Studiengang Mechatronik

Modul 16:

FEM – Finite Elemente Methode

- 8. Vorlesung -

Prof. Dr. Enno Wagner

19. Dezember 2024



Agenda heute

Übersicht

- Wärmeübertragung
 - Natürliche Konvektion
 - Sieden
- Wärmerohre
- Forschung
 - 3-Phasen-Kontaktlinie



Finite Elemente Methoden In der Thermodynamik



Arten des Wärmeübergangs:

1.) Wärmeleitung:
$$R_{\lambda} = \frac{d}{\lambda \cdot A}$$
 (mit λ = Wärmeleitfähigkeit [W/mK])

2.) Konvektion: $R_{\alpha} = \frac{1}{\alpha \cdot A}$ (mit α = Wärmeübergangskoeffizient [W/m²K])

3.) Strahlung (hier nicht betrachtet)



Die Wärmeleitung erfolgt analog der elektrischen Leitung

$$\Delta U = R_{el} * I \qquad <=> \qquad \Delta T = R_{therm} * \dot{Q}$$

Die einzelnen Widerstände können (bei Reihenschaltung) einfach addiert werden:

$$\Phi = \frac{dQ}{dt} = \frac{T_1 - T_2}{\frac{1}{\alpha_1 \cdot A} + \frac{d}{\lambda \cdot A} + \frac{1}{\alpha_2 \cdot A}} = \frac{T_1 - T_2}{R_{\alpha 1} + R_{\lambda} + R_{\alpha 2}} = \frac{T_1 - T_2}{R_k}$$



Wärmeleitung



Wärmeleitung durch ebene Wand

- Konvektion innen
- Wärmeleitung Wand
- Konvektion außen

$$\dot{q} = \frac{1}{R}(T_1 - T_2)$$

- \dot{Q} = Wärmestrom [W]
- R = Wärmewiderstand [K/W]
- α = Wärmeübergangskoeffizient [W/mK]



Stoff	t	ρ	c	λ	10 ⁶ a /
Aluminium 99 75 Al	20	2700	0,896	229	94,6
Duraluminium	20	2700	0,912	165	67.0
Bervllium	20	1850	1.80	159	47,8
Blei (rein)	0	11340	0,128	35,1	24,2
Bronze (6 Sn. 9 Zn. 84 Cu. 1 Pb)	20	8700-8900	0,377	61,7	18,6
Cadmium	0-100	8650	0,230	92.2	46,4
Eisen		120-2460			Creber a
Schmiedeeisen rein	0	7850	0,465	59	16,2
Gußeisen 3% C	20	7000-7700	0,540	58	14,7
Bessemerstahl	20	7830	and star	40	Alder?"
Chromnickelstahl	20	7900	0,477	14,5	3,85
V2A Stahl vergütet	20	8000	0,477	15	3,93
Cr-Stahl (X8 Cr17) rost-	ENT I I	The plan and al	Par	a del Maria	and an
und säurebeständig	20	7700	0,46	25,1	7,09
Cr-Al-Stahl (X1o CrA124)	r 8	5×8. 32. 12.	10 11	nonadbr	Porta
hitzebeständig	20	7600	0,50	16,7	4,41
Manganstahl	20	and it is	0,502	41	en modera
Kobaltstahl 35 Co	20	8000		41	
Wolframstahl	20	8200		39	Seringe
Kesselblech H III	20	7900	0,47	52	14,1
Gold (rein)	20	19290	0,129	310	124
Gold-Platin (40 Au, 60 Pt)	25			26	Noonw
(10 Au, 90 Pt)	25			76,3	Sandb
Iridium	20	22500	0,130	58,6	20
Kalium	20	860	0,741	196,3	1. navili
Kobalt	20	8900	0,414	69,1	18,7
Konstantan (60 Cu, 40 Ni)	20	8800	0,410	22,6	5,69
Kupfer, sehr rein	20	8930	0,383	395	115
Handelsware	20	8300	0,419	372	107

Wärmeleitfähigkeit Metalle

- t Temperatur in ⁰C ρ Dichte in kg/m³
- c,cp spezifische Wärmekapazität in kJ/kg K
- λ Wärmeleitfähigkeit in W/m K
- 10⁶a Temperaturleitfähigkeit in m²/sek $[a=\lambda/(c_p \rho)]$

<u>Quelle:</u> H. Beer, Thermodynamik III, TH Darmstadt



Konvektive Wärmeübertragung

Freie (natürliche) Konvektion

Wärmeübertragung entsteht aufgrund von Dichteunterschieden als Folge von Temperaturunterschieden.

$$\mathbf{N}\mathbf{u=}f(\mathbf{Gr}\cdot\mathbf{Pr}),$$

mit der Nußelt-Zahl

$$Nu = \frac{\alpha l}{\lambda}$$

und der Grashof-Zahl

$$\operatorname{Gr} = \frac{g \, l^3}{v^2} \, \beta \, \Delta \vartheta$$

Pr	Prandtl-Zahl,
α	Wärmeübergangskoeffizient,
l	Anströmlänge,
g	Fallbeschleunigung,
ν	kinematische Viskosität,
$\Delta \vartheta$	Temperaturdifferenz zwischen Oberfläche ϑ_0 und Fluid ϑ_{∞} ,
λ	Wärmeleitfähigkeit des Fluids,
β	räumlicher Wärmeausdehnungskoeffizient des Fluids, s. Gl. (5).





Dimensionsloser Wärmeübergangskoeffizient





	NYTE OF		ch e d	20 42	1		2.5	0.201		
t	ρ	с _р	c'p	λ	λ'	10 ³ β	1o⁵ŋ	10 ⁶ v	10 ⁶ a	Pr
		1.263	1010	1205-10		10			st nr.	0.6364
-150	2,793	1,028	0,245	0,0120	0,0103	8,21	0,870	3,11	4,19	0.74
-100	1,980	1,011	0,241	0,0165	0,0142	5,82	1,18	5,96	8,28	0,72
- 50	1,534	1,007	0,240	0,0206	0,0177	4,51	1,47	9,55	13,4	0,715
0	1,2930	1,006	0,240	0,0243	0,0209	3,67	1,72	13,30	18,7	0,711
20	1,2045	1,007	0,240	0,0257	0,0221	3,43	1,82	15,11	21,4	0,713
40	1,1267	1,008	0,241	0,0271	0,0233	3,20	1,91	16,97	23,9	0,711
60	1,0595	1,009	0,241	0,0285	0,0245	3,00	2,00	18,90	26,7	0,709
80	0,9998	1,010	0,241	0,0299	0,0257	2,83	2,10	20,94	29,6	0,708
100	0,9458	1,012	0,242	0,0314	0,0270	2,68	2,18	23,06	32,8	0,704
120	0,8980	1,014	0,242	0,0328	0,0282	2,55	2,27	25,23	36,1	0,70
140	0,8535	1,017	0,242	0,0343	0,0295	2,43	2,35	27,55	39,7	0,694
160	0,8150	1,020	0,243	0,0358	0,0308	2,32	2,43	29,85	.43,0	0,693
180	0,7785	1,023	0,244	0,0372	0,0320	2,21	2,51	32,29	46,7	0,69
200	0,7457	1,026	0,245	0,0386	0,0332	2,11	2,58	34,63	50,5	0,685
250	0,6745	1,035	0,247	0,0421	0,0362	1,91	2,78	41,17	60,3	0,68
300	0,6157	1,046	0,250	0,0454	0,0390	1,75	2,95	47,85	70,3	0,68
350	0,5662	1,057	0,252	0,0485	0,0417	1,61	3,12	55,05	81,1	0,68
400	0,5242	1,069	0,255	0,0516	0,0443	1,49	3,28	62,53	91,9	0,68
450	0,4875	1,081	0,258	0,0543	0,0467	-	3,44	70,54	103,1	0,685

Temperatur in °C Dichte in kg/m³ ρ c_p spezifische Wärme bei konstantem Druck in kJ/kg K c' spezifische Wärme bei konstantem Druck in kcal/kg K Wärmeleitfähigkeit in W/mK λ λ' Wärmeleitfähigkeit in kcal/m h K thermische Ausdehnungszahl in 1/K ß dynamische Viskosität in kg/m sek n kinematische Viskosität in m²/sek ν Temperaturleitfähigkeit in m²/sek a Pr = v/a Prandtl-Zahl

<u>Quelle:</u>

H. Beer, Thermodynamik III, TH Darmstadt



<u>Verbesserung mittels Strömung</u> und dichtere Fluide:

 \Rightarrow Wärmeübergangskoeffizient α = 4 W/m²K

Beispiel-Berechnung für 100 x 100 mm Fläche, 80°C

näherungsweise (Quelle: Wikipedia)

- Medium Luft: $lpha=12\cdot\sqrt{v}+2$
- Medium Wasser: $lpha=2100\cdot\sqrt{v}+580$

Mit Strömungsgeschwindigkeit v [m/s]



11



Natürliche Konvektion

Wandtemperatur

 \Rightarrow Sehr gering !!



Beispiel: Rundstab



Übung zur Veranschaulichung

Berechnen Sie die Heißkörper-Temperatur

M = Kupfer L = 0,3 m \emptyset = 8 mm A = 0,00005 m² \dot{Q} = 100 W T_{KK} = 0°C

Wie hoch muss T_{HK} sein?



Wenn man z. B. über einen **massiven Kupferstab** mit 8 mm Durchmesser über eine Länge von 300 mm eine Wärmemenge von 100 Watt übertragen, würde man ein treibendes Temperaturgefälle von theoretisch 1493 °C benötigen, ein utopischer Wert der jenseits der Schmelztemperatur von Kupfer liegt.

Eine **Heatpipe** schafft den gleichen Wärmedurchsatz mit einem treibenden Temperaturgefälle von ca. 0,5°C



- Wie funktioniert so eine Heat-Pipe?
- Warum können sie so große Wärmeströme bei kleinem ΔT übertragen?
- Welche weiteren Möglichkeiten gibt es, Wärme ohne große Temperaturdifferenzen zu übertragen?



Behältersieden und Sprühkühlung

Quelle:

Diss. C. Sodtke

=> Behältersieden α = 50.000 W/mK





Wärmeübertragung

Behältersieden

Übergang von flüssige in gasförmige Phase

Latente Wärme => sehr große Verdampfungsenthalpie!





Behältersieden

Mechanismen der Wärmeübertragung beim Behältersieden





Wärmeübertragung

Siedekurve beim Behältersieden

Quelle:

Diss. E. Wagner

Unterschiedliche Phasen der Wärmeübertragung





Wärmerohre (Heatpipes)



Heatpipes

Das Prinzip der Heatpipe ließ sich der amerikanische GM-Ingenieur Richard S. Gaugler 1944 patentieren. Die Entwicklung wurde 1963 von George M. Grover et al. wiederentdeckt, als man für das amerikanische Raumfahrtprogramm nach effizienten passiven Wärmetransportmöglichkeiten suchte.



Wärmerohre (Heat pipes)

Wärmeleitfähigkeit Kupfer

 λ_{Cu} = 400 W/mK

Wärmeleitfähigkeit Heat Pipe λ_{HP} = 100.000 W/mK





Axiale Druckverläufe in einem Wärmerohr

Quelle: Diss. Brandt





Kapillarstrukturen

Optimierter Flüssigkeitstransport

- 1 Netzstruktur
- 2 Sinterstruktur
- 3 offene Axialrillen
- 4, 5, 6 kombinierte Strukturen









Dreieckige Axialrillen rechteckige Axialrillen

Re-Entrant Axialrillen Hochleistungskapilarstruktur



Lokale Phänomene beim Wärmeübergang in Wärmerohren

$$k = \frac{\dot{q}}{\overline{\overline{T}}_{\rm W} - T_{\rm sat}}$$

Betrachtung eines finiten Elementes Lokale Berechnung von

- Impulsbilanz
- Energiebilanz
- Stoffbilanz





Numerische Simulation

- Sehr hohe Auflösung im Bereich der "Mikrozone"
- Finite Elemente < 0,1 μ m
- Mäßige Auflösung im Bereich der Makrozone
- Finite Elemente < 1 mm



Wärmerohre



Ergebnis der Simulation

Extrem hoher Peak der Wärmestromdichte im Bereich der Mikrozone (3-Phasen-Kontaktlinie) Räumliche Ausdehnung ca. 1 µm !



Bild 6.6: Filmdicke δ und Wärmestromdichte $\dot{q}_{\rm mic}$ in Abhängigkeit von der Koordinate ξ $(T_{\rm sat} = 70^{\circ}\text{C}, \dot{q} = 26000 \text{ W/m}^2, \beta = 8^{\circ}, z = L_{\rm a})$



Wärmeübergang in Wärmerohren mit unterschiedlichen Strukturen

In Abhängigkeit des Neigungswinkels $\boldsymbol{\beta}$

Quelle: Diss. Brandt





Wärmeübergang in Wärmerohren mit unterschiedlichen Strukturen

In Abhängigkeit der Wärmestromdichte

Ergebnis: Wärmeübergangskoeffizient $\alpha = 8000 \text{ W/m}^2\text{K}$



Quelle: Diss. Brandt



Auslegung von Wärmerohren – Maßgeblich ist der Temperaturbereich

Arbeitstemperatur (°C)	Arbeitsmedium	Hüllmaterial		
– 200 bis- 8 0	Flüssiger Stickstoff	Edelstahl		
–70 bis 60	Ammoniak	Aluminium, Edelstahl		
-45 bis 120	Methanol	Kupfer, Edelstahl		
5 bis 300	Wasser	Kupfer		
190 bis 550	Quecksilber	Edelstahl		
400 bis 800	Kalium	Edelstahl		
500 bis 900	Natrium	Edelstahl		



Thermodynamik-Forschung:

Experimentelle Untersuchung des Wärmeübergangs an der 3-Phasen-Kontaktlinie



Warum Siede-Forschung ?

Hintergrund:

Sehr hohe Wärmestromdichten an Brennstäben von Kernreaktoren

Hintergrund Siede-Forschung



Probleme beim Blasensieden:

- Durch die Bildung großer Wasser-Dampfblasen entstehen Hot-Spots in denen praktisch keine Wärme abgeführt werden kann => Gefahr durchbrennender Brennstäbe
- Nur aufwendige empirische Modelle zur Berechnung des Wärmeübergangs verfügbar
- Gültigkeit der Modelle nur für bestimmte Fluide, Heizwände
- Physikalische Mechanismen sehr komplex und nicht hinreichend verstanden



Modellbildung: Theorie der Mikrozonen



Ansatz von Stephan, P. und Hammer, J.: A new model for nucleate boiling heat transfer. Springer Wärme- und Stoffübertragung, 30: 119-125 (1994)

- Einzelne Dampfblase
 wächst an definierter
 Keimstelle auf Heiz-wand
 an und steigt in
 Siedeflüssigkeit auf
- Adsorbierter Film (wenige Moleküllagen) ist adiabate Zone
- Starke lokale Verdampfung im Bereich der 3-Phasen-Kontaktlinie → "Mikrozone"



Wärmestromdichte in der "Mikrozone" – im Bereich der 3-Phasen-Kontaktlinie



- Theoretisch/numerische Modelle
- Implementierung der Mikrozone in Blasensiedemodell (Stephan, Hammer 1994) → q_{mic} = 15 · 10⁶ W/m²

Herausforderung:

Messtechnische Validierung, sehr hoher Wärmeströme auf extrem kleinen Abmessungen bei sehr großer Dynamik



Konstruktion einer Siedeapparatur



- Erzeugung von Einzelblasen in einer kleinen metallischen Siedezelle
- Optische Zugänge von 3 Seiten und von unten
- Vollständige Temperierung im Wasserbad
- unabhängige Druckeinstellung
- Mikroskop-High-Speed Kamera für die Blasenkontur
- Mikroskop-High-Speed IR Kamera f
 ür die Aufnahme der Heizwand-R
 ückseite





Entwicklung Folienheizer

- 10-50 μm dicke Edelstahlfolie (1) auf Kupfersockel (3) fixiert
- Eine mittige künstliche Keimstelle (FIB, \emptyset = 20 μ m)
- Kontaktierung mit gekühlten Elektroden (2) zur elektrischen Widerstands-Beheizung
- Optischer Zugang von Unten durch IR transparentes Substrat (6)
- Druckausgleichsbohrung (7)
- Kühlmittelbohrungen (11) in Grundplatte (5) zur Unterdrückung von Blasensieden

Sonstige Daten:

- Arbeitsmittel: HFE-7100, FC-84, FC-3284
- Druckbereich: 300 950 mbar
- Temperaturbereich: 30 80 °C



Darstellung Blasengeometrie





Micro PIV





Blasendynamik



Gastvortrag KIT // Dr. Enno Wagner



Temperaturabdruck mittels IR Bildern





- Auf einer 20 μm dicken Edelstahlfolie ist der "Temperaturabdruck" des Blasenfußes gut erkennbar
- Im Bereich der 3-Phasen-Kontaktlinie tritt eine ringförmige Abkühlung auf
- Der innere Bereich der Dampfblase heizt sich während des Blasenwachstums auf
- Die Annahme einer adiabaten Zone kann folglich bestärkt werden



IR Analyse der Heizwand



Gastvortrag KIT // Dr. Enno Wagner



Zerlegung der Heizwand in Finite Elemente





Darstellung der lokalen Wärmestromdichte



- Ringförmiger Bereich hoher
 Wärmestromdichte im Bereich der 3-Phasen-Kontaktlinie
- Höchste Wärmestromdichte bei Beginn des Blasenwachstums
- Geringe Wärmestromdichte am Umschlagpunkt
- Innerer Bereich der Dampfblase praktisch adiabat
- Wie hoch ist der maximale Mikrozonen-Wärmestrom?



Validierung

Variation der Foliendicke



Variation der Aufnahmefrequenz



Gastvortrag KIT // Dr. Enno Wagner

Ergebnis:

Ergebnis

Unschärferelation der Peak-Wärmeströme

- Verringerung der Heizfolien-Dicke (50, 20, 10 μ m) => Wärmestrom vs. Unschärfe
- Erhöhung der Aufnahmefrequenz (500, 1000, 2000 Hz) • => Wärmestrom vs. Rauschen
- Verlangsamung der Blasenfrequenz (Parabelflug) => Wärmestrom vs. Geschwindigkeit



45





Zusammenfassung

- Numerische Modelle zeigen sehr hohe Wärmestromdichten in einem schmalen Bereich an der 3-Phasen-Kontaktlinie ("Mikrozone")
- Mit einer komplexen Siedeapparatur und mittels örtlich und zeitlich hochauflösender Messtechniken konnte der Effekt auch experimentell sichtbar gemacht werden
- Numerische und experimentelle Ergebnisse konnten erfolgreich validiert werden die Wärmestromdichten sind in einer vergleichbaren Größenordnung

Frage

• Wie kann diese Erkenntnis auf ein technisches Verfahren wie Kühlung von Leistungselektronik angewandt werden ?







Vielen Dank für die Aufmerksamkeit !



Hinweis

Diese Folien sind ausschließlich für den internen Gebrauch im Rahmen der Lehrveranstaltung an der Frankfurt University of Applied Sciences bestimmt. Sie sind nur zugänglich mit Hilfe eines Passwortes, dass in der Vorlesung bekannt gegeben wird.