (max)
large signal voltage gain	$I_{ON} = 2\text{ ms}$, $V_{SAT} = 2V$, $I_{OUT} \approx 0$ $V_{SAT} = 8V$, $R_L = 4\Omega$	100 50	50/30 20/15	30/20 15/10	V/mV (min) V/mV (min)
thermal gradient feedback	$P_{DISS} = 50W$, $I_{ON} = 65\text{ ms}$	30	50	100	μV/W (max)
output-current limit	$I_{ON} = 10\text{ ms}$, $V_{DISS} = 10V$ $I_{ON} = 100\text{ ms}$, $V_{DISS} = 58V$ LM12/LM12C $I_{ON} = 100\text{ ms}$, $V_{DISS} = 78V$	13 1.5 1.5 0.7	16 1.0/0.6 1.7 0.6/0.4	16 0.9/0.6 1.7 0.5/0.35	A (max) A (min) A (max) A (min)
power dissipation rating	$I_{ON} = 100\text{ mS}$, $V_{DISS} = 20V$ $V_{DISS} = 58V$	100 80	90/40 58/35	80/55 52/35	W (min) W (min)
dc thermal resistance	(Note 4)	$V_{DISS} = 20V$ $V_{DISS} = 58V$	2.3 2.7	2.6 4.0	*C/W (max) *C/W (max)
ac thermal resistance	(Note 4)		1.6	1.9	*C/W (max)
supply current	$V_{OUT} = 0$, $I_{OUT} \approx 0$	60	80/90	120/140	mA (max)

Note 1. Neither input should exceed the supply voltage by more than 50 volts nor should the voltage between one input and any other terminal exceed 80 volts for the LM12/LM12C or 60 volts for the LM12L/LM12CL.

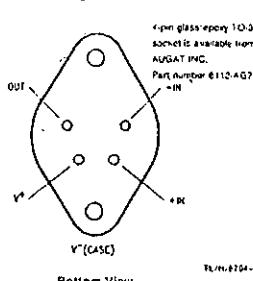
Note 2. Operating junction temperature is internally limited near 225°C within the power transistor and 160°C for the control circuitry.

Note 3. The supply voltage is $\pm 40V$ ($V_{MAX} = 80V$) for the LM12/LM12C and $\pm 30V$ ($V_{MAX} = 60V$) for the LM12L/LM12CL, unless otherwise specified. The voltage across the conducting output transistor (supply to output) is $V_{DS(on)}$ and internal power dissipation is P_{DISS} . Temperature range is $-55^\circ C \leq T_C \leq 125^\circ C$ for the LM12/LM12L and $0^\circ C \leq T_C \leq 70^\circ C$ for LM12C/LM12CL, where T_C is the case temperature. Standard typeface indicates limits at 25°C while boldface type refers to limits or special conditions over full temperature range. With no heat sink, the package will heat at a rate of 35°C/sec per 100W of internal dissipation.

Note 4. This thermal resistance is based upon a peak temperature of 200°C in the center of the power transistor and a case temperature of 25°C measured at the center of the package bottom. The maximum junction temperature of the control circuitry can be estimated based upon a dc thermal resistance of 0.9°C/W or an ac thermal resistance of 0.6°C/W for any operating voltage.

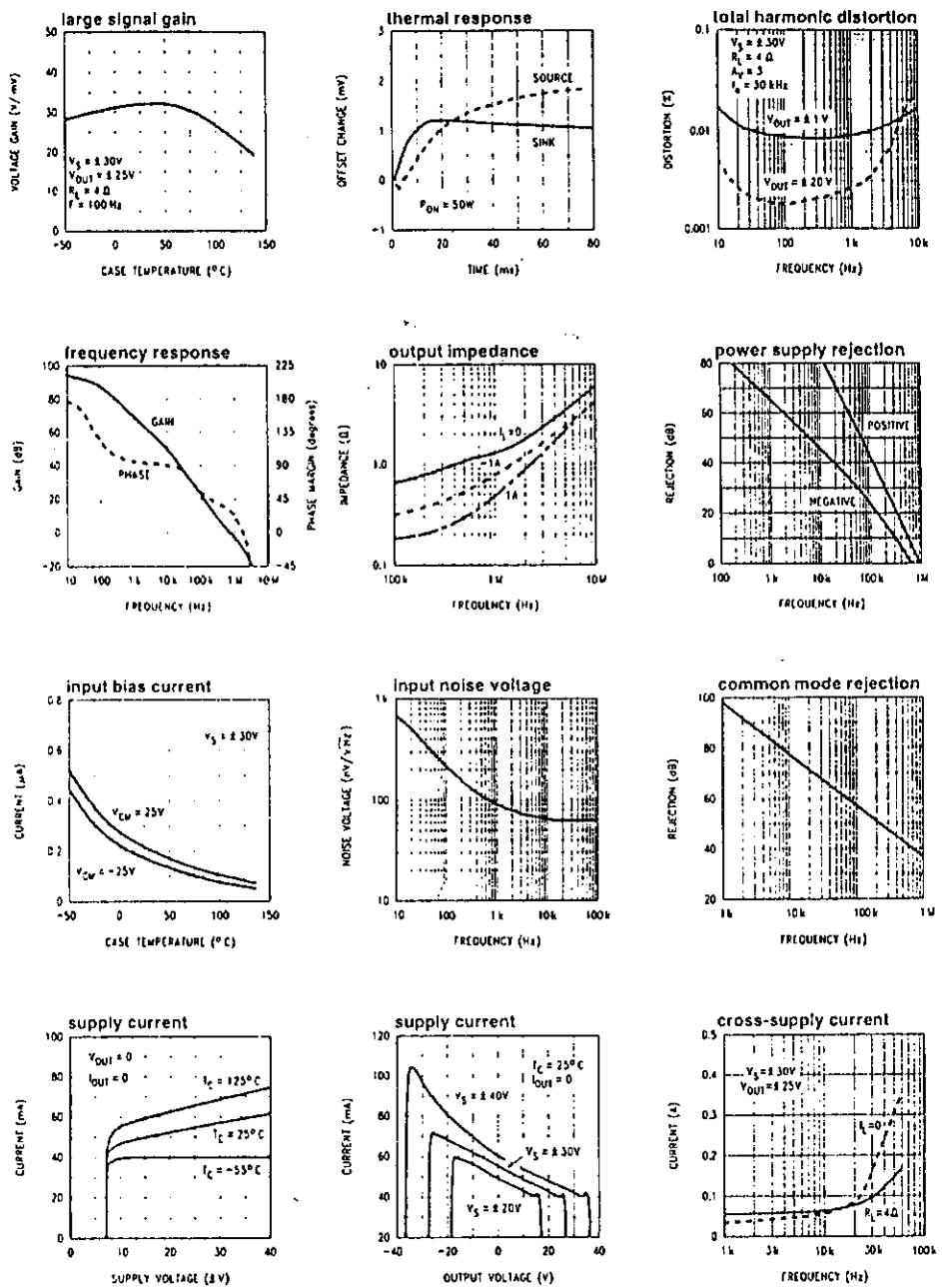
Although the output and supply leads are resistant to electrostatic discharges from handling, the input leads are not. The part should be treated accordingly.

Connection Diagram

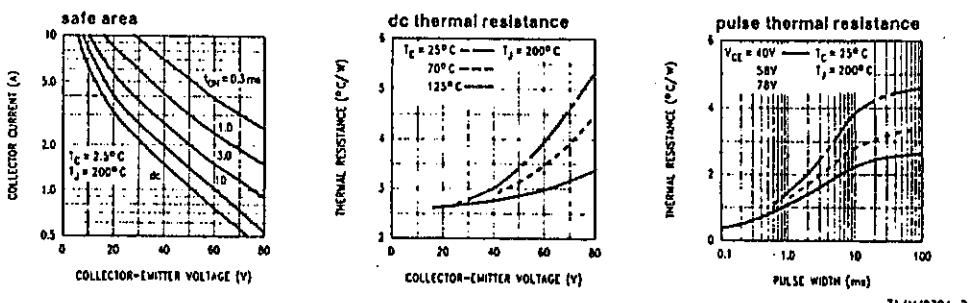


Bottom View

Typical Performance Characteristics (Continued)

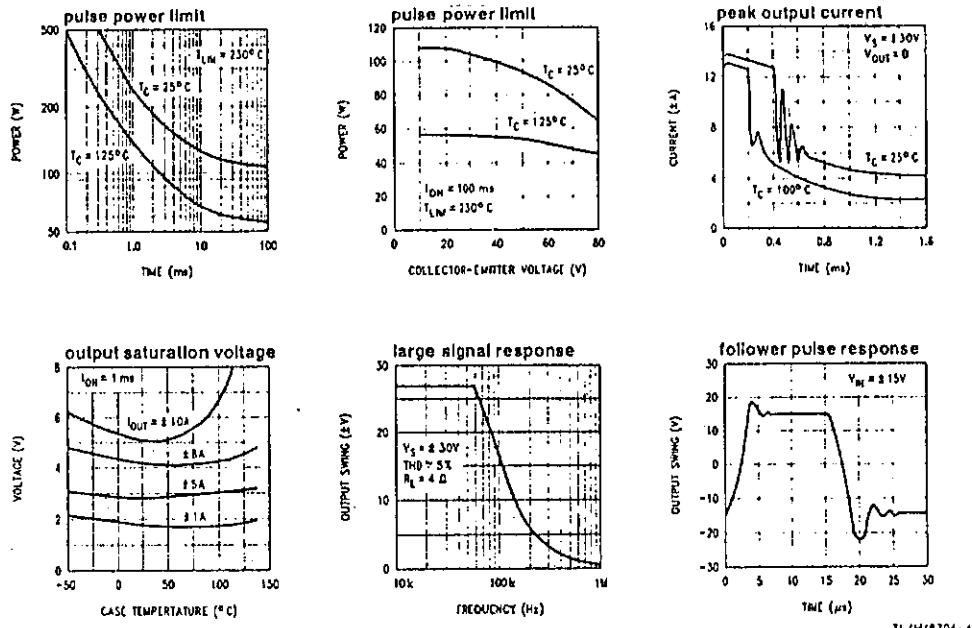


TL/H/6704-5

Output-Transistor Ratings (guaranteed)[†]

TL/H/6704-3

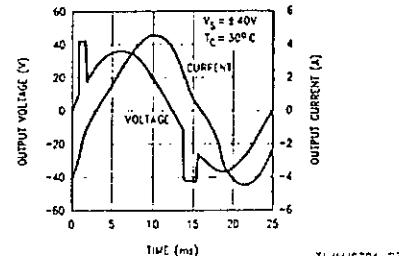
Typical Performance Characteristics



LM12/LM12L. The power ratings of the LM12/LM12CL are 10-percent less at 20V and 15-percent less at 60V, with a corresponding increase in thermal resistance and decrease in safe area current.

TL/H/6704-4

power limiting



Should the power ratings of the LM12 be exceeded, dynamic safe-area protection is activated. Waveforms with this power limiting are shown for the LM12 driving $\pm 36\text{V}$ at 40 Hz into 4Ω in series with 24 mH ($\theta = 45^\circ$). With an inductive load, the output clamps to the supplies in power limit, as above. With resistive loads, the output voltage drops in limit. Behavior with more complex RCL loads is between these extremes.

Secondary thermal limit is activated should the case temperature exceed 150°C . This thermal limit shuts down the IC completely (open output) until the case temperature drops to about 145°C . Recovery may take several seconds.

power supplies

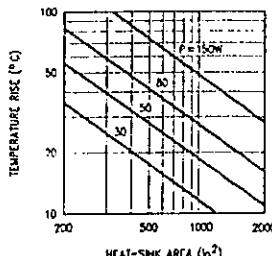
Power op amps do not require regulated supplies. However, the worst-case output power is determined by the low-line supply voltage in the ripple trough. The worst-case power dissipation is established by the average supply voltage with high-line conditions. The loss in power output that can be guaranteed is the square of the ratio of these two voltages. Relatively simple off-line switching power supplies can provide voltage conversion, line isolation and 5-percent regulation while reducing size and weight.

The regulation against ripple and line variations can provide a substantial increase in the power output that can be guaranteed under worst-case conditions. In addition, switching power supplies can convert low-voltage power sources such as automotive batteries up to regulated, dual, high-voltage supplies optimized for powering power op amps.

heat sinking

A semiconductor manufacturer has no control over heat sink design. Temperature rating can only be based upon

case temperature as measured at the center of the package bottom. With power pulses of longer duration than 100 ms, case temperature is almost entirely dependent on heat sink design and the mounting of the IC to the heat sink.



The design of heat sink is beyond the scope of this work. Convection-cooled heat sinks are available commercially, and their manufacturers should be consulted for ratings. The preceding figure is a rough guide for temperature rise as a function of fin area (both sides) available for convection cooling.

Proper mounting of the IC is required to minimize the thermal drop between the package and the heat sink. The heat sink must also have enough metal under the package to conduct heat from the center of the package bottom to the fins without excessive temperature drop.

A thermal grease such as Wakefield type 120 or Thermalloy Thermacole should be used when mounting the package to the heat sink. Without this compound, thermal resistance will be no better than $0.5^\circ\text{C}/\text{W}$, and probably much worse. With the compound, thermal resistance will be $0.2^\circ\text{C}/\text{W}$ or less, assuming under 0.005 inch combined flatness runout for the package and heat sink. Proper torquing of the mounting bolts is important. Four to six inch-pounds is recommended.

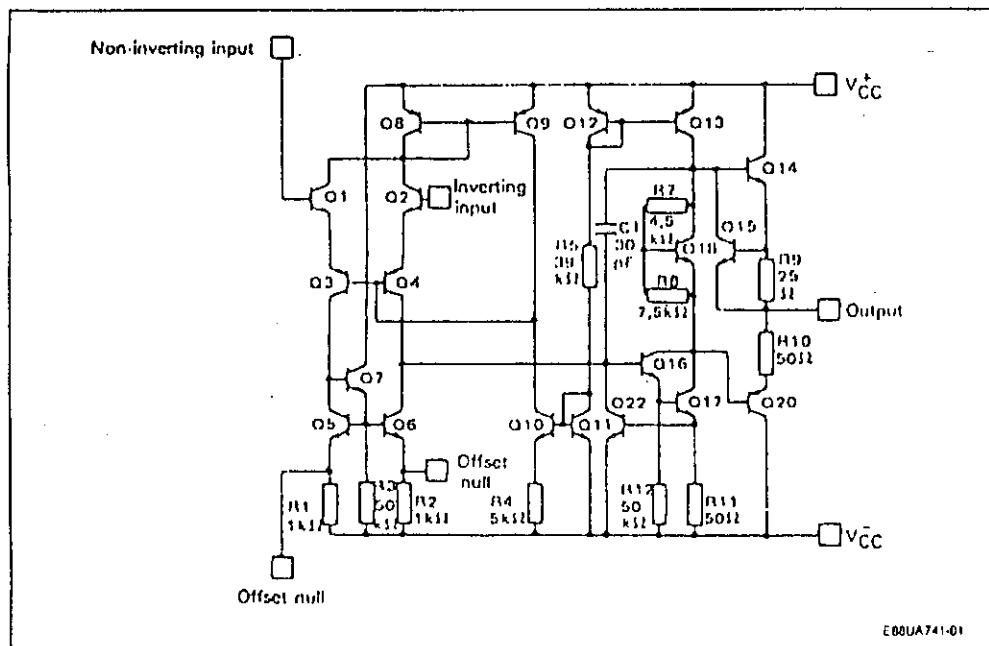
Should it be necessary to isolate V^- from the heat sink, an insulating washer is required. Hard washers like beryllium oxide, anodized aluminum and mica require the use of thermal compound on both faces. Two-mil mica washers are most common, giving about $0.4^\circ\text{C}/\text{W}$ interface resistance with the compound. Silicone-rubber washers are also available. A $0.5^\circ\text{C}/\text{W}$ thermal resistance is claimed without thermal compound. Experience has shown that these rubber washers deteriorate and must be replaced should the IC be dismounted.

D2 Operationsförstärkare 741

ABSOLUTE MAXIMUM RATINGS

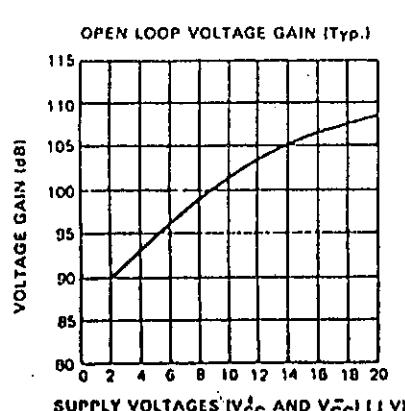
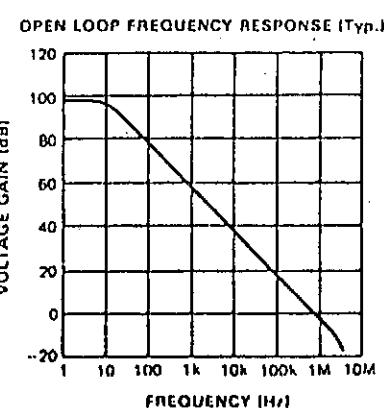
Symbol	Parameter	Value			Unit
		UA741M, A	UA741I	UA741C, E	
V _{cc}	Supply Voltage	± 22	± 22	± 22	V
V _i	Input Voltage	± 15	± 15	± 15	V
V _{id}	Differential Input Voltage	± 30	± 30	± 30	V
P _{int}	Power Dissipation	500	500	500	mW
	Output Short-circuit Duration	Infinite			
T _{oper}	Operating Free-air Temperature Range	- 55 to + 125	- 40 to + 105	0 to + 70	°C
T _{sto}	Storage Temperature Range	- 65 to 150	- 65 to 150	- 65 to 150	°C

SCHEMATIC DIAGRAM

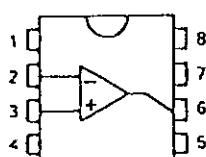


Case	Offset Null	Inverting Input	Non-Inverting Input	V _{cc}	V _{cc}	Output	N.C.
TO99/DIP8/CERDIP8/SO8	1, 5	2	3	4	7	6	0
DIP14	3, 9	4	5	6	11	10	-
LCC20	2, 12	5	7	10	17	15	-

* TO116, LCC20 : Other pins are not connected.



DIP8/CERDIP8
SO8



- 1 - Offset null
- 2 - Inverting input
- 3 - Non-inverting input
- 4 - V_{cc}
- 5 - Offset null
- 6 - Output
- 7 - V_{cc}
- 8 - NC

ELECTRICAL CHARACTERISTICS

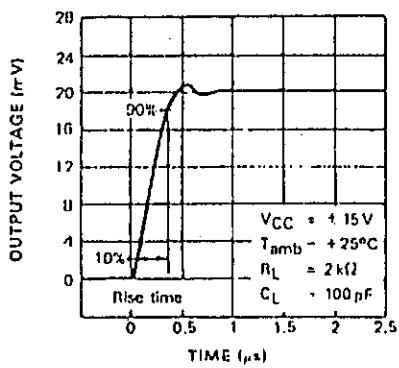
UA741M/A : -55 °C ≤ T_{amb} ≤ +125 °C, V_{CC} = ±15 V
 UA741I : -40 °C ≤ T_{amb} ≤ +105 °C, V_{CC} = ±15 V
 UA741C/E : 0 °C ≤ T_{amb} ≤ +70 °C, V_{CC} = ±15 V
 (unless otherwise specified)

Symbol	Parameter	UA741C, E, I, M, A			Unit
		Min.	Typ.	Max.	
V _{IO}	Input Offset Voltage R _S ≤ 10 kΩ T _{amb} = 25 °C T _{min} ≤ T _{amb} ≤ T _{max} UA741E, A		1	5 6 2 4	mV
I _{IO}	Input Offset Current T _{amb} = 25 °C T _{min} ≤ T _{amb} ≤ T _{max}		2	20 40	nA
I _{IB}	Input Bias Current T _{amb} = 25 °C T _{min} ≤ T _{amb} ≤ T _{max}		10	100 200	nA
A _{VO}	Large Signal Voltage Gain (V _O = ±10 V, R _L = 2 kΩ) T _{amb} = 25 °C T _{min} ≤ T _{amb} ≤ T _{max}	50 25	200		V/mV
SVR	Supply Voltage Rejection Ratio (R _S ≤ 10 kΩ) T _{amb} = 25 °C T _{min} ≤ T _{amb} ≤ T _{max}	77 77	90		dB
I _{CC}	Supply Current, no Load T _{amb} = 25 °C T _{min} ≤ T _{amb} ≤ T _{max}		1.7	2.8 3.3	mA
V _I	Input Voltage Range T _{amb} = 25 °C T _{min} ≤ T _{amb} ≤ T _{max}	-12 -12		+12 +12	V
CMR	Common Mode Rejection Ratio (R _S ≤ 10 kΩ) T _{amb} = 25 °C T _{min} ≤ T _{amb} ≤ T _{max}	70 70	90		dB
I _{OS}	Output Short-circuit Current T _{amb} = 25 °C	10	25	40	mA
±V _{OPIP}	Output Voltage Swing T _{amb} = 25 °C R _L = 10 kΩ R _L = 2 kΩ T _{min} ≤ T _{amb} ≤ T _{max} R _L = 10 kΩ R _L = 2 kΩ	12 10 12 10	14 13		V
S _{VO}	Slew-rate (V _I = ±10 V, R _L = 2 kΩ, C _L ≤ 100 pF, T _{amb} = 25 °C, unity gain)	0.25	0.5		V/μs
t _r	Rise Time (V _I = ±20 mV, R _L = 2 kΩ, C _L ≤ 100 pF T _{amb} = 25 °C, unity gain)		0.3		μs
K _{OV}	Overshoot (V _I = ±20 mV, R _L = 2 kΩ, C _L ≤ 100 pF, T _{amb} = 25 °C, unity gain)		5		%
R _I	Input Resistance, T _{amb} = 25 °C	0.3	2		mΩ

ELECTRICAL CHARACTERISTICS (continued)

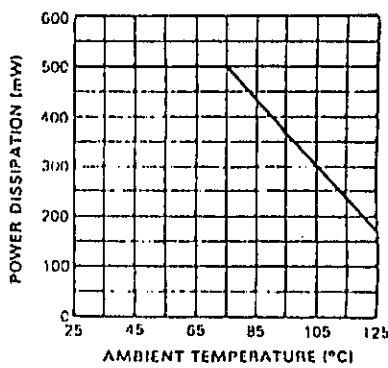
Symbol	Parameter	UA741C, E, I, M, A			Unit
		Min.	Typ.	Max.	
GPD	Gain Bandwidth Product (V _I = 10 mV, R _L = 2 kΩ, C _L ≤ 100 pF, f = 100 kHz, T _{amb} = 25 °C)	0.7	1	1.6	MHz
THD	Total Harmonic Distortion (f = 1 kHz, A _v = 20 dB, R _L = 2 kΩ, V _O = 2 V _{PP} , C _L ≤ 100 pF, T _{amb} = 25 °C)		0.06		%
V _N	Equivalent Input Noise Voltage (f = 1 kHz, R _g = 100 Ω)		23		nV/√Hz
	Phase Margin		50		Degrees

TRANSIENT RESPONSE (Typ.)



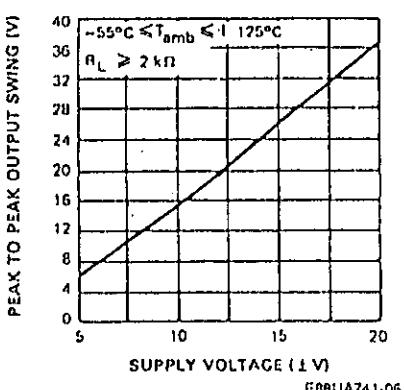
E88UA741-04

ABSOLUTE MAXIMUM POWER DISSIPATION



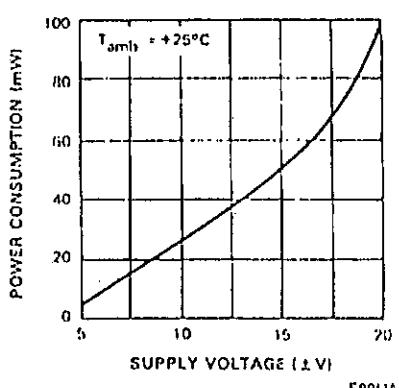
E88UA741-05

OUTPUT VOLTAGE SWING



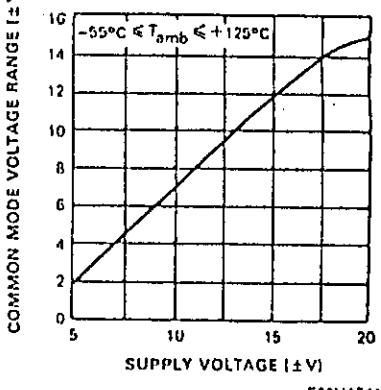
E88UA741-06

POWER CONSUMPTION



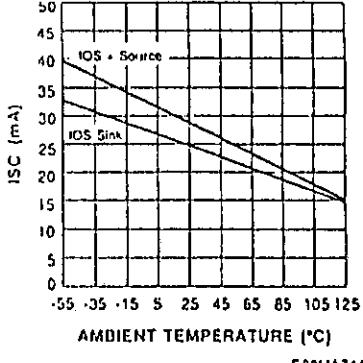
E88UA741-08

INPUT COMMON MODE VOLTAGE RANGE



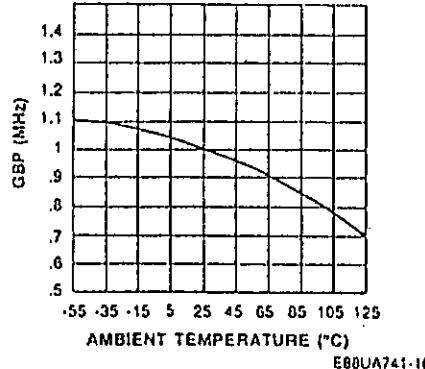
E88UA741-07

OUTPUT CURRENT vs AMBIENT TEMPERATURE



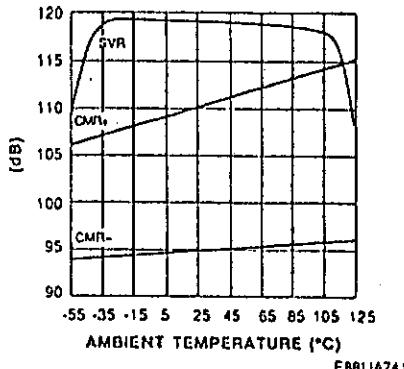
E88UA741-09

GAIN BANDWIDTH PRODUCT vs AMBIENT TEMPERATURE

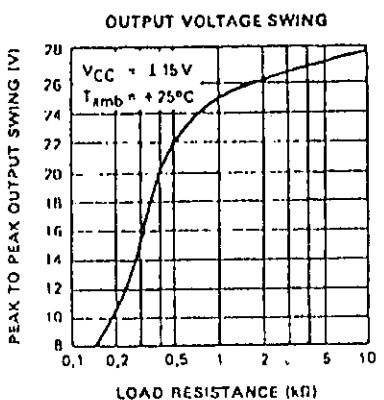


E88UA741-16

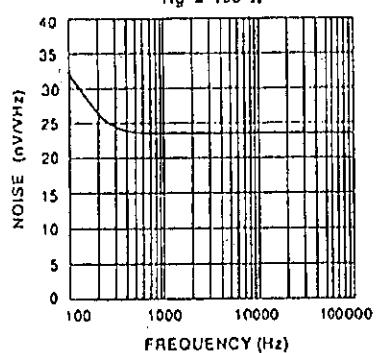
POWER SUPPLY & COMMON MODE REJECTION RATIO vs AMBIENT TEMPERATURE



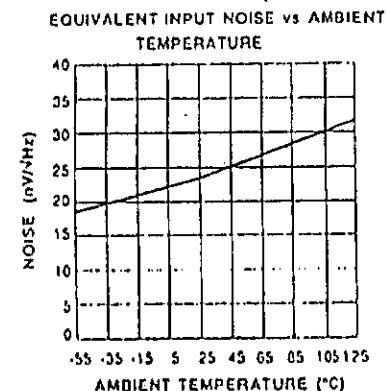
E88UA741-17



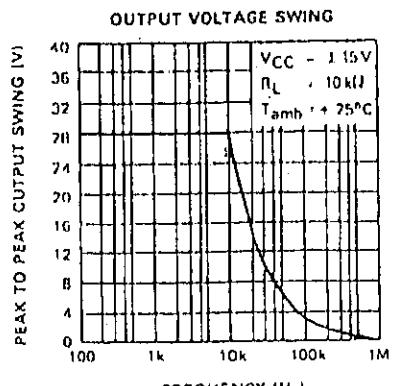
E88UA741-10
EQUIVALENT INPUT NOISE vs FREQUENCY
 $R_g = 100 \Omega$



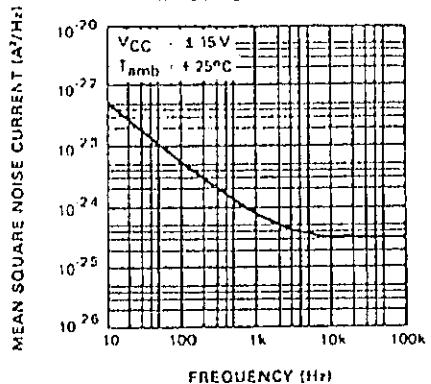
E88UA741-12



E88UA741-14

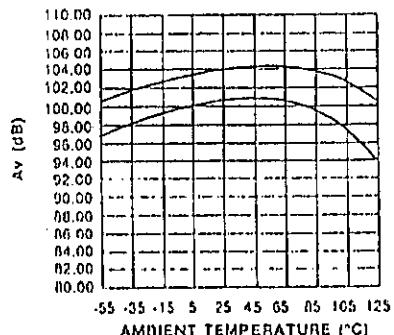


E88UA741-11
INPUT NOISE CURRENT

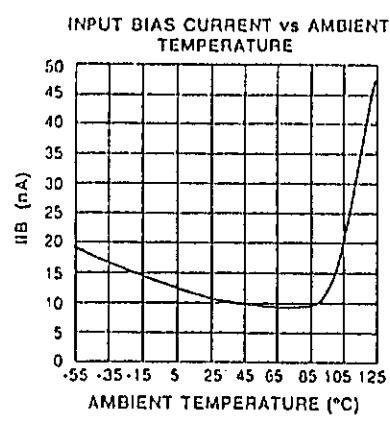


E88UA741-13

LARGE SIGNAL VOLTAGE GAIN vs AMBIENT TEMPERATURE



E88UA741-15



E88UA741-18

D3 Spänningsregulator 7812, 7815

Absolute Maximum Ratings

If Military/Aerospace specified devices are required, please contact the National Semiconductor Sales Office/Distributors for availability and specifications.

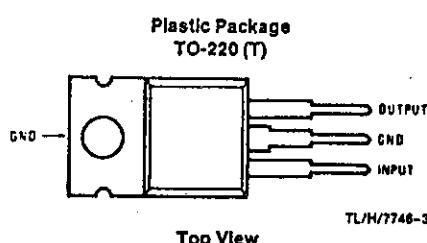
Input Voltage ($V_O = 5V, 12V$ and $15V$)	35V	Maximum Junction Temperature (K Package)	150°C
Internal Power Dissipation (Note 1)	Internally Limited	(T Package)	150°C
Operating Temperature Range (T_A)	0°C to +70°C	Storage Temperature Range	-65°C to +150°C
		Lead Temperature (Soldering, 10 sec.)	
		TO-3 Package K	300°C
		TO-220 Package T	230°C

Electrical Characteristics LM78XXC (Note 2) $0^\circ C \leq T_J \leq 125^\circ C$ unless otherwise noted.

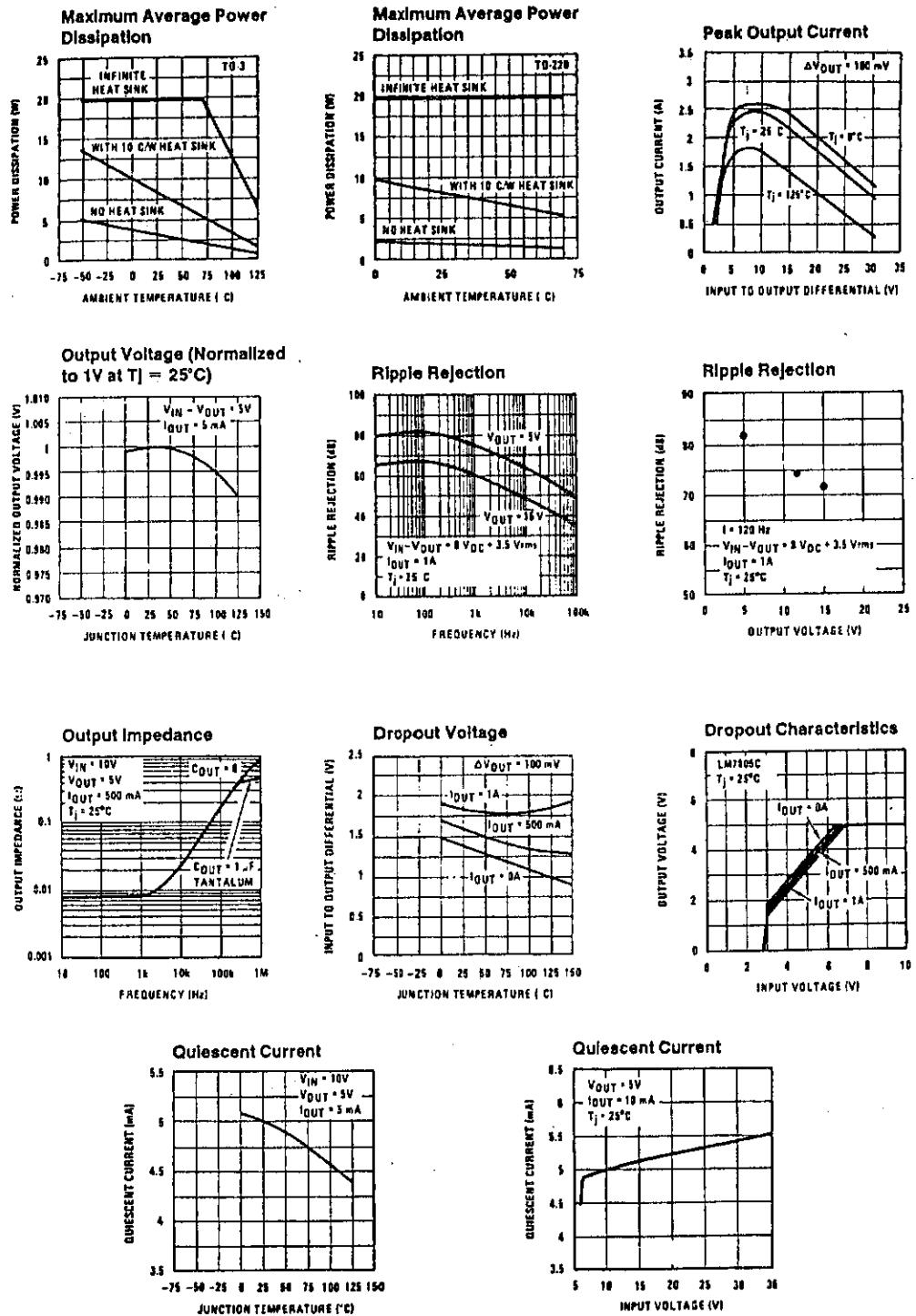
Output Voltage			5V			12V			15V			Units
Input Voltage (unless otherwise noted)			10V			19V			23V			
Symbol	Parameter	Conditions	Min	Typ	Max	Min	Typ	Max	Min	Typ	Max	
V_O	Output Voltage	$T_J = 25^\circ C, 5\text{ mA} \leq I_O \leq 1\text{ A}$	4.8	5	5.2	11.5	12	12.5	14.4	15	15.6	V
		$P_D \leq 15W, 5\text{ mA} \leq I_O \leq 1\text{ A}$ $V_{MIN} \leq V_{IN} \leq V_{MAX}$	4.75 (7.5 $\leq V_{IN} \leq 20$)	5.25 (14.5 $\leq V_{IN} \leq 27$)	11.4 (17.5 $\leq V_{IN} \leq 30$)	12.6 (17.5 $\leq V_{IN} \leq 30$)	14.25 (17.5 $\leq V_{IN} \leq 30$)	15.75 (17.5 $\leq V_{IN} \leq 30$)	14.4	15	15.6	V
ΔV_O	Line Regulation	$I_O = 500\text{ mA}, T_J = 25^\circ C$ ΔV_{IN}	3	50		4	120		4	150		mV
		$0^\circ C \leq T_J \leq +125^\circ C$ ΔV_{IN}		50 (8 $\leq V_{IN} \leq 20$)		120 (15 $\leq V_{IN} \leq 27$)		150 (18.5 $\leq V_{IN} \leq 30$)		150		mV
		$I_O \leq 1\text{ A}$ $T_J = 25^\circ C$ ΔV_{IN}		50 (7.5 $\leq V_{IN} \leq 20$)		120 (14.6 $\leq V_{IN} \leq 27$)		150 (17.7 $\leq V_{IN} \leq 30$)		150		mV
		$0^\circ C \leq T_J \leq +125^\circ C$ ΔV_{IN}		25 (8 $\leq V_{IN} \leq 12$)		60 (16 $\leq V_{IN} \leq 22$)		75 (20 $\leq V_{IN} \leq 26$)		75		mV
ΔV_O	Load Regulation	$T_J = 25^\circ C$ $5\text{ mA} \leq I_O \leq 1.5\text{ A}$ $250\text{ mA} \leq I_O \leq 750\text{ mA}$	10	50		12	120		12	150		mV
		$5\text{ mA} \leq I_O \leq 1\text{ A}, 0^\circ C \leq T_J \leq +125^\circ C$		25		60		75		75		mV
I_Q	Quiescent Current	$I_O \leq 1\text{ A}$ $T_J = 25^\circ C$ $0^\circ C \leq T_J \leq +125^\circ C$		8		8		8		8		mA
ΔI_Q	Quiescent Current Change	$5\text{ mA} \leq I_O \leq 1\text{ A}$		8.5		8.5		8.5		8.5		mA
		$T_J = 25^\circ C, I_O \leq 1\text{ A}$ $V_{MIN} \leq V_{IN} \leq V_{MAX}$		1.0		1.0		1.0		1.0		mA
		$I_O \leq 500\text{ mA}, 0^\circ C \leq T_J \leq +125^\circ C$ $V_{MIN} \leq V_{IN} \leq V_{MAX}$		1.0 (7 $\leq V_{IN} \leq 25$)		1.0 (14.5 $\leq V_{IN} \leq 30$)		1.0 (17.5 $\leq V_{IN} \leq 30$)		1.0		mA
V_N	Output Noise Voltage	$T_A = 25^\circ C, 10\text{ Hz} \leq f \leq 100\text{ kHz}$		40		75		90		90		µV
ΔV_{IN} ΔV_{OUT}	Ripple Rejection	$f = 120\text{ Hz}$ $\left\{ \begin{array}{l} I_O \leq 1\text{ A}, T_J = 25^\circ C \text{ or} \\ I_O \leq 500\text{ mA} \\ 0^\circ C \leq T_J \leq +125^\circ C \end{array} \right.$ $V_{MIN} \leq V_{IN} \leq V_{MAX}$	62 (8 $\leq V_{IN} \leq 18$)	80 (15 $\leq V_{IN} \leq 25$)	62 (15 $\leq V_{IN} \leq 25$)	55 (15 $\leq V_{IN} \leq 25$)	72 (18.5 $\leq V_{IN} \leq 28.5$)	54 (18.5 $\leq V_{IN} \leq 28.5$)	70 (18.5 $\leq V_{IN} \leq 28.5$)	54 (18.5 $\leq V_{IN} \leq 28.5$)	70 (18.5 $\leq V_{IN} \leq 28.5$)	dB
												dB
R_O	Dropout Voltage Output Resistance Short-Circuit Current Peak Output Current Average TC of V_{OUT}	$T_J = 25^\circ C, I_{OUT} = 1\text{ A}$ $f = 1\text{ kHz}$		2.0		2.0		2.0		2.0		V
		$T_J = 25^\circ C$		8		18		19		19		$m\Omega$
		$I_J = 25^\circ C$		2.1		1.5		1.2		1.2		A
		$T_J = 25^\circ C$		2.4		2.4		2.4		2.4		A
		$0^\circ C \leq T_J \leq +125^\circ C, I_O = 5\text{ mA}$		0.6		1.5		1.8		1.8		$mV/^\circ C$
V_{IN}	Input Voltage Required to Maintain Line Regulation	$T_J = 25^\circ C, I_O \leq 1\text{ A}$		7.5		14.6		17.7		17.7		V

Note 1: Thermal resistance of the TO-3 package (K, KC) is typically $4^\circ C/W$ junction to case and $35^\circ C/W$ case to ambient. Thermal resistance of the TO-220 package (T) is typically $4^\circ C/W$ junction to case and $50^\circ C/W$ case to ambient.

Note 2: All characteristics are measured with capacitor across the input of $0.22\text{ }\mu\text{F}$, and a capacitor across the output of $0.1\mu\text{F}$. All characteristics except noise voltage and ripple rejection ratio are measured using pulse techniques ($t_w \leq 10\text{ ms}$, duty cycle $\leq 5\%$). Output voltage changes due to changes in internal temperature must be taken into account separately.



Typical Performance Characteristics



D3 Spänningssregulator 7915

Absolute Maximum Ratings

If Military/Aerospace specified devices are required, please contact the National Semiconductor Sales Office/Distributors for availability and specifications.

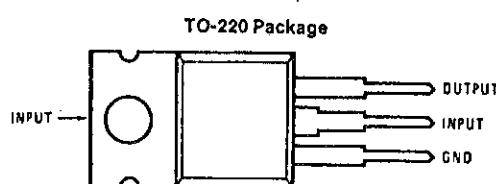
Input Voltage ($V_o = 5V$)	-35V	Input-Output Differential ($V_o = 5V$)	25V
($V_o = 12V$ and 15V)	-40V	($V_o = 12V$ and 15V)	30V
Power Dissipation (Note 1)		Internally Limited	
Operating Junction Temperature Range	0°C to +125°C		
Storage Temperature Range	-65°C to +150°C		
Lead Temperature (Soldering, 10 sec.)	230°C		

Electrical Characteristics (Continued) Conditions unless otherwise noted: $I_{OUT} = 500 \text{ mA}$, $C_{IN} = 2.2 \mu\text{F}$, $C_{OUT} = 1 \mu\text{F}$, $0^\circ\text{C} \leq T_J \leq +125^\circ\text{C}$, Power Dissipation = 1.5W.

Part Number			LM7912C			LM7915C			Units
Output Voltage			12V			15V			
Input Voltage (unless otherwise specified)			-19V			-23V			
Symbol	Parameter	Conditions	Min	Typ	Max	Min	Typ	Max	
V_o	Output Voltage	$T_J = 25^\circ\text{C}$ $5 \text{ mA} \leq I_{OUT} \leq 1 \text{ A}$, $P \leq 15 \text{ W}$	-11.5 -11.4 (-27 ≤ $V_{IN} \leq -14.5$)	-12.0 -12.6 (-30 ≤ $V_{IN} \leq -14.5$)	-12.5 -14.25 (-30 ≤ $V_{IN} \leq -17.5$)	-14.4 -14.25 (-30 ≤ $V_{IN} \leq -17.5$)	-15.0 -15.75 (-30 ≤ $V_{IN} \leq -17.5$)	-15.6 -15.75 (-30 ≤ $V_{IN} \leq -17.5$)	V
ΔV_o	Line Regulation	$T_J = 25^\circ\text{C}$, (Note 2)	5 3 -22	80 30 -16		5 (-30 ≤ $V_{IN} \leq -17.5$)	100 30 (-26 ≤ $V_{IN} \leq -20$)	mV	
ΔV_o	Load Regulation	$T_J = 25^\circ\text{C}$, (Note 2) $5 \text{ mA} \leq I_{OUT} \leq 1.5 \text{ A}$ $250 \text{ mA} \leq I_{OUT} \leq 750 \text{ mA}$	15 15 5	200 200 75		15 15 5	200 200 75	mV	
I_Q	Quiescent Current	$T_J = 25^\circ\text{C}$		1.5	3		1.5	3	mA
ΔI_Q	Quiescent Current Change	With Line With Load, $5 \text{ mA} \leq I_{OUT} \leq 1 \text{ A}$			0.5 0.5	(-30 ≤ $V_{IN} \leq -14.5$)	0.5 0.5	0.5 0.5	mA
V_n	Output Noise Voltage	$T_A = 25^\circ\text{C}$, $10 \text{ Hz} \leq f \leq 100 \text{ Hz}$		300			375		μV
	Ripple Rejection	$f = 120 \text{ Hz}$		54 (-25 ≤ $V_{IN} \leq -15$)	70		54 (-30 ≤ $V_{IN} \leq -17.5$)	70	dB
	Dropout Voltage	$T_J = 25^\circ\text{C}$, $I_{OUT} = 1 \text{ A}$		1.1			1.1		V
I_{OMAX}	Peak Output Current	$T_J = 25^\circ\text{C}$		2.2			2.2		A
	Average Temperature Coefficient of Output Voltage	$I_{OUT} = 5 \text{ mA}$, $0^\circ\text{C} \leq T_J \leq 100^\circ\text{C}$		-0.8			-1.0		$\text{mV}/^\circ\text{C}$

Note 1: For calculations of junction temperature rise due to power dissipation, thermal resistance junction to ambient (θ_{JA}) is $50^\circ\text{C}/\text{W}$ (no heat sink) and $5^\circ\text{C}/\text{W}$ (infinite heat sink).

Note 2: Regulation is measured at a constant junction temperature by pulse testing with a low duty cycle. Changes in output voltage due to heating effects must be taken into account.



TL/H/7340-11

D4 Peltierelement

Peltierelement

År 1834 fann den franske fysikern Peltier att om en ström passerade genom en kontaktpunkt av två olika metaller blev lödpunkten kallare än omgivningstemperaturen. På senare år har man lärt sig att göra lämpliga legeringar som på effektivaste sätt utnyttjar peltier-effekten.

Funktion: Genom att seriekoppla P- och N-dopade legeringar erhåller man ett lämpligt ström-/spänningstörhållande för maximal kyleffekt. Elementet har en kall och en varm sida. Genom att kyla den varma sidan får man en förhöjd kyleffekt på den kalla sidan.

Typ	Max spänning V	Max ström A	Max kyleffekt W	Max skillnads- temp °C	Dimensioner mm	Artikel- nummer	Pris per st
FC0.6-66-06L	8	1,2	5,34	67	14,4×11,3×2,7	75-660-45	670:00
CP1.0-127-05L	15,4	3,9	33,4	67	30×30×3,2	75-660-29	362:00
CP1,4-71-10L	8,6	3,9	18,7	70	30×30×4,7	75-660-11	363:00
CP1,4-127-06L	15,4	6	51,4	67	40×40×3,8	75-660-37	530:00
CP1,4-127-10L	15,4	3,9	33,4	70	40×40×4,7	75-660-03	405:00