

**Elbesparelser ved kalk- og fouling og friktionsnedsættende materialer**  
**Fase 1**

**Teknologisk Institut**  
**September 2004**

Teknologisk Institut  
Projektnr.: 1160818

Co-finansiering: ELFOR  
Projektnr.: 334-8

## Projektgruppe for fase 1

Projektleder	Civilingeniør Jens Brusgaard Vestergaard, Teknologisk Institut
Tribologisentret	Civilingeniør Mads Kogsgaard Hansen, Teknologisk Institut
Materialeprøvning	Civilingeniør Thomas Zweig, Teknologisk Institut
Materialeprøvning	Civilingeniør Arve Krøis, Teknologisk Institut
Vestas Aircoil A/S	Ph.D. Claus Hübbe Ibsen
Electrolux A/S	Hugo Friis
Electrolux A/S	Jan Andersen

## Indholdsfortegnelse

<b>1 SAMMENFATNING OG KONKLUSION</b> .....	<b>4</b>
1.1 BAGGRUND.....	4
1.2 LABORATORIETEST .....	4
1.3 FELTTEST .....	5
<b>1.3.1 Blæserhjul med sol-gel:</b> .....	5
<b>1.3.2 Varmelegemer med sol-gel og tribologiske overflader:</b> .....	5
<b>1.3.3 Ladeluftskøler med sol-gel:</b> .....	5
1.4 KONKLUSION .....	6
1.5 DET VIDERE ARBEJDE.....	6
<b>2 BESKRIVELSE AF MATERIALER</b> .....	<b>7</b>
2.1 BELÆGNINGSPRINCIPPER.....	7
<b>2.1.1 PVD-belægning</b> .....	7
<b>2.1.2 Belægningsskarakteristik</b> .....	8
<b>2.1.3 Belægningssystemer</b> .....	8
<b>2.1.4 Sol-gel belægninger</b> .....	10
2.2 INDUSTRIEL IMPLEMENTERING AF SOL-GEL BELÆGNINGERNE.....	12
2.3 MATERIALEEGENSKABER.....	12
<b>2.3.1 Overfladeenergier</b> .....	12
<b>3 TEST I LABORATORIET</b> .....	<b>14</b>
3.1 OPBYGNING AF KALKBELÆGNINGER .....	14
3.2 VURDERING OG MÅLING AF VEDHÆFTNINGSEVNE .....	15
3.3 KORROSIONSEGENSKABER.....	17
3.4 VARMEOVERGANGSTAL .....	18
<b>4 FELTTEST</b> .....	<b>19</b>
<b>4.1.1 Varmelegemer</b> .....	19
<b>4.1.2 Blæserhjul til tørretumbler</b> .....	19
<b>4.1.3 Ladeluftkøler</b> .....	20
<b>4.1.4 Vandudskiller</b> .....	22
<b>5 PERSPEKTIVER FOR ELBESPARELSER</b> .....	<b>23</b>
<b>6 REFERENCER</b> .....	<b>25</b>

# 1 Sammenfatning og konklusion

## 1.1 Baggrund

Undersøgelser har vist, at der er en sammenhæng mellem et materiales overfladespænding og vedhæftning af biofouling. Desto lavere overfladespænding desto lavere bliver vedhæftningen /1/.

Teknologisk Institut har de senere år udviklet nye typer overflader med lave overfladespændinger. Det drejer sig om to typer tribologiske overflader bestående af henholdsvis wolfram med kulstof (WC/C) samt DLC-belægninger (diamond like carbon), og det drejer sig om varianter af sol-gel (lak-baserede) overflader. På grund af den lave overfladespænding er der en formodning om, at disse overflader kan være foulingafvisende og afvisende over for kalkbelægninger. Hvis sådanne belægninger kan undgås, vil det for mange produkter være ensbetydende med store elbesparelser.

De tribologiske overflader skal belægges i specielle plasmaovne, hvorfor de er forholdsvis dyrere i sammenligning med sol-gel overfladerne, som kan belægges ved en lakeringsproces. Tribologiske overflader er derfor mest velegnede for belægning af mindre emner i store serier, mens der for sol-gel ikke er de store begrænsninger. Til gengæld formodes det, at de tribologiske overflader har en længere levetid.

Til udvikling og undersøgelse af de kalk- og smudsafvisende egenskaber blev der i 2002 fremsendt en ansøgning i 3 faser til ELFOR, hvor fase 1 blev bevilget. Fase 1 er afviklet fra marts 2003 til september 2004, og dokumenteres i nærværende rapport.

En række virksomheder: Electrolux, Vestas AirCoil, Arlafoods, Grundfos og APV Invensys er deltagere i hovedansøgningen, hvor der i denne fase er fokus på Electrolux og Vestas AirCoil.

## 1.2 Laboratorietest

Laboratorieafprøvning ved opbygning af en kalkbelægning ved overbrusning af drikkevand på et 80°C varmt rør behandlet med de forskellige typer overflader viser:

### Tribologiske overflader

WC/C       overordentlig gode kalkafvisende egenskaber  
DLC-TR     gode kalkafvisende egenskaber

### Sol-gel overflader

LRC-1       gode kalkafvisende egenskaber i sammenligning med referencen  
LRC-2       netop bedre en referencen  
LRC-3       gode kalkafvisende egenskaber i sammenligning med referencen  
LRC-4, 130 overordentlig gode kalkafvisende egenskaber

LRC, M-Rt overordentlig gode kalkafvisende egenskaber

Generelt er der en god vedhæftning til referencerne i afprøvningerne.

Korrosionstest i salttågekammer viser, at sol-gel overfladerne er korrosionshæmmende, idet dette er et krav for vandudskilleren og ladeluftskøleren, som oftest benyttes i et saltholdigt miljø. De gode korrosionshæmmende egenskaber af sol-gel åbner for perspektiver om at benytte mere korrosionsfølsomme materialer som fx aluminium frem for rustfrit stål på skibe og off-shore konstruktioner.

### **1.3 Felttest**

De forskellige materialer er afprøvet på produkter fra de to deltagende virksomheder i denne fase.

#### **1.3.1 Blæserhjul med sol-gel:**

Afprøvning af blæserhjul installeret i en tørretumbler hos Electrolux i Tommerup viser gode resultater. Blæserhjulet fremstår helt blankt, mens referencen i rustfrit stål fremtræder loddent med fnuller.

De gode resultater gav modet til også at afprøve et sol-gel belagt blæserhjul i USA, hvor der er særlige store problemer med tilsmudsning af blæserhjul. Efter afprøvning i ca. 3 måneder er meldingen, at blæserhjulet fremstår helt blankt, og at teknikken virker meget lovende.

#### **1.3.2 Varmelegemer med sol-gel og tribologiske overflader:**

Varmelegemerne er felttestet i både Danmark og Sverige.

Varmelegemerne installeret i Danmark er blevet besigtiget sidst i august 2004, og det viste sig, at der var for lidt kalk på såvel de belagte varmelegemer som referencerne for at kunne sige noget om de kalkafvisende egenskaber. Feltafprøvninger kører derfor videre indtil Electrolux' næste planmæssige service om ca. 6 måneder, hvilket indgår i fase 2.

Det sæt varmelegemer med mest kalk på, blev dog udtaget til nærmere undersøgelse sammen med de svenske varmelegemer. Her viste foreløbige undersøgelser for sol-gel overfladen som forventet, at kalken bygges op til en vis tykkelse, hvorefter den springer af i flager på grund af interne spændinger mellem kalkbelægningen og varmelegemet. Derefter begynder processen forfra. Dette stemmer overens med de erfaringer, der haves fra produktion af sjapis, hvor sol-gel overfladen netop er sammensat, så der bygges iskrytaller op i punkter, og når krystallen får en vis størrelse, rives den af.

#### **1.3.3 Ladeluftskøler med sol-gel:**

Ladeluftskøleren er afprøvet på et motoranlæg ved et gartneri. Det viste sig, at sol-gel overfladen medførte, at varmeovergangen mellem luft og køler blev forringet i en sådan grad, at den måtte skiftes ud med en konventionel køler. Noget tyder på, at sol-gel overfladen har ændret strømningsprofilen omkring kølefinerne, så der er mindre turbulens, hvilket reducerer varmeovergangen.

Vestas Aircoil er overbevist om, at den overfladebehandlede køler vil kunne modstå miljøet som sod og korrosion i motoren langt bedre end en standard køler. Men der ligger en opgave i at undersøge overfladebehandlingens indflydelse på varmeovergangen. En

forbedring af varmeovergangen kan ske gennem ændret geometri af kølerfinnerne og gennem profilering af sol-gel overfladen, hvilket vil blive undersøgt i fase 2. Yderligere vil de bedste af de seneste udviklede sol-gel overflader blive afprøvet i fase 2.

#### **1.4 Konklusion**

I løbet af fase 1 er der udviklet både tribologiske og sol-gel overflader med virkelig gode kalkafvisende egenskaber. Dette er demonstreret ved laboratorieforsøg og ved felttest af blæserhjul til tørretumblere og ladeluftskølere til motorer med turboladere.

På baggrund af de gode og positive resultater vil det være absolut relevant at forsætte det frugtbare projektarbejde med at søge fase 2.

Ved projektets begyndelse var der en formodning om, at de vigtigste parametre for vedhæftning af belægninger er overfladespænding og underlagets ruhed. Det viser sig, at der også må være andre parametre, der har betydning.

Potentialet for energibesparelse inden for de i fase 1 nævnte produkter er ca. 20 GWh årligt.

#### **1.5 Det videre arbejde**

Det vil være relevant at undersøge, om teknikkerne kan anvendes på andre produkter som pumper, sensorer, vekslerplader og flader, der skal rengøres i fx levnedsmiddelindustrien. Tilsudsning eller tilkalkning af disse produkter vil alle medføre et øget energiforbrug.

Der er behov for at forbedre sol-gel overfladens varmeovergang fra luft til køleelement, hvilket sandsynligvis kan gøres ved at ændre geometrien af kølefladerne.

Der er behov for at finde metoder til at skabe indre spændinger mellem kalk og underlag med henblik på at få kalklag til at springe af og optimere dette med de gode kalkafvisende egenskaber. Dette kan fx være ved ultralyd, temperaturudvidelse og mekanisk og det kan være nanoteknologisk ved at forbedre den teknik, som kendes fra sjapis, hvor de krystaldannende hydrofile punkter kombineres på en passende måde med de kalkafvisende hydrofobe områder, så man får de størst mulige indre spændinger mellem kalkbelægningen og underlaget.

At klarlægge de parametre, som har betydning for vedhæftning af kalk og smuds.

At optimere sprøjte og dyppeprocesser for emner med komplicerede geometrier.

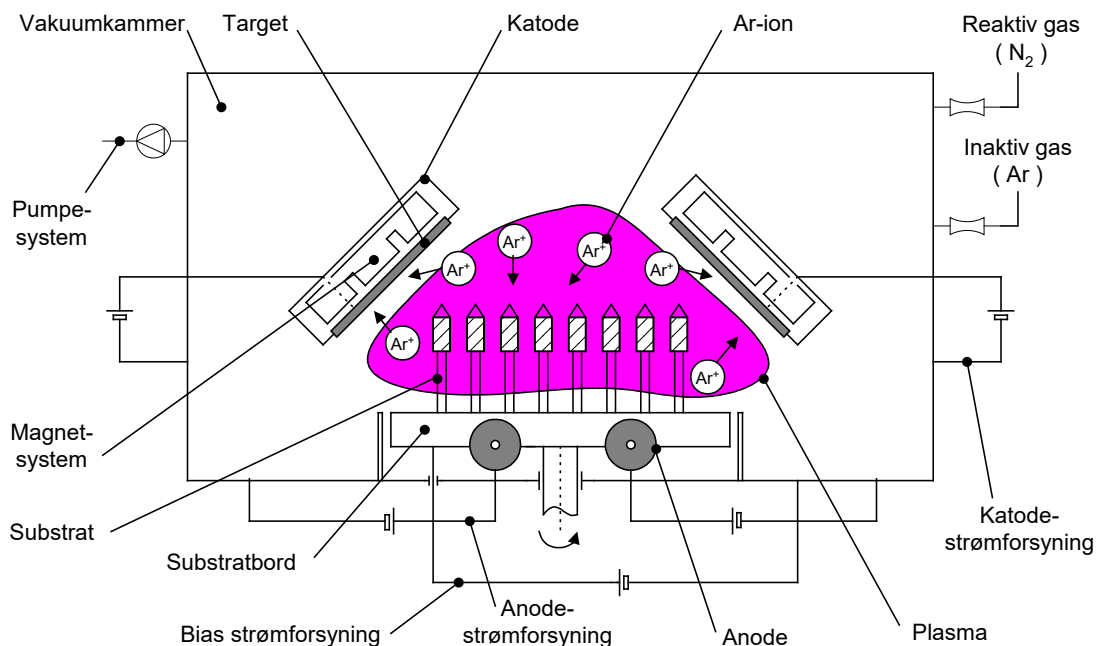
## 2 Beskrivelse af materialer

### 2.1 Belægningsprincipper

#### 2.1.1 PVD-belægning

PVD (Physical Vapor Deposit) er en fællesbetegnelse for en række tørre belægningsprocesser, som bygger på en fysisk fordampning og efterfølgende deponering af en metalkomponent. På Tribologisentret, Teknologisk Institut anvender en variant af teknologien, som betegnes *magnetron sputtering PVD*. Ved magnetron sputtering udnyttes det, at atomer og elektroner med høj energi ved kollision med en fast overflade vil løsrive atomer eller molekyler fra overfladen som resultat af impulsoverførsel. På denne måde dannes atomer eller molekyleret "støv" af det faste stof, som bruges til belægning. Til bombardering af overfladen anvendes ioner af ædelgasser, primært argon, da de ikke reagerer med den bombarderede overflade eller de løsrevne partikler. Ædelgassen benævnes også arbejdsgassen, da den ikke direkte deltager i kemiske reaktioner i processen. Ionbombardementet udføres i et plasma ved højvakuüm. I plasmaet er etableret et elektrisk felt med en spændingsforskel på ca. 1000 V, hvilket betyder, at frie elektroner i plasmaet accelereres.

Ved accelerationen kolliderer de frie elektroner med atomer eller molekyler af ædelgassen, hvorved der fjernes en elektron fra det neutrale atom eller molekyle. Dette medfører en ionisering af ædelgassen til f.eks.  $\text{Ar}^+$ -ioner, der accelereres mod den negativt ladede katode, som udgøres af fordampningskilden. Argonionerne har en sådan størrelse og så meget energi, at partikler fra fordampningskilden forstøves ved kollisionen. Partiklerne kan derefter kondensere på emneoverfladen, med en belægning som resultat. På nedenstående figur ses en principskitse af den anvendte teknologi:



**Figur 1 Principskitse af PVD-teknologien ved anvendelse af reaktiv magnetron sputtering**

PVD-processen kan betegnes som værende en sigtelinieproces. Herved forstås, at de partikler, der fordampes, bevæger sig i rette linier fra fordampningskilden. Dette betyder at der ikke opnås belægning rundt om hjørner, medmindre emnet bevæges. Derfor er der i processen anbragt et substratbord, som er en roterende emneholder, der sikrer, at emnerne opnår en homogen lagtykkelse.

På figuren ses desuden, at der kan tilføres en reaktiv gas som supplement til arbejdsgassen, hvilket i de fleste tilfælde gøres i form af kvælstof, ilt eller kulstofholdige gasser. Dette kaldes reaktiv magnetron sputtering. Fordampningskilden er i de fleste tilfælde titan, krom, aluminium eller grafit, som kombineret med de reaktive gasser giver mulighed for forskellige belægningskompositioner.

Da processen er en sigtelinieproces, sættes der krav til emnernes geometri og dimensioner. Dette betyder, at partiklerne fra fordampningskilden helst skal ramme substratoverfladen i en vinkel mellem 45° og 90°, og det betyder ydermere, at det ikke er muligt at belægge længere ned i huller end ca. lysningsdiametere.

Belægningen udføres batchvis, hvilket betyder, at prisen afhænger af emnets størrelse og mulighed for fiksering i proceskammeret. Overordnet kan det siges, at små emner muliggør større stykantal pr. batch og dermed en lavere stykpris, mens det modsatte er tilfældet for store emner. Grænsen for hvor store emner, der kan belægges, afhænger af maksimumdimensionen for belægningszonen i kammeret. På Tribologicentrets udstyr kan emner op til Ø 400 mm og maksimalt 500 mm i højden belægges.

### 2.1.2 Belægningskarakteristik

Med de anvendte teknologier er det blevet muligt at designe en overflade næsten uden begrænsninger. Det er muligt at skræddersy en række egenskaber for en belægning afhængig af dens anvendelsesområde, hvilket gør anvendelserne mangfoldige. Formålet med dette afsnit er at foretage en beskrivelse af de opbygningsmæssige og strukturelle forhold, som indgår i en belægningsproces. Indledningsvis defineres den tekniske betydning af en overfladebelægning på følgende måde:

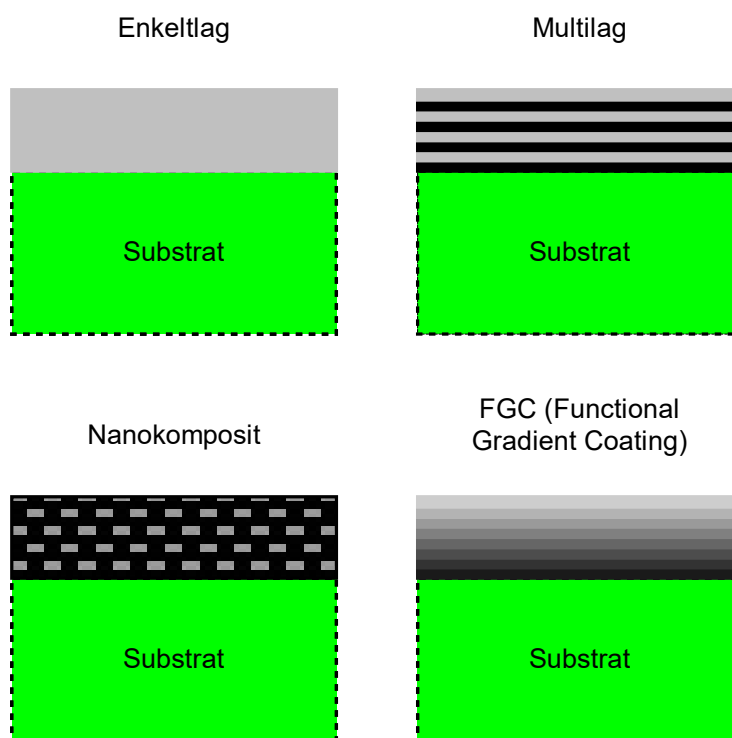
*En belægning er et lag af materiale, som er dannet naturligt, syntetisk eller deponeret kunstigt på overfladen af et substrat, som er lavet af et andet materiale, med henblik på at opnå ønskede tekniske eller dekorative egenskaber.*

Substratet og belægningen udgør dermed hver sin separate fase i systemet. Mellem belægningen og substratet findes en grænseflade i form af et lag med en afgrænset volumen. Grænsefladelaget optræder som et mellemlid, der sædvanligvis har som funktion at skabe vedhæftning til substratet. Derfor anvendes ofte basislag med en bestemt kemisk komposition, som sikrer en god vedhæftning til substratet.

### 2.1.3 Belægningssystemer

Belægningssammensætningen er en vigtig parameter i forbindelse med design af en teknisk overfladebelægning. Årsagen hertil er, at mange af belægningens egenskaber kan føres tilbage til den egentlige belægningsstruktur. Oftest opdeles belægningssammensætningen i følgende hovedgrupper:





**Figur 2: Forskellige belægningssammensætninger**

Her er det illustreret hvorledes der skelnes mellem enkeltlags-, multilags-, nanokompositbelægninger og functional gradient coatings (FGC). De enkelte lag i en multilagsbelægning kan være sammensat af både enkeltlags-, nanokomposit- eller FGC-komponenter. Dermed fremgår det, at en belægning ofte kan betragtes som et belægningssystem, som er komplekst sammensat af forskellige komponenter. Ved målrettet design af belægningssystemer opnås muligheder for at påvirke belægningens egenskaber, hvad enten det er specifikke overflade-, korrosions- eller f.eks. mekaniske egenskaber der ønskes. I det nærværende arbejde er følgende belægningssystemer vist i anvendt:

Behandling	Struktur	Opbygning / Komposition	Procestype
WC-C	Multilag	Multilagsbelægning opbygget af et bindelag efterfulgt af et støkiometrisk graderet kompositlag bestående af wolframkarbid og kulstof.	PVD
DLC-TR	Multilag	Multilagsbelægning opbygget af et bindelag, et kulstofbaseret graderet mellemlag efterfulgt af et toplag bestående af amorf kulstof.	PVD
TiAlN-TR	Enkeltlag	Krystallinsk multikomponentbelægning bestående af støkiometriske mængder af TiN og AlN opløst i hinanden	PVD

**Tabel 1: Tribologiske overflader**

### 2.1.4 Sol-gel belægninger

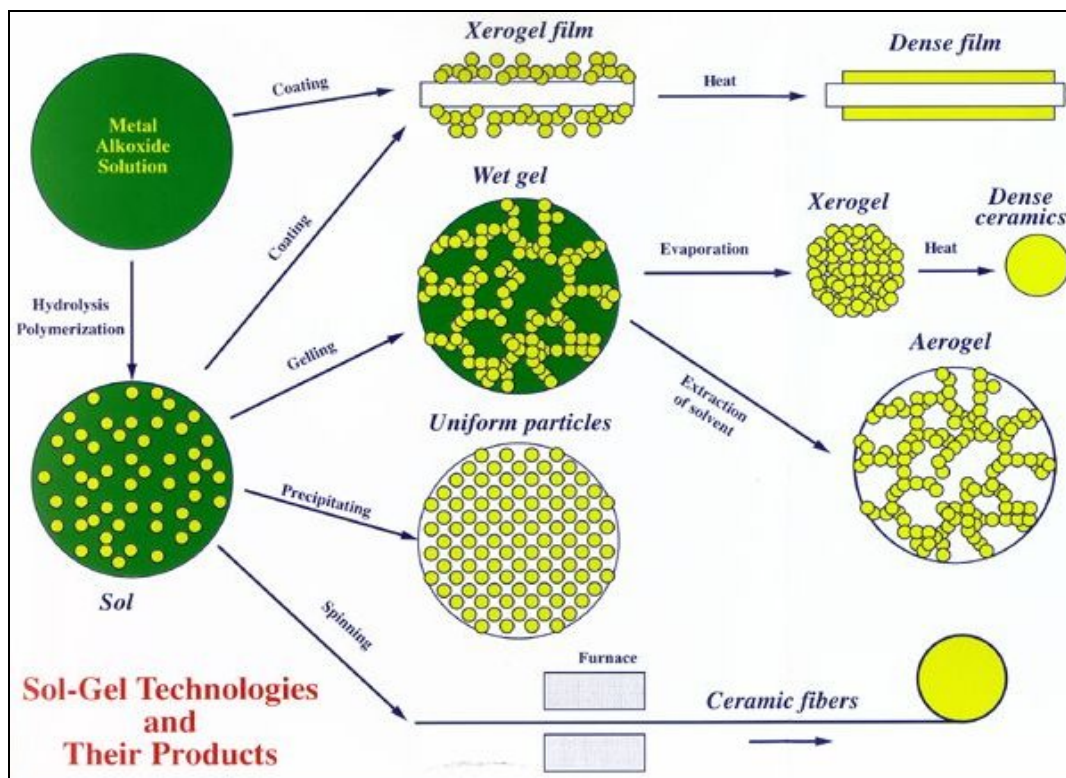
Overfladebehandlingen, som bygger på sol-gel teknologien, må betragtes som en lak. Den kan være opbygget som 1-komponent eller flerekomponent system. Hærdeprocessen foregår ved stuetemperatur ellers ved varme op til et ca. 200°C eller alternativt med UV-lys eller IR stråling. Lakken kan påføres med traditionelle metoder kendt fra lakeringsindustrien, det vil sige: sprøjtning, rulning, neddykning mm.



**Figur 3: Belægningsproces for sol-gel**

Sol-gel processen består af to syntese trin, hvor man først danner en kolloid væske, som indeholder partikler i størrelsen 5-15 nanometer, ved specielle teknologier op til 50 nanometer. Denne blanding kaldes sol. Dernæst krydsbindes indholdsstofferne under fjernelse/fordampning af opløsningsmidlet og der dannes et tredimensionalt netværk, også betegnet som gel. Endelig følges hærkning af belægningen.

Figur 3 viser de forskellige syntese trin, som er mulige ved anvendelse af metalalkoxider. Metalalkoxider er molekyler, hvor et metal- eller halvmetalatom er kemisk bundet til ilt og alkoholgrupper. I tilfælde af at halvmetalatomet er silicium betegnes råstofferne som silaner og siloxaner. Silaner kan påføres substratoverfladen i en direkte proces, hvor der dannes meget tynde belægninger med en lagtykkelse på 10 til ca. 500 nm. Til fremstilling af de aktuelle kalkafvisende overflader er der valgt sol-gel synteseruten. Som vist i Figur 4 omdannes metalalkoxidvæsken til en sol via en kombineret hydrolyse- og polymerisationsproces. Denne sol indeholder de omtalte nanopartikler i kolloidial form. Solen kan blendes og kombineres med andre sole eller kemiske reagenser og påføres herefter substratoverfladen, hvor geleringsprocessen indledes. Sol-gel teknologien tillader syntetiseringen af meget forskellige produkter, såsom tynde funktionelle belægninger, keramiske porøse strukturer samt keramiske fibre.



**Figur 4: Syntesetrin for fremstilling af sol-gel**

Sol-gel belægningen beskytter overfladen med en 1- 10  $\mu\text{m}$  tynd, typisk transparent film, der består af et kovalent bundet netværk af uorganiske og organiske forbindelser i en såkaldt hybridstruktur. I projektet er der arbejdet med 5 forskellige belægningstyper. Der er udført test af både 1- og 2-komponent systemer.

Center for Materialeprøvnings koncept til kalkafvisende belægninger bygger på en kombination af en meget lav overfladespænding, egenspændinger i interfacen mellem overflade og kalk samt en lokalt isoleret kalkdannelse i form af lokale kimpunkter, som er statistisk fordelt på overfladen.

Princippet er at koncentrere kalkdannelsen på små punkter, som er omgivet af upolære, afvisende arealer. Det er bevidst ønsket, at der dannes kalk på overfladen ved disse kimpunkter. Men når kalklaget opnår en kritisk tykkelse vil egenspændingerne i interfacen mellem kalken og overfladen blive større end adhæsienskræfter til overfladen, og kalken vil brække let af.

Belægning	Komp.	Hærde temp. [°C]	Effekt
LRC-1	2	Rt, 120	Lakkoncept 1: primær kalkafvisende
LRC-2	1	120	Lakkoncept 2: primær kalkafvisende samt smudsafvisende
LRC-3	2	80	Lakkoncept 3: primær kalkafvisende samt korrosionsbeskyttende
LRC-4	2	Rt, 50, 130	Lakkoncept 4: primær kalkafvisende, desuden korrosionsbeskyttende samt smudsafvisende
INC-23T	1	170°C	Lakkoncept 5: primær smudsafvisende, desuden god korrosionsbeskyttelse samt antismuds

**Tabel 2: Anvendte sol-gel varianter**

## **2.2 Industriel implementering af sol-gel belægningerne**

Center for Materialeprøvning har indledt et samarbejde med Vestjysk Industrilakering i Skjern, med henblik på overførelse af sol-gel belægningerne fra laboratorieniveau til industriel anvendelse. I kraft af, at sol-gel belægningernes udgangspunkt er sammenlignelig med en lak, kan Vestjysk Industrilakerings mangeårige ekspertise og erfaring med lakering bruges til implementering af de nye belægninger. Vestjysk Industrilakering råder over udstyr til forbehandling, belægning og hærdning af applikationer. De første erfaringer med sol-gel belægningerne er gjort i forbindelse med belægningerne på felttest af ladeluftskøler og vandudskillere til Vestas Aircoil.

## **2.3 Materialeegenskaber**

### **2.3.1 Overfladeenergier**

Det gælder generelt i naturen, at et givet system gerne vil søge mod den laveste energitilstand, som er mulig. Overfladen på et emne af et givet materiale har en tilknyttet energi pr. arealenhed kaldet overfladeenergien eller "overfladespændingen". Denne størrelse benævnes normalt  $\gamma$  og opgives ofte i enten milliNewton/meter (mN/m) eller Joule/kvadratmeter (J/m<sup>2</sup>).

Har et materiale f.eks. en relativ høj overfladeenergi, vil materialet generelt have en tendens til at binde godt mod et andet materiale. Dette kan intuitivt forstås således, at en binding mod et andet materiale vil mindske arealet af den højenergiske overflade, og derved vil systemet som "ønsket" opnå en lavere energitilstand.

Overfladeenergien er derfor med til at beskrive bindingsstyrken mod et givet materiale. Bindingsstyrken er af stor betydning i mange anvendelser. I nogle tilfælde ønskes en god bindingsstyrke (en god adhæsion), som f.eks. inden for metallisering, maling og kompositproduktion. I andre tilfælde ønskes en overflade, der ikke er modtagelig for aflejring af et andet materiale, som f.eks. udfældning af kalk på varmespiraler og varmevekslerplader.

Overfladeenergien varierer meget fra materiale til materiale. F.eks. har en typisk slip-let overflade som PTFE (Teflon®) en meget lav overfladeenergi på ca. 18 mN/m, mens en højenergitisk overflade som rustfrit stål kan have en overfladeenergi på over 100 mN/m, når stålets naturlige oxidhinde brydes.

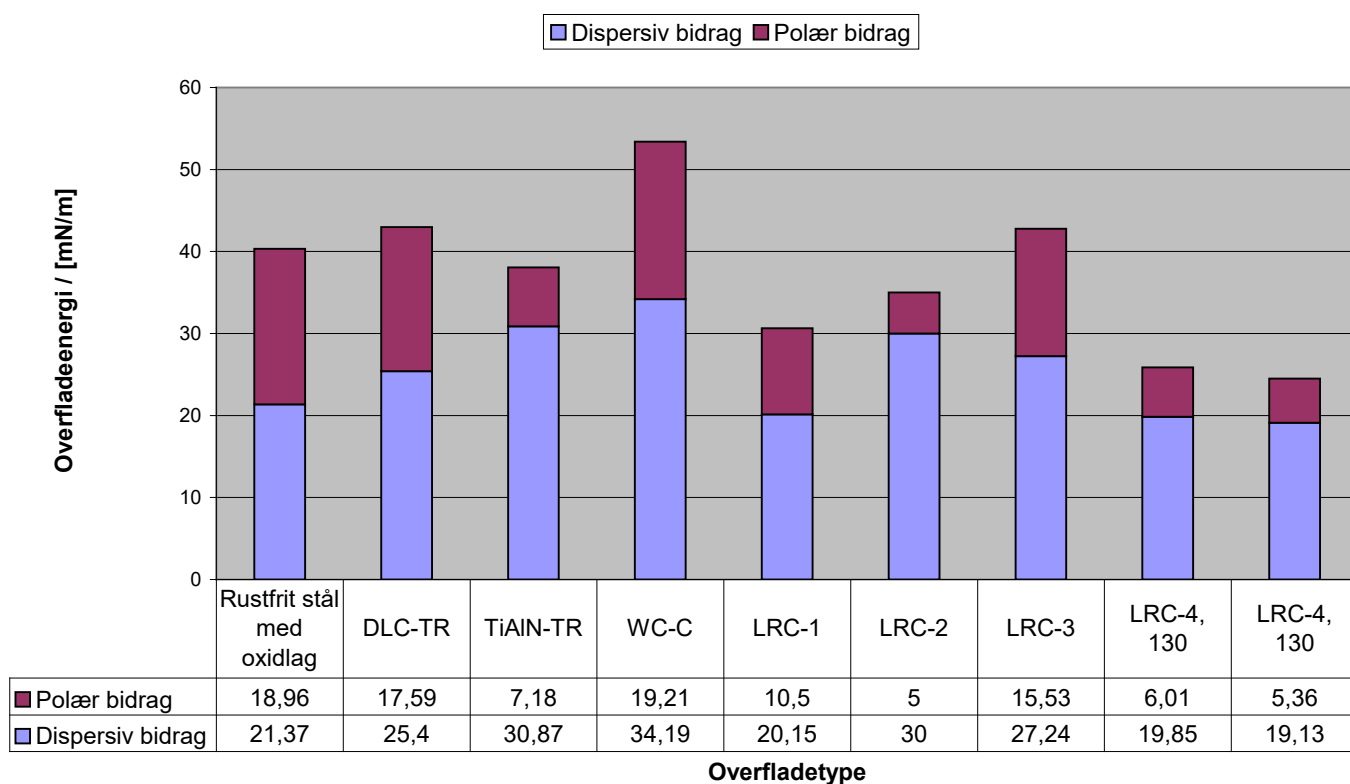
Generelt vil et fald i overfladeenergien indikere en øget evne til at afvise "påklæbning" af andre materialer. Med henblik på at minimere f.eks. vedhæftning af kim, kan det derfor antages, at det er vigtigt at have en lav overfladeenergi af overfladerne, som det kalkholdige vand er i kontakt med. Dette kan bekræftes af mange iagttagelser, hvor kimdannelse oftest sker på ru overflader ved kanter og lignende, samt hvor overfladen vil have mange defekter, som har en høj overfladeenergi.

Adhæsionsegenskaberne er dog ikke alene og direkte afhængig af overfladeenergien. Overfladeenergien kan opsplittes i (mindst) to parametre, det dispersive- ( $\gamma_d$ ) og det polære ( $\gamma_p$ ) bidrag:

$$\gamma_{total} = \gamma_d + \gamma_p$$

Hvor  $\gamma_d$  beskriver den dynamiske ladningsfordeling fra elektronerne, og hvor  $\gamma_p$  beskriver de polære bindinger. Der er altså tale om to forskellige bindingstyper. Bestemmes disse parametre, kan der gives en bedre beskrivelse af adhæsions- og bindingskræfter ved kimdannelse.

Det interessante er, at ved at modificere en overflades kemiske komposition, f.eks. vha. belægning eller anden overfladebehandling, ændres også overfladeenergien. I mange tilfælde kan f.eks. både den totale overfladeenergi og det polære bidrag sænkes, så overfladens tendens til at binde til andre polære overflader minimeres. Figur 5 angiver eksempler på overfladeenergiparametre for de i projektet anvendte overfladebehandlinger. Det skal specielt bemærkes, at for rustfrit stål vil værdierne være meget afhængige af, om stålets naturligt forekommende oxidhinde er brudt eller intakt.



**Figur 5: Overfladeenergi for de i projektet anvendte overflader**

Nogle af de overflader med en forholdsvis høj overfladeenergi i Figur 5 fx WC/C viser overraskende gode kalkafvisende egenskaber. Dette tyder på at andre parametre udover overfladeenergien har stor betydning for vedhæftningen kalk og smuds fx ruhed. Disse parametre vil blive undersøgt nærmere i fase 2.

### 3 Test i laboratoriet

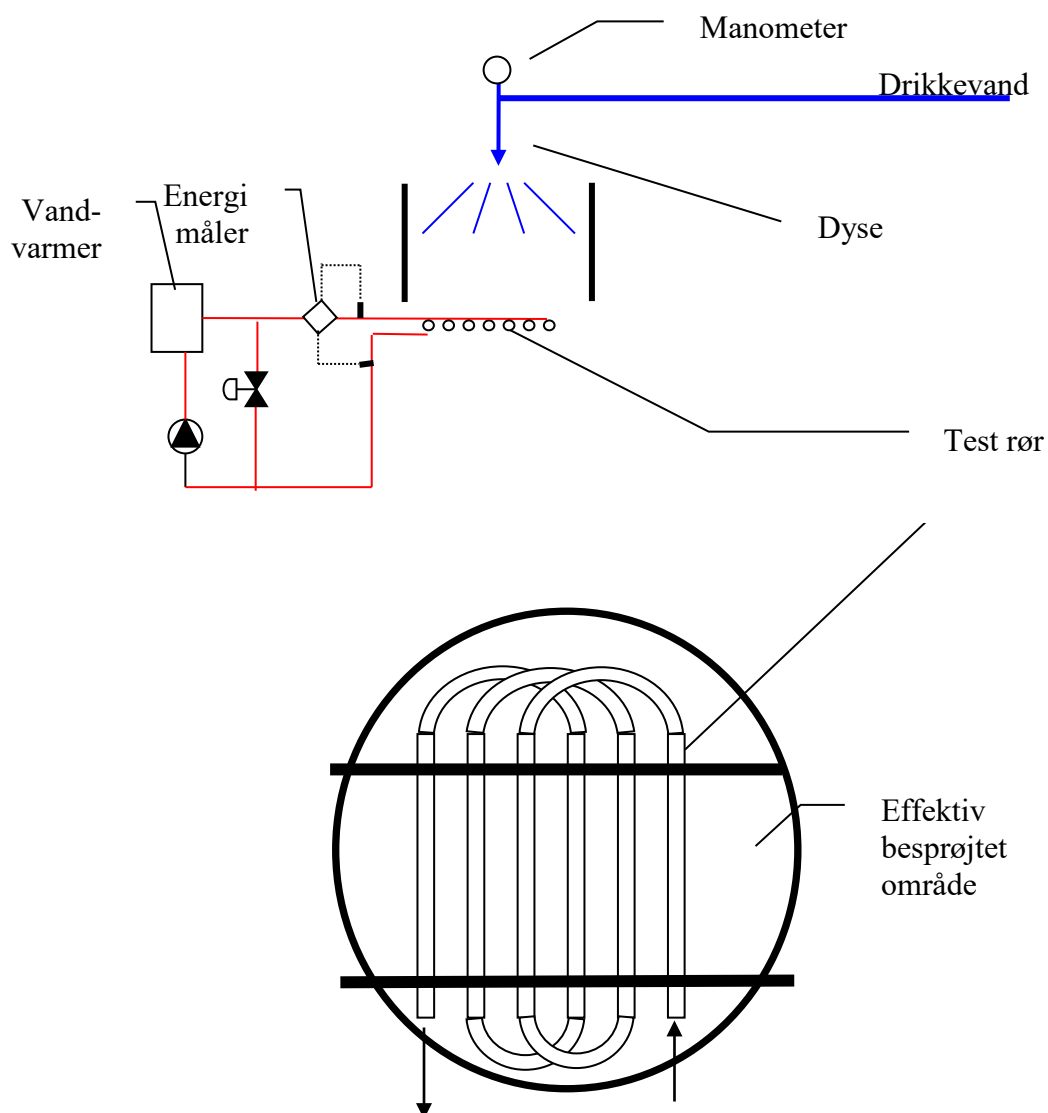
#### 3.1 Opbygning af kalkbelægninger

For at kunne vurdere vedhæftningsevnen af kalk på de forskellige varianter af overflader belægges et 20 cm langt rør med diameter 8 mm, se Figur 6. Seks rør, hvoraf 2 er referencerør af fx rustfrit stål, monteres i en ramme. Rørene opvarmes indvendigt med vand ved 80 °C og rørene oversprøjtes med drikkevand med hårdhed 17 –20 dH i et døgn. På grund af dels opvarmning af vandet og især fordampningen vil vandet blive overmættet, og der vil udfælde sig kalk på rørene ca. et gram for hvert rør i løbet af døgn.

Uanset overfladens beskaffenhed vil der udfælde sig kalk på rørene netop på grund af fordampningen, og vandstrålerne/tågen fra dysen er for blød til at kunne rive kalkbelægningen af.

### 3.2 Vurdering og måling af vedhæftningsevne

Efter at rørene er belagt med kalk, benyttes to metoder til at vurdere kalkens vedhæftelse til overfladen.



**Figur 6: Opbygning af kalklag på testrør belagt med den overflade der skal testes**

Der indsættes referencerør af rustfrit stål eller andre materialer for sammenligning. Rørene opvarmes indvendigt med 80 °C varmt vand og ved oversprøjtning med drikkevand med hårdhed 17-20 dH sidder der efter 24 timer ca. 1 gram kalk på hvert rør.

Den ene metode er at klæbe malertape på kalkbelægningen og rive det af igen, og så vurdere visuelt hvor meget kalk, der hænger ved tapen. På baggrund heraf tildes en karakter, hvor karakter 0 betyder, at der ikke sidder kalk på tapen mens karakter 10 betyder, at al kalken klæber sig til tapen. Denne metode giver et udmærket førstehåndssindtryk af vedhæftningsevnen.

Den anden metode er at lade røret falde 2,8 meter ned på et jernlod langs en lodret udspændt line. Rørene vejes før og efter forsøget og den mængde kalk af det totale i %, der rives af ved sammenstødet med loddet, er et udtryk for vedhæftningsevnen ved netop denne impulsstørrelse. Resultatet af vurdering og måling af vedhæftningsevnen til de forskellige overflader fremgår af Tabel 3. Det ses, at begge de to tribologiske overflader og især to af sol-gel overfladerne LRC-4-130 og LRC-1- M-Rt er gode og har en ringe vedhæftning til kalk. Udvikling af de to sol-gel overflader er sket i løbet af projektperioden, hvorfor de ikke er blevet testet af i felten endnu.

<b>Tribologiske overflader Tapetest</b>			
4 stk. rør for hver type sammen med to referencer er belagt med kalk			
Type	Karakter	Reference	Karakter
DLC-TR	9	Rustfrit stål	2
WC/C	10	Rustfrit stål	2

<b>Lakbaserede sol-gel overflader Tapetest</b>			
4 stk. rør for hver type sammen med to referencer er belagt med kalk			
Type	Karakter	Reference	Karakter
LRC-1	7	Rustfrit stål	3
LRC-2	3	Rustfrit stål	2
LRC-3		Rustfrit stål	

<b>Lakbaserede sol-gel overflader Tape og faldtest</b>			
Et rør af hver type samt to referencer er belagt med kalk sammen og gentaget tre gange			
Type	Karakter tapetest		Faldtest
	Mix 1	Mix2	Afrivning af kalk Mix 3
LRC-4, 50 nr. 1	8	9	50%
LRC-4, Rt	9	10	17%
LRC-4, 130	10	10	98%
LRC-1, M-Rt	9	10	93%
Reference 1	4	0	4%
Reference 2	2	7	28%

**Tabel 3: Vedhæftningsevne af kalk.**

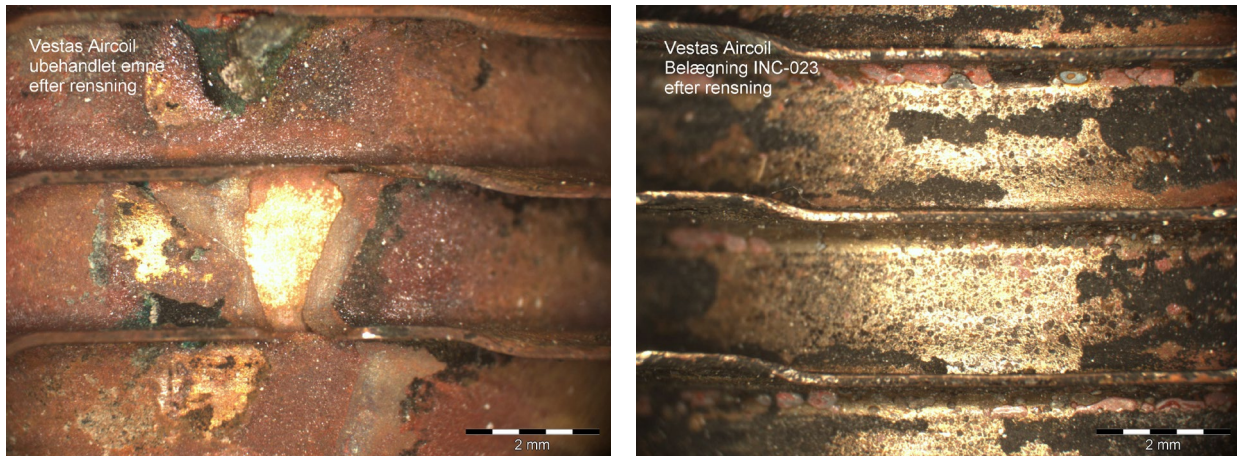
For den visuelle vurdering af tapetesten betyder karakter 10 at al kalken klæber sig til tapen, mens karakter 0 betyder, at ingen kalk klæber sig til tapen. Faldtesten angiver i procent hvor meget kalk der rives af ved sammenstød med et lod ved fald af røret fra 2,8 meters højde.



### 3.3 Korrosionsegenskaber

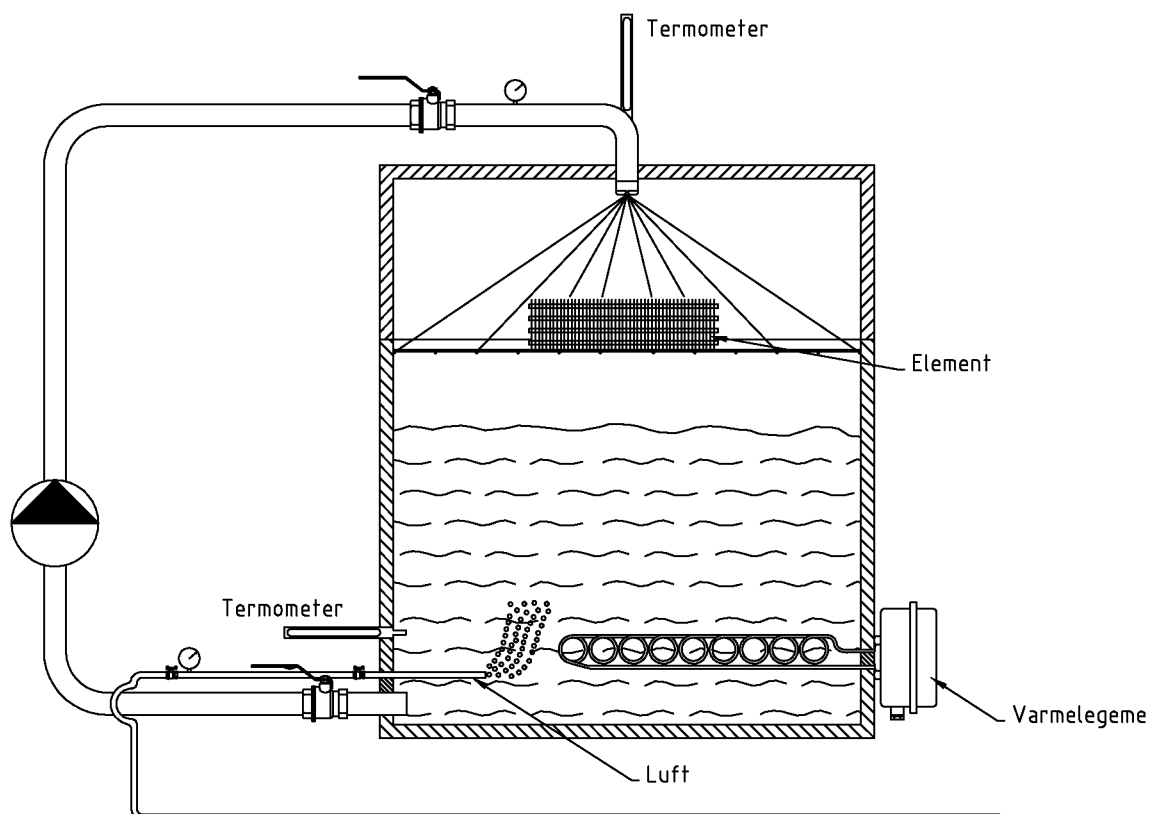
Vestas Aircoil har udført et oversprøjtningforsøg med små ladeluftkølelementer. 3 prøveemne blev produceret, hvoraf 2 blev overfladebehandlet. Herefter blev elementerne oversprøjtet med 70 °C varmt havvand i 500 timer. Havvandet havde et saltindhold på 3%. En skitse af Vestas aircoil forsøgsopstilling kan ses på Figur 8.

Efter forsøget blev elementerne undersøgt og de overfladebehandlede vekslere udviser markant bedre egenskaber overfor korrosionsangreb, sammenlignet med den ubehandlede vekslere se Figur 7.



**Figur 7: Korrosionstest**

Overfladen af ubehandlet (t.v.) og sol-gel type INC-23 belagt vekslere efter korrosionstest hos Vestas Aircoil. Det ses, at den ubehandlede har kraftig korrosion, mens der ikke kan konstateres korrosion på den behandlede.



**Figur 8: Korrosionstest med 70°C varmt havvand, der sprøjtes ud over det overfladebehandlede kølelement**

Der er desuden udført eksponering i salttåge (ISO 9227, 1990) med henblik på at undersøge korrosionsegenskaberne for belægningen INC-23T på henholdsvis aluminiums prøveplader og profil til vandudskiller. Resultaterne viste, at prøvepladerne udviste særdeles god korrosionsbeskyttelse.

For komplicerede geometrier er sprøjteprocessen u hensigtsmæssig, mens dyppeprocessen vurderes til at være mere velegnet. Dette forhold vurderes yderligere i fase 2.

### 3.4 Varmeovergangstal

Vestas aircoil har undersøgt effekten af overfladebehandlingens effekt på varmeovergangskoefficient og tryktabskoefficient. Elementerne var belagt af Teknologisk Institut med et resultat, der ikke var fuldt tilfredsstillende ud fra et lakeringsmæssigt synspunkt. På grund af for tykt et lag lak, var køleren i nogle områder lukket til. Dette blev efterfølgende fjernet med en stålborste. Resultatet af forsøget var, at varmeovergangen blev forringet svarende til 3°C på udløbstemperaturen efter en gennemsnitskøler, mens trykfaldet var uændret. Det antages, at sol-gel overfladens mindre friktion er med til at skabe en mindre turbulensgrad i køleren og dermed forringer varmeovergangstallet. På grund af den forringede varmeovergang samt resultaterne af felttest på en motor hos Varpelev Tomater, se 4.1.3 er der behov for at tilpasse køleren til sol-gel overfladen, så

varmeovergangen kan forbedres. Der er allerede kontakt til et andet gartneri med tilsvarende behov, hvor nye feltforsøg vil blive gennemført i fase 2.

## 4 Felttest

### 4.1.1 Varmelegemer

#### Prøveemnets funktion

De afprøvede varmelegemer er beregnet til opvarmning af vand i vaskemaskiner. I vaskemaskinen sidder der 3 varmelegemer i bunden, hvilket giver mulighed for både at have et belagt varmelegeme og en reference i samme maskine.

#### Felttest

En række varmelegemer er blevet belagt med to typer tribologiske overflader DLC-TR og WC/C samt 3 stk. legemer, der er blevet belagt med sol-gel LRC-3.

Varmelegemerne er afprøvet i henholdsvis større vaskerier i boligforeninger i Lyngby, Århus Universitet og i Sverige.

I hver vaskemaskine er der plads til tre varmelegemer og ved feltafprøvning er der installeret et belagt varmelegeme sammen med en ubehandlet reference. Efter 6 ugers afprøvning er varmelegemerne installeret i Danmark blevet kontrolleret (medio august 2004) og det kunne konstateres, at yderligere afprøvningstid er nødvendig, idet der er en for lille udfældning af kalk til, at de kan bedømmes.

### 4.1.2 Blæserhjul til tørretumbler

#### Prøveemnes funktion

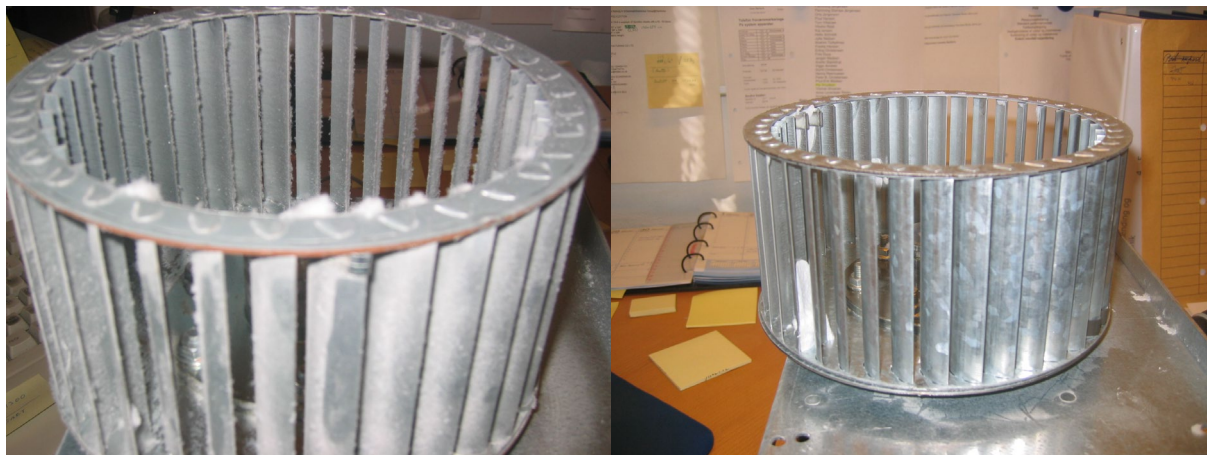
Blæserhjul i tørretumlere skaber den luftstrøm, som bliver blæst ind i tøjet og dermed skaber tørringen. Blæserhjulet, se Figur 9, består af en kreds af lameller, der sidder med cirka 1 cm afstand. Blæserhjulet bliver under brug nemt belagt med fnuller fra tøjet, der skal tørres, og derved nedsættes effekten af blæserhjulet og tørretiden forlænges og med jævne mellemrum, skal hjulet rengøres. Der er således behov for at fremstille et blæserhjul, som kan holde sig fri for fnug i længere tid, hvorved en tørretid, som svarer til et rent blæserhjul, kan bibeholdes og dermed et tilsvarende lavt elforbrug, samt at antallet af servicebesøg kan nedsættes.

#### Felttest

I første omgang er der med sol-gel type INC 23 lakeret et blæserhjul, som er afprøvet sammen med et standard blæserhjul i tørretumlere installeret på fabrikken i Tommerup. Selve afprøvningen sker ved, at en bestemt mængde ens sammensat stof befugtes en gang i døgn og tørres i hver af testtørretumblerne.

Efter 14 dages drift er blæserhjulene taget ud for undersøgelse af fnuller, se Figur 9. Referencehjulet har et loddent udseende, idet det er belagt med tøjfnuller over hele overfladen. Desuden er der store klumper af sammenpresset fnuller, især hvor der er sat clips på hjulet for afbalancering.

Det sol-gel belagte blæserhjul er helt blankt i hele overfladen bortset fra, hvor der er monteret clips for afbalancering af blæserhjulet. Her er der samlet sig en sammenpresset klump af fnuller.



**Figur 9:** Til venstre ses reference blæsehjulet, som overalt er belagt med fnuller og således har et loddent udseende. Til højre ses det sol-gel belagte blæserhjul, som står helt blankt bortset fra, hvor der er clips for afbalancering. Her er der samlet sig en massiv klump af fnuller.

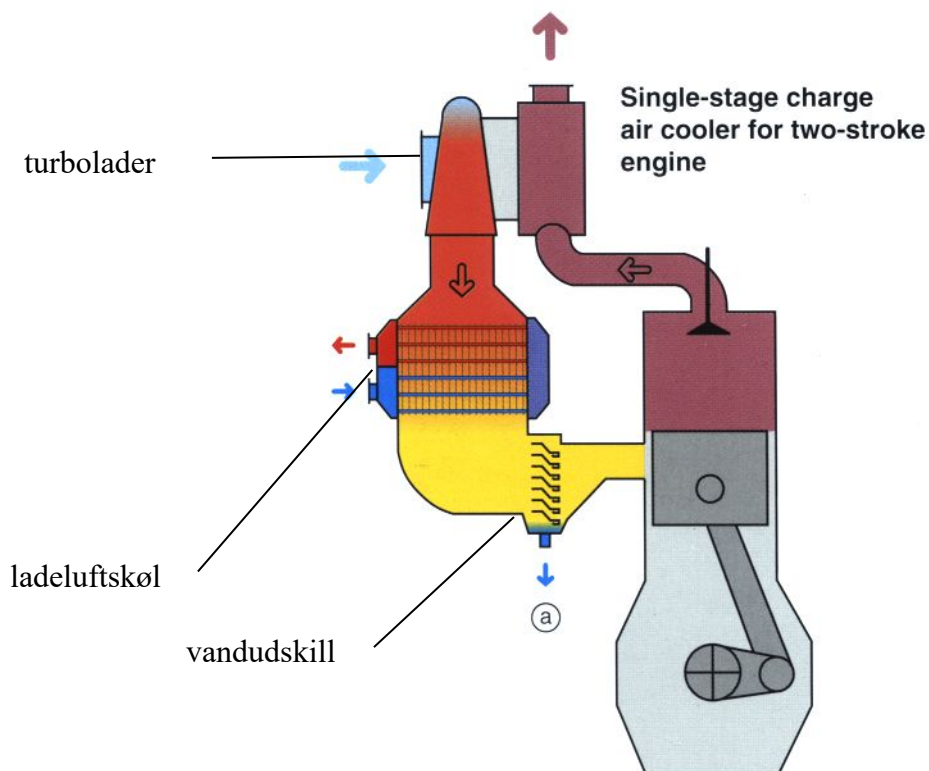
På baggrund af de positive resultater er der i anden omgang belagt yderligere 2 blæserhjul, som er testet under særlig hårde betingelser i en tørretumbler i USA. En udtalelse fra importøren, som aftager en stor part af tørretumblere produceret af Electrolux lyder, at de belagte blæserhjul er helt rene, og at teknikken virker meget lovende.

En konsekvens af testene med blæserhjulet er, at Electrolux har fundet en anden måde at afbalancere hjulet på end ved brug af clips og har optimeret blæserhjulets geometri i forhold til typen af det tøj, der skal tørres.

#### 4.1.3 Ladeluftkøler

##### Prøveemnets funktion

Alle skibsmotorer og landbaserede motorer for produktion af el bliver i dag bygget med turboer, som øger mængden af luft i forbrændingskammeret. Ladeluftkøleren sidder imellem turboen og forbrændingskammeret og køler luft ned. Ved nedkøling af luften fylder luften mindre, hvorved mængden af luft i forbrændingen øges. Til at køle luften ned benyttes vand, som bliver ledt igennem et antal rør i ladeluftkøleren. Omkring disse rør strømmer luften, som derved afgiver varme til vandet. Rørene er påmonteret finner for at forbedre varmeovergangen, og Figur 10 viser placeringen af ladeluftkøleren i motorens luftindsugningssystem.



**Figur 10:** Forbrændingsmotorer med turbolader, ladeluftskøler og vandudskill

Når motoren er i drift, vil køleren sode til. Dette vil resultere i en forøgelse af trykfaldet henover køleren. Der er erfaring med at en stigning i trykfald henover køler er øget med 40-50 % efter 9000 timers drift. Yderligere kan soden indeholde svovl, som blandet med kondensat kan få køleren til at erodere, hvilket nedsætter levetiden. En smudsafvisende overfladebehandling kan derfor modvirke en trykfaldsforøgelse samt forhindre dele af køleren i at erodere.

### Felttest

Vestas aircoil A/S kom i forbindelse med Varpelev Tomater, idet de har kedelige erfaringer med standard ladeluftkølere, der har en kortere levetid end forventet. Det antages, at køleren soder til med et svovlholdigt puds, som efterfølgende får køleren til at erodere. To kølere med elementer behandlet med sol-gel af typen INC-23 blev fremstillet hos Vestjysk Industrilakering, som har professionel erfaring med lakeringsprocesser. Da Gartneriet fik monteret kølerne, viste det sig hurtigt, at kølerne ikke kunne levere en tilfredsstillende køling. De kølede ikke bedre end den slidte køler, hvilket var kritisk, da motoren havde problemer med at køre mere end 80 % last. Hvis lasten falder til under 80% må de ikke bruge deres røgrensningsanlæg (NO<sub>x</sub>), hvorfor motoren skal slukkes. Derved kan de ikke producere CO<sub>2</sub>, hvorved tomaterne ikke vokser hurtigt nok, hvilket forringer indtjeningen. Resultatet blev, at en ny standardkøler blev installeret. Forskellen mellem standardkøleren og den overfladebehandlede køler var markante 9°C på udløbstemperaturen. Det formodes, at den forringede varmeovergang skyldes ændring i strømningen af luften igennem køleren. Overfladebehandlingen har sandsynligvis sænket turbulensgraden,

hvilket har sænket varmeovergangstallet. På grund af den ringe lagtykkelse på få  $\mu\text{m}$  er det usandsynligt, at overfladebehandlings varmeledning vil have stor indflydelse. Vestas AirCoil er overbeviste om, at den overfladebehandlede køler vil kunne modstå miljøet i motorer bedre end standardkøleren, men at der ligger en stor opgave i at undersøge overfladebehandlings indflydelse på varmeovergangen. På nuværende tidspunkt er der et andet gartneri, der er interesseret i at hjælpe med en ny feltafprøvning, når effekten af overfladebehandling på varmeovergangen er bestemt.

#### 4.1.4 Vandudskiller

##### **Prøveemnets funktion**

Efter mange ladeluftkølere sidder der en vandudskiller til at opfange kondenseret vand fra indsugningsluften. Vandudskilleren består af et antal profiler, der er placeret i en ramme. Ved at profilerne tvinger luftstrømningen til at bugte sig, vil vanddråberne på grund af deres tyngde fortsætte ligeud ind på overfladen af profilerne. Her opsamles vandet i hulrum i profilet og falder ned i et opsamlingskammer. Figur 10 viser placeringen af vandudskilleren efter ladeluftkøleren i motorens luftindsugningssystem. De nuværende profiler bliver bukket ud fra en rustfri plade, hvilket har en stor begrænsning i profilens udformning. Ved at benytte et ekstruderet aluminiumsprofil er mulighederne for udformning væsentligt forbedret, og sammen med sol-gel overfladen, som er syrebestandig, åbnes der nye muligheder for at bruge aluminium i et aggressivt miljø. Endvidere er aluminium også et mere miljø- og energivenligt materiale.

##### **Felttest**

Baseret på vores erfaringer med Varpelev Tomater, har Vestas AirCoil valgt at undersøge produktet nøjere inden de går i gang med en feltafprøvning. De har konstrueret en vandudskiller baseret på overfladebehandlede profiler i aluminium i stedet for rustfri stål, og da konstruktionen adskiller sig væsentligt fra den nuværende, afventer Vestas AirCoil for øjeblikket resultatet af en længevarende undersøgelse på deres vibrationsbord. Vibrationer er den hyppigste årsag til nedbrud på vandudskillere.

## 5 Perspektiver for elbesparelser

### 5.1 Driftsmæssige elbesparelser

#### Ladeluftskølere

En del af de fremstillede ladeluftskølere anvendes på turboladede dieselmotorer, som bruges til el-produktion. Hvis køleren kan holdes ren, bliver totalvirkningsgraden på motoren højere. Hvis luftens udløbstemperatur stiger med 10 °C (som ved Varpelev Tomater) resulterer det i en forøgelse af brændstofforbruget på 1 % af Specific Fuel Oil Consumption [g/BHP<sub>h</sub>]. Da der i Danmark vurderes, at der årligt produceres 200.000 MWh el ved hjælp af motorer (i forbindelse med fjernvarmeanlæg) med ladeluftskølere vil smuds og sod på ladeluftskøleren medføre ekstra energiforbrug på 500 MWh. Derudover kommer el-produktion i forbindelse med gartnerier og lignende.

Hertil kommer motorer for produktion af el uden for fjernvarmeproduktion, som for gartnerier.

Fouling på vandsiden øger tryktabet gennem køleren, hvilket resulterer i et øget elforbrug på fødepumperne. Endvidere falder køleevnen, hvilket igen giver lavere totalvirkningsgrad på motoren.

I fase 2 vil energibesparelsen for en ladeluftskøler blive målt.

#### Blæserhjul

Det anslås at et tilsmudset blæserhjul i en tørretumbler vil medføre 5 % øget energiforbrug til drivmotoren, som er på 1,0 kW. For en industritumbler med typisk 5 timers brug dagligt i 300 brugsdage årligt, bliver der et ekstra energiforbrug på:

$$5 \% \times 1\text{kW} \times 5 \times 300 \text{ timer} = 75 \text{ kWh/år pr tumbler}$$

Ved 50.000 tumblere i Danmark, bliver der et ekstra elforbrug alene på motoren på 3,8 GWh/år.

I fase 2 vil energibesparelsen for et blæserhjul blive målt.

#### Varmelegemer

Det antages, at kalk på varmelegemer giver øgede opvarmningstider og øget varmetab på op til 15 %, hvilket giver et øget elforbrug på 15 GWh/år for Danmarks opvaske- og vaskemaskiner.

I fase 2 vil energibesparelsen for et varmelegeme blive målt.

#### Vekslerplader (fase 2)

40 GWh ved øget pumpning og varmetab i rørledninger ved dårlig veksling af varme især i fjernvarmenet.

#### Pumper (fase 2)

Der er installeret over en halv million vådpumper i Danmark og de kører gennemsnitlig 285 dage om året. Et gennemsnitlig estimat på tabet, der skyldes udfældning af kalk i pumpen er 2-3 W. Dette vil samlet set betyde et tab på 7 GWh/år alene i Danmark

Overfladebehandling af større støbejerns pumpehjul med Solgel forventes også at kunne medføre en betragtelig reduktion af strømforbruget.

Solgels egenskaber vil kunne give en udfældningsfri/smudsafvisende overflade, samt nedsætte friktionen mellem pumpen og mediet med en reduktion af energitabet til følge. Det anslås, at der findes 75.000 af disse pumper i Danmark og et gæt er, at for hver pumpe vil energiforbruget reduceres med 100 kWh/år. Dette vil betyde en reduktion af elforbruget på ca. 7.5 GWh/år.

## **5.2 Generelle energibesparelser**

Kalk og andre former for belægnings vurderes til alene i Danmark anledning til et ekstra unødvendigt energiforbrug på over 100 GWh/år.

Hvis teknologien overføres til andre produkter er potentialet i Danmark:

Kølekodensatorer: 30 GWh ved dårligere virkningsgrad og dermed øget kompressorbrug  
Kraftvarmeanlæg: 75 GWh ved forringet virkningsgrad, friktion i rørledning og varmetab.  
Hertil kommer ventilation øget servicering af produkter som tumblere og vaskemaskiner, CIP rengøring af røranlæg, som ikke er kvantificeret.

Internationalt set har Grundfos vurderet, at 1 % af verdens elforbrug omsættes i en Grundfospumpe.

Der er derfor et stort potentiale såfremt kalk og belægningsproblemer kan reduceres, og teknologien falder fint i tråd med Danmarks politik om at reducere udledningen af CO<sub>2</sub> med op til 21 % i henhold til Kyoto-aftalen.

## **5.3 Produktionsmæssing elbesparelser**

El og varmforzinkning af rørplader kræver højt energiforbrug. En alternativ korrosionsbestandig overfladebehandling vil kunne reducere energiforbruget.

Produktionen af vandudskillere er temmelig energi- og ressourcekrævende. En korrosionsbestandig overflade vil muliggøre anvendelsen af alternative materialer som eksempelvis aluminium, som vil reducere energiforbruget, grundet muligheden for at ekstrudere komplekse geometrier, som ellers skal svejdes op.

Fortinning af elementer har en korrosionshæmmende virkning. Desværre er fortinningsprocessen en væsentlig energikrævende proces. En korrosionsbestandig overflade vil derfor kunne reducere energiforbruget til fortinningsprocessen væsentligt.



## 6 Referencer

- /1/ Maxim Candries, M. Atlar and C.D. Anderson (2001), Low energy surfaces on high speed craft, *2<sup>nd</sup> International EuroConference on High-Performing Mine Vehicles (HIPER '01)*, pp. 119 – 127, Hamburg