

# RENOVERING AV BYGGNADER MED HJÄLP AV LIVSTIDSKOSTNADSANALYSER

Stig-Inge Gustafsson, Björn G. Karlsson  
IKP/Energisystem, Tekniska högskolan,  
581 83 Linköping

## INLEDNING

Vid Tekniska högskolan i Linköping, avd. Energisystem, har sedan flera år pågått forskning kring användandet av livstidskostnader som hjälp för att avgöra den absolut bästa renoveringsstrategin för byggnader. Begreppet livstidskostnad, från engelskan förkortat som LCC, inkluderar då direkta ombyggnadskostnader, driftkostnader samt underhållskostnader för en viss tidsperiod. Då dessa kostnader inte uppträder helt samtidigt måste man på något sätt ta hänsyn till att en investering som kan skjutas framåt i tiden inte har samma värde som den som måste utföras omedelbart. Detta sker med hjälp av nuvärdesmetoden se referens [1], och följande två uttryck används vanligen:

$$NV_a = A \times (1 + r)^{-n} \quad (1)$$

$$NV_b = B \times \frac{1 - (1 + r)^{-m}}{r} \quad (2)$$

$NV_a$  är då nuvärdet av en investering om  $A$  kr som inträffar år  $n$  när man tillämpar en real ränta  $r$ . På samma sätt är  $NV_b$  nuvärdet av ett antal årliga investeringar om  $B$  Kr som sker under ett antal av  $m$  år. Uttrycket (1) används lämpligen då enstaka investeringar måste göras, ex. vis om man måste byta fönster om fem år, medan uttrycket (2) används ex. vis vid årligen inträffande kostnader för uppvärmningen av en byggnad. Tyvärr inför man också vissa svårigheter då man tillämpar nuvärdesmetoden. Dels kan man inte på ett vetenskapligt sätt ange exakt vilken real ränta som skall tillämpas och dels måste man ta ställning till hur många år nuvärdesanalysen skall avse. Vad gäller räntenivån kan man dock använda avkastningskraven man har på andra investeringar. Låt oss anta att man är nöjd med den avkastning man har från vanligt banksparrande. Räntan, inklusive inflationen, ligger troligen på c:a 14 %. I dagsläget, januari 1993, är inflationen i landet mycket låg, säg 3 %, vilket innebär att den reala räntan är ungefärligen 11 %. Beräkningen är inte helt invändningsfri från matematisk synvinkel, men ger ett ungefärligt värde på den reala räntan. Det är också viktigt att notera att det är den reala räntan under hela beräkningsperioden som ska tillämpas och inte endast den som just för ögonblicket gäller. Den räntenivå som skall tillämpas är under ständig debatt och det finns förslag på räntor från allt mellan 3 till 15 %. Det finns till och med exempel på att negativa räntor använts se referens [2]. På liknande sätt förhåller det sig med

beräkningsperiodens längd. Det är omöjligt att exakt ange vilket värde denna lämpligen skall ha. Normalt är dock byggnader långsiktiga investeringar och därför verkar det rimligt att använda minst 20 år som beräkningsperiod. Som villkor för statliga ombyggnadslån tillämpas t. ex 30 år som gräns mellan lånetillfällena. Det kan verka nedslående att man redan innan analysen ens startat drabbas av svårigheter att bestämma sig för vilka värden man skall räkna med. Turligt nog finns en lösning som åtminstone delvis gör problemen hanterliga. Genom att utföra en sk känslighetsanalys kan man få reda på hur avgörande ex. vis en förändrad ränta är för slutresultatet.

## OPERAMODELLEN

När man ska undersöka en byggnad och få fram en lämplig renoveringsstrategi är det en avsevärd mängd beräkningar som måste utföras. Det gäller ju inte bara att få fram en kombination av åtgärder utan det ska dessutom vara den bästa möjliga, d.v.s. vi letar efter den optimala strategin. I vårt fall innebär detta att livstidskostnaden ska vara så låg som möjligt. Även om moderna datorer numera återfinnes på de flesta skrivbord måste vissa begränsningar införas för att beräkningsvolymen ska bli hanterlig. I den modell vi utvecklat tas därför bara hänsyn till sådana åtgärder som endast påverkar huset som energisystem. Förbättrade städmöjligheter eller handikappanpassning med hissar o. d. tas därför inte med i analysen. En tilläggsisolering kan innebära att byggnaden får ett mindre attraktivt utseende men sådana förhållanden kommer endast med om konsekvenserna kan åsättas ett värde i pengar. Isoleråtgärden innebär dock att användningen av värme i byggnaden minskar och denna lägre värmekostnad måste naturligtvis inkluderas. Förutom förbättringar av byggnadens klimatskal måste man ta med förhållanden som rör ventilationen och sist men inte minst byggnadens värmesystem. Värme kan produceras och köpas på på många olika sätt och detta måste därför behandlas på ett lämpligt sätt.

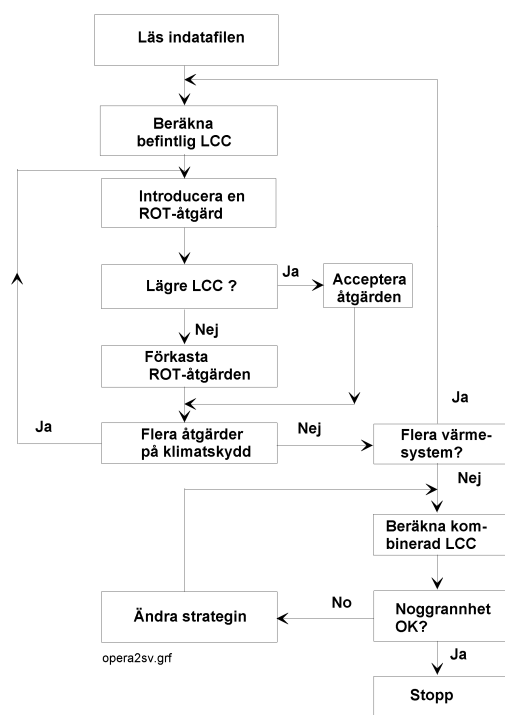
Genom ett anslag från Statens Råd för Byggnadsforskning, BFR, har vi på avd Energisystem tagit fram en modell, eller ett datorprogram, som vi menar är den mest heltäckande metoden för att undersöka en byggnad som ett energisystem. Modellen som fått namnet OPERA, OPtimal Energy Retrofit Advisory, kan numera användas i en vanlig persondator och köras under det vanliga operativsystemet DOS eller i ett fönster under Windows. Programmet är skrivet i standard FORTRAN vilket innebär att det enkelt kan överföras till i stort sett vilken dator som helst. Programkoden är offentlig och har publicerats i en särskild rapport, se referens [3], medan manualen till programmet publicerats av BFR, referens [4]. Följande s.k. ROT-åtgärder på klimatskalet behandlas i programmet:

- Isolering, med optimering, av bjälklag, golv och ytterväggar.
- Byte av fönster. Tre olika typer kan inkluderas samtidigt vid beräkningarna.
- Tätning av fönster och dörrar.
- Frånluftvärmepump

Vidare behandlas följande värmesystem:

- Nya och befintliga oljepannor
- Elvärme med fast och två olika differentierade taxor
- Fjärrvärme med fast och differentierad taxa
- Naturgas
- Två olika bivalenta värmesystem med oljepanna och värmepump.

Som indata till programmet används uppgifter om byggnadens geometri, antal fönster, termisk status på befintliga och nya byggnadsdelar, byggnadskostnader, klimat, tappvarmvattenanvändning, energitaxor mm. En fullständig lista erhålles i referens [4] där det dessutom finns referenser till annan litteratur som använts bl. a. för att få fram värden på alla indata. Alla dessa värden lagras i en indatafil som läses av programmet. Beräkningarna börjar sedan med att det befintliga husets livstidskostnad ta fram, se figur 1.



Figur 1: Schematisk bild av ROT-optimering med OPERA, se referens [5]

Man har då erhållit ett belopp i kronor på den kostnad husägaren har för att underhålla, bygga om och värma upp huset under hela dess livstid. Det är viktigt att notera att, även om huset lämnas som det är just för tillfället, det ändå delvis måste byggas om, eller repareras, vid ett antal tillfällen. Antag att det befintliga husets tvåglasfönster är i dåligt skick. Man bedömer att fönstren

måste bytas senast inom 5 år. I programmet antas då att man vid detta senare tillfälle byter till samma typ av fönster som tidigare använts. Efter, säg tjugo år, måste fönstren bytas igen. Återigen antas att man byter till nya tvåglasfönster och detsamma sker efter ytterligare tjugo år. Om vi antar att husets kvarvarande livslängd är 50 år kommer således tre fönsterbyten att ingå i den befintliga livstidskostnaden. Vid tidsperiodens slut har dock dessa ett visst kvarvarande värde. Detta s.k. restvärde dras då av från kostnaden med hjälp av uttryck (1). Kostnaden för samtliga sådana ombyggnadsåtgärder, vilka kommer till vare sig man vill det eller ej, utgör byggnadens s.k. oundvikliga ROT-kostnader. Det är viktigt att förstå att dessa oundvikliga kostnader blir högre om byggnadens status är sämre, d.v.s. ombyggnadsåtgärderna tidigareläggs. Programmet inför sedan en ROT-åtgärd, som av en tillfällighet satts till en bjälklagsisolering. Från början vet vi inte hur tjock isoleringen skall vara utan detta mått måste beräknas. I referens [6] har visats att en byggnadsdels nya sk U-värde kan beräknas som:

$$U_n = \frac{U_{bef} \times \lambda_n}{\lambda_n + U_{bef} \times t_n} \quad (3)$$

där  $U_n$  = det nya U-värdet,  $U_{bef}$  = det befintliga U-värdet,  $\lambda_n$  =  $\lambda$ -värdet på den nya isoleringen och  $t_n$  = är den nya isoleringens tjocklek.

Genom att multiplicera det nya U-värdet, först med byggnadsdelens area, sedan med ett lämpligt antal gradtimmar och till sist med värmepriset och den s.k. nuvärdesfaktorn, som fås ur uttryck (2), erhålles en kostnad för den värme som passerar byggnadsdelen. Tyvärr vet vi ju inte ännu hur stort  $t_n$  är men tills vidare får det vara obekant. Kostnaden för att tilläggsisolera bjälklaget är ju också beroende av  $t_n$ , en tjockare isolering måste ju vara dyrare än en tunnare. I OPERA modellen antas att det är ett linjärt samband mellan tjocklek och kostnad, även om det kan diskuteras om detta är riktigt då isolering ju vanligen säljs i färdiga tjocklekar. En viktig aspekt är dock att isolerkostnaden inte är linjär just i funktionens början, kostnaden börjar med ett steg. Dessutom tillkommer en fast kostnad som beror av den ovan beskrivna oundvikliga ROT-kostnaden. Följande uttryck används i OPERA:

$$I_k = C_1 + C_2 + C_3 \times t_n \quad (4)$$

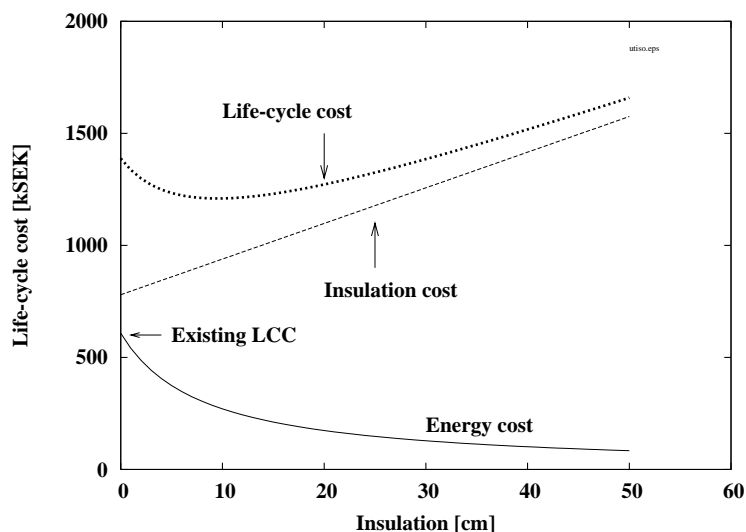
där  $I_k$  är isolerkostnaden och  $C_1$  osv är olika konstanter. Genom att nu lägga samman kostnaden för värmeanvändningen med kostnaden för isoleringen erhålles ett uttryck av typen:

$$LCC_{iso} = C_4 + C_5 \times t_n + \frac{C_6}{\lambda_n + U_{bef} \times t_n} \quad (5)$$

där  $LCC_{iso}$  är livstidskostnaden för byggnadsdelen ifråga och  $C_4$  o.s.v. är ytterligare konstanter. Det gäller nu att hitta det värde på  $t_n$  som ger lägsta möjliga värde på  $LCC_{iso}$ . Utan att bevisa det här, men se referens [6], får man att detta lägsta värde erhålls om:

$$t_{opt} = -\frac{\lambda_n}{U_{bef}} + \sqrt{\frac{C_6}{C_5 \times U_{bef}}} \quad (6)$$

Metoden åskådliggörs grafiskt i figur 2.



Figur 2: Isoleringsoptimering i OPERA, se referens [6]

Här framgår dessutom den befintliga livtidskostnaden. Det viktiga är nu att notera att den befintliga livtidskostnaden inte nödvändigtvis behöver vara högre än den nya som erhållits då byggnadsdelen tilläggsisolerats. Det är endast om den nya LCC är lägre som det är lönsamt att tilläggsisolera, i annat fall är det bättre att låta byggnadsdelen vara som den är. Det senare är ofta fallet vid en eventuell isolering av ytterväggar som i dagsläget har lång befintlig livslängd kvar.

I programmet införs nu nästa ROT-åtgärd, en tilläggsisolering av bottenbjälklaget och en ytterligare LCC beräknas, se figur 1. Denna jämföres sedan med den befintliga LCC o.s.v. Notera att man vid denna andra beräkning startar "från början" igen, d.v.s. utan att ta hänsyn till om någon bjälklagsisolering blev optimal eller ej.

När det gäller utbyte av fönster är det inte lika lätt att hitta ett matematiskt uttryck som man kan minimera, även om vissa försök gjorts, se referens [7]. I OPERA modellen används därför en s.k. trial-and-error metod. LCC beräknas därför för ex. vis treglasfönster, sedan för treglasfönster med energiglas, o.s.v., och det fall som har den lägsta LCC väljs ut som optimalt. Tre fönstertyper kan behandlas samtidigt, förutom de befintliga fönstren. Vill man undersöka flera alternativ måste man byta ut indata till programmet. Vid optimeringen tas även hänsyn till solinstrålningen vilket innebär att resultatet kan skilja sig beroende på fönstrens orientering efter olika väderstreck.

På motsvarande sätt förfars med ex. vis tätning av fönster och dörrar samt ev frånluftvärmepump. Lönsamheten hos en sådan värmepump beror ju till stor del på det luftflöde som passerar apparaten. Man måste således undersöka lönsamheten både med och utan tätning av huset och välja den kombination som ger den lägsta LCC. Ibland kan det vara så att det lönar sig att välja en något större frånluftvärmepump och samtidigt låta byggnaden vara otät även om det är ovanligt.

När alla åtgärder på klimatskal och ventilationsanläggning undersökts byts

värmesystemet ut i modellen, se figur 1, och hela beräkningen görs om igen. När även alla värmesystem undersökts finns därför ett antal olika strategier och den billigaste av dessa väljs ut. Nu är det så att olika energisparåtgärder kan påverka varandra. Låt oss anta att åtgärd 1 beräknats spara  $x$  kronor och åtgärd 2  $y$  kronor. Kombinerar dessa två åtgärder med varandra är det inte säkert att det slutliga sparbeloppet blir  $x+y$  kronor. Detta beror på att en energisparåtgärd förkortar eldningssäsongen med ett antal timmar. I OPERA hanteras detta så att LCC för den slutliga kombinationen av bygg- och ventilationsåtgärder för varje värmesystem beräknas. Operatören får därför kännedom om ifall problemet uppstår och om det är värt mödan att studera detta i detalj. Skulle så vara fallet finns en inbyggd rutin som möjliggör en reduktion av isoleringsgraden så att den lägsta LCC kan väljas. Normalt uppstår aldrig detta problem då skillnaden mellan den stegvisa och den kombinerade metoden oftast är mycket liten, se ex. vis referens [8]. Detta är speciellt tydligt ju färre energisparåtgärder som är optimala. Vår erfarenhet visar att det oftast är bäst att satsa på ett effektivt värmesystem som ger låga uppvärmningskostnader. Detta innebär samtidigt att endast ett fåtal åtgärder på klimatskalet blir lönsamma, och detta i sin tur att kombinationseffekten kan negligeras. Detta framgår tydligt i tabell 1.

*** LCC TABELL FÖR GRUNDALTERNATIVET ***										
VÄRDENA I MSEK										
	EXIS. SYST.	NY OLJA	EL VÄRME	FJÄRR VÄRME	GR.V VÄRME	NAT. GAS	TOU FJÄRR	TOU ELEK.	BIV. GR.VP	BIV.OL. LUFT VP
INGA BYGGÅTG. BESPARINGAR:	3.76	4.16	4.40	3.73	3.84	5.13	3.76	—	3.26	3.55
BJÄLKLAGSISO	.00	.00	.00	.00	.00	.00	.00	—	.00	.00
GOLVISOLERING	.00	.00	.00	.00	.00	.00	.00	—	.00	.00
YTTERV.ISO.UTS.	.00	.00	.00	.00	.00	.11	.00	—	.00	.00
YTTERV. ISO.INS	.00	.00	.00	.00	.00	.00	.00	—	.00	.00
TREGLASFÖNSTER	.13	.16	.19	.13	.14	.26	.13	—	.08	.10
TREGLAS MED GAS F.	.00	.00	.00	.00	.00	.00	.00	—	.00	.00
TREGLAS GAS LE.	.00	.00	.00	.00	.00	.00	.00	—	.00	.00
TÄTNING FÖNSTER	.15	.18	.21	.16	.14	.26	.15	—	.11	.13
FRÅNLUFTVÄRMEP.	.00	.17	.25	.09	.00	.42	.00	—	.00	.00
SUMMMA STEG LCC	3.47	3.64	3.74	3.35	3.56	4.09	3.48	—	3.08	3.31
SUMMMA KOMB LCC	3.47	3.64	3.74	3.35	3.56	4.09	3.48	—	3.08	3.31
FÖRDELNING:										
RETVÄRDE PANNA	.00	.01	.01	.01	.01	.01	.01	—	.01	.01
NY PANNKOSTNAD	.00	.11	.04	.00	.76	.09	.00	—	.47	.78
RÖRKOSTNAD	.00	.03	.00	.00	.50	.02	.00	—	.23	.03
ENERGIKOSTNAD	2.19	1.64	1.83	1.48	1.01	1.53	2.19	—	1.09	1.20
ANSLUTN AVGIFT	.00	.00	.00	.00	.00	.01	.00	—	.00	.00
OMBYGGN.KOSTNAD	.64	1.22	1.22	1.22	.64	1.78	.64	—	.64	.64
OUNDVIK. KOSTNAD	.64	.64	.64	.64	.64	.64	.64	—	.64	.64

Tabell 1: LCC för de olika värmesystemen med kandidater till sparåtgärder, se referens [5]

I tabell 1 återfinns den befintliga LCC högst upp till vänster, dvs 3.76 MSEK. Detta belopp utgör således det sammanlagda värdet på byggnads-, underhålls-, och driftkostnader under byggnades bedömda livslängd. Under detta värde finns de besparingar som kan förväntas då man inför en åtgärd. Då någon bjälklagsisolering inte var lönsam återfinns .00 som sparbelopp. De enda två åtgärder som var lönsamma vid det befintliga värmesystemet, som här var fjärrvärme, är byte av fönster samt tätning. Någon skillnad mellan den stegvisa och den kombinerade metoden blir det heller ej. I tabellen finns dessutom en redovisning av hur kostnaderna fördelar sig på byggkostnader, energikostnader m.m. För det befintliga systemet fås således en LCC om 3.47 MSEK. Om man nu byter den befintliga fjärrvärmeanläggningen mot en ny oljepanna får man en kostnad om 4.16 MSEK om inga byggrotåtgärder genomförs. Nu blir det dessutom lönsamt att installera en frånluftvärmepump men den resulterande LCC

är trots allt högre än tidigare. Detta var således en dålig strategi. Den billigaste lösningen är istället en oljepanna kombinerad med en värmepump så att oljepannan svarar för topplasten medan värmepumpen används för baslasten. Samma byggstrategi skall tillämpas som om det befintliga systemet behövs, dvs man ska byta fönster till treglas samt täta huset. Man bör notera att detta värmesystem ger lägre kostnader för värmen och således sparas heller inte lika mycket på ROT-åtgärderna. Vidare skall nämnas att fönsterbytet blir aktuellt då den befintliga livslängden på fönstren satts till noll år, dvs fönstren måste bytas oavsett om man sparar någon värme eller ej. En mera fullständig redovisning av denna fallstudie återfinnes i referens [5].

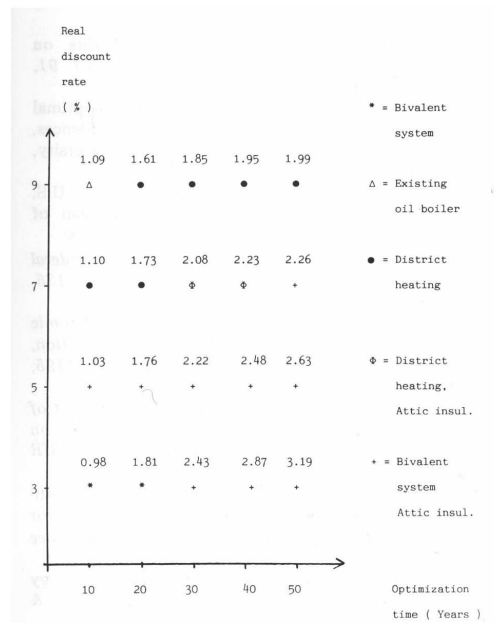
## KÄNSLIGHETSANALYS

Som nämndes inledningsvis känner man kanske inte till de exakta värdena på alla variabler som ingår i modellen. Genom att göra en skänslighetsanalys, dvs man ändrar ett eller flera värden i indatafilen och sedan optimerar en gång till kan man se hur mycket resultatet ändrar sig. Man kan dela in denna påverkan i tre grupper, en där en ökning av värdet i indatafilen ger en ökad LCC, en där detta ger en minskad LCC och en där ingen påverkan sker alls. Ett exempel på den första kategorin kan vara projektets livslängd. Ökar livslängden kommer däremot LCC att öka. Ökas i stället den reala räntan kommer LCC normalt att minska medan LCC på det optimala systemet blir oförändrad om isoleringskostnaden ökar, detta då isoleringen inte kom in som en lönsam åtgärd. Nu kan det dock vara så att om isoleringskostnaden istället minskar får detta till följd att isoleringen plötsligt blir lönsam och därför hamnar i en annan kategori av variabler. Genom att undersöka flera värden samtidigt kan man åskådliggöra påverkan grafiskt i ett diagram, se figur 3.

I figuren återfinns LCC för en byggnad som värden inne i diagrammet. För en ränta om 5 % och en livslängd på byggnaden om 30 år erhålls LCC till 2.22 MSEK. Notera att det inte är samma fall som studerats i tabell 1. Fjärrvärme och bjälklagsisolering är här det bästa alternativet. Så länge räntan är 5 % är denna lösning alltid optimal även om isolertjockleken förändras mellan de olika alternativen. Ökar däremot räntan till 7 % blir fjärrvärme fortfarande billigast, men isoleringen bortfaller helt. På motsvarande sätt kan alla andra variabler undersökas. Tyvärr är det en omfattande uppgift att utföra detta i praktiken då flera hundra variabler ingår som indata. På senare tid har vi därför försökt att använda statistiska metoder, bl. a. s.k. faktoranalys, för att nedbringa antalet nödvändiga beräkningar. Se referens [9] där de första resultaten presenteras.

## Referenser

- [1] Diczfalusy B. and Rapp B. A Model for Assessment of the Profitability of New Energy Technologies in Buildings. Technical report, Byggeforskningsrådet, Dokument D22, Stockholm, 1988. ISBN 91-540-4951-2.
- [2] Van Dyke J., Hu P. Determinants of Variation in Calculating a Discount Rate. *Energy*, 14(10):661–666, 1989. Pergamon Press.



Figur 3: Bivariat känslighetsanalys av projekttid och real kalkylränta, se referens [10]

- [3] Gustafsson Stig-Inge. The OPERA model. A computer model for optimal energy retrofits in multi-family buildings. The FORTRAN code. Rapport nr LiTH-IKP-R-613, 1990.
- [4] Gustafsson Stig-Inge. A Computer Model for Optimal Energy Retrofits in Multi-Family Buildings. The OPERA model. Technical report, Byggeforskningsrådet, Dokument D21, Stockholm, 1990.
- [5] Gustafsson S. I. och Karlsson B. G. Lönsamma Energisparåtgärder i 60-talets Flerbostadshus. Fallet Grevegårdsvägen. Technical report, Tekniska högskolan i Linköping, 1992. Rapport nummer LiTH-IKP-R-727.
- [6] Gustafsson S-I. Optimal energy retrofits on existing multi-family buildings. Avdelning Energisystem. Institutionen för Konstruktions- och Produktionsteknik. Tekniska Högskolan, Linköpings Universitet. Linköping., 1986. Licentiatavhandling nr 91. ISBN 91-7870-118-X.
- [7] Markus T.A. The Window as an Element in the Building Envelope; Techniques for Optimization. In , volume 2, Köpenhamn, Danmark, . CIB 79.
- [8] Sonderegger R., Cleary p., Garnier J. and Dixon J. CIRA Economic Optimization Methodology. Technical report, Lawrence Berkeley Laboratory, U.S.A., 1983.
- [9] Gustafsson S. I., Andersson S. och Karlsson B. G. Factorial Design for Energy System Models. *Energy, The International Journal*, 19(8), 1993.



- [10] Gustafsson S. I. *Life-Cycle Costing Related to the Refurbishment of Buildings*. Blackie Academic and Professional, Chapman & Hall, 1993. Kapitel 3 i boken "Life Cycle Costing for Construction", Redigerad av J. W. Bull.