

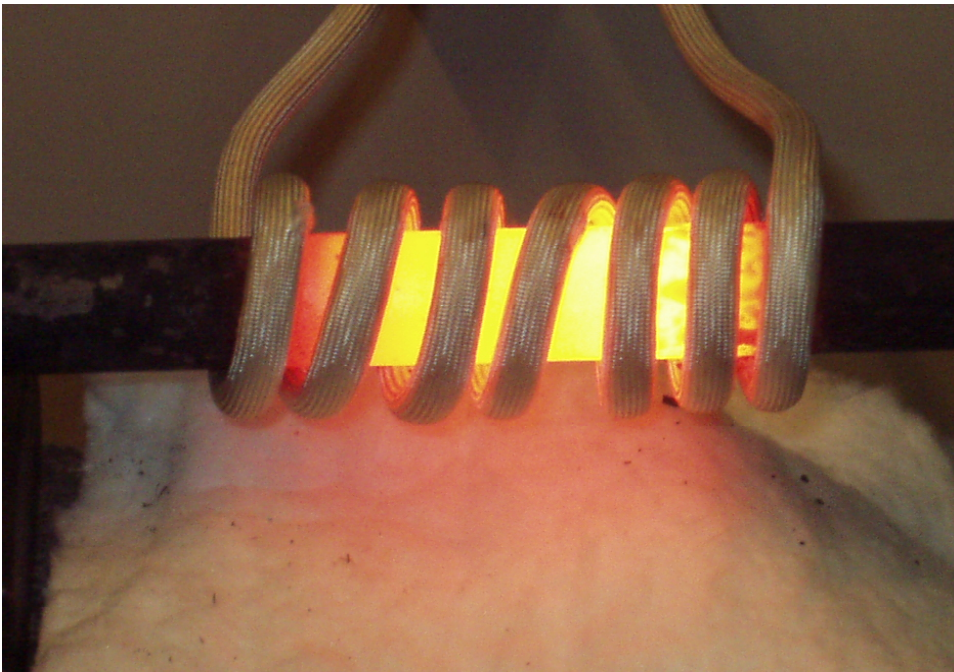
BIRCH & KROGBOE

## Optimering og udvikling af elovne

Elfor PSO 2003

Forskning og Udvikling indenfor  
effektiv elanvendelse

Projektnummer: 335-38



**B I R C H   &   K R O G B O E**

## Optimering og udvikling af elovne

### Elfor PSO 2003

### Forskning og Udvikling indenfor effektiv elanvendelse

### Projektnummer: 335-38

**Projektet er udarbejdet af:**

Mogens Johansson	Danske Energi Analyse A/S
John Moritzen	JM Projekt
Frede Blåbjerg	Institut for Energiteknik, AAU
Erling Aabo Andersen	E. Aabo Andersen A/S
Kåre Friis	Ib Obel Pedersen A/S
Steen Jønsson	Scandinavian Brake Systems A/S
Martin Lykke Jensen	Birch & Krogboe A/S

**DANSK ENERGI ANALYSE A/S****JM Projekt****AALBORG UNIVERSITET****AABO****IOP****SCANDINAVIAN BRAKE SYSTEMS AIS****Birch & Krogboe** 

Revision : G  
Revisionsdato: 30. oktober 2004  
Sagsnr. : 17955/005  
Projektleder : Martin Lykke Jensen  
Udarbejdet af : MLJ/mlj  
Godkendt af : John Moritzen

## Indholdsfortegnelse

<b>RESUME</b> .....	<b>5</b>
<b>1 INDLEDNING</b> .....	<b>8</b>
1.1 BAGGRUND OG FORMÅL MED PROJEKTET .....	8
1.2 PROJEKTINDHOLD .....	8
<b>2 OPVARMNINGSTEKNOLOGIER TIL OVNE</b> .....	<b>10</b>
2.1 TRADITIONEL MODSTANDBASERET OPVARMNING .....	10
2.1.1 <i>Teknologien</i> .....	10
2.1.2 <i>Materialer der kan opvarmes</i> .....	11
2.1.3 <i>Energieffektivitet</i> .....	11
2.2 INFRARØD OPVARMNING (IR) .....	12
2.2.1 <i>Teknologien</i> .....	12
2.2.2 <i>Materialer der kan opvarmes</i> .....	15
2.2.3 <i>Energieffektivitet</i> .....	15
2.3 INDUKTIONSOPVARMNING .....	16
2.3.1 <i>Teknologien</i> .....	16
2.3.2 <i>Materialer der kan opvarmes</i> .....	19
2.3.3 <i>Energieffektivitet</i> .....	21
2.3.4 <i>Et praktisk varmforsøg</i> .....	22
2.4 KONDUKTIV OPVARMNING.....	24
2.4.1 <i>Teknologien:</i> .....	24
2.4.2 <i>Materialer der kan opvarmes</i> .....	24
2.4.3 <i>Energieffektivitet</i> .....	25
2.5 HØJFREKVENSOPTVARMNING .....	25
<i>Teknologien</i> .....	25
2.5.2 <i>Materialer der kan opvarmes</i> .....	28
2.5.3 <i>Energieffektivitet</i> .....	29
2.6 MIKROBØLGEOPVARMNING .....	29
2.6.1 <i>Teknologien</i> .....	29
2.6.2 <i>Materialer der kan opvarmes</i> .....	30
2.6.3 <i>Energieffektivitet</i> .....	31
2.7 KORT SAMMENFATNING OVER DE FORSKELLIGE OPVARMNINGSMETODER.....	31
<b>3 KORTLÆGNING AF ELFORBRUG TIL ELOVNE DANSK ERHVERVSLIV</b> .....	<b>33</b>
3.1 INDLEDENDE FORUDSÆTNINGER.....	33
3.2 ELFORBRUG OPDELT PÅ BRANCHER .....	33
3.2.1 <i>Bagerforretninger (158120)</i> .....	33

3.2.2	<i>Træindustri (200000) og møbelindustri (361000)</i> .....	33
3.2.3	<i>Papirindustri (210000)</i> .....	34
3.2.4	<i>Fremstilling af rengøringsmidler m.v. (245070)</i> .....	34
3.2.5	<i>Plastbranchen (251122, 252400)</i> .....	34
3.2.6	<i>Jern- og metalindustri</i> .....	34
3.2.7	<i>Fremstilling af legetøj, guld- og sølvvarer m.v. (362060)</i> .....	35
3.3	SAMMENFATNING OVER ELFORBRUG FORDELT PÅ BRANCHE OG ANVENDELSE .....	35
<b>4</b>	<b>POTENTIALE FOR ELBESPARELSER</b> .....	<b>37</b>
4.1	TEORETISK POTENTIALE FOR FORBEDRING AF METODE.....	37
4.1.1	<i>Konventionel opvarmning</i> .....	37
4.1.2	<i>Infrarød opvarmning</i> .....	38
4.1.3	<i>Induktionsopvarmning</i> .....	38
4.1.4	<i>Dielektrisk opvarmning</i> .....	38
4.2	ENERGIBESPARELSESPOTENTIALE INDENFOR BRANCHER.....	41
4.2.1	<i>Bagerforretninger (158120)</i> .....	41
4.2.2	<i>Træindustri (200000)</i> .....	41
4.2.3	<i>Medicinalindustri (244000)</i> .....	42
4.2.4	<i>Fremstilling af rengøringsmidler m.v. (245070)</i> .....	42
4.2.5	<i>Plastbranchen (251122, 252400)</i> .....	42
4.2.6	<i>Jern- og metalindustrien (272030 – 352050)</i> .....	42
4.2.7	<i>Møbelindustri (361000)</i> .....	42
<b>5</b>	<b>CASES</b> .....	<b>44</b>
5.1	CASE OMKRING ELOPVARMET GENNEMLØBS TØRREOVN .....	44
5.1.1	<i>Indledende casebeskrivelse</i> .....	44
5.1.2	<i>Beskrivelse af emner, ovn og opvarmningsteknologi</i> .....	44
5.1.3	<i>Beregning af energitjeneste</i> .....	45
5.1.4	<i>Optimering af energiforbrug til tørreovn</i> .....	47
5.2	CASE OMKRING ELOPVARMET GENNEMLØBS HÆRDEOVN TIL PULVERLAK.....	50
5.2.1	<i>Indledende casebeskrivelse</i> .....	50
5.2.2	<i>Beskrivelse af emner, ovn og opvarmningsteknologi</i> .....	50
5.2.3	<i>Beregning af energitjeneste</i> .....	51
5.2.4	<i>Optimering af energiforbrug til hærdeovnen hos Broen Armatur</i> .....	55
5.3	CASE OMKRING ELOPVARMET SINTEROVN TIL BREMSEKLODSE .....	58
5.3.1	<i>Indledende casebeskrivelse</i> .....	58
5.3.2	<i>Beskrivelse af emner, ovn og opvarmningsteknologi</i> .....	58
5.3.3	<i>Beregning af energitjeneste</i> .....	59
5.3.4	<i>Optimering af energiforbrug til sinterovnen hos SBS</i> .....	61

5.4	CASE OMKRING OPTIMERING AF ELOPVARMET TØRREOVN TIL KLIPPE/LIME MASKINE .....	63
5.4.1	<i>Indledende casebeskrivelse</i> .....	63
5.4.2	<i>Beskrivelse af emner, ovn og opvarmningsteknologi</i> .....	63
5.4.3	<i>Beregning af energitjeneste</i> .....	64
5.4.4	<i>Optimering af energiforbrug til tørreovnen</i> .....	66
5.5	CASE OMKRING NYT LAKERINGSANLÆG HOS SAUER DANFOSS I NORDBORG.....	67
5.5.1	<i>Indledende casebeskrivelse</i> .....	67
5.5.2	<i>Beskrivelse af emner, ovn og opvarmningsteknologi</i> .....	67
5.5.3	<i>Beregning af energitjeneste</i> .....	69
5.5.4	<i>Optimering af energiforbrug til ovnen hos Sauer Danfoss</i> .....	70
<b>6</b>	<b>ANBEFALINGER TIL VIDERE ARBEJDE</b> .....	<b>71</b>
6.1	FORVENTET UDVIKLING AF ELFORBRUG TIL ELOVNE .....	71
6.2	ERSTATNING AF MODSTANDSOPVARMEDE GASBASEREDE OVNE.....	71
6.3	ANBEFALINGER OM VIDERE PERSPEKTIV UDFRA DETTE ARBEJDE .....	72
<b>7</b>	<b>KONKLUSION</b> .....	<b>73</b>
<b>8</b>	<b>REFERENCER</b> .....	<b>76</b>
	<b>BILAG 1: EKSEMPLER PÅ PRODUCENTER AF OVNE</b> .....	<b>77</b>

## Resume

Denne rapport dokumenterer de resultater, der er opnået gennem forprojektet "Optimering og udvikling af elovne". Projektet er gennemført under Elfor PSO ordningen i 2003, hvor en stor del af projektfinansieringen er opnået. Den resterende andel er sket gennem egenfinansiering fra samtlige af de medvirkende projektparter.

Rapporten henvender sig primært til bevillingsgiverne samt energirådgivere, herunder elskabernes energirådgivere. Sekundært henvender rapporten sig til ovnbyggere.

Rapporten omhandler opsamling og udvikling af viden omkring energioptimering af elovne imod mere direkte opvarmning, med det formål at minimere ovnenes tab, og dermed hæve virkningsgraden for selve energitjenesten.

Projektet består dels af en teoretisk undersøgelsesdel, hvor der redegøres for de forskellige teknikker, virkningsgrader, mv. Efterfølgende indeholder rapporten en række cases, der dokumenterer muligheder for besparelser samt metodikker til realisering af disse besparelser.

Rapportens kapitel 1 er en indledning til projektet. Heri indgår såvel baggrunden for projektet samt projektets indhold.

Kapitel 2 indeholder en beskrivelse af de mest anvendte teknologier, der anvendes indenfor elopvarmning. Hver teknologi indeholder en beskrivelse af:

1. Teknologien
2. Materialer som teknologien kan anvendes på
3. Energieffektivitet

Blandt de beskrevne teknologier er konventionel modstandsbaseret opvarmning absolut den mest anvendte. Hensigten med projektet var således også, at undersøge potentialet og mulighederne for at substituere konventionel modstandsbaseret opvarmning med én af de øvrige teknologier, der måtte være passende i den aktuelle situation. De øvrige beskrevne teknologier er følgende:

- Infrarød opvarmning.
- Induktiv opvarmning.
- Konduktiv opvarmning.
- Højfrekvensopvarmning (kapacitiv opvarmning).
- Mikrobølgeopvarmning.

Kapitel 3 er en kortlægning af elforbruget til opvarmning, opdelt på brancher samt slutanvendelserne opvarmning, tørring samt brænding/sintring. De overordnede resultater af kortlægningen indikerer, at det samlede elforbrug til de 3 slutanvendelser er ca. 320 GWh, hvoraf de ca. 200 GWh stammer fra ovne eller ovnlignende anlæg. Dette forbrug fordeler sig på mange brancher, mens størstedelen af forbruget ligger på relativt få brancher:

- Bagerforretninger (27%).
- Træindustri (12%).
- Plastindustri (10%).
- Jern- og metalindustri (32%).
- Møbelindustri (9%).

Disse 5 brancher står således for ca. 90% af elforbruget omsat i ovne.

I kapitel 4 beskrives de vurderede muligheder for elbesparelser opdelt på brancher. I alt vurderes besparelsemulighederne til at ligge i intervallet 13-52 GWh, svarende til 7-26% af branchernes elforbrug til ovne.

De anslåede forbedringsmuligheder kan tilvejebringes enten ved at optimere/forbedre den eksisterende teknologi i den eksisterende ovn, eller ved at skifte teknologi. Sidstnævnte vil kræve investering i nyt udstyr. Generelt er det vurderet, at de eksisterende teknologier kan forbedres med 10-20%.

De anslåede besparelser i elforbrug skal samtidig vurderes i forbindelse med produktivitetsstigning, kvalitet og pris. For mange af de direkte opvarmningsmetoder er der mulighed for langt kortere procestid og dermed højere produktivitet.

I kapitel 5 gennemgås 5 cases, der viser mulighederne for at øge effektiviteten gennem en række forholdsvis simple tiltag. I fire af casene fokuseres primært på optimering af eksisterende ovne, idet det har vist sig ikke at være lønsomt at udskifte ovne alene med energibesparelsesformål for øje. Samtlige 4 cases viser, at der er store muligheder for besparelser på elovne. Samtlige cases viser, at det er muligt at hæve virkningsgraden for energitjenesten med en faktor 2-5 gennem simple tiltag, der alle har en meget kort eller ingen tilbagebetalingstid. Den femte case viser et eksempel på, hvor markant energieffektiviteten kan øges ved at tænke anderledes – når en eksisterende ovn står for at skulle udskiftes.

I kapitel 6 er der givet en række anbefalinger til det videre arbejde. Resultatet af disse anbefalinger er følgende:

Der er næppe behov for en større forsknings- og udviklingsindsats i elovnes opvarmnings-teknologier. Den fortsatte billiggørelse af effektelektronikken vil formentlig gradvis gøre de

nye teknologier til direkte opvarmning mere interessante i takt med de forbedrede og billigere komponenter til processtyring.

Der er imidlertid brug for en øget indsats indenfor formidling og demonstration, da der individuelt kan opnås store besparelser. Det vil således være nyttigt, fx via elselskabernes energirådgivningen, at virksomheder med elovne orienteres både om mulighederne for at forbedre deres eksisterende ovne og for de spændende perspektiver ved at skifte til direkte opvarmning. Her tænkes ikke alene på elbesparelser, men nok så meget på de afledte gevinster i form af pladsbesparelser og muligheder for større produktion via den kortere procestid.

I forsyningsselskabernes fælles energirådgivning bør der også gøres opmærksom på det langt større effektiviseringspotentiale, der findes ved at udskifte naturgasopvarmede ovne til direkte opvarmning. Der er langt flere gasovne i industrien end elovne, og det samfunds- og virksomhedsøkonomiske potentiale ved energieffektivisering på dette område er tilsvarende større.

Kapitel 7 er konklusionen over dette arbejde. Den vigtigste konklusion er, at det relativt simpelt er muligt at opnå store individuelle besparelser på anlæg – dels gennem effektivisering af de eksisterende processer, men specielt gennem skift af teknologi. Anlægsinvesteringen ved at anvende én af nye teknikker er dog så stor, at en energibesparelse ikke alene kan dække investeringen med en rimelig tilbagebetalingstid. Et teknologiskifte skal derfor, udover anslåede besparelser i elforbrug, sammenholdes med muligheden for produktivetsstigning, kvalitetsløft og gennemløbstid. For mange af de direkte opvarmningsmetoder er der mulighed for langt kortere procestid og dermed højere produktivitet.



## 1 Indledning

### 1.1 Baggrund og formål med projektet

Når der laves en analyse af energiforbruget på en typisk konvektionsbaseret elopvarmet ovn til tørrings-, opvarmnings- eller hærtningsformål, udgør energitjenesten ofte en meget lille del af det samlede energiforbrug - fra 10–30% og i enkelte tilfælde rent faktisk under 1%. Resten af energiforbruget er typisk tab i kanalafkast, stråling og konvektion, indløb- og udløb samt evt. conveyer- eller transportbåndstab.

Ved at levere energitjenesten mere direkte i det produkt der skal opvarmes, kan man reducere tabene til afkast, stråling og konvektion, ind- og udløb samt transportbånd.

Den mere direkte opvarmning kan leveres med induktion, modstandsopvarmning eller dielektrisk opvarmning i form af mikrobølgeopvarmning og højfrekvensopvarmning. Disse opvarmningsformer er forbundet med højere sekundærforbrug til spoler og forkoblingsudstyr. Det samlede energiforbrug til processen bliver alligevel lavere, på grund af færre øvrige tab.

De ovnbyggere, der leverer ovne til industrien i Danmark, leverer i stor stil stadig traditionelle modstandsbaserede ovne hvor energien frembringes via varmespiralerne i ovnenes top eller sider. I den senere tid er der dog i stigende grad produceret elovne med strålevarme, som virker mere direkte, men stadig har høje varmetab.

Når der sjældent leveres ovne baseret på induktion, modstandsopvarmning eller dielektrisk opvarmning, skyldes det dels den højere pris for ovnen, men sandsynligvis også mangel på viden omkring mulighederne ved at benytte disse relativt nye teknologier til forskellige materialer og temperaturniveauer.

I dette projekt er der lagt op til, at der skaffes tilstrækkelig viden til, at danske ovnbyggere i højere grad, kan producere ovne, der benytter mere direkte opvarmning, og dermed reducere øvrige varmetab, som forekommer i traditionelle ovne. Derudover søger projektet også, at formidle denne viden til industrien selv og til industriens rådgivere, således at der sker en stigende efterspørgsel på disse produkter, en efterspørgsel som også rettes til udenlandske producenter af ovne.

### 1.2 Projektindhold

Projektet bestod oprindeligt af en teoretisk del og en praktisk del. I den teoretiske del skal grundlaget for direkte opvarmning undersøges. Denne viden sammenholdes med en kortlægning af den nuværende bestand af elovne i Danmark, hvilket gør det muligt at estimere

hvilke typer af ovne, der skal sættes på at konvertere til en mere direkte opvarmning. I den praktiske del skulle udvalgte ovne ombygges til at anvende mere direkte opvarmning.

Under behandlingen af projektansøgningen blev den praktiske del imidlertid fravalgt i første omgang, idet bevillingsgiveren ønskede at se resultatet af de teoretiske undersøgelser – primært for at opnå indblik i mulighederne for elbesparelser.

Den teoretiske del bestod oprindeligt også af en mindre laboratedel. Formålet med denne del var, at foretage forsøg med henblik på at opnå yderligere viden omkring, hvilke typiske ovne der kan anvendes til mere direkte opvarmning. Undervejs i projektet viste det sig dog, at der ikke var et særligt behov for at udføre disse undersøgelser, men i stedet opnå information om besparelsemuligheder gennem cases. Af denne årsag er fasen med laboratorietests nedprioriteret.

Projektbeskrivelsen indeholdt følgende 5 faser, hvoraf fase 4 er nedprioriteret, mens information gennem cases (indeholdt i fase 2,3 og 4) er blevet opprioriteret:

1. Teoretisk afdækning af nødvendigt energiforbrug ved direkte opvarmning.
2. Afdækning af elforbrugets fordeling til elovne opdelt på brancher og teknologi.
3. Teoretisk afdækning af mulighed for reduktion af elforbrug ved skift af teknologi.
4. Test af direkte opvarmningsformer i laboratorium, mht. materialer, temperaturer mm.
5. Rapportering og formidling.

Der henvises til projektansøgningen /1/ og /2/, for at opnå yderligere kendskab til projektbeskrivelserne. Med udgangspunkt i denne korte beskrivelse af projektet, omhandler resten af denne rapport resultaterne af projektafviklingen.

## 2 Opvarmningsteknologier til ovne

Som beskrevet i indledningen, udgør energitjenesten ved anvendelse af traditionelle ovne til tørrings-, opvarmnings- eller hærdningsformål, ofte en meget lille del af det samlede energiforbrug – med andre ord er virkningsgraden for energitjenesten meget ofte lav. Der er typisk tale om 5–30%, men i enkelte tilfælde kan virkningsgraden for energitjenesten være mindre end 1%. Resten af energiforbruget er typisk tab i kanalafkast, stråling og konvektion, indløb- og udløb, samt evt. conveyor- eller transportbåndstab.

Anvendelse af direkte opvarmning kan ofte reducere disse tab væsentligt. Dette kapitel har til formål at redegøre for de mest almindelige direkte opvarmningsmetoder, deres mulige anvendelse samt deres energieffektivitet. Når dette vurderes som nødvendigt skyldes det, at de forskellige metoder ofte blandes sammen. Ligeledes er kendskabet til disse metoder og deres anvendelsesmuligheder meget begrænsede. Endelig er de forskellige typer af opvarmning mest hensigtsmæssige i forskellige brancher. Det er derfor vigtigt at identificere, hvilken type direkte opvarmning man bør satse på i afhængighed af branchen.

Udover en beskrivelse af de direkte opvarmningsformer, er der for helhedens skyld lavet en kort gennemgang af traditionel konvektionsbaseret opvarmning. De typer opvarmning der behandles i det følgende er således:

1. Traditionel modstandsbaseret opvarmning.
2. IR-opvarmning.
3. Induktionsopvarmning.
4. Konduktiv opvarmning.
5. Højfrekvensopvarmning (kapacitiv opvarmning).
6. Mikrobølgeopvarmning.

Fælles for opvarmningsformerne nævnt under pkt. 2-6 er, at de opvarmer emnerne direkte, og således ikke gør brug af luften i ovnrummet som varzebærer. Herved vil luften i ovnrummet kun blive opvarmet som følge af strålings- og konvektionstab fra emnerne, hvilket resulterer i en lavere ovntemperatur, som igen medfører færre tab. Hertil kommer, at den direkte opvarmning ikke har væsentlig opstartstid, samt at den kan stoppe momentant, hvorfor dette også medfører besparelser på driften.

### 2.1 Traditionel modstandsbaseret opvarmning

#### 2.1.1 Teknologien

Den traditionelle elopvarmede ovn benytter varmestave, som er monteret på elovnens sider og top. Elvarmestavene består normalt af vikledede konstantantråde eller nikkel-chrom legere-

de tråde, som påtrykkes en spænding, hvorved de opvarmes. Varmestavene opvarmer luften i ovnrummet til den ønskede temperatur. Luften overfører herefter, evt. ved hjælp af cirkulatorer, sin energi til de emner, der skal opvarmes. Temperaturen i ovnrummet skal være højere end emnernes sluttemperatur, da der ellers ikke kan overføres tilstrækkelig med energi til emnerne.

### 2.1.2 Materialer der kan opvarmes

Alle materialer kan opvarmes i den traditionelle elopvarmede konvektionsovn. Temperaturbegrænsningen ligger helt oppe omkring 2.000°C og der er ingen begrænsninger i form.

### 2.1.3 Energieffektivitet

Energieffektiviteten i en konventionel elopvarmet ovn er normalt lav. Det skyldes, at der tabes meget energi til omgivelserne som følge af, at ovnrummet er fuldt opvarmet. Det er ikke ualmindeligt, at den energi, der afsættes til opvarmning af emnerne i ovne kun udgør 5-30% af den tilførte energi til ovnen, i enkelte tilfælde ned til 1%. Resten er tab, som typisk kan være:

- Tab ved ovnåbning.
- Tab i udsugning/afkast.
- Tab ved stråling og konvektion fra ovnens overflade.
- Tab ved evt. bånd/conveyorsystem ind og ud af ovnen.

#### **Tab ved ovnåbninger**

Uanset om ovnen kører som batch eller ved kontinuerlig drift, vil der være et tab ved ovnens åbninger. Det skyldes, at de emner der skal opvarmes, skal ind og ud af ovnen, og at der herved lukkes kold luft ind i ovnen. Denne uønskede erstatningsluft opvarmes til ovnens driftstemperatur. Hertil kommer evt. strålingstab til omgivelserne fra ovnens åbninger. Der tabes ved døråbning fra 5 til 10% af ovnens tilførte eleffekt.

#### **Tab i udsugning/afkast**

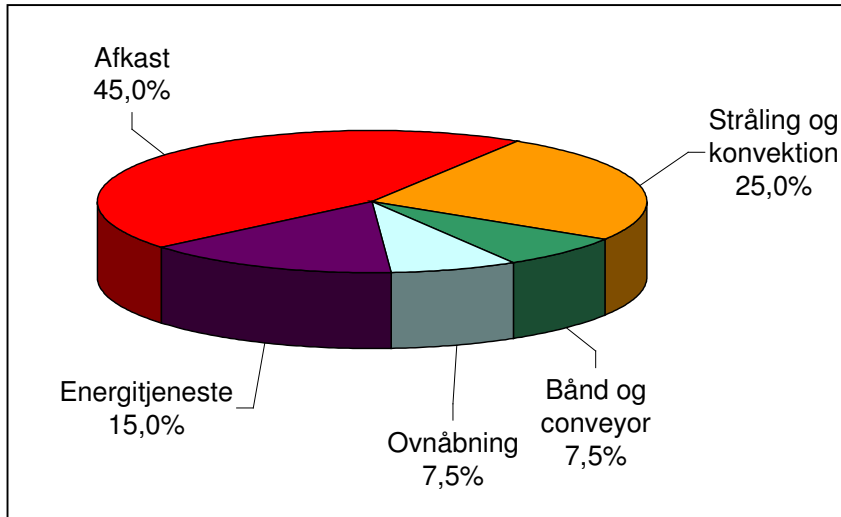
Da der ofte er tale om afdampning af opløsningsmidler eller andre stoffer, som er sundhedsskadelige eller som kan skabe eksplosionsfare ved opvarmning, er der som oftest udsugning fra ovnrummet. Den varme - og ofte fugtige - luft repræsenterer et væsentligt tab af energi - ofte 40-50% af ovnens tilførte effekt.

#### **Tab ved stråling og konvektion fra ovnens overflade**

Da ovnrummet er varmt, vil ovnens overflade uanset en eventuel god isolering være varm. Herved tabes der varme til omgivelserne i form af stråling og konvektion. Typisk tabes der 20-30% af ovnens tilførte eleffekt til stråling og konvektion fra ovnens overflade.

### Tab ved evt. bånd/conveyorsystem ind og ud af ovnen

Hvis der eksempelvis er et endeløst bånd/conveyorsystem ind og ud af ovnen, tabes der energi idet det varme bånd afkøles udenfor ovnen. Når båndet returnerer i ovnen, vil det atter opvarmes inde i ovnen. Herved tabes der typisk 5-10% af den tilførte eleffekt. Figur 2.1 viser resultatet af en energibalance for en typisk konvektionsovn. Som det ses af figuren, udgør energitjenesten en lille del af den samlede tilførte effekt til ovnen, mens resten er tab. Fælles for alle tabene er ovnens varme lufttemperatur, som er skyld i de store tab. Hvis man derfor vil undgå de store tab er det nødvendigt at undgå den høje temperatur for ovnluften.



Figur 2.1. Typisk energibalance for en elopvarmet konvektionsovn.

## 2.2 Infrarød opvarmning (IR)

### 2.2.1 Teknologien

Ved infrarød opvarmning (IR) benyttes, at ethvert varmt legeme udstråler energi til omgivelserne. Desto højere temperatur emnet har i forhold til omgivelserne, desto højere er den energi der udstråles, og desto lavere er bølgelængden for strålingen. Den synlige farve på infrarød opvarmning ses i tabel 2.1 herunder som funktion forskellige temperaturer.

Temperatur	Farve
525 [°C]	Svag rød
760-815 [°C]	Meget rød
980-1040 [°C]	Hvid eller hvidlig

Tabel 2.1. Synlig farve på infrarød opvarmning som funktion af temperaturen.

Elementerne der anvendes i strålevarmeovne er metalstave. Disse metalstave påtrykkes en elektrisk spænding, hvorved der løber en elektrisk strøm igennem dem, hvilket får dem til at gløde. Elementerne har en maksimal temperatur, som – for visse elementer – ses af tabel 2.2 herunder sammen med en beskrivelse af deres fordele og ulemper.

Materiale	Maksimal temperatur [°C]	Fordele / ulemper
Nikkel/chrom	1.100	Høj temperatur, høj resistivitet, konstant resistivitet, god modstand mod elementoxidation
Jernlegeringer	1.300	Høj temperatur, høj resistivitet, god modstand mod elementoxidation, elementets mekaniske styrke aftager med alderen
Nikkel-jern legeringer	"Lav"	Lav temperatur, lav resistivitet, positiv temperatur modstandskoefficient
Molybdæn	1.400	Høj temperatur, lav resistivitet, lange og fine elementer er påkrævet, meget skiftende modstandskoefficient med temperaturen
Tungsten	2.200	Samme som molybdæn, men med endnu højere temperatur
Grafit	1.650	Høj temperatur
Siliciumcarbide	1.500	Høj temperatur, høj resistivitet, meget sprødt

Table 2.2. Maksimal temperatur samt fordele/ulemper for elementer som funktion af elementmaterialet.

De fleste strålevarmeelementer har en kappe omkring selve elementet der beskytter det. Kappen er, i de fleste tilfælde, af glas hvorved der mistes noget af den udstrålede energi. Det bedste materiale er kvartsglas, som kun tilbageholder 10% af den udstrålede energi fra elementet. Tabel 2.3 herunder viser de typiske infrarøde strålevarmeelementer og deres karakteristika, i form af: Afgivet effekt, overfladetemperatur og bølgelængdespektret for den udsendte energi. Den angivne effekt er praktisk afgivet effekt for det areal som elementerne dækker. Spektret i bølgelængden dækker over den fordeling, hvor der opnås 95% af totaleffekten.

Materiale	Kappe	Effekt [W/cm <sup>2</sup> ]	Overflade [°C]	Bølgelængde for 95% af totaleffekten [µm]		
				Maks.	Kort	Lang
Tungsten m. keramisk reflektor	Kvartsrør	12,4	939	2,4	1,2	10,3
FeCrAl m. baggrundsisolering	Kvartsplade	6,2	747	2,9	1,4	12,2
Nikkel/chrom	Kvartsrør	5,6	720	2,9	1,5	12,6
Nikkel/chrom m. metalreflektor	Ingen	5,2	702	3,0	1,5	12,8
Nikkel/chrom	Keramisk	4,7	676	3,1	1,5	13,1
FeCrAl m. baggrundsisolering	Ildfast mat.	3,9	633	3,2	1,6	13,8
Rørformet Nikkel/chrom m. metalreflektor	Ingen	3,6	615	3,3	1,6	14,0
Færdige IR-lamper horisontal	Glas	2,3	525	3,7	1,8	15,6
Færdige IR-lamper vertikal	Glas	1,2	398	4,3	2,2	18,6

Table 2.3. Data for typiske strålevarmeelementer. Kilde: /3/.

For at opnå en optimal udnyttelse af den udstrålede energi fra strålevarmeelementerne, er det vigtigt, at der vælges elementer, der udstråler ved en bølgelængde, som materialet der skal modtage strålingen - er modtagelig overfor. Forskellige materialer er mere eller mindre modtagelige for forskellige bølgelængder. Hvis ikke strålevarmen absorberes af det materiale der skal opvarmes, men blot reflekteres, vil strålingen forsvinde ud i den øvrige del af ovnen, og i sidste ende blive til varm luft, hvilket er at betragte som tab. Alle materialer har en ab-

sorptivitet der er mindre end 1, idet dele af strålingen altid reflekteres. En rimelig god tilnærmelse er, at absorptiviteten er identisk med emissiviteten (gælder altid for grå legemer). Tabel 2.4 viser forskellige materials emissivitet.

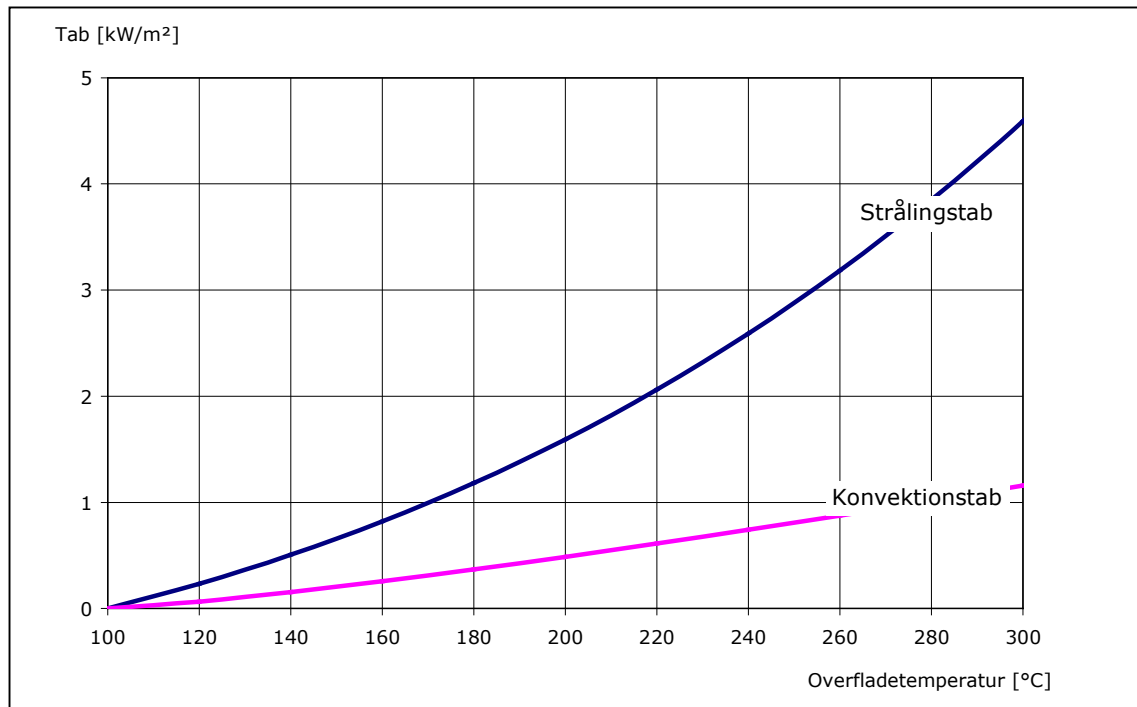
Materiale	Emissivitet		
Nikkel/chrom (80/20)	0,87 (100°C)	0,87 (600°C)	0,89 (1.300°C)
Ikke-oxideret aluminium	0,02 (25°C)	0,03 (100°C)	0,06 (500°C)
Oxideret aluminium	0,11 (200°C)	0,19 (600°C)	-
Poleret messing (73/23)	0,03 (250°C)	0,03 (350°C)	-
Oxideret messing	0,61 (200°C)	0,60 (400°C)	0,61 (600°C)
Ikke-oxideret kulstof	0,81 (25°C)	0,81 (100°C)	0,79 (500°C)
Grafit	0,76 (100°C)	0,75 (300°C)	0,71 (500°C)
Oxideret kobber	0,87 (40°C)	0,83 (260°C)	0,77 (540°C)
Poleret kobber	0,03 (40°C)	-	-
Ikke-oxideret jern	0,05 (100°C)	-	-
Oxideret jern	0,74 (100°C)	0,84 (500°C)	0,89 (1.200°C)
Stærkt oxideret støbejern	0,95 (100°C)	0,95 (250°C)	-
Poleret stål (316)	0,28 (25°C)	0,57 (230°C)	0,66 (950°C)
Galvaniseret zink	0,28 (40°C)	-	-
Poleret zink	0,02 (40°C)	0,03 (260°C)	0,06 (1.100°C)

Tabel 2.4. Forskellige værdier af emissiviteter for forskellige stoffer ved forskellige temperaturer /2/.

Strålevarmeelementerne vil ikke kun nøjes med at stråle på de emner der skal opvarmes. De fleste emner vil stråle i en vinkel op til 90°C ud fra deres fastgørelsespunkt. Hermed vil også andre materialer modtage energi - det være sig vægge, bånd for emnefremføring mm. Det er derfor vigtigt, at de emner, der skal modtage strålingen, udgør så stort et areal som muligt ud af det samlede areal der bestråles af elementerne.

Da energien, som overføres til emnerne, skal absorberes gennem emnernes overflade, vil deres overfladetemperatur blive høj. Som følge heraf, vil emnerne have et højt tab til omgivelserne i form af strålingstab og konvektionstab, idet det tager en vis tid, før emnerne er gennemvarme. Dette tab vil langsomt opvarme luften i ovnrummet, hvorved tabet fra ovnen, i form af infiltrationstab og udsugningstab, øges. Det kan betyde, at IR-opvarmning ved høje sluttemperaturer for emnerne medfører en lav virkningsgrad for selve energitjenesten, på trods af en effektiv og direkte opvarmningsform.

Figur 2.2 viser strålings- og konvektionstab fra emner i en ovn, hvor ovntemperaturen er 100°C. Desto højere temperatur emnerne opnår, desto mere energi tabes der til ovnrummet. Bemærk hvordan specielt strålingstabet vokser ved stigende temperaturer.



Figur 2.2. Strålings- og konvektionstab fra emner i en ovn, hvor ovntemperaturen er 100°C.

### 2.2.2 Materialer der kan opvarmes

Strålevarme kan anvendes til de fleste materialer. Det er dog ikke velegnet til meget blanke materialer, da disse ikke vil være i stand til at modtage den udsendte stråling. Disse materialer bør opvarmes med én af de øvrige teknologier. Herudover vil strålevarme kun ramme og opvarme materialet på de sider, som vender mod strålevarmeelementerne. Det betyder, at meget rumlige emner kan være vanskelige at opvarme tilstrækkeligt ensartet med strålevarme.

### 2.2.3 Energieffektivitet

Energieffektiviteten ved strålevarmeovne er normalt høj, idet næsten al energien der dannes og forbruges i strålevarmeelementerne, sendes af sted som strålevarme. For at den samlede virkningsgrad skal være høj kræver det imidlertid også, at de emner som skal modtage opvarmningen kan modtage og absorbere så meget som muligt af den udsendte energi.

Der er målt på en IR-ovne til pulverlakering. Denne ovn udviste dog ikke en markant højere virkningsgrad end traditionelle konvektionsopvarmede ovne. En anden måling på en klippe- limemaskine viste imidlertid en effektivitet på 35% efter optimering. I forbindelse med disse målinger skal det pointeres, at en væsentlig forudsætning for en høj effektivitet er, at arealet af emnerne skal udgøre en stor andel af det areal, som strålevarmeelementerne bestråler. I modsat fald vil energien ellers ramme indersiden af ovnen og blot før til opvarmning af luften



i ovnen. Såfremt dette sker, er strålevarme ikke mere effektiv end traditionel konvektionsopvarmning.

## 2.3 Induktionsopvarmning

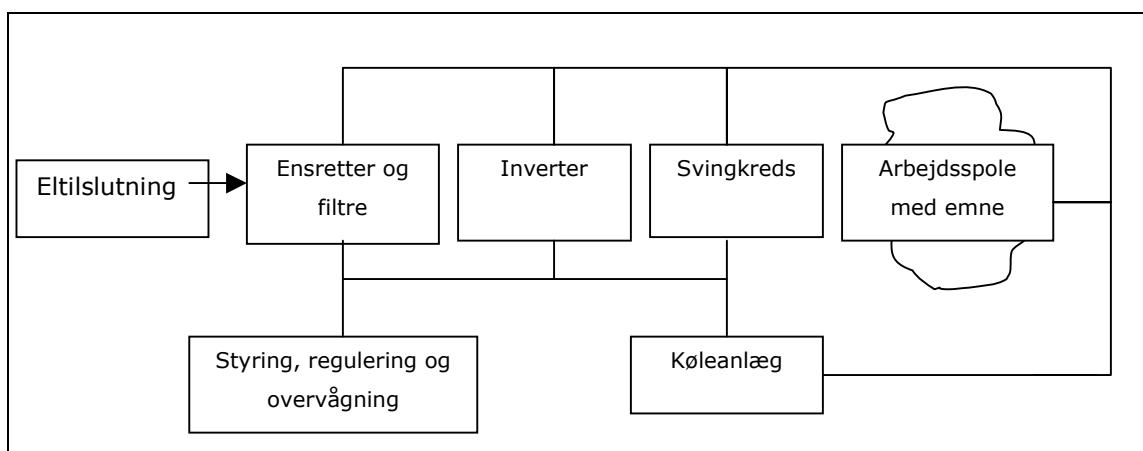
### 2.3.1 Teknologien

Når en spole tilføres en strøm, dannes et magnetfelt i og omkring spolen. Placeres et elektrisk ledende emne i magnetfeltet, induceres en elektrisk strøm i emnet, hvilket resulterer i, at der overføres energi til emnet, hvorved emnet opvarmes. Ved induktionsopvarmning er der således ingen direkte kontakt mellem emne og energikilde. Da energien overføres elektromagnetisk, kan energikilden (spolen) være kold, idet processen ikke beror på en temperaturforskel mellem varmekilde og emne. Figur 2.3 viser et eksempel på en induktionsovn.



Figur 2.3. Typisk induktionsanlæg.

Induktionsanlægget består af en række hovedkomponenter, vist i figur 2.4. Induktionsanlægget - eksklusiv køleanlæg og emne - kaldes samlet for en generator. Vekselstrømsforsyningen ensrettes ved hjælp af dioder (converter). I inverteren omdannes jævnspændingen atter til vekselspænding, men med en anden frekvens, der næsten altid er højere. Vekselspændingen tilføres svingkredsen, der dels er afstemt til arbejdsfrekvensområdet for inverteren, og dels sørger for tilpasning mellem inverterens udgangsimpedans og belastningens impedans (spole med emne). Der findes mange varianter af induktionsanlæggets opbygning, som hver har deres fordele og ulemper i forhold til den enkelte anvendelse.



Figur 2.4. Induktionsanlæggets hovedkomponenter.

Inverteren kan være opbygget med forskellige typer halvledere, afhængig af effekt og - specielt - hvilket frekvensområde, generatoren skal arbejde i. Grænserne er flydende, og ændres i takt med komponentudviklingen, men følgende er almindeligt:

- Thyristorer: Op til ca. 10 kHz.
- Bipolare Transistorer: Op til ca. 50 kHz.
- IGBT transistorer: Op til ca. 150 kHz.
- MosFet transistorer: Op til ca. 1 MHz.

Over 0,5-1 MHz anvendes den klassiske rørgeneratorer, som strengt taget ikke kan beskrives ved ovenstående blokdiagram, idet inverter og svingkreds er slået sammen til et oscillatorkredsløb.

Når rørgeneratoren ikke anvendes, hvis det er muligt at anvende en anden type, skyldes det at dens virkningsgrad er lavere og fremstillingsomkostningerne større. Endelig er det aktive element - senderrøret - kostbart og har en begrænset levetid. Der er dog visse opgaver, hvor rørgeneratoren foretrækkes.

Som beskrevet tidligere, anvendes vekselspænding til induktionsopvarmning. Årsagen er, at induktion er afhængig af strømændringer. Tilføres en spole jævnstrøm, vil strømmen stige indtil den når en fast værdi. Under denne periode opbygges et magnetfelt omkring spolen, og der induceres en strøm i kernen (emnet). Når den faste værdi nås, sker ingen ændring i magnetfeltet, og der induceres dermed ingen strøm i emnet.

Den strøm, spolen inducerer i emnet, vil være størst i overfladen, og aftage eksponentielt med afstanden til overfladen. Den afstand fra overfladen, hvor strømstyrken er aftaget til  $1/e = 37\%$  af værdien i overfladen, betegnes som indtrængningsdybden "d". Indtrængningsdybden afhænger af frekvensen, emnets permeabilitet og specifikke modstand, hvoraf de to sidstnævnte er temperaturafhængige materialekonstanter (se afsnit 2.3.2).

I mange tilfælde er indtrængningsdybden af marginal betydning, idet den termiske varmeledning bort fra overfladen udjævner temperaturen. Men i visse tilfælde skal der tages hensyn til dette. Hvis emnedimensionerne er i samme størrelsesorden som indtrængningsdybden, vil virkningsgraden falde. Dette skyldes, at strømmen induceret fra den ene side af spolen er modsat rettet strømmen induceret fra den anden side af spolen. Såfremt at der er tale om et lille emne, vil de inducerede modsatrettede strømme overlape i midterregionen og udligne hinanden. Som tommelfingerregel vil reduktionen være ubetydelig, når emnedimensionen er 4 gange indtrængningsdybden.

Men også spolens og emnets geometri spiller ind ved indtrængningsdybden. For eksempel kan et tyndvægget rør udmærket opvarmes med en omsluttende cylindrisk spole ved en

frekvens, hvor indtrængningsdybden er større end vægtykkelsen, da der i et rør ikke er nogen midterregion, hvor strømmene kan overlappe. Såfremt en tråd eller en cylinder skal opvarmes, skal der derimod tages hensyn til indtrængningsdybden.

Geometrien spiller også ind på en anden måde. Feltet fra spolen er orienteret, så virkningsgraden afhænger af "på hvilken led" spolen kobler til emnet. Et eksempel ses ved opvarmning af tynde plader. I stedet for at placere pladen "inde" i en oval spole, placeres pladen "mellem" spolens vindinger, hvorved der kan opnås god virkningsgrad ved lavere frekvenser.

I en række tilfælde bruges indtrængningsdybdens afhængighed af frekvensen til at optimere opvarmningsprocessen. I tilfælde af overfladehærdning, hvor man ønsker at det underliggende materiale skal være sejt, er det et krav, at kun overfladen bliver varm. Der vælges så en høj frekvens. I tilfælde, hvor der ønskes en hurtig gennemvarmning, kan der vælges en lav frekvens med stor indtrængningsdybde, på bekostning af virkningsgraden. Indtrængningsdybden beregnes efter:

$$d = 50.330 \cdot \sqrt{\frac{R}{P \cdot F}} \quad [2.1]$$

hvor:

- d er indtrængningsdybde [mm].
- R er materialets resistivitet [Ohm·cm].
- P er materialets relative permeabilitet [-].
- F er frekvensen [Hz].

Det fremgår, at indtrængningsdybden øges, når modstanden stiger, og reduceres, når frekvens eller permeabiliteten øges. Med undtagelse af frekvensen, er disse størrelser i større eller mindre grad temperaturafhængige. Permeabiliteten er derudover afhængig af fluxtætheden, hvilken atter er en funktion af effektniveauet. Med disse begrænsninger, giver tabel 2.5 et godt billede af forholdene.

Materiale	Frekvens					
	50 Hz	1 kHz	10 kHz	100 kHz	1 MHz	10 MHz
Kobber	7,62	2,03	0,64	0,20	0,065	0,020
Aluminium	11,43	3,05	0,96	0,31	0,089	0,030
Messing	17,48	4,57	1,44	0,46	0,139	0,046
Stål, kold	16,51	3,81	1,20	0,38	0,102	0,038
Stål, $T > T_{\text{Curie}}$	81,28	19,05	6,02	1,91	0,610	0,191
Grafit, ren	203,20	43,18	13,64	5,05	1,270	0,508

Tabel 2.5. Data for indtrængningsdybde [mm] som funktion af frekvens og materialetype ifølge /4/

### 2.3.2 Materialer der kan opvarmes

Forudsætningen for induktiv opvarmning er, at materialet er elektrisk ledende. Dette gælder primært ved opvarmning af metaller, som udgør den altoverskyggende del af applikationerne, men gælder også for en række ikke-metaller. Eksempler på ikke-metaller er grafit og silicium karbid, der anvendes til digler i smelleanlæg samt kulstof kompositmaterialer. På eksperimentelt plan er opvarmning af elektrolytiske væsker foretaget induktivt.

Et materiales magnetiske permeabilitet er forholdet mellem det magnetfelt materialet udsættes for, og den fluxtæthed som opstår i materialet. Ved magnetisk flux forstås magnetiske kraftlinjer, og ved fluxtætheden antallet af kraftlinjer der gennemskærer en arealenhed. Den relative permeabilitet er forholdet mellem permeabiliteten i det frie rum og et givet materiales permeabilitet.

Metaller og legeringer kan opdeles i 3 grupper: Ferromagnetiske, paramagnetiske og diamagnetiske.

- Diamagnetiske metaller vil have relative permeabiliteter som er mindre en 1, og vil dermed sprede de magnetiske kraftlinjer. Det mest diamagnetiske materiale der kendes er Bismut, men også Aluminium er svagt diamagnetisk.
- Paramagnetiske metaller udgør langt størsteparten og har relative permeabiliteter mellem 1 og 10, hvilket vil sige, at de har en tendens til at koncentrere de magnetiske kraftlinjer.
- Ferromagnetiske materialer har relative permeabiliteter over 10 - for visse legeringer over  $10^6$ . Blandt dem er de metaller, som vi til daglig omtaler som magnetiske, så som jern/stål, nikkel og kobolt m.fl.

Når det gælder induktionsopvarmning er den store forskel mellem materialerne om de er ferromagnetiske eller ikke-ferromagnetiske.

#### **Ferromagnetiske materialer**

Når ferromagnetiske materialer udsættes for et vekslende magnetfelt, der inducerer en vekselstrøm i emnet, er der populært sagt to årsager til opvarmning:

1. Det vekslende magnetfelt vil bevæge molekylerne i metallets krystalstruktur, og molekylbevægelserne vil dermed skabe varme. I mange sammenhænge betegnes dette hysterese-tab.
2. Magnetfeltet inducerer som nævnt en strøm i emnet. Da emnet er ledende, men har en indre modstand, opstår der et tab, der resulterer i varmeudvikling. Dette betegnes ofte som Joule effekten.

Den grundlæggende Joule effekt skyldes egentlig Ohms lov om effekttab:

$$P = R \cdot I^2 \quad [2.2]$$

hvor:

- P er effektabet [W].
- R er emnets specifikke modstand [Ohm].
- I er den inducerede strøm [Ampere].

I mange fremstillinger af induktionsopvarmning illustreres dette ved, at arbejdsspølen siges at udgøre primærvindingen i en transformator, medens emnet der opvarmes, udgør en kortsluttet sekundærvinding. Forholdet mellem bidragene fra de to fænomener afhænger af materialets magnetiske egenskaber, og vil være forskellig for forskellige magnetiske materialer og legeringer.

Magnetiske materialer har et såkaldt Curie punkt eller Curie temperatur. Ved denne temperatur ændres krystalstrukturen, og metallet skifter fra at være ferromagnetisk til at være paramagnetisk. Derefter skyldes varmeudviklingen alene tab grundet Joule effekten, hvilket ændrer virkningsgraden. Curie temperaturen for rent jern ligger omkring 760°C, mens Curie temperaturen for kulstof-stållegeringer ligger noget lavere - fra i omegnen af 680°C og op. Rustfri stållegeringer vil generelt have endnu lavere Curie temperaturer. Såkaldt umagnetisk rustfrit stål har Curie temperaturer, der er lavere end normal omgivelsestemperatur.

### **Ikke-ferromagnetiske materialer**

For ikke-ferromagnetiske materialer skabes opvarmning stort set udelukkende på grund af Joule effekten. Den udviklede varme vil derfor primært afhænge af emnets specifikke modstand og den inducerede strøm. Den specifikke modstand er en materialekonstant, mens den inducerede strøm er en funktion af magnetfeltets fluxtæthed, hvilket igen er en funktion af strømmen i arbejdsspølen. Deri ligger forklaringen på virkningsgradens afhængighed af emnets specifikke modstand. Den samme lov der gælder for emnets varmeudvikling, gælder selvfølgelig også for tabet i generator og arbejdsspøle.

Alt andet lige, vil det kræve en højere strøm i arbejdsspølen at producere en given effekt, desto lavere emnets specifikke modstand er. Jo højere strøm, der skal genereres af generatoren, desto højere strøm skal der løbe i arbejdsspølen, hvorfor tabene stiger i arbejdsspølen og generatorens komponenter. Konsekvensen er, at virkningsgraden aftager. Da den specifikke modstand er temperaturafhængig, og da generatorens komponenter er kølede, mens emnet opvarmes, vil virkningsgraden ved effektoverførslen stige med stigende temperatur.

### **Opvarmning via susceptør**

I visse tilfælde anvendes induktionsopvarmning til sammenføjning af ikke-ledende materialer. Enten ved at tilsætte eksempelvis jernpulver til materialet, eller anbringe en metalskive eller trådvæv mellem to ikke-ledende materialer. Et eksempel er forsegling, hvor plast pålagt

aluminiumsfolie anbringes under låget på en beholder. Beholderen føres under en arbejds-  
spole, der opvarmer folien gennem låget, hvorved folien svejses fast til beholderens hals.

### 2.3.3 Energieffektivitet

Der er stor forskel på, hvorledes producenterne opgiver effekt og virkningsgrad. Virknings-  
graden er stærkt afhængig af den enkelte applikation, og specielt varierer tabene i genera-  
torens svingkreds og arbejdsspole. Den mest gængse måde – og samtidig den mest reelle  
måde - at anføre den effekt, som en induktiv generator kan yde, er den effekt, som genera-  
toren kan afgive til et koldt (vandkølet) stålemne ved god tilpasning mellem emne og ar-  
bejdsspole. To generatorer, der afgiver samme effekt under ideelle arbejdsbetingelser, kan  
imidlertid opføre sig forskelligt under mindre ideelle arbejdsbetingelser.

Visse producenter angiver effekten ved generatorens terminaler, og medtager ikke tab i ar-  
bejdsspolen. Andre angiver "inverter efficiency", og medtager hverken tabene i svingkreds  
eller arbejdsspole. Det kan derfor være svært for brugeren at sammenligne de enkelte fabri-  
kater direkte. Man kan godt have en "inverter efficiency" på over 90%, selv om den samlede  
virkningsgrad er nærmere 40%. I det følgende defineres virkningsgrad som den del af den  
fra nettet optagne effekt, der afgives til emnet i arbejdsspolen. For en given generator, er  
der to afgørende faktorer for virkningsgraden:

- Materialet der skal opvarmes.
- Arbejdsspølsens udformning.

Materialets egenskaber er givet, medens arbejdsspølsens udformning vil afhænge af de prak-  
tiske forhold omkring varmeprocessen samt af spoledesignerens dygtighed.

### Opnåelige virkningsgrader som funktion af materiale

I tabel 2.6 er anført en række "nøgletal" for praktisk opnåelige virkningsgrader for induktiv  
opvarmning. Der vil selvfølgelig kunne opnås højere virkningsgrader end nedenstående, så-  
fremt generator mv. bliver skræddersyet til en given applikation. Omvendt kan virkningsgra-  
den blive lavere, såfremt der er dårlig kobling mellem arbejdsspole og emne.

Materiale	Virkningsgrad [%]
Stål, koldt	70-85
Stål over Curie punktet	35-40
Rustfrit stål	55-65
Messing	50-60
Kobber	35-45
Aluminium	35-45

Tabel 2.6. Praktisk opnåelige virkningsgrader for induktiv opvarmning.

### Andre faktorer

Den samlede virkningsgrad for et system vil afhænge af andre faktorer end blot virkningsgraden for den induktive proces. Under opvarmningen vil emnet tabe energi til omgivelserne ved konvektion og varmestråling. Sædvanligvis er den induktive varmeprocess så hurtig, at disse faktorer er uden betydning. Men er overfladearealet stort eller temperaturen høj, kan det være nødvendigt at tage dette med i betragtning.

For IR udstråling kan compensationseffekten for et uisoleret emne estimeres ved (idet der ses bort fra indstrålet IR):

$$P = \sigma \cdot A \cdot \varepsilon \cdot T_k^4 \quad [2.3]$$

hvor:

- P er den udstrålede effekt [W].
- A er det udstrålende areal [m<sup>2</sup>].
- $\varepsilon$  er overfladens emissivitetskoefficient [-].
- $\sigma$  er strålingstallet,  $5,72 \cdot 10^{-8}$  [W/m<sup>2</sup>K<sup>4</sup>].
- $T_k$  er overfladetemperaturen [K].

I langt de overvejende tilfælde er induktionsanlægget vandkølet, og køleanlæggets blæsere, pumper, kompressorer mv. vil have et forbrug, der bør medregnes i en total energianalyse.

#### 2.3.4 Et praktisk varmforsøg.

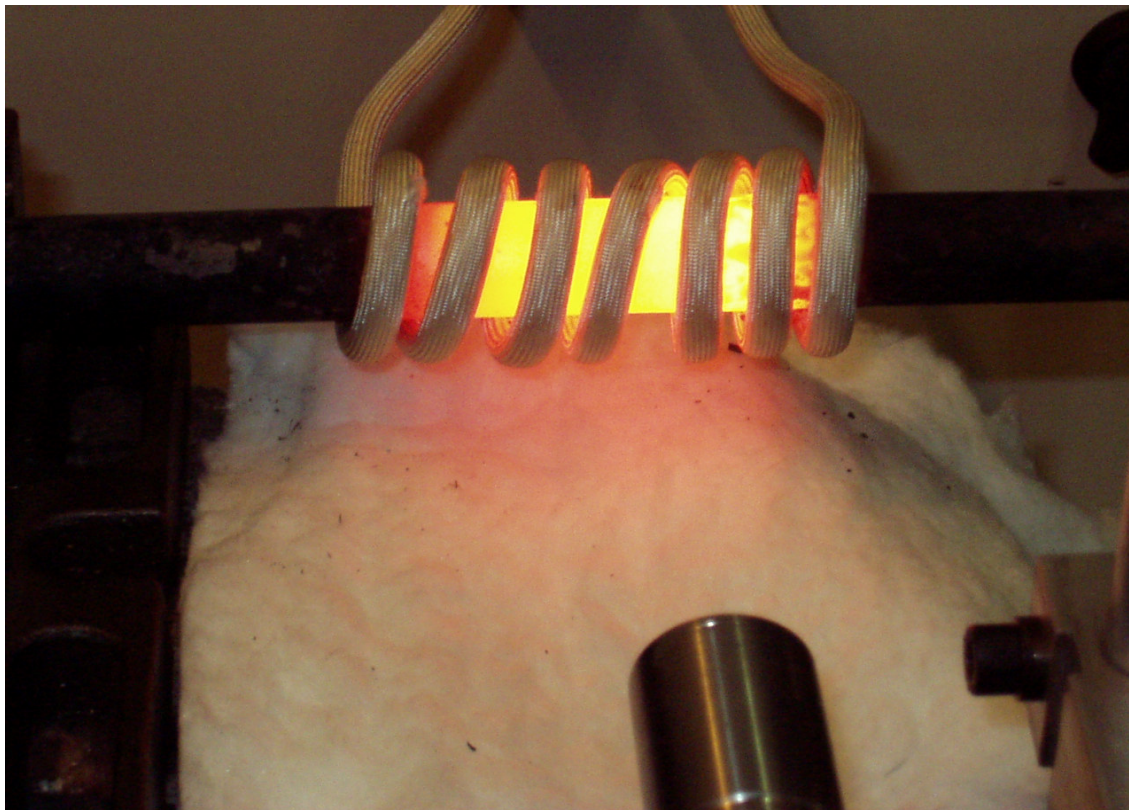
For at illustrere nogle af de omtalte fænomener, blev der i projektet foretaget opvarmning af en Ø19mm stålstang. Temperaturen blev målt på overfladen med et IR pyrometer placeret omtrent midt i varmezonen. Pyrometeret har en nedre målegrænse på 300°C. Frekvensen er ca. 8kHz, hvilket giver en indtrængningsdybde på ca. 1,5mm under Curiepunktet og ca. 6mm over Curiepunktet (jf. også tabel 2.5). Der blev anvendt en 17 kW generator ved fuld effekt. Figur 2.5 viser måleopstillingen, mens figur 2.6 viser temperaturforløbet over tiden.

Ved t=6,5s startes MF generatoren. I perioden indtil t=10s, stiger temperaturen stejlt indtil temperaturen er ca. 700°C, hvilket dels skyldes indtrængningsdybden kun er ca. 1,5mm og dels den høje virkningsgrad.

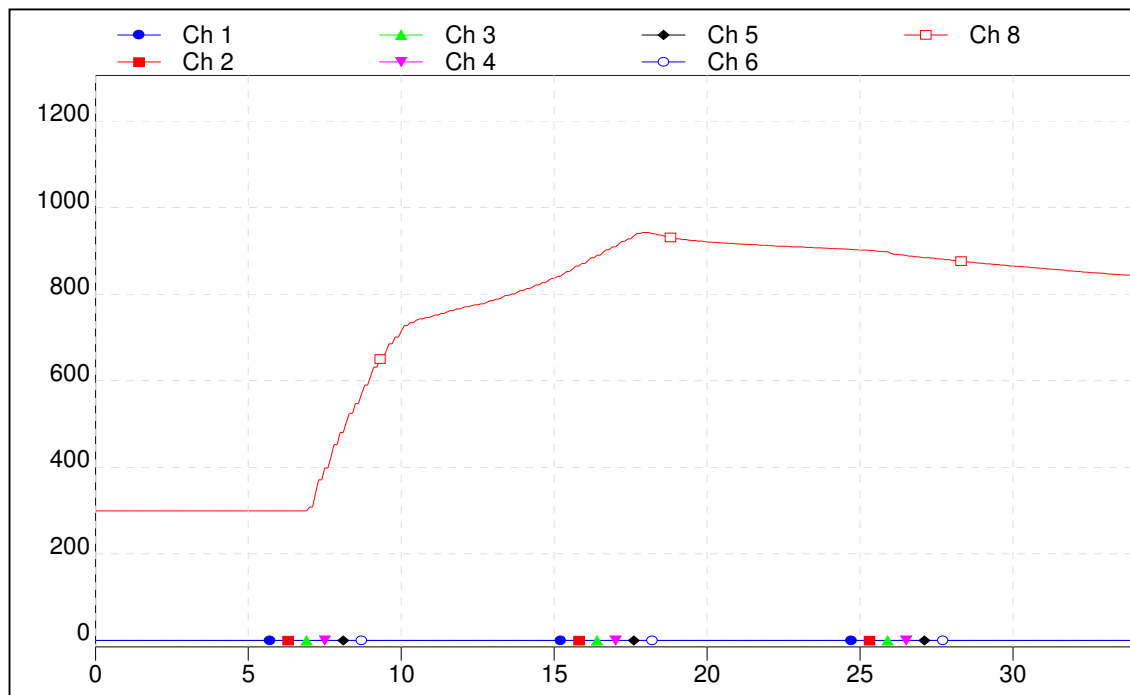
Fra t=10s til omkring t=12,5s udflader kurven betydeligt. Dette skyldes en kombination af en reduceret virkningsgrad i ydersektionen der ligger over curiepunktet, og at feltet kan koble gennem dette lag til de underliggende koldere lag. Der sker således en temperaturudjævning gennem emnets tværsnit. I mellempfasen ændres virkningsgraden gradvist.

Fra omkring t=13s er emnets temperatur over curiepunktet gennem hele emnets tværsnit. Da indtrængningsdybden nu er 6mm, er temperaturforskellen gennem emnets tværsnit lille.

Som det ses, øges kurvens stejthed med stigende temperatur, hvilket afspejler at virkningsgraden øges med stigende temperatur, fordi den specifikke modstand øges.



Figur 2.5. Måleopstilling med stålstangen placeret inde i spolen.



Figur 2.6. Temperaturprofil som funktion af tid i sekunder. Jernstangen er ikke opvarmet inden forsøgets start, men pyrometeret har en nedre målegrænse på 300°C.



Ved  $t=18s$  afbrydes MF generatoren, og der sker et lille - ret brat - fald i overfladetemperaturen, når temperaturforskellen mellem overflade og underliggende lag udjævnes. Herefter ses en fladere afkølingskurve.

Virkningsgraden kan ikke aflæses direkte af hældningen på kurven - dels fordi det er overfladetemperaturen der måles, men også fordi materialets varmeyfælde er noget temperaturafhængig. Men som illustration af opvarmningens forskellige faser er eksemplet imidlertid ganske illustrativt.

## 2.4 Konduktiv opvarmning

### 2.4.1 Teknologien:

Ved konduktiv opvarmning sendes en elektrisk strøm direkte igennem det emne, der skal varmes op. Der afsættes herved energi i det emne, som strømmen løber igennem, som følge af den elektriske modstand i emnet.

Mange af de fysiske fænomener, der er beskrevet i forbindelse med induktionsopvarmning, er også relevant for konduktionsopvarmning. Således er resultaterne for indtrængningsdybde vist i tabel 2.5 også gældende for konduktionsopvarmning.

I de tilfælde, hvor der ønskes en overfladeopvarmning, anvendes derfor sædvanligvis induktionsopvarmning, men hvor emnet ønskes gennemvarmet, er konduktiv opvarmning et alternativ. Dette gælder specielt i de tilfælde hvor netfrekvensen kan anvendes, idet dette principielt kun kræver en transformer mellem netforsyningen og elektroderne, der danner kontakt med emnet.

Udover selve transformeren, er det nødvendigt med styring til regulering af varmeafgivelsen i materialet. Reguleringen kan ske on/off eller mere jævnt ved, at spændingen, og dermed strømmen, reguleres i afhængighed af den opnåede temperatur i det opvarmede emne.

Hvis gennemvarmning af emnet er meget kritisk kan der anvendes jævnstrøm, men kompleksiteten af strømkilden – og dermed omkostningerne – stiger, samtidig med virkningsgraden reduceres, på grund af tab i ensretterkredsløbet.

### 2.4.2 Materialer der kan opvarmes

I de tilfælde hvor emnets modstand er relativt stor, og der kan skabes sikker kontakt mellem emne og strømkilde – eksempelvis elektrolytiske væsker og tyndtrådsopvarmning – er metoden særdeles anvendelig. I forbindelse med anvendelse i metalindustrien, er det primære

problem de meget høje strømme der er involveret, ofte mange tusinde ampere, hvilket stiller store krav til udformningen af kontakterne og til emnets kontaktflader. Industrielle anlæg til opvarmning af stålemner til smedning har sædvanligvis en mekanisk børste/rende anordning, der rengør emnets kontaktpunkter før emnerne overføres til varmestationen. Såfremt effekten skal reguleres under opvarmningen og/eller varmeprocessen overvåges elektrisk, vil strømkildens kompleksitet nærme sig induktionsopvarmningsudstyret. Hertil kommer, at de større krav til mekaniske anordninger vil medføre, at anlæggets anskaffelsessum vil ligge på samme niveau som udstyr til induktionsopvarmning, der kræver mindre vedligehold og har større nøjagtighed i forbindelse med gentagne cyklusser.

### 2.4.3 Energieffektivitet

I princippet er konduktiv opvarmning den mest energieffektive af de direkte opvarmningsformer, og kan være den mest prisgunstige i anskaffelse. De eneste tab, der er ved konduktiv opvarmning, er de elektriske konverteringstab i transformator og styringsudrustning samt tab fra det opvarmede emne i form af stråling og konvektion. Ved konduktiv opvarmning opnås således typisk energitjenester over 60%.

En række praktiske forhold gør dog, at metoden har en begrænset anvendelse. Ikke mindst udformning af kontaktpunkter mellem strømkilde og emne er vanskelig. Enten skal kontakterne kunne tåle emnets sluttemperatur – og være mekanisk holdbare ved denne temperatur – eller også skal kontakterne være kølede. I det sidste tilfælde vil de kølede kontakter påvirke emnets temperaturfordeling på grund af den termiske afledning fra emne til kontakter.

## 2.5 Højfrekvensopvarmning

### 2.5.1 Teknologien

Højfrekvensopvarmning er en form for dielektrisk opvarmning, dvs. opvarmning af ikke-elektrisk ledende materialer. Højfrekvensopvarmning kan anvendes som en mere direkte form for opvarmning, hvor opvarmning sker i hele emnet indefra og ud. Herved opnår emnet i højere grad en jævn temperatur i det samlede volumen. Det benævnes også volumetrisk opvarmning i litteraturen. Figur 2.7 viser en typisk højfrekvensovn.



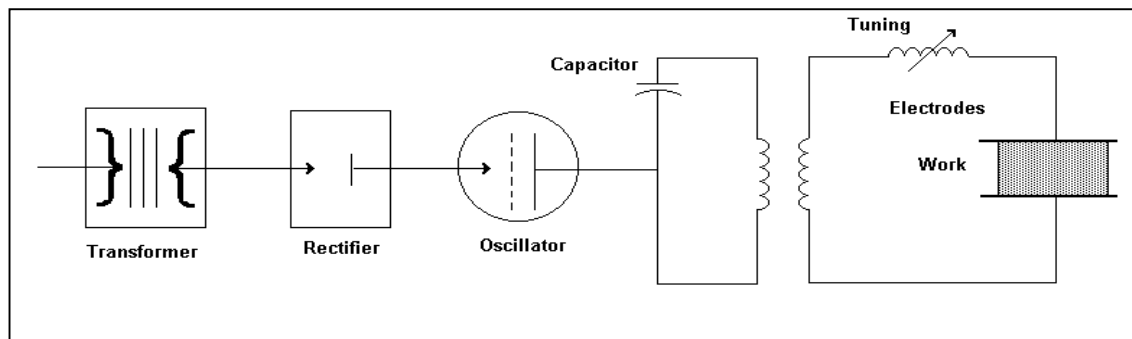
Figur 2.7. Typisk højfrekvensanlæg.

Højfrekvensopvarmning opnås ved, at der skabes et elektrisk felt mellem to plader/elektroder. Elektronerne i molekylerne i emner, der placeres i det elektriske felt, sættes i bevægelse, hvorved emnet bliver opvarmet. Teknologien kan anvendes til selektiv opvarm-

ning af flere sammensatte materialer, og kan eksempelvis opvarme materialer, der er overfladeisolerede. Højfrekvensopvarmning skyldes to faktorer:

- **Ion-acceleration.** Ioner bærer på en elektrisk ladning som accelereres, når de introduceres i et elektriske felt. Ved accelerationen opnås kinetisk energi, som bliver frigivet i form af varme, når ionerne støder ind i andre ioner.
- **Dipol rotation.** Opstår når polære orienterede molekyler, som eksempelvis vand, indsættes i et elektriske felt. Herved vil molekylerne ordnes i lige rækker, i stedet for deres tilfældige orientering. Når feltet herefter ændres, som følge af frekvensen af det elektriske felt, vil orienteringen af molekylerne igen ændres. Det medfører en stadig rotation af molekylerne i feltet med opvarmning af emnet som følge.

For at skabe det elektriske felt, skal der bruges en højfrekvent kraftig strømforsyning, styringsudrustning og elektroder/plader imellem hvilke, det elektriske felt skabes. Frekvensområdet ligger mellem 5 og 300 MHz. Typiske frekvenser er dog 6,3 , 13,5, 27 og 40,5 MHz. Spændingen er typisk fra 1.000 til 15.000 Volt. Når emnet placeret i feltet, skabes der en ideal kapasitor i serie med en lille modstand, hvorved der føres energi over i emnet. Figur 2.8 er en illustration af typisk højfrekvensopvarmning.



Figur 2.8. Illustration af typisk højfrekvensopvarmning. Kilde: /5/

Højfrekvensanlæg kan være udformet med fast eller variabel generatorfrekvens, der er forskellige i sin opbygning.

Med fast generatorfrekvens anvendes de godkendte industrifrekvenser. I disse anlæg sker tilpasningen mellem generator og elektrodesystem således, at elektrodesystemet skal kunne tilpasse sig den faste generatorfrekvens. Disse anlæg kan typegodkendes. Effektregulering sker ved at ændre generatorens fødespænding eller koblingsgraden mellem generator og elektrodesystem.

Med variabel generatorfrekvens sker tilpasningen til elektrodesystem primært ved at ændre på generatorens arbejdsfrekvens. Da sådanne anlæg ikke arbejder på faste, og på forhånd godkendte, frekvenser, stilles større krav til afskærmning og udvidet dokumentation. Effek-

ten ændres typisk ved at ændre på generatorens oscillatorfrekvens. For begge systemer kan elektrodesystemet enten være udformet som en serieresonanskreds eller parallelresonanskreds.

Alle dielektriske materialer har en energitabs konstant. Hvis denne konstant er for lav, er det ikke muligt at skabe opvarmning i materialet - selv med en høj spænding og en høj frekvens over det elektriske felt. Omvendt kan faktoren være så høj, at der er tale om elektrisk ledende materiale, hvilket kan betyde betydelig strømmæssig lækage.

Begrebet Loss Factor (LF) er et produkt af materialets relative dielektriske konstant (relative permeabilitet) og dets Power Loss Tangent, således at  $LF = \epsilon_r \cdot \tan(\theta)$ . Et materiales Loss Factor bør ligge i intervallet 0,01-1,0 for at højfrekvent opvarmning er effektiv. Loss Factor er temperaturafhængig, således at den stiger med stigende temperatur. Den maksimalt afgivne effekt et emne kan opnå i et givet felt med højfrekvensopvarmning, kan beregnes ved følgende udtryk:

$$W = \frac{5,55 \cdot V^2 \cdot f \times \epsilon_r \cdot \tan(\theta) \cdot A}{t \cdot 10^{14}} \quad [2.4]$$

hvor:

- W er den afgivne effekt til emnet [W].
- V er feltstyrken [V].
- f er feltfrekvensen [Hz].
- $\epsilon_r$  den relative dielektriske konstant (også benævnt relativ permeabilitet) [-].
- $\tan(\theta)$  er materialets Power Loss Tangent [-].
- A er arealet mellem elektroderne og emnet [mm<sup>2</sup>].
- t er tykkelsen af emnet [mm].

Tabel 2.7 viser LF for forskellige materialer, samt den resulterende maksimale afgivne effekt til emnet:

Materiale	Loss Factor (LF)	Afgivet effekt [W/cm <sup>3</sup> ] ved følgende frekvenser		
		13,5 MHz	27,0 MHz	40,5 MHz
"Laveste"	0,01	0,073	0,146	0,220
Bakkelit	0,18	1,281	2,624	3,906
Bomuld	0,03	0,220	0,433	0,671
Lim	0,25	1,831	3,600	5,431
Papir	0,4	2,929	5,797	8,726
Polyethylen	0,0004	0,003	0,006	0,009
PVC	0,04	0,293	0,580	0,873
Træ, tørt	0,04	0,293	0,580	0,873
Træ, vådt	0,1	0,726	1,465	2,197
Vand	0,36	2,624	5,248	7,811
"Højeste"	1	7,262	14,52	21,79

Tabel 2.7. Loss factor (LF) for forskellige materialer samt resulterende maksimal afgiven effekt til emnet. Kilde: /5/. Det er forudsat, at elektroderne er i direkte kontakt med emnet.

Der er stor forskel på den afgivne effekt til de forskellige materialer. Nogle materialer er svære at opvarme i et elektriske felt, mens andre kan udsættes for ekstrem hurtig opvarmning.

Det er derfor vigtigt, at spænding og frekvens er tilpasset de forskellige emner, som skal opvarmes i ovnen. Det er endvidere vigtigt, at ovnens reguleringsudstyr kan tilpasses ovenens ydelse til den ønskede opvarmning.

### 2.5.2 Materialer der kan opvarmes

De materialer, der kan opvarmes med højfrekvensopvarmning, er typisk ikke-elektrisk ledende materialer. Der er forskel på de enkelte materials evne til at optage energi, i form af ion-acceleration og dipol rotation i det elektriske felt. De forskellige materials evne til blive opvarmet, resulterer i en effektiv dybde for opvarmningen. Den effektive dybde for opvarmningen er givet ved følgende udtryk:

$$d = \frac{cv}{2 \times \pi \times f \times \tan(\theta) \times \sqrt{\epsilon r}} \quad [2.5]$$

hvor:

- d er den effektive dybde for opvarmningen [mm]
- cv er bølgehastigheden i vacuum ( $4,6 \times 10^{11}$  mm/sekund)
- f er feltfrekvensen [Hz]
- $\epsilon r$  er den relative dielektriske konstant (også benævnt relativ permeabilitet) [-]
- $\tan(\theta)$  materialets Power Loss Tangent [-].

Tabel 2.8 viser typiske materialer, deres dielektriske konstanter samt i hvilke dybde materialet kan opvarmes med højfrekvensopvarmning i afhængighed af den påtrykte frekvens af feltet.

Materiale	Dielektrisk konstant	Power loss tangent	Effektiv dybde [m] ved følgende frekvenser	
			13,5 MHz	40,5 MHz
Bakkelit	6-8	0,042	39,3	13,1
Nylon	3,7-5,5	0,050	35,3	11,8
Papir	2-2,5	0,114	17,7	5,9
glas	3-12	0,008	113,4	37,8
Polyethylen	2,3	0,0004	17.449	5.816
PVC	3-5	0,011	176,7	58,9
Pyrex	4,6	0,003	471,0	157,0
Vand	80,0	0,005	19,6	6,5
Træ, vådt	2,0	0,020	91,9	30,6

Tabel 2.8. Dielektriske konstanter og effektiv dybde ved højfrekvensopvarmning. Kilde: /5/.

Højfrekvensopvarmning er, som det fremgår af tabellen, meget effektivt til at gennemvarme materialer, på grund af den forholdsvis lave frekvens i det elektriske felt.

### 2.5.3 Energieffektivitet

Der kan generelt opnås høj energieffektivitet ved højfrekvensopvarmning. Virkningsgraden for selve opvarmningsprocessen, dvs. forskellen på den energi, der skabes i det elektriske felt, og den energi der skal tilføres strømforsyningen, er i store træk den samme som virkningsgraden for strømforsyningen og styringsudrustningen, idet der ikke tabes energi herudover. Denne virkningsgrad vil typisk ligge i intervallet 50-65%. Hvis der varmes på emner med lav Loss Factor, og der således afsættes ringe effekt i emnet, tabes den øvrige energi ikke, da den således ikke vil blive tappet fra strømforsyningen. Der vil dog altid være konstante tab i strømforsyningen og styringsudrustningen, og disse tab bliver større i forhold til den afsatte effekt i emnet, hvis der varmes på emner med en lav Loss Factor.

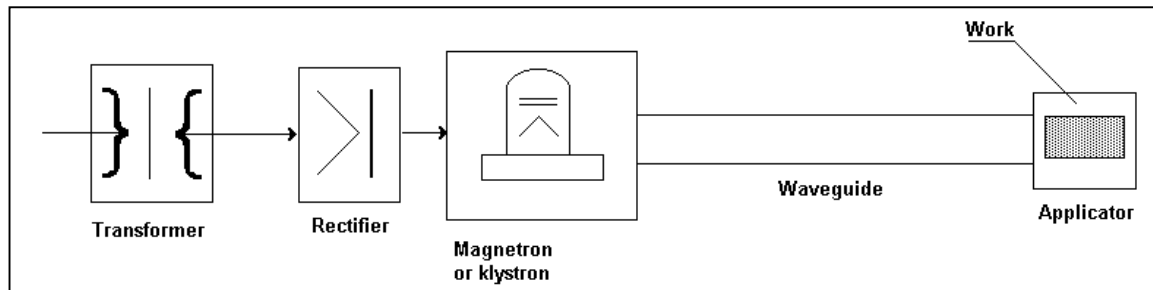
Hertil skal regnes tab til stråling og konvektion fra det opvarmede emne til ovnrummet. Se tidligere figur 2.2 herom. Disse tab er universelle og har ikke specielt med opvarmningsteknologien at gøre.

## 2.6 Mikrobølgeopvarmning

### 2.6.1 Teknologien

Mikrobølgeopvarmning er blot en anden form for dielektrisk opvarmning, dvs. opvarmning af ikke-elektrisk ledende materialer. Her er frekvensen noget højere (fra 300 til 30.000 MHz). Typisk anvendte frekvenser er 915, 2.450 5.800 og 22.125 MHz. Spændingen er ligeledes højere (op til 30.000 Volt).

På samme måde som for den højfrekvente opvarmning skal der bruges en transformer og en ensretter til et mikrobølgeanlæg. Herefter ophører ligheden, idet mikroovnen benytter en mikrobølge generator - en magnetron eller klystron - til at producere energien, der skal afsættes i emnet. De producerede mikrobølger tilrettes (waveguide), og ledes herefter til ovnrummet med en bølgeguide. Bølgeguiden, som normalt er et rektangulært rør, er normalt af kobber eller aluminium. Dimensionerne for bølgeguiden tilpasses bølgelængden for mikrobølgerne, således at forvrængning undgås. I ovnrummet udsættes emnet for opvarmning ved ion-acceleration og dipol rotation, som følge af de mikrobølger, der passerer gennem emnet. Figur 2.9 er en illustration af typisk mikrobølgeopvarmning.



Figur 2.7. Illustration over typisk mikrobølgeopvarmning. Kilde: /5/.

Det er normalt forbundet med rimeligt høje sikkerhedskrav at anvende mikrobølgeopvarmning. Det skyldes dels, at der opereres med de høje spændinger og høje frekvenser, men også at mikrobølger kan undslippe ovnen, og medføre personskaade, med mindre der er tilstrækkelig sikkerhed herfor.

Normalt er teknologien til mikrobølgeopvarmning noget dyrere end til højfrekvensopvarmning. Det anbefales således alene at anvende mikrobølgeopvarmning, når højfrekvensopvarmning ikke kan anvendes, eksempelvis på grund af en for lav Loss Factor for emnet, eller meget tynde eller irregulære emner. Omvendt kan mindre masseproducerede mikrobølgeanlæg erhverves relativt billigt, såfremt den reducerede afgivne effekt er tilstrækkelig.

Den afgivne effekt til emnet følger de samme formeludtryk som for den højfrekvente opvarmning. Den dielektriske konstant for materialet er også nogenlunde den samme for mikrobølgeopvarmning. Imidlertid er materialets Power Loss Tangent,  $\tan(\theta)$ , lavere ved mikrobølgeteknologien for visse materialer, hvorfor den samlede Loss Factor, LF, herved også bliver lavere. Tabel 2.9 viser Loss Factor og afgivet effekt til forskellige materialer ved fire typiske frekvenser.

Materiale	Loss Factor (LF)	Afgivet effekt [ $W/cm^3$ ] ved flg. Frekvenser			
		915 MHz	2.450 MHz	5.800 MHz	22.125 MHz
Bakkelit	0,15	74	198	468	1.785
Bomuld	0,03	15	40	94	357
Papir	0,4	197	527	1.248	4.759
Polyetylen	0,001	0,5	1,3	3,1	11,9
PVC	0,1	49	132	312	1.190
Vand	12	5.905	15.811	37.429	142.778

Tabel 2.9. Loss factor (LF) for forskellige materialer samt resulterende maksimal afgiven effekt til emnet. Kilde: /6/

### 2.6.2 Materialer der kan opvarmes

Mikrobølgeopvarmning kan anvendes til stort set de samme materialer, som kan benyttes til højfrekvensopvarmning. Mikrobølger genereres dog ved en højere frekvens, hvorfor den effektive dybde for opvarmningen er lavere. Det betyder i praksis, at mikrobølger derfor ofte anvendes til tyndere materialer, plastfilm, papir, osv. Det formeludtryk for den effektive op-

varmningsdybde, som gælder for højfrekvensopvarmning, er det samme ved mikrobølgeopvarmning.

### 2.6.3 Energieffektivitet

Energieffektiviteten for mikrobølgeopvarmning er normalt ringere end for højfrekvensopvarmningen. Det skyldes, at mikrobølgegeneratoren i sig selv har en virkningsgrad på 50-60%. Hertil kommer tab i strømforsyning og reguleringsudstyr, samt tab til stråling og konvention fra det opvarmede emne. Der må derfor ikke forventes en virkningsgrad for energitjenesten ved mikrobølgeopvarmning på over 50%.

Mikrobølgegeneratoren, som anvendes til at producere den nødvendige energi til opvarmningen af emnerne, har følgende typiske data skitseret i tabel 2.10.

Type	Frekvens [MHz]	Maksimal effekt [kW]	Effektivitet [%]	Levetid [timer]
Magnetron	915	< 25	55-65	3-6.000
Magnetron	2450	6	50-60	3-6.000
Klystron	2450	50	60	15.000

Tabel 2.10. Typiske karakteristika og effektiviteter for forskellige typer af mikrobølgegenerators. Kilde: /5/.

## 2.7 Kort sammenfatning over de forskellige opvarmningsmetoder

Tabel 2.11 giver et samlet overblik over de forskellige teknologier, deres anvendelsesområder, anvendelseseksempler samt typiske effektiviteter.



Opvarmningsform		Frekvens	Effektivitet [%]	Eksempler på anvendelse
Modstandsopvarmning		0-60 Hz	5-30%	<i>Ledende og halvledende materialer, eksempelvis:</i> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Opvarmning via ledning, stråling og konvektion af alle slags materialer inkl. luftarter</li> <li>• Direkte opvarmning af glasbade</li> <li>• Varmetracing af rør m.m.</li> </ul>
Infrarød opvarmning (IR)		330 GHz – 440 THz	20-30%	<i>Ikke-blanke emner med lille materialetykkelse, eksempelvis:</i> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Tørring af papirbaner</li> <li>• Tørring af malinger og lakker</li> <li>• Tørring af granulater</li> <li>• Fortørring af tekstiler.</li> </ul>
Induktionsopvarmning		50 Hz-5 MHz	35-60% (ikke-magnetiske materialer)  70-85% (magnetisk materiale)	<i>Ledende materialer, eksempelvis:</i> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Hærdning af metaller, f.eks. tandkranse og savklinger</li> <li>• Udglødning og normalisering af metaller</li> <li>• Forvarmning af aluminium før ekstrudering</li> <li>• Forvarmning af metaller og anden overfladebehandling</li> <li>• Loddeprocesser</li> </ul>
Konduktiv opvarmning		50-5.000 Hz DC > 100 kHz	50-90%	<i>Ledende materialer, eksempelvis</i> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Direkte opvarmning af glasbade</li> <li>• Varmetracing af rør m.m.</li> </ul>
Dielektrisk opvarmning	Højfrekvensopvarmning	5-300 MHz	50-65%	<i>Ikke-ledende materialer, eksempelvis:</i> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Tørring af lim i spånplader og MDF-plader/fremstilling af limtræ</li> <li>• Tørring af garner og tekstiler</li> <li>• Svejsning af PVC og lign.</li> <li>• Eftertørring (efterbagning) af kiks og kager og opvarmning af vandholdige fødemidler.</li> </ul>
	Mikrobølgeopvarmning	300-30.000 MHz	40-60%	<i>Ikke-ledende materialer, eksempelvis:</i> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Tørring af løg, kartoffelchips, pasta- og macaroniprodukter</li> <li>• Tørring af træ til baseball bats</li> <li>• Forstegning af bacon, kyllinger og hamburgere</li> <li>• Pasteurisering af æggeghvider og æggebakker</li> <li>• Delvis optøning (temperering) af levnedsmidler, f.eks. for udstening af kirsebær</li> <li>• Vulkanisering af gummi.</li> </ul>

Tabel 2.11. Typiske karakteristika og effektiviteter for forskellige teknologier til opvarmning.

### 3 Kortlægning af elforbrug til elovne dansk erhvervsliv

#### 3.1 Indledende forudsætninger

I dette kapitel beskrives resultaterne af kortlægningen af elovnes elforbrug i Danmark. Kortlægningen omfatter primært elovne og anden elvarme til tørring, opvarmning og varmebehandling i erhvervslivet, men ikke ovne til smeltning og støbning. Kortlægningen har primært fokus på traditionel konvektionsopvarmning, hvilket naturligt skyldes, at projektet har til formål, at undersøge mulighederne for at ombygge eller udskifte eksisterende konvektionsbaserede ovne til mere direkte opvarmede ovne, dvs. ovne med dielektrisk opvarmning, infrarød opvarmning eller induktionsopvarmning, som beskrevet i det forrige kapitel.

Tørring, opvarmning og varmebehandling i elovne benyttes mange steder i industrien, men i de fleste brancher er det relativt små anvendelser. I det følgende beskrives elforbruget i brancherne med de største forbrug.

Udgangspunktet for kortlægningen er dels baseret på opgørelsen af elforbruget i 1997 til opvarmning, tørring og brænding/sintring /6/, dels på kontakter til ca. 20 virksomheder, en række leverandører (visse fremgår af bilag 1) og dels målinger foretaget på en række konkrete ovne.

#### 3.2 Elforbrug opdelt på brancher

##### 3.2.1 Bagerforretninger (158120)

Elforbruget til elovne i bagerier er opgjort til 54 GWh/år, fordelt med 9 GWh/år til opvarmning (raskning), yderligere ca. 10 GWh/år til opvask og resten til tørring (bagning). Antallet af forretninger med elovne er ca. 600, idet der i 1998 var 1.245 bagerforretninger og fordelingen af forbrugene af el og anden brændsel til bageovne er stort set lige store. Bageriernes elovne er udstyret med elvarmelegemer (modstandsopvarmning), der opvarmer ovnlufte.

##### 3.2.2 Træindustri (200000) og møbelindustri (361000)

Elforbruget til tørring kortlagt til 35 GWh/år og elforbruget til opvarmning til 7 GWh/år for disse to brancher. Affaldstræ udgør langt den største energikilde ved tørring af træ, men der findes antagelig en del mindre elbaserede tørreovne, ligesom der bruges el til bl.a. UV-tørring af lakker, som ikke foregår i egentlige ovne. Elforbruget til opvarmning går bl.a. til hærkning af lim, som hovedsageligt foregår i konvektionsovne.

### 3.2.3 *Papirindustri (210000)*

Elforbruget til tørring er opgjort til 4 GWh/år. Det er elforbruget i Dalum Papirs IR-panel, der tørrer papirbanen efter limpriet.

### 3.2.4 *Fremstilling af rengøringsmidler m.v. (245070)*

Elforbruget til opvarmning er opgjort til 50 GWh/år. Hovedparten af dette forbrug går til opvarmning af råvarer og involverer ikke elovne. Hos Haldor Topsøe A/S er der syv elopvarmede roterovne, hvor produkterne kalcineres ved opvarmning til 500-660 °C. Hver ovn har typisk 160 kW varmelegemer og kører i tre skift. Det årlige elforbrug er ca. 4 GWh.

### 3.2.5 *Plastbranchen (251122, 252400)*

Fremstilling af gummiprodukter m.v. (251122) og Fremstilling af andre plastprodukter (252400) anvender et elforbruget til opvarmning opgjort til 19 GWh/år samt et elforbrug til tørring på 28 GWh/år. Elforbruget til tørring anvendes især til modstandsvarmelegemer for opvarmning af tørreluft til tørring af granulat. Her er alternative opvarmningsformer næppe mulige. Elforbruget til opvarmning omfatter især termoformanlæg. Hos Færch Plast, der er landets største termoformfabrik, bruges således ca. 6 GWh/år i de keramiske elvarmelegemer, der opvarmer plastfolien inden formningen til bakker og bægre mv. Varmekasserne er af fabrikkens eget fabrikat. Energieffektiviteten hos Færch Plast er opgjort til 25%.

### 3.2.6 *Jern- og metalindustri*

Denne branche indeholder 17 underbrancher fra Forarbejdning af jern og stål (272030) til Fremstilling af transportmidler ekskl. skibe og biler m.v. (352050). I disse brancher er elvarmeforbruget opgjort til 20 GWh/år til opvarmning, 36 GWh/år til tørring og 7 GWh/år til brænding/sintring.

Ved hærkning af stål benyttes ofte gas til opvarmningen, men energieffektiviteten er typisk beliggende omkring 1%. Induktionshærkning er derfor et godt alternativ. Det benyttes bl.a. hos Bodycote Varmebehandling A/S, som har et elforbrug på omkring 5 GWh/år til eldrevne hærdeovne og afspændingsovne.

Af andre konkrete virksomhedseksempler kan nævnes:

- Broen Lab. i Assens har en tørreovn og en hærdeovn, som indgår i et elopvarmet pulverlakeringsanlæg for gas- og vandarmaturer. Ovnene er leveret af Ideal-Line Ideal Engineering A/S i Fåborg. Tørreovnen har 4 elvarmelegemer på i alt 160 kW. Virkningsgraden for energitjenesten er opgjort til 17%. Hærdeovnen har fem elvarmelegemer på i alt 200 kW. Virkningsgraden er opgjort til 2%.

- Danfoss bruger næsten udelukkende gas og hedtvand til hærdeovne og til tørring i forbindelse med vaskeanlæg. Danfoss har dog to forvarmeovne og tre anløbsovne, hvor der anvendes el. De bruges til hærkning af metalkomponenter. Forvarmeovnene er på ca. 70 kW. Samlet elforbrug til de fem ovne anslås til 1 GWh/år.
- Grundfos har - ud over aluminiumssmelteværket med 2 elovne på hver 1 MW - kun nogle små el-hærdeovne i værktøjsafdelingerne. Produktionen af rustfrit sintermetal er udskilt i firmaet Sintex, der har tre 55 kW modstandopvarmede sinterovne foruden forskellige laboratorieovne og forsøgsovne. Sinterovnene bruger ca. 20 kW hver, og er i drift omkring 5000 timer årligt svarende til et samlet elforbrug på omkring 300 MWh/år.
- Metrotherm. Ved fremstilling af emaljerede varmtvandsbeholdere af stål, tørres emaljen først med elopvarmet luft (elforbrug ca. 100 MWh/år), og brændes derefter i en elopvarmet ovn. Ovnens temperatur er 860 °C, den installerede elvarmeeffekt 750 kW og elforbruget ca. 1,4 GWh/år. Energieffektiviteten blev for nogle år siden opgjort til 34% for tørreanlægget og 8% for emaljeovnen.
- SBS, Scandinavian Brake Systems, producerer bremseskiver m.m. og anvender elovne til hærkning og sintring. Der er to ovne til hærkning af pulverlak på bremse bagplader. Begge er fremstillet af Richter Hansen i Svendborg. Den ene har 30 kW varmelegemer, den anden har et IR-panel på 24 kW. Virkningsgraden for sidstnævnte er opgjort til 8%. Der er yderligere 3 ovne på hver 55 kW til hærkning af pulverlak. Disse er fremstillet hos Leinweber Maschinen GmbH i Østrig. Hertil kommer 2 sinterovne på hver ca. 90 kW, samt en induktionsovn på 36 kW.

### 3.2.7 Fremstilling af legetøj, guld- og sølvvarer m.v. (362060)

Elforbruget til tørring er opgjort til 2 GWh/år. Lego er den største elforbruger i denne branche. De bruger el til opvarmning af tørreluft til tørring af granulat. De har yderligere et elforbrug på omkring 1 GWh/år til termoplastanlæg.

## 3.3 Sammenfatning over elforbrug fordelt på branche og anvendelse

Tabel 3.1 er en kort sammenfatning af elforbruget i elovne i industrien i Danmark. Elforbruget er opdelt på kategorierne: Opvarmning, tørring, brænding/sintring. Summen af disse udgør det samlede kortlagte forbrug. Hertil kommer dog, at ikke hele forbruget omsættes i ovne eller ovnlignende anlæg. Denne andel er vist i kolonne for sig. Denne andel er estimeret ud fra de beskrivelser der er gennemgået tidligere i kapitlet.

Branche	Branche-kode (DB93)	Elforbrug på elanvendelse [GWh]			Del af elforbrug omsat i ovne	
		Opvarmning	Tørring	Brænding/sintring	[GWh]	[%]
Fremst. af stivelsesprodukter m.v.	156009	4	-	-	-	-
Bagerforretninger	158120	19	45	-	54	27
Tekstilindustri	170000	-	3	-	-	-
Træindustri	200000	7	17	-	24	12
Papirindustri	210000	-	4	-	4	2
Udgiver- og forlagsvirksomhed	221309	-	1	-	-	-
Mineralolieindustri	230000	3	-	-	-	-
Fremst. af kunstgødning	241500	-	9	-	-	-
Medicinalindustri	244000	5	13	-	10	5
Fremst. af rengøringsmidler m.v.	245070	50	-	-	4	2
Plast	251122, 252400	19	28	-	19	10
Fremst. af produkter af beton	266080	8	3	-	-	-
Jern- og metalindustri*	272030 – 352050	20	36	7	63	32
Møbelindustri	361000	-	18	-	18	9
Fremst. af legetøj, guld, sølv m.v.	362060	-	2	-	1	1
<b>Industri i alt</b>		<b>135</b>	<b>179</b>	<b>7</b>	<b>197</b>	<b>100</b>

Tablet 3.1. Elforbrug i industrien til opvarmning, tørring og brænding/sintring samt den del heraf, der omsættes i ovenlignende anlæg (inkl. IR-paneler m.m.). \*: Det aktuelle elforbrug i jern- og metalindustrien er måske vurderet for lavt i /6/

Af tabellen ses, som beskrevet tidligere, at de mest væsentlige forbrug ligger i brancherne:

- Bagerforretninger (27%).
- Træindustri (12%).
- Plastindustri (10%).
- Jern- og metalindustri (32%).
- Møbelindustri (9%).

Disse 5 brancher står således for ca. 90% af elforbruget omsat i ovne. Da de tidligere undersøgelser har vist, at konvertering i bagerforretninger ikke umiddelbart er muligt, vil det være i de sidste 4 brancher at potentialet i praksis skal findes. Det samlede elforbrug i Danmark var, ifølge Dansk Energi /8/, ca. 33.000 GWh i 2003, heraf anvendes ca. 10.000 GWh i industrien. Elforbruget til elovne udgør hermed ca. 2% af industriens elforbrug. Der er således ikke tale om, at elforbruget til elovne udgør en meget markant andel af elforbruget. Forbruget er imidlertid placeret på relativt få enheder, hvilket taler for at forsøge at opnå elbesparelser i dette specifikke segment.

## 4 Potentiale for elbesparelser

I dette kapitel opsummeres de væsentligste opvarmningsmetoder, deres virkningsgrad og deres mulighed for at kunne substituere en anden opvarmningsmetode. Som princip er det vigtigt, at opvarmningsmetoderne kan give samme funktionalitet, men sekundære forhold spiller endvidere en væsentlig rolle. Dette vil altid kræve en individuel analyse af hver enkelt ovntype og dens proces. Eksempler på sekundære forhold kan være:

- Investeringen er for stor i nyt udstyr og kan ikke betales tilbage via produktivetsforbedringer og energibesparelser.
- Processen ikke kan styres tilstrækkelig.
- Det er vanskeligt at udføre opvarmningen/processen med for små/store emner.

I kapitlet er endvidere estimeret, hvilke energibesparelser der, opdelt på brancher, kan tilvejebringes enten via forbedringer på de eksisterende ovne eller ved at skifte til et helt anden og direkte opvarmningsmetode.

### 4.1 Teoretisk potentiale for forbedring af metode

Mulighederne for at forbedre energitjenesten på de forskellige opvarmningsformer, tager udgangspunkt i tabel 2.12 med henblik på at redegøre for hvorvidt en substitution af modstandsoptørring med de mere direkte opvarmningsmetoder lader sig gøre. Endvidere redegøres for, hvorvidt der kan ske forbedringer indenfor de enkelte opvarmningsprincipper.

#### 4.1.1 Konventionel opvarmning

Denne opvarmningsform er tidligere diskuteret mht. tab. Tabene kan typisk reduceres ved:

- Hurtigere opvarmning/tørring af emnet. Dette reducerer procestiden og dermed det samlede tab. Dette kan kræve en kraftigere elektrisk installation.
- Mindre afkast/udsugning, som specielt er nødvendig ved eksplosionsfare. Dette kan i mange tilfælde styres mere trinløs i forhold til mængden af materiale, der er i ovnen.
- Den tabte energi kan genbruges - enten i den aktuelle proces eller til andre formål.
- Mere isolering kan reducere strålings- og konstruktionstab. Dette vil afhænge meget af ovnens konstruktion.
- Tab ved emneskift kan reduceres ved at vælge forme/bånd, der har en så lille varmekapacitet som muligt. Alternativt kan den høje temperatur i forme/bånd fastholdes, så de ikke skal opvarmes hver gang.

#### 4.1.2 Infrarød opvarmning

De væsentlige besparelser kan opnås ved et fornuftigt emnevalg set i forhold til det infrarøde opvarmningsprincip. Således skal de emner, der skal opvarmes, være modtagelige for den udstrålede bølgelængde. Derudover influerer følgende på princippetets virkningsgrad:

- Maksimering af de opvarmede emners areal i forhold til udstrålingsfeltet fra den infrarøde stråling.
- Anvendelse af yderligere isolering, så den "tabte" varme bidrager til opvarmningen. Det skal dog bemærkes, at desto højere temperatur emnerne har, desto mere vil de bidrage til et øget strålingstab.
- Er varmelegeme og emne placeret i en ovn, vil mindre udsugning/afkast generelt holde mere varmeenergi i selve ovnen og indirekte bidrage til opvarmning.
- Hurtigere opvarmning kan reducere procestiden. Samtidig vil det dog betyde, at emnernes overfladetemperatur stiger og dermed øget varmeafgivelse til omgivelserne.

#### 4.1.3 Induktionsopvarmning

Denne direkte opvarmningsform er som udgangspunkt effektiv, men kan på sigt blive endog mere effektiv. Den magnetiske kobling imellem arbejdsspole og emne er meget afgørende for effektiviteten for opvarmningen. Følgende hensyn/tiltag kan anvendes for yderligere at optimere princippet:

- Generatoren kan pga. effektelektroniske komponenters udvikling blive mere effektiv. Specielt forventes det, at ledetabene i komponenterne til stadighed reduceres. Prisen på generatoren kan også blive reduceret over tid og gøre teknologien mere attraktiv.
- Koblingen imellem arbejdsspole og emne er essentiel. Denne skal optimeres fra proces til proces og enhederne kan være dyre. Omvendt kan en del tab reduceres derved.
- Kombinationen af generator, arbejdsspole og forskellige emner kan bevirke, at en ændring af arbejdsfrekvensen vil kunne optimere processen yderligere. Dette vil dog kræve en mere intelligent styring.
- Hurtigere opvarmning vil reducere procestiden og dermed forøge produktivitet. Omkostningerne er dog en kraftigere, og dermed dyrere, installation.

#### 4.1.4 Dielektrisk opvarmning

Den dielektriske opvarmning er særdeles effektiv, men kræver igen et godt samspil imellem emne og generator. Ved de "lavere" frekvenser anvendes en resonanskreds, hvilket åbner mulighed for en mere dynamisk valgt arbejdsfrekvens, mens frekvensen ved anvendelse af mikrobølger normalt vil være givet. Derfor kan følgende tiltag overvejes til at forbedre metoden:

- Optimering af generator ved nye effektkomponenter (høj spænding/strøm).
- Tilpasning af frekvens og spænding i forhold til emne. Dette kan komplicere generatoren, men for de lavere frekvenser er der typisk en tuningsreaktor i kredsen.
- Hurtigere opvarmning vil reducere procestid og dermed den tid, emnet kan afgive varme til omgivelserne.

De forskellige opvarmningsmetoder kan systemmæssigt opnå højere virkningsgrader ved, at genanvende mest muligt af den tabte energi. Der eksisterer i dag allerede en del interessante løsninger (forvarmning, anden opvarmning), men de eksisterende elovne kan til staidighed forbedres.

Tabel 4.1 opsummerer de ovenfor viste muligheder med angivelse af standardeffektivitet og forbedringsmulighed for de enkelte teknologier.

Langt hovedparten af de konventionelle ovne kan erstattes af de direkte opvarmningsmetoder. De er dog dyrere i investering, hvorfor såvel energibesparelser, produktivitetsstigninger som procesmæssige forbedringer skal kunne kapitalisere en sådan investering. Dette vil, i betydeligt omfang, afhænge af den enkelte ovns funktion og virkemåde. I kapitel 5 vil forskellige eksempler på dette blive vist.



Opvarmningsform		Frekvens	Forbedringer	Standard Effektivitet [%]	Forbedret Effektivitet [%]
Modstandsofvarmning		0-60 Hz	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Hurtigere opvarmning</li> <li>• Mindre afkast/udsugning</li> <li>• Mere isolering</li> <li>• Mindre varmfylde i emnetransport</li> <li>• Mindre tab ved emneskift</li> <li>• Øvrig processtyring</li> </ul>	5-30%	15-45%
Infrarød opvarmning (IR)		330 GHz – 440 THz	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Rigtig valg af emne</li> <li>• Maksimere emneareal</li> <li>• Mere isolering</li> <li>• Mindre udsugning/afkast</li> <li>• Hurtigere opvarmning</li> </ul>	20-30%	25-45%
Induktionsopvarmning		50 Hz-5 MHz	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Optimering af generator</li> <li>• Optimering af arbejdsspole i forhold til emne</li> <li>• Dynamisk valg af frekvens i forhold til belastning</li> <li>• Hurtigere opvarmning</li> </ul>	35-60% (ikke-magnetiske materialer)  70-85% (magnetisk materiale)	40-65%  82-86%
Konduktiv opvarmning		50-5.000 Hz DC > 100 kHz	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Optimering af strømkilde</li> <li>• Optimering af kontaktsystem</li> <li>• Dynamisk valg af frekvens i forhold til belastning</li> <li>• Hurtigere opvarmning</li> </ul>	50-90%	60-90%
Dielektrisk opvarmning	Højfrekvensopvarmning	5-300 MHz	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Optimering af generator</li> <li>• Tilpasning af frekvens, spænding og elektrodesystem</li> <li>• Hurtigere opvarmning</li> </ul>	50-65%	55-75%
	Mikrobølgeopvarmning	300-30.000 MHz	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Optimering af generator</li> <li>• Hurtigere opvarmning</li> </ul>	40-60%	45-65%

Tabel 4.1. Opvarmningsformer og deres mulighed for at blive individuelt forbedret.

## 4.2 Energibesparelspotentiale indenfor brancher

I kapitel 3 blev energiforbruget opdelt på de enkelte brancher. Heri indgik endvidere en kort redegørelse for, om energien blev anvendt til opvarmning, tørring eller brænding/sintring. Tabel 4.2 angiver typisk anvendte opvarmningsprincipper indenfor hver enkel branche, muligheden for at skifte til andre principper og anslået forbedringsmuligheder rent energimæssigt. Den anslåede forbedring kan tilvejebringes på to måder: Enten ved at optimerе/forbedre den eksisterende teknologi i den eksisterende ovn, eller ved at skifte teknologi. Sidstnævnte vil kræve investering i nyt udstyr.

De anslåede besparelser i elforbrug skal samtidig vurderes i forbindelse med produktivitetsstigning, kvalitet og pris. Mange af de direkte opvarmningsmetoder giver mulighed for langt kortere proces tid og dermed højere produktivitet. I kapitel 5 vil en række cases i forskellige virksomheder sandsynliggøre nogle af de muligheder, der er for at forbedre elovnens performance.

De samlede besparelsemuligheder anslås til at ligge i intervallet 13-52 GWh, svarende til 7-26% af branchernes elforbrug til ovne. En stor del af disse besparelser hentes gennem optimering af eksisterende ovne.

### 4.2.1 Bagerforretninger (158120)

De eksisterende ovne kan forbedres betydeligt. Et forskningsprojekt i 1982, udført af JTI sammen med Brødrene Meincke A/S (som alene laver bageovne til industribagerier) og Incentive A/S, undersøgte energibesparelsen ved at benytte en kombination af mikrobølger, IR og modstandsopvarmning /7/. Efterfølgende erfaringer indikerede, at det er svært at styre anvendelsen af IR og mikrobølger i en bageovn.

Det vurderes dog, at udviklingen indenfor ovne har betydet, at infrarød og dielektrisk opvarmning stadig er en mulighed. Dette vil dog primært afhænge af den nødvendige fleksibilitet af ovnen. Reduceret fleksibilitet vil forbedre det direkte opvarmningsprinip.

### 4.2.2 Træindustri (200000)

Træindustrien bruger en del konvektionsovne og vil med fordel kunne anvende dielektrisk opvarmning med højere produktivitet og mindre energiforbrug til følge.

#### 4.2.3 Medicinalindustri (244000)

Denne industri er voksende og bruger stadig mere avancerede metoder til deres produkter, såvel til opvarmning som tørring. I den forbindelse vil de med fordel kunne anvende dielektrisk opvarmning til disse processer.

#### 4.2.4 Fremstilling af rengøringsmidler m.v. (245070)

Begrænset størrelse, men dielektrisk opvarmning en mulighed i de kendte produktionsanlæg.

#### 4.2.5 Plastbranchen (251122, 252400)

Såvel dielektrisk som infrarød opvarmning vil kunne anvendes som alternativ til det allerede benyttede.

#### 4.2.6 Jern- og metalindustrien (272030 – 352050)

Den største energiforbrugende branche, som i forvejen bruger hovedparten af de eksisterende opvarmningsformer. De eksisterende ovne kan optimeres, en række kan procesteknisk anvende induktionsopvarmning i stedet med stor fordel.

#### 4.2.7 Møbelindustri (361000)

Kan med fordel anvende det dielektriske princip til opvarmning og tørring.

Branche	Branche-kode (DB93)	Elforbrug på elanvendelse [GWh]			Heraf omsat i ovne [GWh]	Opvarmningsprincip (i dag)				Eventuelt teknologiskift	Forventet samlet besparelse [GWh]
		Opvarmning	Tørring	Brænding-/Sintring		Modstand	IR	Induktion	Dielektrisk		
Fremst. af stivelsesprodukter m.v.	156009	4	-	-	-						
Bagerforretninger	158120	19	45	-	54	X				Infrarød og dielektrisk	0-10
Tekstilindustri	170000	-	3	-	-	X			X		
Træindustri	200000	7	17	-	24	X			X	Dielektrisk	3-10
Papirindustri	210000	-	4	-	4		X		X		
Udgiver- og forlagsvirksomhed	221309	-	1	-	-						
Mineralolieindustri	230000	3	-	-	-						
Fremst. af kunstgødning	241500	-	9	-	-						
Medicinalindustri	244000	5	13	-	10	X				Dielektrisk	1-2
Fremst. af rengøringsmidler m.v.	245070	50	-	-	4	X				Dielektrisk	0-1
Plastindustri	251122, 252400	19	28	-	19	X		(X)		Dielektrisk og infrarød	3-5
Fremst. af produkter af beton	266080	8	3	-	-				(X)		
Jern -og metalindustri	272030 - 352050	20	36	7	63	X	X	X		Induktion og konduktion	5-20
Møbelindustri	361000	-	18	-	18	X			X	Dielektrisk	1-4
Fremst. af legetøj, guld, sølv m.v.	362060	-	2	-	1	X					
<b>Industri i alt</b>		<b>135</b>	<b>179</b>	<b>7</b>	<b>197</b>						<b>13-52</b>

Tabel 4.2. Brancheopdelt elforbrug, anvendt opvarmningsprincip, forslag til forbedringer samt samlet vurderet besparelspotentiale.

## 5 Cases

I det følgende præsenteres en række cases med det formål, at eksemplificere de potentialer der er dels ved at optimere eksisterende ovne og dels ved skift af teknologi. I forbindelse med casene er der foretaget målinger på ovnene. Målingerne har dels givet en detaljeret viden omkring den nøjagtige anvendelse af den tilførte energi til de enkelte ovne, og dels viden og inspiration til, hvorledes energianvendelsen til elovne generelt kan optimeres.

### 5.1 Case omkring elopvarmet gennemløbs tørreovn

#### 5.1.1 Indledende casebeskrivelse

Denne case omhandler en traditionel elopvarmet gennemløbs tørreovn og mulighederne for optimering af denne. Tørreovnen er en del af et samlet elopvarmet pulverlakeringsanlæg hos Broen Lab. i Assens, hvor der produceres VVS-armaturer til brug i laboratorier.

#### 5.1.2 Beskrivelse af emner, ovn og opvarmningsteknologi

Anlægget består først af et affedtnings- og afvaskningsanlæg. Herefter tørres de våde og vaskede emner i tørreovnen. Efter tørreanlægget påføres emnerne pulverlak elektrostatisk, hvorefter de sendes ind i en hærdeovn for hærkning af pulverlakken. Efter hærdeovnen er der en kølezone for endelig nedkøling af emnerne.

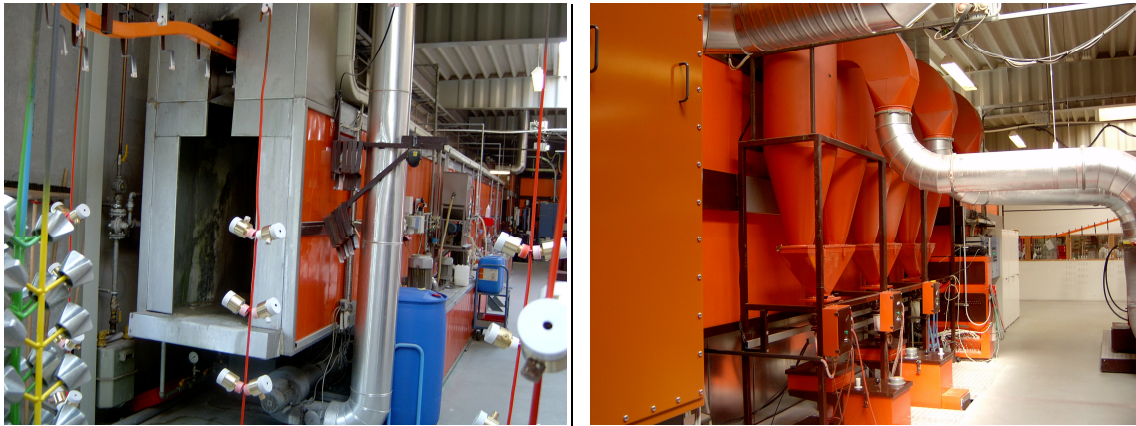
Igennem hele anlægget er der et conveyorsystem til transport af emnerne, som ophænges på rammer. Ovnene er derfor åbne i enderne, således at emnerne kan køre uhindret igennem anlægget. Anlægget er ca. 10 år gammelt. Der er kun modificeret én gang siden idriftsættelsen. For et par år tilbage blev der således etableret et varmegenvindingsystem fra den varmere hærdeovn til den koldere tørreovn. Varmegenvindingen har reduceret elforbruget til tørreovnen betydeligt.

Tørreovnen har til formål at tørre den vandmængde, der sidder på de emner som skal pulverlakeres. Dette sker ved, at opvarme emnerne til ca. 160°C, hvorved vandet på emnerne fordamper. For at lette processen bruges der, til det sidste skyllevand, demineraliseret vand, som har lav overfladespænding og dermed en lav vedhæftningsevne til emnerne. Dertil kommer, at der, foran indløbet til tørreovnen, er placeret en højhastighedsblæser, der i større omfang afblæser vand fra emnerne, før emnerne kører ind i ovnen.

De emner, der kører gennem tørreovnen, varierer i størrelse og form. Emnerne ophænges på rammer, som igen hænges på kroge, som fastgøres til conveyorbanelen. Der er tale om jernrammer og selve emnerne, VVS-armaturerne, er typisk af messing og stål.

Ovnen er opvarmet med traditionelle modstandsopvarmede elstave. Den samlede installerede effekt til elvarmestavene er ca. 160 kW. Hertil kommer 4 cirkulatorer, som dels afkøler elvarmestavene, dels sørger for, at den afgivne varme kommer rundt i hele ovnen.

Ovnen er vinkelformet, ca. 6,5 meter på den ene side og 12,3 meter på den anden side af vinklen. Ovnen er ca. 1,3 meter bred og 2,5 meter høj. Den er placeret på 1 meter høje ben, således at den passer til resten af produktionsanlægget. Ovnen er beklædt med malede plader, og under pladerne er der isoleret med varmebestandigt isoleringsmateriale. Der suges fra ovnens top i både den våde ende, hvor emnerne kommer ind i ovnen, samt i den tørre ende, hvor emnerne kommer ud af ovnen. Den fugtige og varme udsugningsluft kastes over tag. Figur 5.1 og 5.2 er illustrationer af ovnen.



Figur 5.1-5.2. Illustrationer af tørreovnen hos Broen Lab.

### 5.1.3 Beregning af energitjeneste

#### **Energiflow ind i tørreovnen**

Emner, rammer, kroge og det samlede conveyor system tilføres ovnen ved en temperatur på ca. 20°C (rumluften er 24°C, men emnerne er underafkølede efter afvaskningen før tørreovnen). Erstatningsluften for den luftmængde, der afsuges fra ovnens top, tilføres ovnen ved ca. 24°C. Conveyorhastigheden er ca. 1,4 meter pr. minut, og der er tre kroge pr. meter. En krog vejer ca. 700 gram. Krogene er af almindelig stål. Rammerne ophænges på hver anden eller tredje krog, så de pulverbelagte emner ikke støder ind i hinanden og beskadiger pulverbelægningen, der er skrøbelig før hærdeningen af pulveret er gennemført.

I registreringsperioden kom der ca. 40 rammer med emner i timen. Hver ramme med emner vejer ca. 2 kg. Heraf er den største del af stål og resten messing. Elvarmestave forbruger i gennemsnit 18 kW og cirkulatorerne afsætter ca. 3 kW varmeenergi inde i ovnen.

Der er varmegenvinding fra den varme hærdeovn, der efterfølger tørreovnen, over til tørreovnen. Der suges således ca. 620 kg. procesluft pr. time fra toppen af hærdeovnen. Proce-

sluften, der er 170°C varm, suges gennem en Ø200 isoleret spirokanal, og den varme indblæsningsluft tilledes i toppen af tørreovnen for varmegenvinding.

### Energiflow ud af tørreovnen

Emner, rammer og kroge forlader ovnen ved ca. 160°C. Kæden i conveyorbane er ca. 100°C, når den forlader tørreovnen, idet den bliver beskyttet af kædeløbet, som omkranser kædens tre sider. Udsugningsluften forlader ovnen i den våde ende ved 40°C samt en relativ fugtighed på 15%. I den tørre ende er luften 64°C varm og har en relativ fugtighed på 3%. Der udsuges henholdsvis ca. 800 og ca. 1.600 kg luft pr. time.

Ovnens overflade er, som følge af den gode isolering, relativt kold, ca. 25-45°C. På endestykkerne dog ca. 60°C. Herved tabes der energi i form af stråling og konvektion fra ovns overflade. Herudover tabes der energi til omgivelserne ved stråling gennem åbningerne ved ind- og udløb.

### Energibalancen for tørreovnen

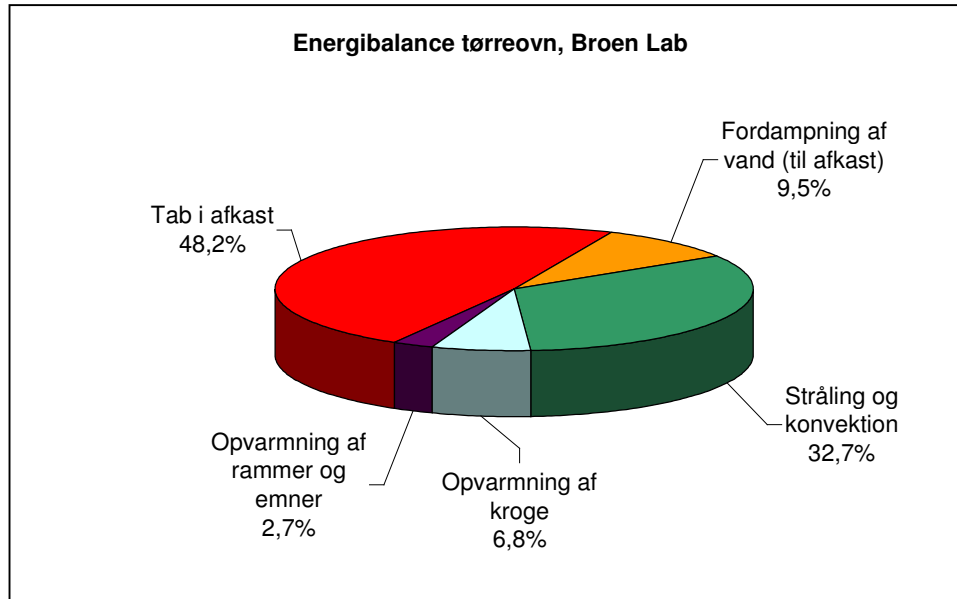
På baggrund af registreringer af flow, temperaturer, emnestørrelse, vægt på kroge og conveyorbane samt en række øvrige parametre, er der opstillet en energibalance der er vist i nedenstående tabel 5.1.

Energibalance	Mængde [stk./h] el. [kg/h]	Vægt [kg/stk.]	Cp [kJ/kg.°C]	Temperatur [°C]	Energi- strøm [kJ/s]
<b>Ind:</b>					
Effekttag til almindelig elvarme					18,0
Afgivet effekt fra cirkulatorer					3,0
Kroge på conveyorbane	252	0,7	0,46	20	0,5
Rammer og emner	40	2,0	0,40	20	0,2
Kæde på conveyorbane	84	2,0	0,46	20	0,4
Luft fra varmegenvinding, hærdeovn	618	-	1,08	169	31,3
Øvrig indsugningsluft	1.703	-	1,13	24	12,8
<b>Sum</b>					<b>66,1</b>
<b>Ud:</b>					
Kroge på conveyorbane	252	0,7	0,46	160	3,6
Rammer og emner	40	2,0	0,40	160	1,4
Kæde på conveyorbane	84	2,0	0,40	100	1,9
Luft i afkastkanal våd ende	758	-	1,44	39	11,8
Luft i afkastkanal tør ende	1.563	-	1,16	64	32,3
Stråling og konvektion					15,3
<b>Sum</b>					<b>66,3</b>

Tabel 5.1. Varmebalance for tørreovn til lakanlæg hos Broen Lab.

Med baggrund i energibalancen er den nøjagtige fordeling af energiforbruget til tørreovnen beregnet. Fordelingen kan ses af figur 5.3, hvoraf det fremgår, at en stor del af den tilførte

energi til ovnen går til tab. Godt 48% af den tilførte energi tabes i afkastet over taget som varm luft. Knap 33% tabes i selve ovnlokalet som strålings- og konvektionstab fra ovnen. Ca. 10% bruges til opvarmning af kroge, conveyor og VVS-emnerne. Endelig bruges der ca. 10% til fordampning af det vand, der kommer ind i ovnen på emnerne. Det skal dog nævnes, at opvarmning af emner og kroge, samt stråling og konvektionstab, kommer rumopvarmningen til gode i vinterhalvåret.



Figur 5.3. Fordeling af energiforbruget på tørreovnen hos Broen Lab.

### **Virkningsgraden for energitjenesten for tørreovnen**

Virkningsgraden for energitjenesten defineres som forholdet mellem den nødvendige energitilførsel til at udføre den opgave som ovnen egentlig skal udføre, og det faktiske tilførte energiforbrug til ovnen.

Analysen viser en virkningsgrad for energitjenesten på tørreovnen på ca. 12%. Den nødvendige energitilførsel er beregnet som summen af energiforbrug til opvarmning af emner og rammer samt til opvarmning og fordampning af vand på emnerne i ovnen. Såfremt der kun fokuseres på den rene fordampning af vand, som er det egentligt reelle formål med tørreovnen, er virkningsgraden kun ca. 10%. En virkningsgrad på 10% til 12% er i den lavere ende, og det kan sandsynligvis forbedres.

#### *5.1.4 Optimering af energiforbrug til tørreovn*

Fra analysen af energitjenesten er der identificeret følgende muligheder for optimering af energiforbruget til tørreovnen, der efterfølgende gennemgås:



1. Mindre afsugning fra ovnen.
2. Højere ovnbelastning.
3. Mindske varmetabet til omgivelserne ved stråling og konvektion.
4. Lettere materiale for kroge.
5. Alle fire tiltag gennemføres.
6. Anden energiteknologi.

### Ad 1. Mindre afsugning fra ovnen

Ovnen er oprindeligt dimensioneret til et nominelt flow af våde emner gennem ovnen. I det undersøgte tilfælde var flowet af emner noget lavere. Det betyder, at den afsugede luftmængde fra ovnens våde og tørre ende indeholder beskedne fugtmængder, hvorved tabet i den udsugede varme luft er relativt stort. En løsning herpå kunne derfor være, at der monteres en spjældregulering - eller endnu bedre - en hastighedsregulering af de blæsere, der suger fra ovnens våde og tørre ende.

Hvis der eksempelvis blev afsuget den halve luftmængde fra den våde ende og en tredjedel fra den tørre ende, ville temperaturen og den relative fugtighed i udsugningskanalerne stige til hhv. ca. 45°C og 80°C samt ca. 20% og ca. 4%. Elforbruget til ovnens elvarmelegemer vil falde ca. 10 kW. Virkningsgraden for energitjenesten vil herved stige til ca. 13,5%.

### Ad 2. Højere ovnbelastning

På samme måde kan der opnås en øget virkningsgrad for energitjenesten, hvis conveyorhastigheden øges, eller hvis emnerne hænger tættere, så belastningen af ovnen øges. Hvis conveyorhastigheden eksempelvis stiger til det dobbelte, eller hvis der er dobbelt så mange emner på krogene, vil ovnens effektoptag øges med ca. 10 kW – fra 18 til 28 kW. Da den dobbelte mængde samtidig tørres, vil virkningsgraden for energitjenesten stige til ca. 20%.

### Ad 3. Mindske varmetabet til omgivelserne ved stråling og konvektion

Tabet fra ovnen til stråling og konvektion er ca. en tredjedel af det samlede energiforbrug til ovnen. Fordelingen ses af tabel 5.2.

	Areal [m <sup>2</sup> ]	Tempera- tur [°C]	Varmetab [kW]	Fordeling [%]
<b>Strålings og konvektionstab fra flader:</b>				
Top	22,8	45	5,2	34,2
Sider	87,5	30	5,3	34,5
Endestykker	6,5	60	2,6	17,1
Bund	22,8	25	0,3	2,1
<b>Stråling fra ind- og udløb til produktionslokalet:</b>				
Indløb	0,98	50	0,2	1,2
Udløb	0,98	166	1,7	10,9
<b>Sum</b>			<b>15,3</b>	<b>100</b>

Tabel 5.2. Beregning af stråling og konvektionstab fra tørreovn hos Broen Lab.

Såfremt der optimeres på ovnens isoleringsevne, eksempelvis gennem efterisolering og påbygning af bafler eller sluser, som hindrer strålingstabet ved ind- og udløb, kan det samlede tab reduceres fra 15,3 kW til 3,3 kW - eller en reduktion på 12 kW i tilført effekt. Herved stiger virkningsgraden for energitjeneste fra 12% til knapt 16%.

#### **Ad 4. Lettere materiale for kroge**

Der kunne anvendes kroge af lettere materialer til conveyorbane. De anvendte kroge er af almindelig stål. Såfremt der anvendtes et lettere materiale, eksempelvis aluminium, som er næsten en tredjedel så let som stål pr. volumenenhed, men dog med den dobbelte varmeyfylde, vil der kunne opnås en lidt bedre virkningsgrad. Effektoptaget vil falde ca. 2 kW og virkningsgraden for energitjenesten vil stige ca. 0,5%. Et alternativ til materialeskift er optimering af vægten af de eksisterende kroge, ved at minimere godstykkelsen, såfremt det er muligt ud fra styrkemæssige forhold.

#### **Ad 5. Alle fire tiltag gennemføres**

Hvis alle fire ovenstående tiltag gennemføres vil det betyde at effektoptaget til ovnen vil kunne reduceres med 15,5 kW, og virkningsgraden for energitjenesten vil stige fra 12% til ca. 35%. En virkningsgrad for energitjenesten på 35% er acceptabel for en modstandsbase-ret elovn, da der altid vil være en række tab.

#### **Ad 6. Anden energiteknologi**

Hvis virkningsgraden for energitjenesten skal stige yderligere, vil det sandsynligvis være nødvendigt at skifte til en anden energiteknologi. Det skal være muligt, at borttørre vandet, samtidig med, at det primært er emnerne der opvarmes. Dette vil i høj grad eliminere tab der skyldes, at ovnrummet også er varmt.

Såfremt der eksempelvis anvendes induktiv opvarmning eller højfrekvensopvarmning på en kort byggelængde, vil det alene være emnerne og vandet der opvarmes i løbet af kort tid. Hermed skal der alene bruges energi til opvarmning af selve emnerne samt til opvarmning og fordampning af vandet. Dertil kommer, at der er strålings- og konvektionstab fra de varme emner til det kolde ovnrum samt beskedne tab til opvarmning af kroge, luft mm. Udover denne direkte energimængde, skal der bruges energi til forkoblingsudstyr og evt. køleudstyr, i alt ca. 30% oveni, hvilket er en erfaringsværdi fra tidligere byggede ovne. Den samlede virkningsgrad for energitjenesten kan ved denne opvarmningsform opgøres til knapt 50%. Der kan sandsynligvis ikke opnås højere virkningsgrad for energitjenesten.

Hvor forslagene 1-5 kan udføres uden videre i praksis, kan det være mere tvivlsomt, hvorvidt den nuværende tørreproces kan substitueres med en proces med mere direkte opvarmning. Der vil dels være praktiske problemer med spoler og elektroder, men der vil også være problemer med de varierende størrelser på emnerne, der skal tørres og pulverlakeres.

## 5.2 Case omkring elopvarmet gennemløbs hærdeovn til pulverlak

### 5.2.1 Indledende casebeskrivelse

Denne case omhandler to traditionelle elopvarmede gennemløbs hærdeovne for pulverlak, der anvender forskellig teknologi til opvarmning.

Den ene ovn er en del af et samlet elopvarmet pulverlakeringsanlæg hos Broen Armatur i Assens. Her producerer man VVS-armaturer til brug i laboratorier. Anlægget består først af et affedtning- og afvaskningsanlæg. Herefter kommer en tørreovn til tørring af de våde og vaskede emner. Efter tørreanlægget påføres emnerne pulverlak elektrostatisk, hvorefter de sendes ind i hærdeovnen for hærkning af pulverlakken. Efter hærdeovnen er der en kølezone for endelig nedkøling af emnerne.

Den anden ovn er en hærdeovn hos SBS i Svendborg. Hærdeovnen er placeret i et såkaldt færdiggørelsesanlæg, hvor der produceres bremseklodser til MC-markedet. Anlægget pålimer bremsebelægning på en bagplade som efterfølgende pulverlakeres ved - først elektrostatisk - at få påført et tyndt lag pulverlak, og dernæst hærkning i hærdeovnen. Emnerne pulverlakeres dels af hensyn til korrosion og dels af kosmetiske hensyn. Efter hærdeovnen er der en karrusel kølezone.

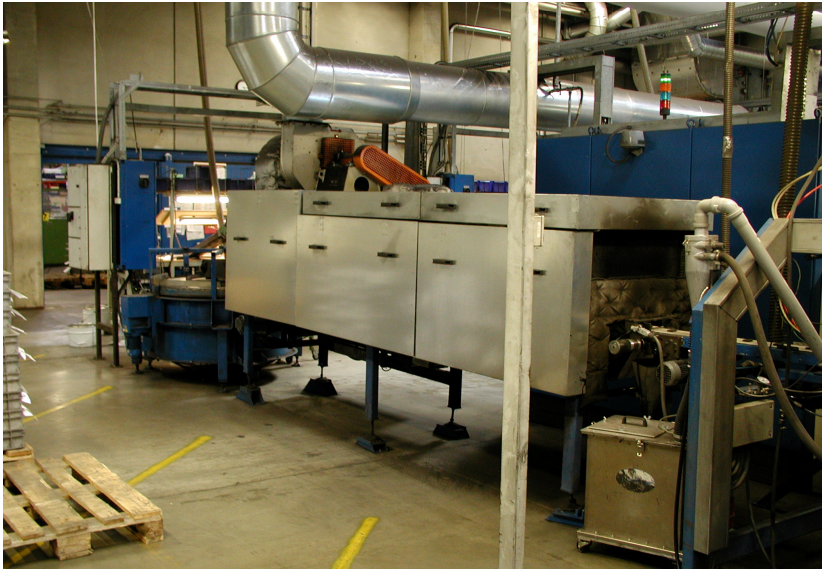
### 5.2.2 Beskrivelse af emner, ovn og opvarmningsteknologi

De emner, der kører gennem hærdeovnene, varierer i størrelse og form. Hos Broen Armatur ophænges emnerne på rammer som igen hænges på kroge, som fastgøres til en conveyorbane, der løber igennem ovnen. Emnerne der typisk er af messing eller jern vejer ca. 2 kg samlet for emner og rammer. Hos SBS løber emnerne igennem ovnen på et metalbånd. Emnerne vejer typisk 100 gram pr. styk.

Ovnen hos Broen Armatur er rektangulær og ca. 14 x 1,3 meter og 2,5 meter høj. Den er placeret på 1 meter høje ben, således at den passer til resten af produktionsanlægget. Ovnen er beklædt med malede plader og under pladerne er der isoleret med varmebestandigt isoleringsmateriale. Der afsuges fra ovnens top og den udsugede luftmængde sendes til tørreovnen i samme anlæg for varmegenvinding.

Ovnen hos SBS er noget mindre. Den er 3,7 meter lang, 1 meter bred og 0,8 meter høj. Den er placeret på 1 meter høje ben, således at den passer til resten af produktionsanlægget. Før ovnen er der placeret et fluid bed anlæg til påføring af pulverlak, og efter ovnen er der placeret en kølekarussel til nedkøling af emnerne. Der er et gennemgående 15 cm bredt perforeret endeløst bånd, der løber igennem ovnen med emnerne. Efter udløbet af ovnen løber

båndet under ovnen og tilbage til indløbet igen. Ovnen er beklædt med blanke strålingsned-sættende plader, og under pladerne er der isoleret med varmebestandigt isoleringsmateriale. Der afsuges fra ovnens top og den varme udsugningsluft kastes over tag. Figur 5.4 viser hærdeovnen hos SBS.



Figur 5.4. Illustration af hærdeovn hos SBS.

Ovnen hos Broen Armatur er opvarmet med traditionelle modstandsopvarmede elstave. Den samlede installerede effekt til elvarmestavene er ca. 200 kW. Hertil kommer 5 cirkulatorer, som dels afkøler elvarmestavene og dels sørger for at den afgivne varme cirkuleres i ovnen.

Ovnen hos SBS er derimod bestykket med IR-teknologi. Der er i ovnens top placeret IR-elementer, som reguleres efter en overfladetemperatur på ca. 600°C på IR-panelerne. Den resulterende temperatur på emnerne bliver herved ca. 200°C.

### 5.2.3 Beregning af energitjeneste

#### **Energiflow ind i hærdeovnene**

Hos Broen Armatur tilføres emner, rammer og kroge og det samlede conveyor system ovnen ved en temperatur på ca. 24°C. Erstatningsluften for den luftmængde, der afsuges fra ovnens top, tilføres ovnen ved ca. 24°C. Conveyorhastigheden er ca. 1,4 meter pr. minut og der er tre kroge pr. meter. Hver krog vejer ca. 700 gram. Krogene er af almindelig stål. Rammerne ophænges på hver anden eller tredje krog, så de pulverbelagte emner ikke støder ind i hinanden og beskadiger pulverbelægningen, der er skrøbelig før hærdeningen af pulveret er gennemført. I registreringsperioden kom der ca. 40 rammer med emner i timen. Hver ramme vejer med emner ca. 2 kg. Heraf er den største del af stål og resten messing. Kæden i conveyorbanen er endeløs og den vejer anslået 2 kg pr. meter. Kædehastigheden er 1,4 meter pr. minut. Elvarmestavene forbruger i gennemsnit 90 kW og cirkulatorerne afsætter ca. 4 kW inde i ovnen.

Hos SBS tilføres emner, det endeløse bånd og erstatningsluften, hærdeovnen ved ca. 22°C. Der tilføres ca. 400-600 emner pr. time afhængigt af deres vægt. Større vægt giver lavere flow og omvendt. Emnerne er af almindeligt stål. Emnerne varierer i størrelse, fra 50 gram og opefter. Det endeløse bånd vejer ca. 2 kg i alt. Det er ca. 10 meter langt og 15 cm. bredt. Båndhastigheden er ca. 100 meter i timen, svarende til, at der er ca. 20 cm. mellem hvert emne. Pulverlakken hærder ved ca. 200°C. IR-elementerne tilføres elektrisk effekt. I registreringsperioden blev den maksimale effekt registreret til 40 kW og gennemsnittet til ca. 12,5 kW.

### **Energiflow ud af hærdeovnene**

Hos Broen Armatur forlader emner, rammer og kroge ovnen ved ca. 200°C. Kæden i conveyorbanen er ca. 150°C, når den forlader hærdeovnen, idet den bliver beskyttet af kædeløbet, som omkranser kædens tre sider. Der er varmegenvinding fra hærdeovnen til tørreovnen. Der udsuges ca. 620 kg varm procesluft pr. time igennem en Ø200 isoleret spirokanal fra toppen af hærdeovnen. Temperaturen er ca. 170°C og den varme indblæsningsluft tilledes i toppen af tørreovnen for varmegenvinding.

Ovnen er på overfladen relativt kold, ca. 34°C, dog på endestykkerne ca. 60°C. Herved tabes der energi til stråling og konvektion fra ovnens sider. Ved indløb og udløb tabes der ligeledes energi ved stråling til omgivelserne.

Hos Broen Armatur er tabene fra hærdeovnens ind- og udløb samt fra hærdeovnen over i kølezonen ikke kendte. Tabet ved indløbet til ovnen er forsøgt reduceret ved hjælp af en luftsluse, som konstant cirkulerer luft, med forholdsvis høj hastighed, forbi indløbet når ovnen er i gang. Luften cirkuleres ved hjælp af en blæser, som er placeret på toppen af ovnen. Såvel kanaler som blæser er uisolerede.

Hertil kommer tab ved overgang fra hærdeovn til kølezonen. Kølezonen er i samme dimensioner som hærdeovnen, og overgangen til kølezonen er blot en stor åbning i hærdeovnen. Der er ikke sluse ved overgangen fra hærdeovnen til kølezonen. Det var, ved gennemgangen af ovnen, ikke muligt at bestemme tabet ved overgang fra hærdeovn til kølezone, da det ikke var muligt at komme ind i ovnen under produktionen. Alle de beskrevne tab er derfor skønnede.

Hos SBS forlader emner og bånd hærdeovnen ved ca. 200°C. Overfladetemperaturen på bagpladen kan måles til 200°C, men det forudsættes ikke at være gældende for den samlede godstykkelse. Udsugningsluften forlader ovnen med ca. 200°C. Der suges ca. 125 m<sup>3</sup>/h. Ovnen er ca. 30-40°C varm på overfladen på trods af god isolering. I bunden af ovnen endog 80°C. Herved tabes der energi til stråling og konvektion fra ovnens sider. Ved ind- og udløb tabes energi ved stråling til omgivelserne. Denne del er dog ubetydelig.

### Energibalancen for hærdeovnene

Tabel 5.3 og 5.4 viser, på baggrund af registreringer af flow, temperaturer, emnestørrelser, conveyerbane, endeløse bånd mv., energibalancen for de to hærdeovne.

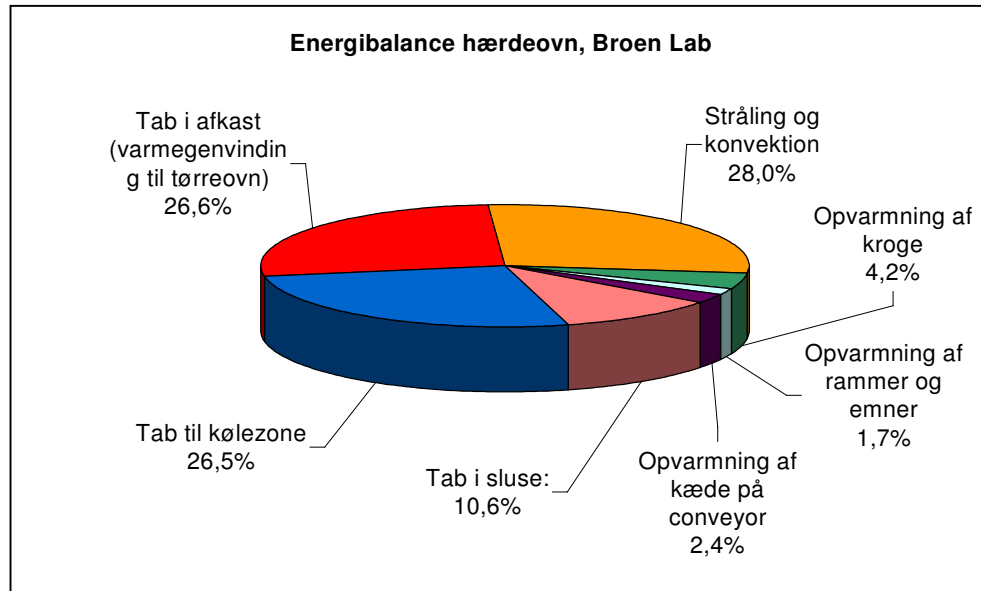
Energibalance	Mængde [stk./h] el. [kg/h]	Vægt [kg/stk.]	Cp [kJ/kg.°C]	Tempe- ratur [°C]	Energi- strøm [kJ/s]
<b>Ind:</b>					
Effektoptag til almindelig elvarme					90,0
Afgivet effekt fra cirkulatorer					4,0
Kroge på conveyorbane	252	0,7	0,46	24	0,5
Rammer og emner	40	2,0	0,40	24	0,2
Kæde på conveyorbane	84	2,0	0,46	24	0,4
Indsugningsluft	618	-	1,50	24	6,2
<b>Sum</b>					<b>101,4</b>
<b>Ud:</b>					
Kroge på conveyorbane	252	0,7	0,46	200	4,5
Rammer og emner	40	2,0	0,40	200	1,8
Kæde på conveyorbane	84	2,0	0,40	150	2,8
Udsugning til tørreovn	618	-	1,08	169	31,3
Tab i sluse ved indløb			Skønnet		10,0
Infiltrationstab ved overgang til kølezone			Skønnet		25,0
Stråling og konvektion					26,5
<b>Sum</b>					<b>101,8</b>

Tabel 5.3. Varmebalance for hærdeovn til lakanlæg hos Broen Armatur.

Energibalance	Mængde [stk./h] el. [kg/h]	Vægt [kg/stk.]	Cp [kJ/kg.°C]	Tempe- ratur [°C]	Energi- strøm [kJ/s]
<b>Ind:</b>					
Effektoptag til strålevarme					12,5
Emner	500	0,1	0,4	22	0,1
Indsugningsluft	125	-	1,0	22	0,8
Bånd	1	20,0	0,4	30	0,1
<b>Sum</b>					<b>13,5</b>
<b>Ud:</b>					
Emner	500	0,1	0,4	200	1,1
Luft i afkastkanal	125	-	1,2	200	8,4
Bånd	1	20,0	0,4	200	0,4
Stråling og konvektion					3,4
<b>Sum</b>					<b>13,3</b>

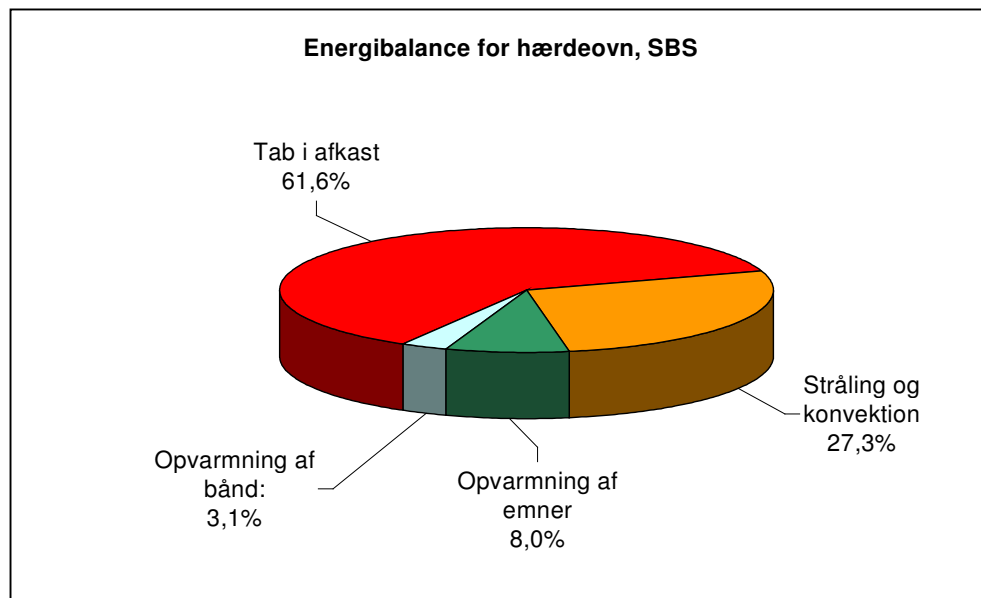
Tabel 5.4. Varmebalance for hærdeovn til pulverlak hos SBS.

Af energibalancen vist i tabel 5.3 ses, at der er store tab fra hærdeovnen hos Broen Armatur. Hos SBS derimod er tabene færre og mindre, hvilket fremgår af tabel 5.4. På baggrund i energibalancen, viser figur 5.5 og figur 5.6 fordelingen af energiforbruget til de to forskellige tørreovne.



Figur 5.5. Fordeling af energiforbruget på hærdeovnen hos Broen Armatur.

Som det ses af figur 5.5, tabes en stor del af den tilførte energi til ovnen. Knap 27% af den tilførte energi tabes i afkastet, men genindvindes dog, og sendes til tørreovnen i samme anlæg. Andre 28% tabes i selve ovnlokalet som strålings- og konvektionstab fra ovnen. Godt 10% tabes som følge af slusen før ovnen, og andre knapt 27% tabes ved overgang fra hærdeovn til kølezone. Godt 8% bruges til opvarmning af kroge, conveyor og VVS-emnerne.



Figur 5.6. Fordeling af energiforbruget på hærdeovnen hos SBS.

Af figur 5.6 ses, at tabet til afkastet er ca. 62%, mens tabet til stråling og konvektion er ca. 27%. Tabet til opvarmning af båndet udgør 3% og selve opvarmningen af emnerne, der kører igennem ovnen, ca. 8%.

### Sammenligning af virkningsgraden for energitjenesten for de to hærdeovne

Virkningsgraden for energitjenesten er, for de to ovne, beregnet som forholdet mellem energiforbruget til opvarmning af emner sammenholdt med det samlede energiforbrug til ovnen og sammenlignet i tabel 5.5.

Tab i ovne	Broen Armatur [kW]	SBS [kW]
Tab i afkast	25,1	7,6
Stråling og konvektion	26,5	3,4
Opvarmning af emner	1,6	1,0
Opvarmning af bånd mm.	6,3	0,4
Tab i sluse ved indløb	10,0	0,0
Tab ved udløb	25,0	0,0
<b>Sum</b>	<b>94,4</b>	<b>12,3</b>
<b>Virkningsgrad ved energitjeneste</b>	<b>1,7%</b>	<b>8,0%</b>

Tabel 5.5. Sammenligning af virkningsgrad for energitjeneste mellem de to hærdeovne.

Vurderes virkningsgraden for energitjenesten for de to hærdeovne, er der meget stor forskel. Ovnen hos SBS har en virkningsgrad, der er ca. 5 gange højere end ovnen hos Broen Armatur. Det skyldes dels at selve opvarmningen af emnerne er noget højere hos SBS, men også at der er betydelige færre og mindre tab ved ovnen hos SBS.

En virkningsgrad for energitjenesten på knapt 8%, som det er tilfældet for SBS, er i den lave ende. Virkningsgraden for energitjenesten hos Broen er imidlertid meget ringe, og i det følgende beskrives, hvorledes ovnen hos Broen kan optimeres.

#### 5.2.4 Optimering af energiforbrug til hærdeovnen hos Broen Armatur

Ud fra analysen af energitjenesten er der identificeret en række muligheder for optimering af energiforbruget til hærdeovnen hos Broen Armatur, der efterfølgende gennemgås:

1. Mindre afsugning fra ovnen.
2. Højere ovnbelastning.
3. Mindske varmetabet til omgivelserne ved stråling og konvektion.
4. Mindre tab ved indløb og udløb af ovnen.
5. Alle fire tiltag gennemføres.
6. Anden energiteknologi.



### **Ad 1. Mindre afsugning fra ovnen**

Ovnen er dimensioneret for et givent flow af emner igennem ovnen. I det undersøgte tilfælde, er flowet af emner noget lavere end det nominelle. Det betyder, at den afsugede luftmængde fra ovnen er højere end nødvendig, og tabet bliver som følge heraf relativt stort i forhold til energitjenesten. En løsning herpå kan være, at der monteres en spjældregulering eller en hastighedsregulering af blæseren, der afsuger fra ovnens top. Hvis der eksempelvis blev afsuget den halve luftmængde, vil elforbruget til ovnens elvarmelegemer falde ca. 12 kW. Virkningsgraden for energitjenesten vil herved stige til ca. 2%.

### **Ad 2. Højere ovnbelastning**

På tilsvarende vis kan der opnås en bedre virkningsgrad for energitjenesten, hvis conveyorhastigheden øges, eller hvis emnerne hænger tættere. Hvis conveyorhastigheden eksempelvis øges til den dobbelte, eller hvis der er dobbelt så mange emner på krogene, vil det betyde at ovnens effektoptag kun skal øges med ca. 8 kW fra 90 kW til 98 kW, samtidig med at der hærdes den dobbelte mængde. Virkningsgraden for energitjenesten vil dermed stige til ca. 3%.

### **Ad 3. Mindske varmetabet til omgivelserne ved stråling og konvektion**

Tabet fra ovnen til stråling og konvektion er ca. 28% af det samlede energiforbrug til ovnen. Såfremt der optimeres på ovnens isoleringsevne ved efterisolering af top, bund og sider, kan det samlede tab reduceres til det halve, fra ca. 27 kW til 14 kW. Herved stiger virkningsgraden for energitjenesten til knapt 2%.

### **Ad 4. Mindre tab ved indløb og udløb af ovnen**

Tabene ved indløb og udløb fra ovnen er skønnet til henholdsvis 10 kW og 25 kW. Tabet ved indløbet skyldes en påbygget sluse, som i sig selv er en fornuftig løsning. De 4 meter rørføring i Ø300 mm. kanal, samt ventilator mm. er imidlertid uisolerede. Der vil derfor kunne reduceres i tabet, hvis kanaler og ventilatorhus blev efterisoleret. Ved udløbet af hærdeovnen tabes der ligeledes en del energi, da hærdeovnen går direkte over i kølezonen. Fra kølezonen suges der en stor luftmængde, således at det er muligt at køle emnerne ned hurtigt nok til, at de kan håndteres af de medarbejdere der tager emnerne fra conveyoren. Da hærdeovn og kølezone hænger sammen er det ikke tilstrækkeligt styret, hvor meget luft der enten suges eller tilkommer fra hærdeovnen over i kølezonen ved ren infiltration. For at løse dette problem er det derfor nødvendigt at indblæse nøjagtig samme luftmængde til kølezonen, som der suges ud - eller alternativt at hærdeovnen og kølezonen separeres fra hinanden. Det er løseligt vurderet, at de to tab herved kan halveres, og at den tilførte effekt til ovnen hermed kan reduceres med knapt 18 kW. Virkningsgraden for energitjenesten vil dermed stige til ca. 2%.

**Ad 5. Alle fire tiltag gennemføres**

Hvis alle fire ovenstående tiltag gennemføres, vil det betyde, at effektoptaget til ovnen reduceres med 35 kW, svarende til 40% reduktion. Virkningsgraden for energitjenesten vil stige fra 1,7% til ca. 5,3%. En virkningsgrad for energitjenesten på 5,3% er stadig lavt, men det skyldes, at der tale om en stor ovn set i forhold til ovnbelastningen, når der sammenlignes med ovnen hos SBS.

**Ad 6. Anden energiteknologi**

Hvis virkningsgraden for energitjenesten skal stige yderligere, vil det nok være nødvendigt at skifte til en anden energiteknologi. Det skal være muligt, at borttørre vandet, samtidig med, at det primært er emnerne der opvarmes. Dette vil i høj grad eliminere tab der skyldes, at ovnrummet også er varmt.

Hvis IR kan anvendes - og med et godt dækningsareal - ville energitjenesten kunne hæves til eksempelvis 20-30% i bedste fald. Såfremt der eksempelvis blev anvendt induktiv opvarmning eller højfrekvensopvarmning, (induktiv opvarmning bruges blandt andet ved pulverlakering af rør), hvor alene emnerne og pulverlakken blev opvarmet til eksempelvis 200°C på en kort byggelængde, ville en stor del af de eksisterende tab kunne undgås, med en endnu bedre virkningsgrad til følge.

Hermed skal der alene bruges energi til opvarmning af selve emnerne. Dertil kommer, at der er strålings- og konvektionstab fra de varme emner til det kolde ovnrøm. Endelig er der beskedne tab til opvarmning af kroge, luft mm. Udover denne direkte energimængde, skal der bruges energi til forkoblingsudstyr og evt. køleudstyr, i alt ca. 30% oveni (erfaringsværdi).

Den samlede virkningsgrad for energitjenesten kan ved denne opvarmningsform opgøres til godt 26%. Der kan sandsynligvis ikke opnås højere virkningsgrad for energitjenesten. Det skyldes dels, at selve energitjenesten - opvarmning af emnerne - i forvejen udgør en lille del af de samlede tab. Herudover er der uundgåelige tab til forkoblingsudstyret til induktionshøjfrekvesopvarmningen.

Hvor forslagene 1-5 sandsynligvis umiddelbart kan lade sig gøre, kan det være mere usikkert, om hærdeprocessen umiddelbart kan konverteres til den mere direkte opvarmning. Den mere direkte opvarmning med infrarød opvarmning praktiseres allerede hos SBS, men induktionsopvarmning og højfrekvensopvarmning kan dels give praktiske problemer med spoler og elektroder, men også problemer med de varierende størrelser på emnerne, der skal pulverlakeres. I praksis er det sandsynligvis mest konvektion der kan anvendes til pulverlakering, og optimering af anlæggene vil derfor være den primære metode til at øge virkningsgraden for energitjenesten.

### 5.3 Case omkring elopvarmet sinterovn til bremseklodser

#### 5.3.1 Indledende casebeskrivelse

Denne case omhandler en sinterovn, der er placeret hos SBS i Svendborg. SBS producerer blandt andet bremseklodser til motorcykler og sinterovnen bruges til at sintre bremseklodsen, således at den opnår specielle styrke- og varmebestandige egenskaber. Den specielle sintrede bremseklods anvendes til motorcykel race.

#### 5.3.2 Beskrivelse af emner, ovn og opvarmningsteknologi

Bremseklodserne, der kører gennem sinterovnen, varierer i størrelse og form. Hos SBS placeres klodserne på kakler som igen placeres på et endeløst metalbånd, der løber igennem ovnen. Klodserne, der består af en messing/bronze bagplade med en pålimet bremsebelægningsklods, vejer typisk 100 gram pr. styk.

Sinterovnen er 5,2 meter lang, 1,3 meter bred og 1,4 meter høj. Den er placeret på ca. 1 meter høje ben. Efter ovnen er der placeret en kølezonen til nedkøling af emnerne, således at de efter sintringen kan håndteres af medarbejderne. Der er et gennemgående 30 cm bredt perforeret endeløst bånd, der løber igennem ovnen med klodserne. Efter udløbet af ovnen løber båndet igennem kølezonen og under ovnen tilbage til indløbet igen. Ovnen er beklædt med malede plader og under pladerne er der isoleret med varmebestandigt isoleringsmateriale.

Ilt er meget uønsket i ovnen af hensyn til sintringsprocessen, hvorfor der konstant tilledes kvælstof og brint til ovnen. Kvælstoffet skal forhindre infiltration med atmosfærisk luft og brinten skal reagere med den ilt, der trods alt kommer ind i ovnen, således at der dannes vand. Der afsuges ikke direkte fra ovnen, men via en emhætte, placeret over indløbet til ovnen, som udsuger udviklede gasser fra sintringen, kvælstoffet og den dannede vanddamp, ved forbrænding af brinten.

Ovnen er opvarmet med traditionelle modstandsopvarmede elstave. Den samlede installerede effekt til elvarmestavene er ca. 90 kW. Der er ikke luftcirkulation i ovnrummet, som har en bredde ligesom båndet på ca. 30 cm og en højde på højst 10 cm. Figur 5.7 er et billede af sinterovnen.



Figur 5.7. Illustration af sinterovnen hos SBS.

### 5.3.3 Beregning af energitjeneste

#### **Energiflow ind i sinterovnen**

Bremseklodserne tilføres sinterovnen ved ca. 22°C. Klodserne placeres med ca. 16 stk. på hver kakkelse, som placeres lige efter hinanden på det endeløse bånd. Hastigheden for de endeløse bånd og dermed kakklerne er 130 mm. pr. minut, svarende til 26 kakkler pr. time. Det endeløse bånd vejer ca. 420 kg i alt. Det svarer til, at der kører 130 kg bånd ind i ovnen pr. time. Båndet er af almindeligt stål og er nedkølet til rumtemperatur, før det kører igen returerer i ovnen. For at fjerne ilt fra ovnrummet tilledes der konstant 5 Nm<sup>3</sup> brint og 2 Nm<sup>3</sup> kvælstof pr. time, hvor kun brinten repræsenterer en brændværdi. Elvarmestavene forbruger i gennemsnit 27 kW.

#### **Energiflow ud af sinterovnen**

Bremseklodser, kakkler, det endeløse bånd og diverse gasser og vanddamp forlader ovnen ved ca. 800°C. Klodser, kakkler og bånd bliver herefter nedkølet i en vandkølet zone. Gasserne forlader ovnen ved indløbet til ovnen, hvor de bliver opsuget i en emhætte som hænger ned over ovnen her. Herudover tabes der energi til strålings- og konvektionstab fra ovnens overflader, sider, top og bund.

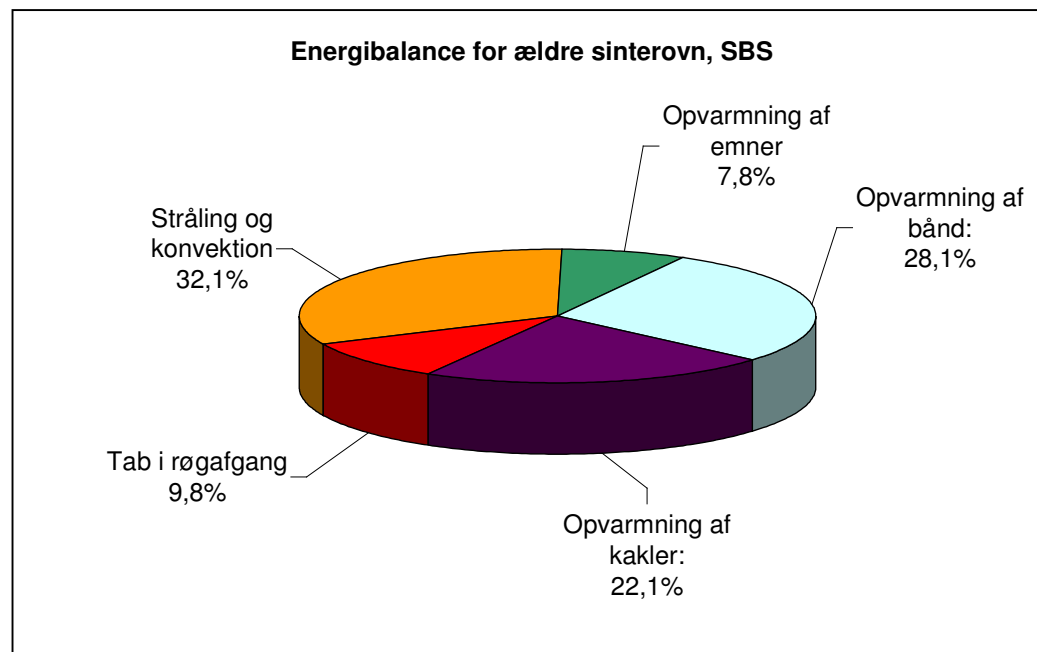
#### **Energibalancen for sinterovnen**

Tabel 5.6 viser, på baggrund af registreringer af temperaturer, antal klodser, båndhastighed, det endeløse bånd mv., energibalancen for sinterovnen.

Energibalace	Mængde [stk./h], [m <sup>3</sup> /h] el. [kg/h]	Vægt [kg/stk.]	Cp [kJ/kg·°C]	Tempe- ratur [°C]	Energi- strøm [kJ/s]
<b>Ind:</b>					
Effektoptag til elvarmelegemer					28,0
Emner	416	0,1	0,40	22	0,1
H <sub>2</sub> tilført ovnen (brændværdi)	5	-	-	22	17,8
O <sub>2</sub> tilført ovnen	4	1	0,96	22	0,02
N <sub>2</sub> tilført ovnen	2	1,25	1,00	22	0,02
Kakler	26	1,8	1,00	22	0,3
Bånd	131	1	0,46	30	0,5
<b>Sum</b>					<b>46,7</b>
<b>Ud:</b>					
Emner	416	0,1	0,40	800	3,7
Røggas fra forbrænding af H <sub>2</sub>	4	1	2,20	800	4,0
N <sub>2</sub> fraført ovnen	2	1,25	1,00	800	0,6
Kakler	26	1,80	1,00	800	10,4
Bånd	131	1	0,46	800	13,4
Stråling og konvektion					14,7
<b>Sum</b>					<b>46,7</b>

Tabel 5.6. Varmebalance for ældre sinterovn til bremseklodser hos SBS.

På baggrund i energibalancen er det muligt, at beregne den nøjagtige fordeling af energiforbruget til sinterovnen, hvilket fremgår af figur 5.8. Af figuren fremgår det, at en stor del af den tilførte energi til ovnen tabes. Godt 32% af den tilførte energi tabes ved stråling og konvektion, mens ca. 28% anvendes til opvarmning af det endeløse bånd. Ca. 22% bruges til opvarmning af kaklerne og andre ca. 10% går til tab i emhætten i form af varme gasser og vanddamp.



Figur 5.8. Energibalancen for den ældre sinterovn hos SBS.

### **Virkningsgraden for energitjenesten for sinterovn**

Analysen viser en virkningsgrad for energitjenesten på sinterovnen på ca. 8%. Den nødvendige energitilførsel er beregnet som energiforbruget til opvarmning af emner. En virkningsgrad på 8% er i den lavere ende, og det kan forbedres.

#### *5.3.4 Optimering af energiforbrug til sinterovnen hos SBS*

Der er ud fra analysen af energitjenesten identificeret følgende muligheder for optimering af energiforbruget til sinterovnen hos SBS, der efterfølgende gennemgås:

1. Reducere opvarmning af bånd.
2. Reducere opvarmning af kakler.
3. Mindske varmetabet til omgivelserne ved stråling og konvektion.
4. Alle tre tiltag gennemføres.
5. Anden energiteknologi.

#### **Ad 1. Reducere opvarmning af bånd**

Til at føre kakler og emner igennem ovn og kølezone, løber der et ca. 20 meter langt og 30 cm bredt perforeret bånd af stål. Båndet vejer ca. 420 kg. Med en båndhastighed på 130 mm. pr. minut svarer det til, at der løber 130 kg bånd ind i ovnen, som herved opvarmes til ovntemperaturen på 800°C. Efter ovnen føres båndet videre til kølezonen og efter kølezonen returnerer båndet under ovnen og tilbage til indløbet. Ved indløbet har båndet igen opnået rumtemperaturen på ca. 22°C. Opvarmningen af båndet resulterer i, at der konstant tabes knapt 13 kW, svarende til 28% af det samlede tilførte energiforbrug.

Hvis det i stedet blev valgt, at der var tre bånd i forbindelse med ovnen, et bånd før indløbet, et bånd inde i ovnen og et bånd efter ovnen til kølezonen, kunne energitabet til opvarmningen undgås, da båndet inde i ovnen konstant ville have den høje temperatur på 800°C. De to ydre bånd kunne hermed undgå at blive opvarmet direkte. Hermed vil energitjenesten stige fra 8% til 11%, og den tilførte eleffekt til sinterovnen falde fra gennemsnitligt 28 kW til 15 kW.

#### **Ad 2. Reducere opvarmning af kakler**

På samme måde kan der opnås en bedre virkningsgrad for energitjenesten, hvis opvarmningen af kaklerne kunne reduceres. Der tilføres ca. 26 kakler pr. time og kaklerne vejer ca. 1,8 kg pr. styk. Det svarer til, at der hver time opvarmes 47 kg ildfaste kakler, som har en relativt høj varmeylde. Kaklerne opvarmes til 800°C, og nedkøles helt inden de igen benyttes. Der tabes herved i gennemsnit godt 10 kW, svarende til 22% af den samlede tilførte energi.

Hvis der i stedet valgtes kakler med en lavere varmekapacitet eller kakler der havde en mindre tykkelse end de nuværende (ca. 1 cm tykke), ville energitabet til opvarmningen af kak-

lerne reduceres. Hvis eksempelvis vægten/varmekapaciteten for kaklerne kunne reduceres med 50%, ville virkningsgraden for energitjenesten stige fra 8% til ca. 9%, og effektoptaget vil falde fra gennemsnitligt 28 kW til 23 kW.

### **Ad 3. Mindske varmetabet til omgivelserne ved stråling og konvektion**

Tabet fra ovnen til stråling og konvektion er ca. 32% af det samlede energiforbrug til ovnen. Såfremt der optimeres på ovnens isoleringsevne ved efterisolering af top, bund og sider samt ved at afslutte med blanke plader eller aluminiumsmaling, ville det samlede effektoptag reduceres fra ca. 28 kW til godt 19 kW. Herved ville virkningsgraden for energitjenesten stige til knapt 10%.

### **Ad 4. Alle tre tiltag gennemføres**

Hvis alle tre ovenstående tiltag gennemføres vil det betyde, at effektoptaget til ovnen vil kunne reduceres med knapt 27 kW, hvilket svarer til at der næsten ikke skal bruges elektricitet til opvarmning. Virkningsgraden for energitjenesten vil stige fra 8% til knapt 19%. Det ville således primært være energitilvæksten fra forbrænding af den tilledte brint, som ville kunne holde ovnen i gang.

### **Ad 5. Anden energiteknologi**

Hvis virkningsgraden for energitjenesten skal stige yderligere, vil det sandsynligvis være nødvendigt at skifte til en anden energiteknologi, hvor det ikke er nødvendigt at holde ovnrummet varmt, for at opnå sintringen, således at det alene er emnerne der opvarmes.

Hvis der eksempelvis blev anvendt induktiv opvarmning eller højfrekvensopvarmning, hvor klodserne og bremsebelægningen opvarmes til eksempelvis 800°C på en ganske kort byggelængde, ville en stor del af de eksisterende tab kunne undgås med en endnu bedre virkningsgrad til følge. Hermed ville der kun skulle bruges energi til opvarmning af selve emnerne og sintringen, samt til strålings- og konvektionstab fra de varme emner til det kolde ovnrum. Hertil kommer beskedne tab til opvarmning af bånd og kakler. Endelig ville brugen af brint og kvælstof kunne reduceres, da ovnrummet omkring ovnen med induktion/højfrekvens har en relativt kort byggelængde, og dermed lille volumen til at indeholde ilt. Det flydende brint og kvælstof, som der bruges er meget bekosteligt.

Udover den direkte energi, skal der bruges energi til forkoblingsudstyr og evt. køleudstyr, i alt ca. 30% oveni. Det forudsættes, at temperaturen i det lille ovnrum hvor induktions- eller højfrekvensenheden befinder sig, vil blive opvarmet til anslået 200°C som følge af tilsætningen af brint og strålings- og konvektionstab fra de opvarmede emner.

Den samlede virkningsgrad for energitjenesten kan ved denne opvarmningsform opgøres til godt 54%. Der kan sandsynligvis ikke opnås højere virkningsgrad for energitjenesten. Det skyldes dels, at selve energitjenesten - opvarmning af emnerne - udgør en i forvejen lille del

at de samlede tab. Herudover er der uundgåelige tab til forkoblingsudstyret til induktions-højfrekvesopvarmningen.

Hvor forslagene 1-3 sandsynligvis kan lade sig gøre uden videre i praksis, kan det være mere usikkert om det kan lykkes at konvertere sintringsprocessen til den mere direkte opvarmning. Induktionsopvarmning og højfrekvensopvarmning kan give praktiske problemer med spoler og elektroder, og problemer med de varierende størrelser på emnerne, der skal sintres. Dette vil kræve videre undersøgelser.

## **5.4 Case omkring optimering af elopvarmet tørreovn til klippe/lime maskine**

### *5.4.1 Indledende casebeskrivelse*

Denne case omhandler en IR baseret tørreovn, der er placeret hos SBS i Svendborg. SBS producerer blandt andet bremseklodser til motorcykler, og tørreovnen bruges til at fortørre limen på bremsebelægninger hos SBS. Bremsebelægningerne monteres efter fortørringen på bremsesko og hærdes herefter i spænd i naturgasopvarmede hærdeovne.

### *5.4.2 Beskrivelse af emner, ovn og opvarmningsteknologi*

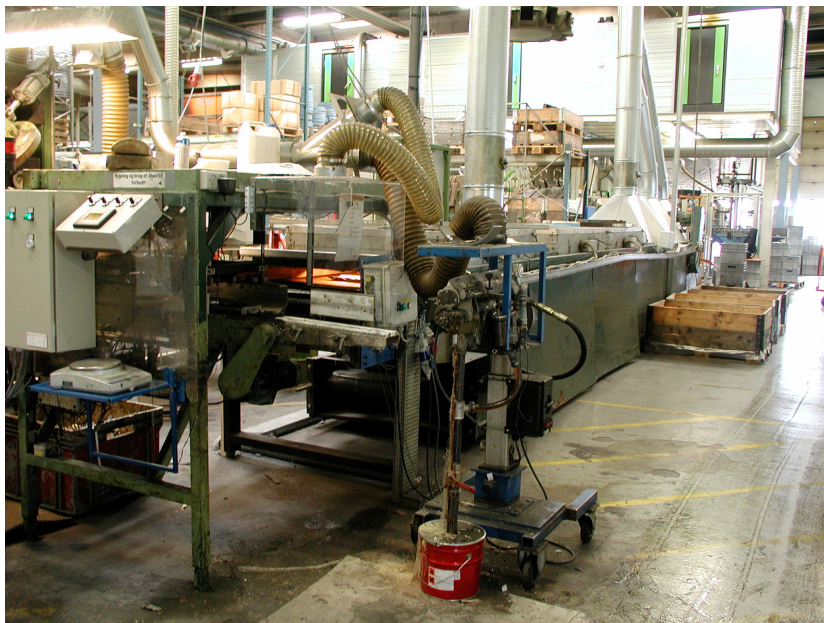
Afklipping af bremsebelægningerne i den rette længde, samt påføring af lim, sker på et arrangement før tørreovnen. Efter afklipping og limpåføring lægges belægningerne med limsiden opad og føres ind på et perforeret bånd, der løber inde i ovnen og således ikke bidrager til tab uden for ovnen. Inde i ovnen møder limsiden IR-elementerne, der er monteret i ovnens top. Gennem ovnen får limen tilstrækkelig varmepåvirkning fra strålevarmelementerne til, at belægningerne og limens temperatur når op på ca. 65°C. Hermed bliver belægningerne så overfladetørre, at de kan håndteres uden at de klister sammen. Under ovnen er der to underliggende kølebånd, som køler emnerne ned til lidt over rumtemperatur, før de endeligt forlader ovnen.

De emner der kører gennem tørreovnen varierer i størrelse og form. Fra små, korte og tynde bremsebelægninger til store, lange og tykke belægninger. Da ovnens varmeafgivelsen fra IR-elementerne ikke er reguleret, styres processen med båndhastigheden inde i ovnen.

Ovnen er 10 meter lang, 1 meter bred og 1 meter høj. Ovnen er beklædt med malede plader, og under pladerne er der isoleret med varmebestandigt isoleringsmateriale. Der afsuges fra ovnens top i den varme ende via en samlekanal fra både tørresektionen og de to kølesektioner. Der indblæses kold udeluft til den anden ende, hvor emnerne tilledes, både til tørresektionen og til kølesektionerne. Den fugtige og varme udsugningsluft fra udsugningen i den varme ende kastes over tag.



Ovnen er opvarmet med traditionelle elopvarmede IR-rør på hver 1 kW. Den samlede installerede effekt til elvarmestavede er ca. 17 kW. Varmeeffekten er ikke reguleret. En illustration af ovnen fremgår af figur 5.9.



Figur 5.9. Illustration af tørreovn hos SBS.

#### 5.4.3 Beregning af energitjeneste

##### **Energiflow ind i ovnen**

Emnerne tilføres ovnen ved en temperatur på ca. 23°C. Erstatningsluften for den luftmængde, der afsuges fra ovnens varme ende, tilføres ovnen ved ca. 24°C (udetemperatur på målingsdagen). Der indblæses ca. 1.700 kg udeluft pr. time. Da der udsuges en del mere luft fra ovnen end der indblæses, tilføres der desuden ca. 2.900 kg rumluft til ovnen pr. time á 23°C i form af infiltration. Effektoptaget til IR-elementerne er ca. 17 kW.

##### **Energiflow ud af ovnen**

Emnerne forlader tørrektionen ved ca. 65°C. Herefter fortsætter emnerne under ovnen på de to kølebånd, indtil de helt forlader ovnen ved ca. 29°C. Der udsuges fra ovnens varme ende ca. 4.600 kg luft pr. time ved en temperatur på ca. 35°C (luften suges dels fra tørrektion, dels fra kølezonen).

Ovnen er relativt kold, ca. 25-30°C på overfladen, som følge af den gode isolering. Herved tabes der energi til stråling og konvektion fra ovnens sider på ca. 1,4 kW. Herudover bruges der en beskedne mængde energi til at fordampe opløsningsmidlet i limen.

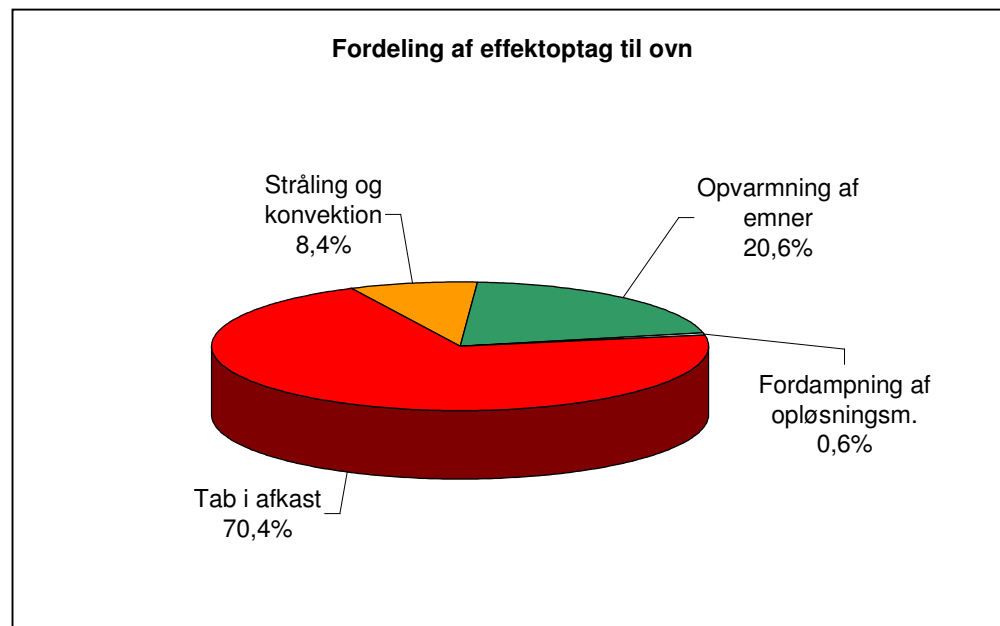
### Energibalancen for ovnen

På baggrund af registreringer af flow, temperaturer, emnestørrelse, vægt med mere, er det muligt at bestemme energibalancen for tørreovnen. Balancen er vist af tabel 5.7.

Energibalance	Mængde [stk./h] el. [kg/h]	Vægt [kg/stk.]	Cp [kJ/kg·°C]	Tempe- ratur [°C]	Energi- strøm [kJ/s]
<b>Ind:</b>					
Effekttag til strålevarme					17,0
Emner	3.000	0,04	2,5	23	1,9
Luft fra indsugningskanal	1.726	1	1,004	24	11,6
Infiltration (luft fra lokalet)	2.891	1	1,004	23	18,5
<b>Sum</b>					<b>49,0</b>
<b>Ud:</b>					
Emner	3.000	0,04	2,5	65	5,4
Luft i afkastkanal	4.617	1	1,004	33	42,1
Fordampning af opløsningsmiddel	Skønnet værdi (residual)				0,1
Stråling og konvektion	Beregnet				1,4
<b>Sum</b>					<b>49,0</b>

Tabel 5.7. Varmebalance for klippe/lime maskinens tørrektion hos SBS.

På baggrund i energibalancen er det muligt, at beregne den nøjagtige fordeling af energiforbruget til ovnen. Den ses af figur 5.10 herunder.



Figur 5.10. Energibalancen for klippe/lime maskinens tørrektion hos SBS.

Som det ses af figuren går en stor del af den tilførte energi til ovnen til tab. Godt 70% af den tilførte energi tabes i afkastet over taget som varm luft. Andre knapt 8,4% tabes i selve ovnlokalet som strålings- og konvektionstab fra ovnen. Godt 20% bruges til opvarmning af

emnerne og limen. Og under 1% bruges til det formål, ovnen reelt har, nemlig fordampning af opløsningsmidlet i limen.

### **Virkningsgraden for energitjenesten for tørreovnen**

Den rene energitjeneste for tørreovnen, dvs. ovnens reelle funktion, består alene i fortørre den lim, der sidder på emnerne. For at opnå dette opvarmes emnernes overflade og limen til ca. 65°C, hvorved opløsningsmidlet i limen fordamper.

Analysen viser en virkningsgrad for energitjenesten på tørreovnen på godt 21%. Virkningsgraden er beregnet som energiforbrug til opvarmning af emner og lim, samt fordampning af opløsningsmidlet i limen. En virkningsgrad på 21% er i den lave ende, og det kan sandsynligvis forbedres. Såfremt der kun fokuseres på den rene fordampning af opløsningsmidlet i limen, som er det egentligt reelle formål med tørreovnen, er virkningsgraden under 1%.

#### *5.4.4 Optimering af energiforbrug til tørreovnen*

SBS ønskede på et tidspunkt at ombygge ovnen, da den dels gav problemer med væltede emner inde i ovnen ved håndtering fra tørresektion til kølesektion, dels har store tab ved afsugningen. Der blev, ud fra analysen af energitjenesten, identificeret følgende muligheder for optimering af energiforbruget til tørreovnen hos SBS, der efterfølgende blev realiseret (dog kun forslag nr. 1 og 2):

1. Mindre afsugning fra ovnen
2. Højere ovnbelastning
3. Anden energiteknologi.

#### **Ad 1. Mindre afsugning fra ovnen**

Man reducerede flowet på udsugningsventilatoren ved at geare ventilatoren ned. Den udsugede luftmængde blev reduceret til det halve. Herved tabes der ikke så meget energi over taget, ligesom der også tabes mindre rumvarmeenergi fra produktionslokalet i vinterhalvåret, pga. af høje infiltration.

#### **Ad 2. Højere ovnbelastning**

Ovnens byggelængde blev reduceret. I stedet for den 10 meter lange ovn med IR-elementer i toppen, blev ovnens tørrelængde halveret til 5 meter. Til gengæld blev emnerne i stedet lagt tættere på båndet inde i ovnen, hvorved der ikke blev "spildt" så meget strålevarme. Båndets hastighed blev tilsvarende reduceret. På trods af den kortere tørrelængde, kan limen stadig opnå de ønskede 65°C, hvorved opløsningsmidlet i limen når at tørre. Resten af ovnens tidligere byggelængde blev i stedet brugt til kølezone, hvor indblæsning af køleluft tilledes på midten af ovnen. Afsugningen stadig foregår i ovnens varme ende.

De to tiltag tilsammen har medført at elforbruget til ovnen IR-elementer er halveret. Hertil kommer kraftig reduceret elforbrug til afsugningsventilatoren. Ovnens virkningsgrad for energitjenesten er herved fordoblet til 40%.

### **Ad 3. Anden energiteknologi**

Det blev ligeledes overvejet at konvertere til anden energiteknologi. Ib Obel Pedersen A/S forsøgte, i en forsøgsopstilling, at opvarme bremsebelægninger og lim med højfrekvensopvarmning - og med godt resultat. Imidlertid ville emnerne, med meget varierende størrelse og form, kræve en del styringsudrustning, for løbende at kunne tilpasse sig opgaven. Investeringen til dette var relativt høj, så SBS valgte i stedet at foretage den omtalte ombygning, beksrevet under forslag 1 og 2.

Med en mere ensartet produktion ville der kunne bygges et tilpasses højfrekvensanlæg med høj virkningsgrad til en tålelig investering.

## **5.5 Case omkring nyt lakeringsanlæg hos Sauer Danfoss i Nordborg**

### *5.5.1 Indledende casebeskrivelse*

Lakeringsanlægget bruges til at rense, lakere og tørre hydraulikpumper for endelig forsendelse til kunden. Anlægget kører efter nye energi- og miljørigtige principper, som dels giver Sauer Danfoss økonomiske gevinster, dels miljømæssige og arbejdsmiljømæssige fordele. Anlægget er leveret og opsat af firmaet E. Aabo Andersen i Svendborg, og bygger på et tysk patent. Anlægget i Nordborg på Als var klar til brug i starten af 2004, og er således helt nyt.

### *5.5.2 Beskrivelse af emner, ovn og opvarmningsteknologi*

Hele anlægget består af en stor lukket enhed på 20 x 8 meter i grundareal med en højde på 6 meter, som består af to etager. Emnerne, der skal afvaskes og lakeres, føres ind i ovnen ved gulvniveau og føres, efter endt behandling, ud samme sted. Hydraulikpumperne er placeret med 4 stk. på et ophæng på en conveyorbane, der løber gennem hele ovnen. Der er i alt 89 ophæng i ovnen. Med en conveyorbastighed på 0,8 meter/min. kan anlægget klare ca. 100 ophæng svarende til ca. 400 pumper i timen.

Emnerne kører først gennem et affedtnings- og fosfateringsanlæg, der sprøjter væske over pumperne gennem dyser. Efter endt afvaskning, hvor det sidste skyllevand er demineraliseret, afblæses det meste af vandet i en afblæsningszone vha. en højhastighedsblæser og rørformede dyser, mens selve ophænget drejer rundt om sin egen akse.

Den sidste vandmængde tørres i en tørresektion. Normalt ville der blive anvendt en el- eller naturgasopvarmet tørreovn, der tørrer emnerne ved en driftstemperatur på 100-150°C gennem tørreovnen. Dette var også tidligere tilfældet hos Sauer Danfoss.

I det nye anlæg anvendes køletørring til at borttørre vandet på emnerne. Emnerne føres ind i et lukket kammer, der med luftstyrede døre ved ind- og udløb, sikrer at den tørre luft forbliver i kammeret. I kammeret holdes der, ved hjælp af en affugter, en konstant lav fugtighed på ca. 30% RH og en temperatur på ca. 30°C. Ophængene kører gennem ovnen, mens små cirkulatorer sørger for god luftcirkulation omkring emnerne. Selve tørrekammeret har en længde på kun 5 meter. Udenfor tørresektionen er selve affugtningsanlægget placeret med kompressor, fordamper og kondensator. I affugtningsanlægget afkøles en delstrøm af luften fra kammeret i anlæggets fordamper, hvorved vandet slås af. Efter endt affugtning opvarmes delstrømmen i kondensatoren, før den igen sendes ind i tørrekammeret. Der borttørres ca. 2 kg vanddamp pr. time.

Efter endt tørring kører emnerne videre til lakering. Normalt anvendes pulverlakering som herefter efterhærdes i en el- eller naturgasopvarmet hærdeovn ved ca. 200°C. I dette tilfælde er der anvendt robotstyret sprøjtetlakering med vandbaseret lak. Dette muliggør, at emnerne igen kan tørres i et affugtningsdrevet tørrekammer ved ca. 30°C, hvor vanddampen fjernes fra lakken. Kammeret, der er magen til kammeret efter afvaskningen, hærder ikke lakken tilstrækkeligt til, at emnerne med det samme kan pakkes ned. Der er derfor påbygget en efterhæringszone på anlægget, hvor emnerne opvarmes til ca. 70°C. Efter hærningen af lakken, afkøles emnerne i en kølezone, hvorefter de føres til ovnens udløb. Her tages de af ophænget og pakkes direkte ned til forsendelse.

De emner, der kører gennem tørreovnen, varierer i størrelse og form. Emnerne placeres på ophæng, som igen hænges på rondeller, der fastgøres til conveyorbanelen. Emnerne vejer mellem 6 og 11 kg pr. stk. og der er 4 emner pr. ophæng. Der køres ca. 100 ophæng igennem pr. time og dermed 400 emner pr. time.

Tørrekammeret er ca. 5 meter langt, 1,5 meter bredt og ca. 2,5 meter højt. Kammeret er omkranset af præisolerede aluminiumsbeklædte plader. Ved indløb og udløb til kammeret er der monteret automatiske døre, som åbner og lukker, når der skal emner ind og ud af ovnen. Der er ingen afsugning fra kammeret ud over de kanaler, der kører ud til affugtningsanlægget, der er placeret ved siden af kammeret, og denne delstrøm recirkuleres. Kammer og affugtningsanlæg er således et lukket system.

Kammeret er ikke opvarmet ud over den opvarmning som affugtningsanlægget afstedkommer. Når delstrømmen af luft fra kammeret affugtes, genopvarmes den i affugtningsanlæggets kondensator til ca. 30°C. Kompressoren i affugtningsanlægget er en hermetisk Scroll kompressor. Hertil kommer to mindre ventilatorer til henholdsvis at suge og indblæse del-

strømmen til kammeret. Kompressoren holder en forudindstillet fordampningstemperatur i affugterens fordamper på ca.  $\pm 5^{\circ}\text{C}$ . Herved kan delstrømmen nedkøles til ca.  $0^{\circ}\text{C}$  før den atter opvarmes til ca.  $35^{\circ}\text{C}$  i kondensatoren.

### 5.5.3 Beregning af energitjeneste

#### Energiflow ind i ovnen

Emner, ophæng og conveyorrondeller tilføres ovnen ved ca.  $20^{\circ}\text{C}$  (underafkølet efter afvaskning). Der tilføres ca. 100 ophæng og ca. 400 emner pr. time. Rondeller og ophæng er af alm. stål. Emnerne er af støbejern. Ophængene vejer ca. 11 kg og emnerne fra 6,6 til 11 kg, afhængigt af deres størrelse. Rondeller og den del af conveyorbane, der opvarmes, vejer ca. 10 kg pr. stk. Disse er også lavet af alm. stål.

#### Energiflow ud af ovnen

Emner, ophænge og conveyorrondeller forlader ovnen ved ca.  $26^{\circ}\text{C}$ . Der afsuges ikke fra tørrekammeret. Ovnens er relativt kold på overfladen ( $25^{\circ}\text{C}$ ). Herved tabes der energi til stråling og konvektion fra ovnsider, men det er beskedent. Hertil kommer et beskedent energitab ved døråbning.

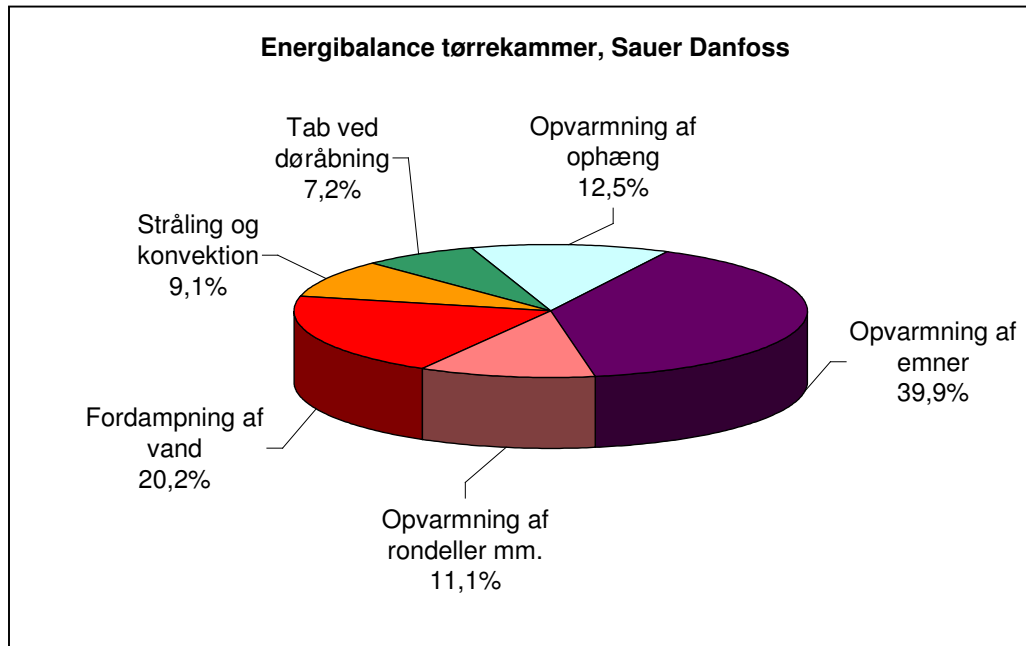
#### Energibalancen for ovnen

På baggrund af målinger af emner, ophæng, rondeller og overfladetemperaturer, kan der beregnes en varmebalance for ovnen, hvilket fremgår af tabel 5.8.

Energibalance	Mængde [stk./h]	Vægt [kg/stk.]	Cp [kJ/kg·°C]	Temperatur [°C]	Energistrøm [kJ/s]
<b>Ind:</b>					
Effekttag til affugtningsanlæg					5,5
Afgivet effekt fra cirkulatorer					1,5
Emner	400	9,0	0,46	20	9,2
Ophæng på conveyorbane	100	11,3	0,46	20	2,9
Rondel og conveyorbane	100	10,0	0,46	20	2,6
<b>Sum</b>					<b>21,6</b>
<b>Ud:</b>					
Emner	400	9,0	0,46	26	12,0
Ophæng på conveyorbane	100	11,3	0,46	26	3,8
Rondel og conveyorbane	100	10,0	0,46	26	3,3
Vandfordampning	2	1,00	-	-	1,4
Tab ved døråbning			Beregnet		0,5
Stråling og konvektion			Beregnet		0,6
<b>Sum</b>					<b>21,6</b>

Tabel 5.8. Varmebalance for den nye tørreovn hos Sauer Danfoss.

På baggrund i energibalancen er den nøjagtige fordeling af energiforbruget til tørreovnen beregnet, hvilket fremgår af figur 5.11.



Figur 5.11. Energibalancen for tørrekammeret i ovnen hos Sauer Danfoss.

Da affugtningskammeret for laktøreringen er opbygget på nøjagtigt samme måde som tørrekammeret efter afvaskningen, må det antages at energitjenesten er tilnærmelsesvist den samme.

### **Virkningsgraden for energitjenesten for tørreovnen**

Energijtjenesten for de to tørrekamre består således i, at opvarme emnerne og borttørre den vandmængde der sidder på emnerne. Udfra balancen kan virkningsgraden for energitjenesten beregnes til ca. 60%, hvilket er temmelig godt. Dette inkluderer energi til opvarmning af emner samt fordampning af vand på emnerne.

#### *5.5.4 Optimering af energiforbrug til ovnen hos Sauer Danfoss*

Sauer Danfoss har valgt, at påbygge en lakhærdningszone på anlægget, da emnerne skal kunne pakkes ned i plastic efter at de kommer ud fra ovnen. Hvis emnerne alternativt kunne stå og efterhærde i lokalet i et døgn, før de blev pakket i plastic, kunne der opnås samme resultat uden energiforbrug. Lakhærdningszonen er dog udført energirigtigt. Den er kun opvarmet til 70°C og opvarmningen sker med hedtvand. Der foretages en beskedent afsugning fra hærdnezonen på anslået 300 m<sup>3</sup>/h, som kun afstedkommer et beskedent tab. Det må derfor samlet konkluderes at lakeringsanlægget hos Sauer Danfoss er særdeles energieffektivt.

## 6 anbefalinger til videre arbejde

### 6.1 Forventet udvikling af elforbrug til elovne

De største områder for anvendelse af elovne i danske industri er jern- og metalindustrien med bl.a. hærkning af metaller, pulverlakering og sintring, træ- og møbelindustrien med tørring af lakker, hærkning af lim m.m. og bagerbutikker med bagning af brød. Bagerbutikkerne er i denne sammenhæng specielle, da de lever af friskbagte varer. For de andre brancher gælder, at elovnene indgår som en stærkt integreret del af produktionen, og i de fleste tilfælde kun står for en mindre del af eludgifterne (selv om den enkelte ovn er elintensiv).

I den senere tid har der været en større samfundsdebat om udflytning af arbejdspladser fra Danmark mod øst – dels mod de tidligere østlande, men i ligeså høj grad mod Asien og Kina i særdeleshed. Således peger Danmarks Statistik også på, at antallet af arbejdspladser indenfor industrien er på det laveste niveau siden 2. verdenskrig /8/, /9/ m.fl. Samtidig peges der dog på, at udflytningen som oftest også medfører etablering af jobs med mere komplekse arbejdsopgaver i Danmark /9/.

Udviklingen tyder derfor kraftigt på, at især virksomheder med lavteknologiske produkter vil flytte hele - eller dele af - produktionen til lavtlønsområder og kun bevare udviklings- og konstruktionsarbejdet i Danmark eksempelvis. Denne udvikling har man således også set i flere år inden for jern- og metalindustrien og træ- og møbelindustrien. Ifølge Danmarks Statistik er beskæftigelsen inden for træ- og møbelindustrien faldet med ca. 15% fra 2000 til 2003, hvilket indikerer en betydelig udflytning af arbejdspladser.

Der er ingen grund til at forvente, at de tilbageblevne virksomheder i større omfang vil øge deres anvendelse af el i elovne eller vil konvertere fra gas til el i ovnene. Derfor må der regnes med, at anvendelsen af elovne vil være svagt faldende over de kommende år, hvilket naturligt også medfører, at elforbruget til elovne vil falde i løbet af de kommende år.

### 6.2 Erstatning af modstandsopvarmede gasbaserede ovne

Med virkningsgrader beliggende i området 5-30% - og i visse tilfælde lavere - **kan** det være økonomisk fordelagtigt at udskifte den traditionelle gasfyrede modstandsopvarmede ovn med en elektrisk ovn, der opvarmer emnerne direkte. Traditionelt set har gasbaserede ovne været anvendt grundet den lave gaspris i sammenligning med elprisen. Med en virkningsgrad der kan være op til 8 gange bedre for en ovn med direkte opvarmning, vil denne i mange tilfælde opveje prisforskellen og mere til. Da investeringen imidlertid vil være bekostelig, skal overvejelserne omkring dette skift baseres på samme overvejelser, som gør sig gældende ved teknologiskifte mellem ovne baseret på elopvarmning, dvs. at den mere omkostningstunge investering i en ovn baseret på direkte opvarmningsprincipper skal kunne tilba-



gebetale sig i form af såvel energibesparelser, produktivitetstigninger som procesmæssige forbedringer.

Til gengæld vil det energimæssige besparelspotentiale langt overstige de vurderede besparelspotentialer beskrevet gennem dette arbejde. Det skyldes alene, at energiforbruget til gasopvarmede ovne er langt højere end energiforbruget til elopvarmede ovne.

Dette kan være i modstrid med hensigten om at spare på elforbruget. Imidlertid vil besparelsen af CO<sub>2</sub> udslippet til omgivelserne mindskes, hvilket er det samfundsmæssige mest væsentlige argument for at ønske elforbruget reduceret. En forudsætning for dette er dog, at elovnens virkningsgrad er 2½-3 gange større end gasovnens virkningsgrad, da produktion af el udsender ca. 2½-3 gange så meget CO<sub>2</sub> pr. kWh som anvendelse af naturgas.

### **6.3 anbefalinger om videre perspektiv ud fra dette arbejde**

I løbet af projektafviklingen har det vist sig, at en ombygning af de eksisterende ovne dels er meget bekostelig og dels er vanskelig, da de direkte opvarmningsformer kræver en nøje tilpasning til opgaven, hvilket kan indskrænke visse ovnes fleksibilitet. Dette kan betyde, at den traditionelle konvektionsvarme i mange tilfælde er den mest fleksible opvarmningsmetode, selvom den energimæssigt set langt fra er at foretrække.

Alternativet til et teknologiskifte vil således bestå i, at optimere de konvektionsovne, som der står rundt omkring på virksomhederne, således at de bliver så effektive som muligt. Dette foretages typisk gennem mindre afsugning, bedre isolering, brug af hurtiglukkende døre/sluser, minimering af opvarmning af bånd og conveyorsystemer. Kapitel 5 viste en række cases med beskrivelser af forskellige muligheder for optimering sammenholdt med beregninger af effekten af disse optimeringer. Det bør i øvrigt bemærkes, at metoderne og resultaterne fra disse cases direkte kan overføres til traditionelle gasbaserede ovne.

Anbefalingerne om det videre perspektiv består således i, at der ikke skal udføres yderligere F&U-baseret arbejde direkte på elovne med henblik på at øge energieffektiviteten, idet metoderne er kendt teknik. I stedet bør opmærksomheden hos virksomheder med traditionelle el- og gasbaserede ovne øges, således at disse gøres opmærksom på mulighederne ved at skifte teknologi. Hvis energisparepotentialet fra gasbaserede ovne medtages, at der er et meget betydeligt potentiale for energibesparelser.

## 7 Konklusion

Den overordnede konklusion er, at det er muligt at opnå store individuelle besparelser på anlæggene – dels gennem effektivisering af de eksisterende processer, men specielt gennem skift af teknologi. Investeringen i ny teknik er dog forbundet med så store omkostninger, at en energibesparelse ikke alene kan dække investeringen med en rimelig tilbagebetalingstid. Et teknologiskifte skal derfor, udover anslåede besparelser i elforbrug, sammenholdes med muligheden for produktivitetstigning, kvalitetsløft og gennemløbstid. For mange af de direkte opvarmningsmetoder er der mulighed for langt kortere procestid og dermed højere produktivitet.

Hovedformålet med dette projekt har i øvrigt været følgende:

- Teoretisk afdækning af effektivitet ved direkte opvarmning.
- Afdækning af elforbrugets fordeling på elovne opdelt på brancher og teknologi.
- Teoretisk afdækning af mulighed for reduktion af elforbrug ved skift af teknologi.
- Udførelse af cases med eksempler på optimering af eksisterende ovne samt oplæg til besparelse ved skift af teknologi.

Den teoretiske afdækning af effektivitet ved direkte opvarmning er gennemgået i kapitel 2 og sammenlignet med effektiviteten ved modstandsbaseret opvarmning. Udover modstandsbaseret opvarmning indeholder beskrivelsen følgende teknikker:

- Infrarød opvarmning.
- Induktiv opvarmning.
- Konduktiv opvarmning.
- Højfrekvensopvarmning (kapacitativ opvarmning).
- Mikrobølgeopvarmning.

Sammenligningen viser, at den teoretiske, og praktiske, effektivitet ved de direkte opvarmningsmetoder er langt højere end ved modstandsbaseret opvarmning. Således er den normale effektivitet ved modstandsbaseret opvarmning ca. 5-30%, mens effektiviteten ved direkte opvarmning ligger omkring 20-90% i afhængighed af teknikken, hvad der skal opvarmes, temperaturniveauet mv. Der kan således være tale om en markant stigning i effektiviteten – i teorien op til ca. 20 gange. Endvidere viser undersøgelserne, at direkte opvarmning kan anvendes i mange forskellige produktionsprocesser.

Kortlægningen af elforbruget til opvarmning er i kapitel 3 opdelt på brancher samt følgende slutanvendelser: Opvarmning, tørring samt brænding/sintring. De overordnede resultater af kortlægningen viser, at det samlede elforbrug til de 3 slutanvendelser er ca. 320 GWh (svarende til 1% af Danmarks elforbrug), hvoraf de ca. 200 GWh stammer fra ovne eller ovnlignende anlæg. Dette forbrug fordeler sig på mange brancher, mens størstedelen af forbruget

ligger på relativt få brancher: Bagerforretninger (27%), træindustri (12%), plastindustri (10%), jern- og metalindustri (32%) samt møbelindustri (9%). Disse 5 brancher står således for ca. 90% af elforbruget omsat i ovne.

Besparelspotentialet er endvidere vurderet på brancher i kapitel 4. I alt vurderes besparelsemulighederne til at ligge i intervallet 13-52 GWh, svarende til 7-26%. Det relativt store spænd skyldes, at der i visse brancher hersker usikkerhed for, hvorvidt besparelserne reelt har en mulighed for at vinde indpas. De anslåede forbedringsmuligheder kan tilvejebringes enten ved at optimere/forbedre den eksisterende teknologi i den eksisterende ovn, eller ved at skifte teknologi. Sidstnævnte vil kræve investering i nyt udstyr. Generelt er det vurderet, at de eksisterende teknologier kan forbedres med 10-20%. Typiske optimeringsmuligheder består i:

- Mindre afkast/udsugning.
- Hurtigere opvarmning.
- Mere isolering.
- Optimering af generatorer, transformere og emner.
- Hurtigere opvarmning af emner.

I kapitel 5 gennemgås 5 cases, der viser mulighederne for at øge effektiviteten gennem en række forholdsvis simple tiltag. I fire af casene fokuseres primært på optimering af eksisterende ovne, idet det har vist sig ikke at være lønsomt at udskifte ovne alene med energibesparelsesformål for øje. Samtlige 4 cases viser, at der er store muligheder for besparelser på elovnene, idet det er muligt at hæve virkningsgraden for energitjenesten med en faktor 2-5 gennem simple tiltag, der alle har en meget kort eller ingen tilbagebetalingstid. Den femte case viser et eksempel på, hvor markant energieffektiviteten kan øges ved at tænke anderledes – når en eksisterende ovn står for at skulle udskiftes.

Slutteligt er der i kapitel 6 givet en række anbefalinger til det videre arbejde. Resultatet af disse anbefalinger er, at der næppe er behov for en større forsknings- og udviklingsindsats i elovnes opvarmningsteknologier. Den fortsatte billiggørelse af effektelektronikken vil formentlig gradvis gøre de nye teknologier til direkte opvarmning mere interessante i takt med de forbedrede og billigere komponenter til processtyring.

Der er imidlertid brug for en øget indsats indenfor formidling og demonstration, da der individuelt kan opnås store besparelser. Det vil således være nyttigt, fx via elselskabernes energirådgivning, at virksomheder med elovne orienteres både om mulighederne for at forbedre deres eksisterende ovne og om de spændende perspektiver ved at skifte til direkte opvarmning. Her tænkes ikke alene på elbesparelser, men nok så meget på de afledte gevinster i form af pladsbesparelser og muligheder for større produktion via den kortere procestid.

Virksomhederne bør der også gøres opmærksom på det langt større effektiviseringspotentiale, der findes ved at udskifte gasopvarmede ovne til direkte elopvarmning. Der er langt flere gasovne i industrien end elovne, og potentialet ved energieffektivisering på dette område er tilsvarende større.

## 8 Referencer

- /1/: 335-38: Optimering og udvikling af elovne. PSO-F&U Ansøgning år 2003, maj 2003
- /2/: Projektforslag om optimering og udvikling af elovne - uddybning. marts 2003
- /3/: <http://www.omega.com/literature/transactions/volume1/emissivitya.html>
- /4/: Zinn, S. & Semiatin, S.L.: "Elements of Induction Heating. Design, Control, and Applications", EPRI, ASM International, April 1988, ISBN: 0871703084
- /5/: Erickson, C.J.: "Handbook of Electrical Heating for Industry. Chapter 6. Dielectric Heating", IEEE Press, 1995. ISBN: 0-7803-0420-9
- /6/: Johansson, M.: "Kortlægning af erhvervslivets energiforbrug". Dansk Energi Analyse, September 2000
- /7/: Gry, P.: "Energibesparende bagemetoder", 1988
- /8/: Dansk Energi, Statistik, [www.danskenergi.dk](http://www.danskenergi.dk)
- /9/: "Industrien sender job til udlandet", Artikel i MetroXpress, 2.juni 2004
- /10/: Dansk Industri: "Danske virksomheders etableringer i udlandet", Etableringsundersøgelsen, 2003. [www.di.dk](http://www.di.dk)

## Bilag 1: Eksempler på producenter af Ovne

I det følgende omtales nogle danske producenter og leverandører af elovne, baseret bl.a. på oplysninger fra deres hjemmesider. Det er kun et meget begrænset udvalg, der omtales. Der eksisterer mange flere virksomheder, der kan levere ovne.

### **Fornax A/S, Silkeborg ([www.fornax.dk](http://www.fornax.dk))**

Er specialiseret i anlæg og systemer til industriel varmebehandling. Har ca. 30 medarbejdere og en eksportandel på ca. 50%. Producerer konvektionsovne på især el (modstandsvarmelegeme), men også med gas og olie som energikilder. Ovntyper er kammerovne og gennemløbsovne. Standardprogrammet for kammerovne har effekter fra 5 kW til 36 kW og temperaturniveau 250°C og 500°C. Ovnene bruges til opvarmning, tørring og hærkning. Eksempler er tørring og hærkning af lak på printplader, afspænding og kontrolleret nedkøling af glas samt blødgøring af acrylplader inden hærkning. Gennemløbsovne bruges bl.a. til anløbning af fjedre og til tørring og hærkning af printplader. I emballageindustrien benyttes gennemløbsovne efter pasternoster-princippet til tørring og hærkning af f.eks. tætningsmassen mellem en dåses metalsvøb og bund.

### **Hasle Industri af 1977 A/S, Hasle ([www.hasle-refractories.dk](http://www.hasle-refractories.dk))**

Under handelsnavnet Isomax produceres ovne, hvoraf en mindre andel er elopvarmede. Disse bruges til sintring af metalpulver (hos Ferritslev Maskinfabrik) og til forskningsbrug (hos Grundfos og Rockwool, hvor temperaturniveauet er op til 1.800°C)

### **Ib Obel Pedersen A/S, Bagsværd ([www.obel-p.dk](http://www.obel-p.dk))**

Firmaet har 75 medarbejdere og producerer/leverer et bredt spektrum af produkter. To store områder er HF-anlæg og induktionsanlæg. HF-anlæggene, der arbejder med radiobølger med frekvens på 13,56 MHz, bruges i træindustrien til hærkning af lim i limtræsbjælker, vinduer, etc. Ca. 80% af generatorens afgivne effekt overføres til limfugerne. HF-anlæggene bruges endvidere til tørring af tekstiler og vandbaserede lakker, til sterilisering og pasteurisering af levnedsmidler, til varmebehandling (hærkning, støbning, anløbning, temperering) i metalindustrien o.a. Induktionsanlæggene arbejder med frekvenser på 2-4 kHz. De benyttes til hærkning af f.eks. savklinger, opvarmning af metalemner inden de pulverlakeres, varmebehandling af svejste konstruktioner, anløbning, udglødning m.m.

### **E. Aabo Andersen, Svendborg ([www.aabo.dk](http://www.aabo.dk))**

E. Aabo Andersen A/S - i daglig tale kaldt Aabo Maleanlæg - blev grundlagt 10 april 1980. Firmaet leverer anlæg til overfladebehandling med såvel pulver som vådlak. Alle Aabo ovne kan leveres med opvarmning via gas, el eller olie, og standard brænder systemer kan belastes op til 550 kW med lufttydelser på op til 72.000 m<sup>3</sup>/h pr. brænderenhed. Aabo Maleanlæg dækker hele temperatur skalaen fra 50° C op til 450° C.

**Scan-Plexus, Svendborg ([www.scan-plexus.com](http://www.scan-plexus.com))**

Scan-Plexus udvikler og producerer anlæg til industriel overfladebehandling, med egen ingeniør-, projekt-, svejse-, montage- og malerafdelinger. Scan-Plexus har ca. 30 ansatte placeret i Svendborg. Scan-Plexus produktprogram består bl.a. af forbehandlingsanlæg, hærde- og tørreovne, pulverbokse, vådlakbokse, conveyoranlæg og styringssystemer. Scan-Plexus leverer normalovne (80-240°C) og højtemperaturovne (240-420°C). Fælles for begge ovntyper er, at de kan leveres som lige-, vende- eller kammerovne, og de tilhørende brænderunits har hver et kapacitetsspænd på 14.000-42.000 m<sup>3</sup>/h. Ovnene er isolerede med op til 250 mm mineraluld og kan opvarmes direkte eller indirekte med gas eller el.

**Ideal-line, Fåborg ([www.ideal-line.dk](http://www.ideal-line.dk))**

Ideal-line er Skandinaviens største producent af anlæg til overfladebehandling med egen engineering afdeling med løbende udvikling af nye produkter, og en salgsorganisation der varetager salg til hele verden. Ovne leveres med forskellige former for opvarmning: Direkte gas opvarmet, indirekte gas/olie opvarmet, elopvarmet og hedtolie opvarmet. Ideal Line leverer ovne med effektive slusefunktioner for energioptimal drift, men også ovne med automatiske døre. Ideal-line leverer lavtemperatur- og højtemperaturovne op til ca. 500°C.

**Imitec, Svendborg ([www.imatec.dk](http://www.imatec.dk))**

Leverandør af anlæg for tørring, opvarmning, hærkning og pasteurisering med anvendelse af mikrobølger, infrarød stråling og varm luft. Firmaet har to ingeniører samt servicefolk. Anlæggene produceres hos underleverandører, og mikrobølgeudstyret købes i Tyskland, England og USA. Største eleffekt for deres anlæg har været 200 kW. Anlæggene for tørring og hærkning bruges bl.a. i støberier og plastindustrien til behandling af støbeforme samt til tørring af organiske materialer. Anlæg til pasteurisering bruges eksempelvis til æggebakker og paller, der pasteurieres før genbrug samt til pasteurisering af gylle og foderstoffer. I træindustrien kan mikrobølgeanlæg bruges til tørring af træ helt ned til 5-7% fugtighedsindhold, men træindustrien er meget konservativ og holder fast i de gammelkendte tørremetoder.

**Lytzen A/S, Herlev ([www.lytzen.com](http://www.lytzen.com))**

Producerer ovne for sterilisering, tørring og varmebehandling. Har ca. 60 medarbejdere og en eksportandel over 90%. Ovnene er hovedsageligt elopvarmede (modstandsopvarmning, andre opvarmningsformer er ikke inde i billedet), men der er også dampopvarmede. Temperaturer i ovnene er op til 600°C. Grænsen skyldes, at ovnene er lavet af stålplader. Steriliseringsovne er til den farmaceutiske industri. Tørreovne bruges til tørring af printplader, granulater m.m. Varmebehandling kan eksempelvis være af stempelstænger.