


Functional Surfaces group Halmstad

Vindforsk 2008
Lars Bååth och Hans Löfgren Halmstad University



(Av)isning av vingar på vindkraftsverk

Vindforsk 2008

Lars Bååth och Hans Löfgren Halmstad University



(Av)isning av vingar på vindkraftsverk

1. Förutsättning för isbildning?

- Bindning av vatten/is till vinge
- Underkyllt vatten eller vattenånga

Vindforsk 2008

Lars Bååth och Hans Löfgren Halmstad University



(Av)isning av vingar på vindkraftsverk

1. Förutsättning för isbildning?

- Bindning av vatten/is till vinge
- Underkyllt vatten eller vattenånga

2. Värma vatten eller smälta is?

- Hindra is att bildas
 - Värma vatten innan träffar vingen eller
 - Värma vatten när träffar vingen
- Smälta bort den is som har bildats på vingen.

Vindforsk 2008

Lars Bååth och Hans Löfgren Halmstad University



(Av)isning av vingar på vindkraftsverk

1. Förutsättning för isbildning?

- Bindning av vatten/is till vinge
- Underkyllt vatten eller vattenånga

2. Värma vatten eller smälta is?

- Hindra is att bildas
 - Värma vatten innan träffar vingen eller
 - Värma vatten när träffar vingen
- Smälta bort den is som har bildats på vingen.

3. Strålning eller värmeledning?

- Mikrovågor/IR/UV
- Varm vingyta

Vindforsk 2008

Lars Bååth och Hans Löfgren Halmstad University



(Av)isning av vingar på vindkraftsverk

1. Förutsättning för isbildning?

- Bindning av vatten/is till vinge
- Underkyllt vatten eller vattenånga

2. Värma vatten eller smälta is?

- Hindra is att bildas
 - Värma vatten innan träffar vingen eller
 - Värma vatten när träffar vingen
- Smälta bort den is som har bildats på vingen.

3. Strålning eller värmeledning?

- Mikrovågor/IR/UV
- Varm vingyta

4. Hindra vatten att fästa vid vingen?

- Struktur
- Material
- Statiskt fält

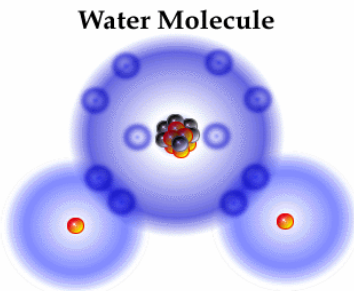
Vindforsk 2008

Lars Bååth och Hans Löfgren Halmstad University



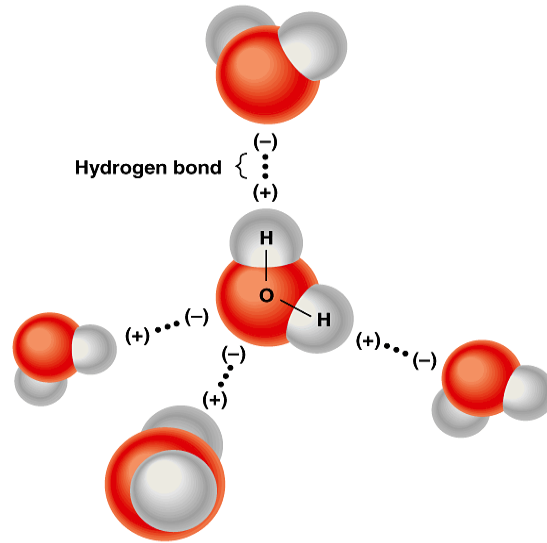
Water molecule

Polar covalent bond



Key: protons neutrons electrons

From Chemistry and Biochemistry

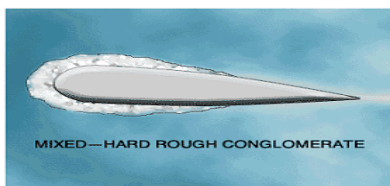


Vindforsk 2008

Lars Bååth och Hans Löfgren Halmstad University



Sideview of wing with clear ice



Sideview of wing with mixed ice



Sideview of wing with rime.

Aircraft Antiicing Systems Mehl&Parsons NASA

- Icing is caused by super-cooled liquid water drops

- cloud water drops $\varnothing < 50\mu\text{m}$
- freezing drizzle $\varnothing 50\mu\text{m} - 500\mu\text{m}$
- freezing rain $\varnothing > 500\mu\text{m}$

- Or by sublimation (direct freezing of water vapor)

Icing type is dependent on temperature as suggested in the following table:

Clear 0°C to -10°C - drops have time to flow before freezing

Mixed -10°C to -15°C

Rime -15°C to -40°C - drops freeze immediately

Vindforsk 2008

Lars Bååth och Hans Löfgren Halmstad University



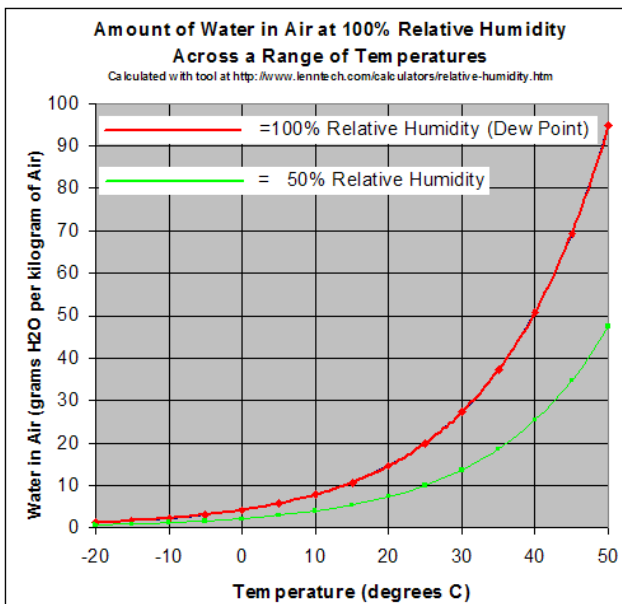
Olika lösningar för olika geografiska platser?

Dis	0.1-1µm
Torr dimma	1-10 µm
Tät dimma	10-40 µm
Duggregn	50-100 µm
Lätt regn	200-400 µm
Regn	500-1000 µm

Nedinsningskarteringen?

Vindforsk 2008

Lars Bååth och Hans Löfgren Halmstad University



Liquid Water Content (LWC)

We assume: 0.1-1 g/m³

Nedinsningskarteringen?

Vindforsk 2008

Lars Bååth och Hans Löfgren Halmstad University



To heat water

Specific heat of Water
kJ/g/K

Temperature raise K

Swept volume m³

Liquid Water Content
g/m³

Accesstime s

Target wing area m²

$$q'' = C_p \cdot \rho_{LWC} \cdot \frac{\Delta T}{\Delta s} \cdot \frac{V}{A}$$

= required power no losses
kW/m²

Vindforsk 2008

Lars Bååth och Hans Löfgren Halmstad University



To heat water

Water 1 m² area and $\rho_{LWC} = 1 \text{ g/m}^3 \rightarrow 1 \text{ }\mu\text{m}$ of water column length

If drop diameter > 1 μm then sum area of water droplets < area covered, then signal loss due to loss of beam fill as:

$$\Lambda_{bf} = \frac{\sum A_{drop}}{A}$$

And the required power is increased as:

$$q'' = C_p \cdot \rho_{LWC} \cdot \frac{\Delta T}{\Delta s} \cdot \frac{V}{A} \cdot \Lambda_{bf}^{-1}$$

Vindforsk 2008

Lars Bååth och Hans Löfgren Halmstad University



To heat water

$$q'' = C_p \cdot \rho_{LWC} \cdot \frac{\Delta T}{\Delta s} \cdot \frac{V}{A} \cdot \Lambda_{bf}^{-1}$$

This can be rewritten as:

$$q'' = \frac{2}{3} C_p \cdot \rho_{H_2O} \cdot \phi \cdot \frac{\Delta T}{\Delta s}$$

Density of water

Diameter of droplets

Vindforsk 2008

Lars Bååth och Hans Löfgren Halmstad University



To heat water

Note: independent of LWC!

$$q'' = \frac{2}{3} C_p \cdot \rho_{H_2O} \cdot \phi \cdot \frac{\Delta T}{\Delta s} \quad \text{kW/m}^2$$

Means that as long as the sum of all droplets do not cover the area, then only their size matter.

If we heat one drop we will heat all within sight...

Vindforsk 2008

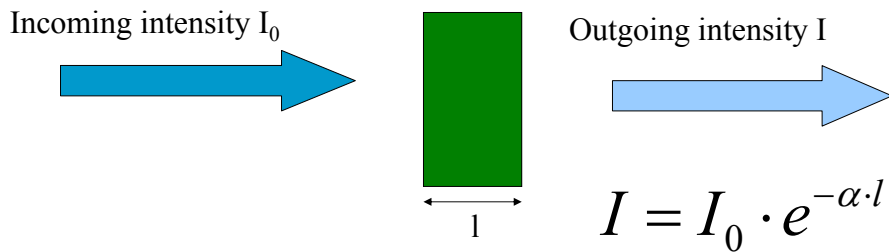
Lars Bååth och Hans Löfgren Halmstad University



To heat water

$$q'' = \frac{2}{3} C_p \cdot \rho_{H_2O} \cdot \phi \cdot \frac{\Delta T}{\Delta s}$$

Efficiency of radiative heating:



Vindforsk 2008

Lars Bååth och Hans Löfgren Halmstad University



To heat water

$$q'' = \frac{2}{3} C_p \cdot \rho_{H_2O} \cdot \phi \cdot \frac{\Delta T}{\Delta s} \cdot (1 - e^{-\alpha \cdot l})^{-1}$$

α is material dependent as

$$\alpha = \frac{4 \cdot \pi \cdot \sqrt{\epsilon_I}}{\lambda}$$

Wavelength

Imaginary dielectric constant

Loss to water

Vindforsk 2008

Lars Bååth och Hans Löfgren Halmstad University



To heat water

$$q'' = \frac{2}{3} C_p \cdot \rho_{H_2O} \cdot \phi \cdot \frac{\Delta T}{\Delta s} \cdot (1 - e^{-\alpha \cdot l})^{-1}$$

Loss to water

α is material dependent as

$$\alpha = \frac{4 \cdot \pi \cdot \sqrt{\epsilon_I}}{\lambda}$$

Imaginary dielectric constant

High ϵ_I
➤ high α
➤ high absorption

Wavelength

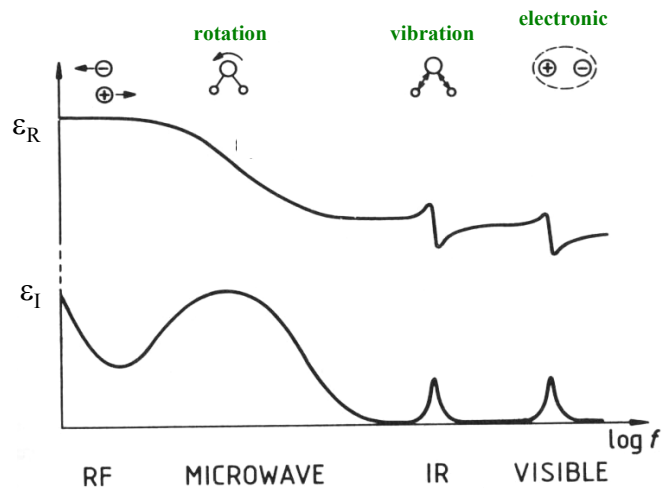
Vindforsk 2008

Lars Bååth och Hans Löfgren Halmstad University



Electromagnetic response

conductive dielectric



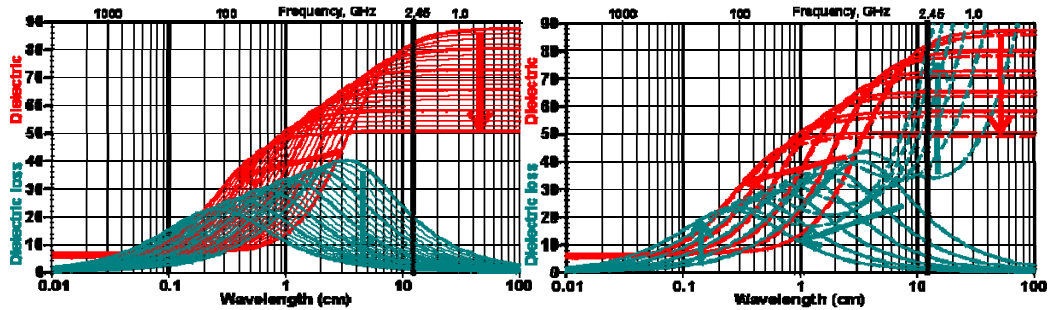
A qualitative presentation of parameters affecting the dielectric constant

Vindforsk 2008

Lars Bååth och Hans Löfgren Halmstad University



Microwave spectrum of water



pure water

arrows increasing temperature

From <http://www.lstu.ac.uk>

saline water

arrows increasing salinity

Vindforsk 2008

Lars Bååth och Hans Löfgren Halmstad University



To heat water

$$q'' = \frac{2}{3} C_p \cdot \rho_{H_2O} \cdot \phi \cdot \frac{\Delta T}{\Delta s} \cdot (1 - e^{-\alpha \cdot l})^{-1}$$

Water

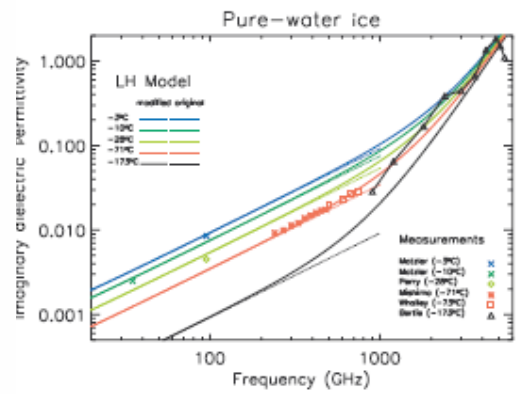
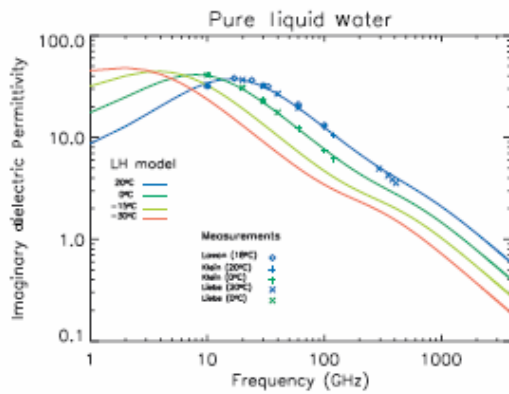
$l = \phi = 10 \mu\text{m}$

w.l.	loss
130 mm	0.3%
13 mm	5%
3 mm	17%

Vindforsk 2008

Lars Bååth och Hans Löfgren Halmstad University





Vindforsk 2008

Lars Bååth och Hans Löfgren Halmstad University



To heat water or melt ice

Water

$l = \varphi = 10 \mu\text{m}$	
w.l.	loss
130 mm	0.3%
13 mm	5%
3 mm	17%

Ice

$l = 10 \text{ mm}$	
w.l.	loss
130 mm	1%
13 mm	9%
3 mm	73%

Ice 1m thick

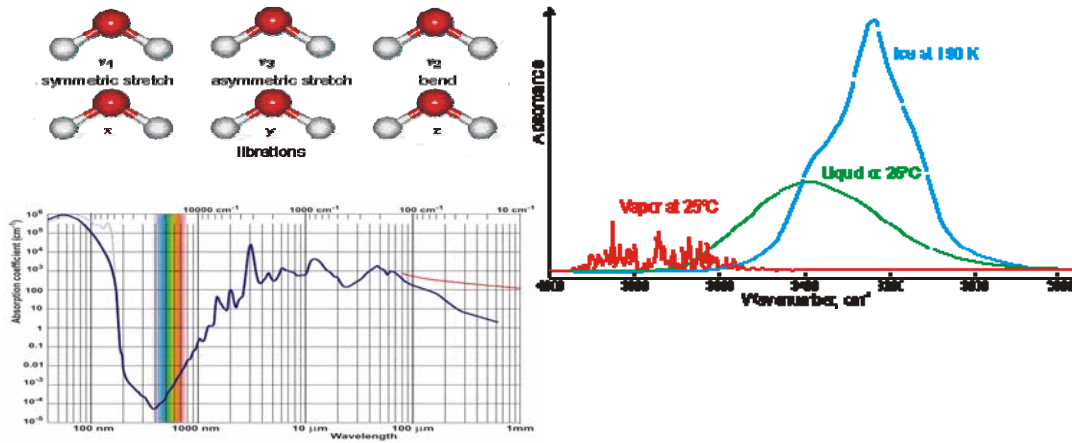
130 mm	61%
--------	-----

Vindforsk 2008

Lars Bååth och Hans Löfgren Halmstad University



To heat water or melt ice



Vindforsk 2008

Lars Bååth och Hans Löfgren Halmstad University



To heat water or melt ice

Water		Ice	
$l = \varphi = 10 \mu\text{m}$		$l = 10 \text{ mm}$	
w.l.	loss	w.l.	loss
130 mm	0.3%	130 mm	1%
13 mm	5%	13 mm	9%
3 mm	17%	3 mm	73%
20 μm	63%	20 μm	100%
		Ice 1m thick	
		130 mm	61%

Vindforsk 2008

Lars Bååth och Hans Löfgren Halmstad University



To heat water

$$q'' = \frac{2}{3} C_p \cdot \rho_{H_2O} \cdot \phi \cdot \frac{\Delta T}{\Delta s} \cdot (1 - e^{-\alpha \cdot l})^{-1}$$

Water

$l = \phi = 10 \mu\text{m}$	
w.l.	loss
130 mm	0.3%
13 mm	5%
3 mm	17%
20 μm	63%

Calculation:

10 μm drops, 4 kJ/kg/K,
10° sweep, 10° opening angle
2 dm wing strip, 3 wings 45 m radius
Continuous power T=-5°

130 mm	27 MW
13 mm	1.4 MW
3 mm	500 kW
20 μm	120 kW

Vindforsk 2008

Lars Bååth och Hans Löfgren Halmstad University



To heat water

$$q'' = C_p \cdot \rho_{LWC} \cdot U \cdot \Delta T \cdot A \cdot (1 - e^{-\alpha \cdot l})^{-1}$$

Water

$l = \phi = 10 \mu\text{m}$	
w.l.	loss
130 mm	0.3%
13 mm	5%
3 mm	17%
20 μm	63%

Calculation:

0.1 mm water layer, 4 kJ/kg/K,
1 m wing strip, 3 wings 45 m radius
Continuous power T=-5°

130 mm	5.3 MW
13 mm	368 kW
3 mm	191 kW
20 μm	162 kW

Vindforsk 2008

Lars Bååth och Hans Löfgren Halmstad University



To melt ice

$$q'' = C_{ice} \cdot \rho_{ice} \cdot l \cdot A \cdot (1 - e^{-\alpha \cdot l})^{-1}$$

Ice

l = 10 mm	
w.l.	loss
130 mm	1%
13 mm	9%
3 mm	73%
20 μm	100%

Calculation:

10 mm thick, 330 kJ/kg/K,
1 m wing strip, 3 wings 45 m radius

130 mm	11 MWh
13 mm	1.2 MWh
3 mm	150 kWh
20 μm	113 kWh

Vindforsk 2008

Lars Bååth och Hans Löfgren Halmstad University



Slutsatser idag:

1. Värma vatten droppar innan de träffar vingen är möjligt:
 - 2.5 GHz (130 mm) mycket för ineffektivt.
 - 22 GHz (13 mm) möjligt men ineffektivt
 - 100 GHz (3 mm) eller IR möjligt och kan vara effektivt
2. Värma vattenhinna på ytan kan fungera (hel träffyta)
 - Små droppar hamnar endast i träffytan (liten yta)
 - Stora droppar kan flyta ut (blankis)
3. Smälta is på ytan:
 - < 50 GHz (inklusive 2.5 GHz) fullständigt orealistiskt
 - > 100 GHz - IR möjligt (helst 10 mm istäcke)
4. Värmeledning från ytan:
 - Kylning av luft 200 W/m²
 - Kylning av vattendroppar 120 W/m²

Vindforsk 2008

Lars Bååth och Hans Löfgren Halmstad University



Pågående arbete:

1. CFD beräkningar av flödet mot vingen
 - Vattendroppar
 - Vattenånga
 - Ren luft
2. Spridningen av droppar på vingytan
 - Temperatur
 - Droppstorlek
 - Vingytans krökningsradie
3. Betingelser för nedisning
 - Nedisningskarteringen!
4. Sublimering (is direkt från gas)
5. Bildande av is och bindning på ytan
 - Ytkemi → Samarbete önskas!
 - Ytstruktur
 - Statiskt fält på ytan?

Vindforsk 2008

Lars Bååth och Hans Löfgren Halmstad University



Prognosen för projektet är mycket god

Vi behöver:

- Samarbete i ytkemi
- Förutsättningarna (nedisningskarteringen???)

Vindforsk 2008

Lars Bååth och Hans Löfgren Halmstad University



Prognosen för projektet är mycket god

Vi behöver:

- Samarbete i ytkemi
- Förutsättningarna (nedisningskarteringen???)

→ Snart slut på medel...

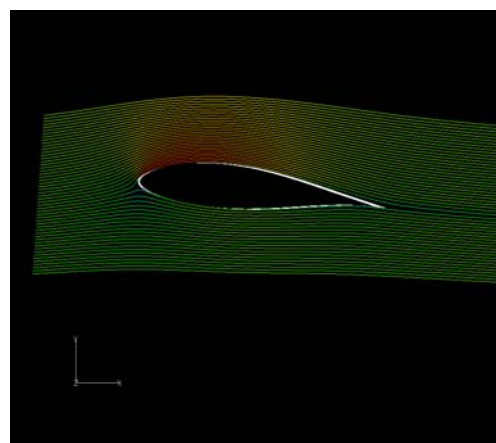
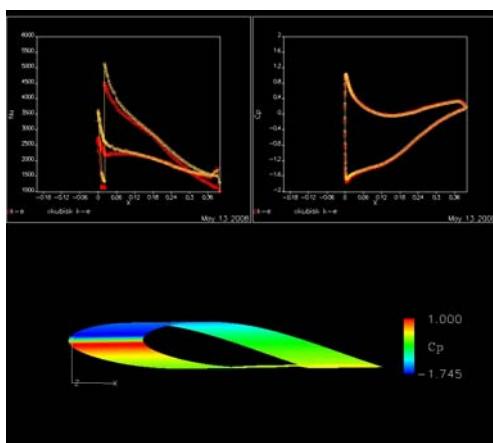
Vindforsk 2008

Lars Bååth och Hans Löfgren Halmstad University



CFD (Fluent) simuleringar av vinge

Simuleringar pågår med underkylda vattendroppar i flödet



Vindforsk 2008

Lars Bååth och Hans Löfgren Halmstad University

Watch this space...

