

Drei Transportmechanismen des Wärmetransports:

Wärmestrahlung

Benötigt kein Medium

$$\tau = \alpha + \rho + \tau$$

Mit α = Absorptionsgrad
 ρ = Reflexionsgrad
 τ = Transmissionsgrad

Vereinfachtes Kirchhoff-Gesetz: Emissionsgrad = Absorptionsgrad $\epsilon = \alpha$

Plancksches Strahlungsgesetz

Beschreibt spektrale spezifische Ausstrahlung des von einem schwarzen Strahler ausgesendeten Strahlung in Abhängigkeit seiner Temperatur

$$M_\lambda(\lambda, T) = \frac{c_1}{\lambda^5} \frac{1}{\exp\left(\frac{c_2}{\lambda T}\right) - 1} \quad [2.3] \quad c_1, c_2 \hat{=} 1, 2. \text{ Strahlungskonstante}$$

Vereinfachung Wiensches Strahlungsgesetz für $\lambda T \rightarrow 0$

$$M_\lambda(\lambda, T) = \frac{c_1}{\lambda^5} \exp\left(-\frac{c_2}{\lambda T}\right) \quad [2.8]$$

Weitere Vereinfachung Rayleigh-Jeans-Gesetz mit Taylor: $\exp(x) \approx 1+x$

$$M_\lambda(\lambda, T) = \frac{c_1}{c_2} \frac{T}{\lambda^4} \quad \text{für } \lambda T \rightarrow \infty$$

Stefan-Boltzmann Gesetz

Beschreibt die Gesamtmenge der in alle Richtungen ausgesendeten Strahlung eines schwarzen Strahlers in Abhängigkeit seiner Temperatur.

$$M(T) = \int_0^\infty M_\lambda(\lambda, T) d\lambda = \sigma_{SB} T^4 \quad [2.11] \quad \sigma_{SB} \hat{=} \text{Stefan-Boltzmann-Konstante}$$

Bsp: Isothermer Körper $\epsilon_k < 1$ in isothermer Umgebung mit $\epsilon_\infty = 1$

$$\dot{Q}_{k,em} = A_k \epsilon_k \sigma_{SB} T_k^4$$

$$\dot{Q}_{k,abs} = A_k \alpha_k \sigma_{SB} T_\infty^4 \rightarrow \dot{Q}_k = A_k \sigma_{SB} (\epsilon_k T_k^4 - \alpha_k T_\infty^4)$$

Wiensches Verschiebungsgesetz

Beschreibt die Wellenlänge des spektralen Strahlungsmaximums eines schwarzen Strahlers in Abhängigkeit seiner Temperatur

$$\lambda_{max} = \frac{b}{T} \quad [2.18] \quad b \hat{=} \text{Wiensche Verschiebungskonstante}$$

~~Plancksches Strahlungsgesetz~~

Wärmeleitung

Benötigt ein Medium

→ Leitungselektronen → Temperaturgefälle

Mikroskopische / Makroskopische Betrachtung spielt eine Rolle

Wiedemann-Franz-Gesetz

Zusammenhang zwischen elektrischer Leitfähigkeit σ und Wärmeleitfähigkeit k

$$\frac{k}{\sigma} = LT \quad [2.27] \quad L \hat{=} \text{Lorentz Faktor}$$

Mikroskopische Betrachtung wichtig für Anwendungen im Miniaturbereich

z.B. Mikrosensoren, superleitende Dünnschichten, ...

Meistens genügt jedoch eine makroskopische Betrachtung

Fourierscher Erfahrungssatz

Flächenspezifischer Wärmestrom \vec{q}_A an einer beliebigen Stelle im Inneren des Temperaturfeldes T ist proportional zum Temperaturgradienten an dieser Stelle

$$\vec{q}_A = -k \nabla T \quad [2.27]$$

↳ Wärme wird in Richtung abnehmender Temp. transportiert

Vereinfachung bei nur einer Dimension: $q_A = -k \frac{\partial T}{\partial x} \quad [2.28]$

Fouriersche Wärmeleitungsgleichung

Beschreibt das raumzeitliche Temperaturfeld $T(\vec{x}, t)$ eines

Kontrollvolumens in einer Wärmeleitungssituation unter Berücksichtigung

innerer Wärmespeicherung / -freisetzung

$$\nabla \cdot k \nabla T + \dot{q}_V = \rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} \quad [2.10] \quad (\text{Allgemeine Form})$$

Kartesische Koordinaten

$$\frac{\partial}{\partial x} (k_x \frac{\partial T}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y} (k_y \frac{\partial T}{\partial y}) + \frac{\partial}{\partial z} (k_z \frac{\partial T}{\partial z}) + \dot{q}_V = \rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} \quad [2.50]$$

Im Skript ob hier einige Beispiele zur Vereinfachung der Gleichung

zylinderkoordinaten

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (k_r \frac{\partial T}{\partial r}) + \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial \phi} (k_\phi \frac{\partial T}{\partial \phi}) + \frac{\partial}{\partial z} (k_z \frac{\partial T}{\partial z}) + \dot{q}_V = \rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} \quad [2.55]$$

Kugelkoordinaten

$$\frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} (k r^2 \frac{\partial T}{\partial r}) + \frac{1}{r^2 \sin^2(\theta)} \frac{\partial}{\partial \phi} (k \frac{\partial T}{\partial \phi}) + \frac{1}{r^2 \sin(\theta)} \frac{\partial}{\partial \theta} (k \sin \theta \frac{\partial T}{\partial \theta}) + \dot{q}_V = \rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} \quad [2.56]$$

Konvektion

Einphasige Betrachtung (kein Phaseübergang des Fluids)

Mit Transport von Wärmeübertragende Teilchen verknüpft, benötigt Medium Strömung zum Teilchentransport notwendig (Durch äußere Einwirkung oder durch Temperaturgradienten, z.B. Dichteunterschiede, ...)

Konzentrationsgrenzschicht

Bestimmt konvektive Massetransfer, ~~Wärmeübertragung~~ bestimmt

Strömungsgrenzschicht

Haftbedingung an der Wand, dort Geschwindigkeit 0

→ haftende Teilchen behindern die Bewegung benachbarter Teilchen

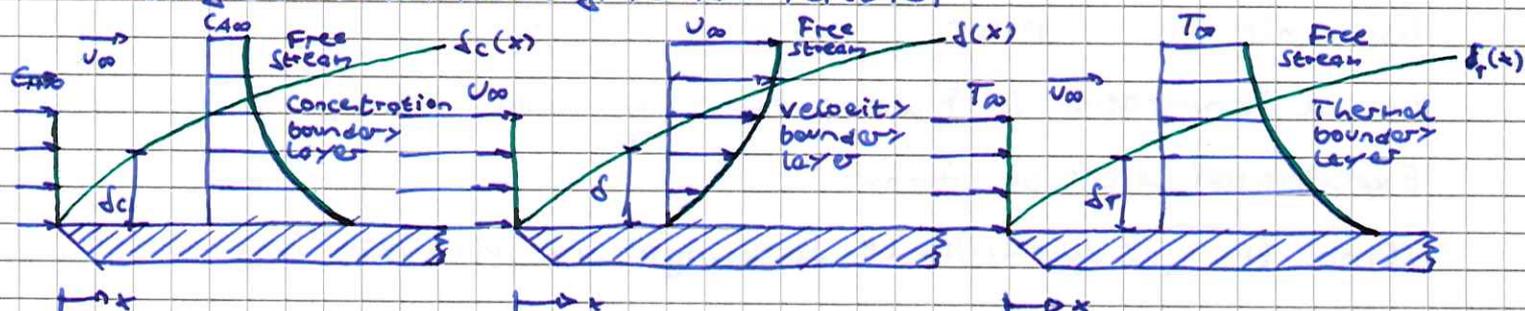
→ Schubspannungen τ

Thermische Grenzschicht

Ausbildung ähnlich der Strömungsgrenzschicht bei Temperaturdifferenzen

Fluidteilchen an der Plattenoberfläche in thermische Gleichgewicht mit Platte

→ Energieaustausch mit angrenzenden Teilchen



Newtons Law of Cooling

$$h = \frac{-k_f \left. \frac{\partial T_f}{\partial y} \right|_{y=0^+}}{T_w - T_\infty} \quad [2.64]$$

Erkenntnis ist, dass die Eigenschaften der Wand für h (bei ansonsten perfekter geometrischer Ähnlichkeit) keine Rolle spielen

→ keine Abhängigkeit von Festkörpereigenschaften

Wärmeübergangskoeffizient

$$h = \frac{-k_f \left. \frac{\partial T_f}{\partial n} \right|_{\text{Wand}}}{T_w - T_{ref}} \quad \text{bzw.} \quad \dot{q}_A = h (T_w - T_{ref})$$

Wirkung

Ursache

~~Wandtemperatur~~ ~~Wandtemperatur~~ ~~Wandtemperatur~~

Wobei $T_w - T_{ref}$ ist die "Treibende Temperaturdifferenz"

Tref kann beliebig gewählt werden, solange gilt: $\Theta_f = \frac{T_f - T_w}{T_{ref} - T_w}$ ähnlich

Θ_f ist bei Tref τ , eine Änderung von Θ_f sollte möglichst ähnlich sein, sodass die Bedeutung im Experiment und Original für Tref gleich sind

Bsp adiabate Wandtemperatur

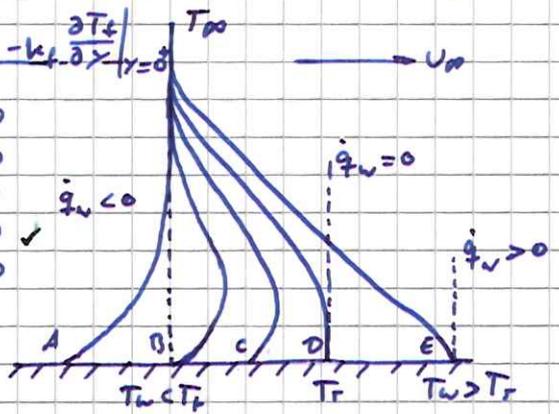
Lokale Wandtemperatur für lokal angenommene, adiabate Wand

→ Wandtemperaturdifferenz zwischen Wandwärmestrom an und aus

entspricht treibender Temperaturdifferenz

Vorteil: Eindeutige lokale Zuordnung, aber schwer experimentell / numerisch zu bestimmen

Pos	T_{ref}	$\dot{q}_A = h(T_w - T_{ref})$	$\dot{q}_A = h(T_w - T_{aw})$	$\dot{q}_A = -k_f \frac{\partial T_f}{\partial x} _{y=0}$
A	$T_w < T_{ref} < T_{aw}$	< 0	< 0	< 0
B	$T_w = T_{ref} < T_{aw}$	$= 0$	< 0	< 0
C	$T_{ref} < T_w < T_{aw}$	> 0	< 0	< 0
D	$T_{ref} < T_w = T_{aw}$	> 0	$= 0$ ✓	$= 0$ ✓
E	$T_{ref} < T_{aw} < T_w$	> 0	> 0	> 0



Bsp Bulk-Temperatur

Massestromenmittelte Temperatur eines Strömungsquerschnitts

Experimentell oft nur näherungsweise bestimmbar

Bsp Centerline Temperatur

Lokale Temperatur im Flächenschwerpunkt eines Strömungsquerschnitts

Experimentell leicht bestimmbar

stimmt für gut durchmischte Strömungen in guter Näherung mit der Bulk-Temperatur überein.

Problem z.B. bei Umlenkungen

Erhaltungsgleichungen (DGLs) beschreiben physikalischen Hintergrund
 Aufstellen Dimensionsloser Erhaltungsgleichungen erlaubt Übertragung
 der Beschreibung auf physikalisch ähnliche Bedingungen (Experiment)

Erhaltungsgleichung - Kontinuitätsgleichung

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \rho \nabla \cdot \vec{U} = 0 \quad [3.7] \quad \text{Allgemeine Form}$$

Erhaltungsgleichung - Navier-Stokes'sche Gleichungen (weiter im Skript)

$$\rho \left(\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} \right) = - \frac{\partial p}{\partial x} + \mu \Delta u - 2 \rho \omega v + (\rho - \rho_i) \omega^2 H + \rho_i \omega^2 H \quad [3.75]$$

Dimensionslose Kennzahlen

Prandtl-Zahl $Pr \stackrel{\text{def}}{=} \frac{\nu}{\alpha} \quad [3.24] \hat{=} \frac{\text{Strömungsgrenzschichtdicke}}{\text{Temp.grenzschichtdicke}}$

Schmidt-Zahl $Sc \stackrel{\text{def}}{=} \frac{\nu}{D_m} \quad [3.26] \hat{=} \frac{\text{Strömungsgrenzschichtdicke}}{\text{Konzent.grenzschichtdicke}}$

Lewis-Zahl $Le \stackrel{\text{def}}{=} \frac{kc}{\rho c_p \nu} \quad [3.27] \hat{=} \frac{\text{Wärmeleitung}}{\text{Diffusion}}$

Reynolds-Zahl $Re_L \stackrel{\text{def}}{=} \frac{uL}{\nu} \quad [3.29] \hat{=} \frac{\text{Beschleunigungskräfte}}{\text{Reibungskräfte}}$

Beschreibt bei laminar überströmter ebener Platte die Dicke der hydrodynamischen Grenzschicht → Sie nimmt mit wachsender Re-Zahl ab.

Mach-Zahl $Ma \stackrel{\text{def}}{=} \frac{u}{c} \quad [3.30] \hat{=} \frac{\text{Geschwindigkeit}}{\text{Schallgeschwindigkeit}}$

Eckert-Zahl $Ec \stackrel{\text{def}}{=} \frac{\bar{u}^2}{c_p(T_w - T_i)} \quad [3.32]$

Spielt nur bei sehr hohen Geschwindigkeiten eine Rolle oder auch sonst, wenn die treibende Temperaturdifferenz für den Wärmeübergang klein wird

Nusselt-Zahl $Nu_L \stackrel{\text{def}}{=} \frac{hL}{k_f} \quad [3.33]$

Interpretation als dimensionsloser Temperaturgradient senkrecht zur Wand

Weitere Dimensionslose Kennzahlen im Skript zu finden!

~~Übertragungszahl~~
 Sherwood-Zahl $Sh_L = \frac{h_m L}{D}$

Analog zur Nusselt-Zahl bei Stoffübergang
~~Temperaturmessung~~

direkt

indirekt

stabil

instabil

Widerstandsthermometer

RTD - Resistance Temperature Device

Funktionsprinzip: Vibrationen des Atomgitters sind Temperaturabhängig (und Materialspezifisch) \rightarrow Bewegung freier Elektronen in elektrischen Leitern ist Temp.- und Materialabhängig \rightarrow el. Widerstand eines Leiters ist Temp. abhängig und Materialspezifisch \rightarrow Materialspezifische Kennlinie $R(T)$ \rightarrow Temperaturbestimmung über Kennlinie Inverse $T(R)$ möglich! (Solange diese streng Monoton)

Metall-Widerstandsthermometer

Kennlinie hängt sehr stark vom Material ab

keine logarithmische Darstellung im Diagramm

Einer der genauesten Temperatursensoren (Weil sehr gut verstandenes Material)

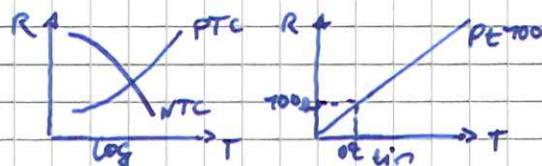
Halbleiter-Widerstandsthermometer (Thermistoren)

Materialien können frei kombiniert werden

Logarithmische Darstellung im Diagramm, Widerstand steigt

bei bestimmten Temperaturen plötzlich stark an, kann als Schalter genutzt werden

Jeder Thermistor mit eigener Kennlinie



NTC: Widerstand sinkt mit steigender Temperatur (Heißleiter)

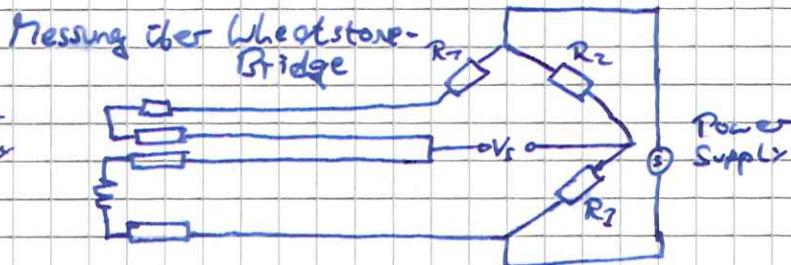
PTC: Widerstand nimmt mit steigender Temperatur zu (Kaltleiter)

Diagramme!

- Enger Temperaturbereich im Vergleich mit Metall-Widerstandstherm.
- Gut zur Messung sehr kleiner Temperaturänderungen
- Aber vor allem bei hohen Temperaturen nicht-linear



2-Draht-Schaltung



4-Draht-Schaltung

Hitzedraht - Anemometrie

Zur punktuellen Messung von zeitlichen Geschwindigkeits- und Temperaturfluktuationen in turbulenten Strömungen (1D, 2D, 3D)

- Drei sehr dünne, orthogonal ausgerichtete Drähte werden erwärmt, bei einer Umströmung mit einem kühleren Medium werden sie je nach Ausrichtung unterschiedlich stark gekühlt, daran lässt sich die Strömungsrichtung erkennen
- Nur für Modellbereich gedacht
- Sehr aufwändig, wird nur für spezielle turbulente, hochfrequente Messungen in Wandnähe genutzt.
- Draht wird gegenüber der Strömung elektrisch aufgeheizt
- konvektive Kühlung der Sonde → Widerstandsänderung

Energiebilanz für stationäre Strömungen

$$R_w l_w^2 = (T_w - T_a) \phi_{conv} (v) \quad [4.8]$$

Energiebilanz für instationäre Strömungen (ohne Wärmeleitung)

$$m_w c_w \frac{dT_w}{dt} = R_w l_w^2 - (T_w - T_a) \phi_{conv} (v) \quad [4.9]$$

mit $T_w \hat{=}$ Temp. des beheizten Drahtes

$T_a \hat{=}$ Temp. des unbeheizten Drahtes [inkompress. \approx Fluidtemp.]
[kompress. \approx Recoverytemp.]

Funktion $\phi(v) \hat{=}$ hauptsächlich abhängig von Strömungsgeschwindigkeit normal zum Sensordraht

einfach, kein Regler, Draht altert schnell

keine therm. Trägheit
 häufigst genutzt, schnelle Regelung

CCA - constant current anemometry - Sensor wird mit konst. Strom beheizt

CTA - constant temperature anemometry - Sensor durch Regler auf konst. Temp.

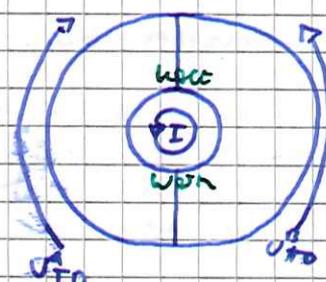
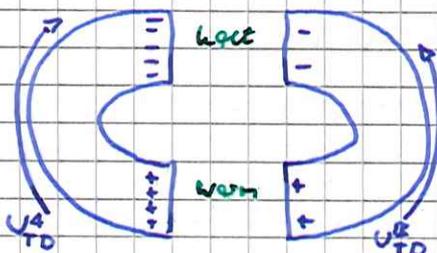
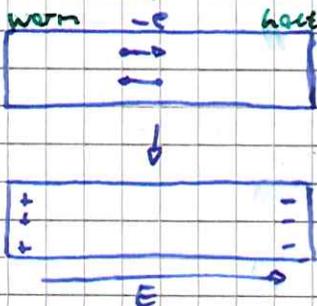
CVA - constant voltage anemometry - Sensor wird mit konst. Spannung beheizt
 Kompensation therm. Trägheit in Post-processing

Frequenzen der Strömungsfuktuation typisch deutlich höher als therm. Trägheit des Sensors, daher elektrische Kompensation notwendig

bei CCA und CTA Einsatz eines Hochpass-Filters

bei CTA Verwendung eines Regelkreises

Thermoström: Entstehung durch Ladungsverchiebungen (Thermodiffusionsströme in einem Material / in zwei unterschiedlichen Materialien / in einem Stromkreis aus zwei unterschiedlichen Materialien)



Thomson-Effekt: Beschreibt den geänderten Wärmestrom entlang eines Stromdurchflusses Leiters, in welchen ein Temperaturgradient vorliegt. Temperaturänderungen hängen von der Flussrichtung der Ladungsträger bezüglich der Richtung der Temperaturgradienten ab.

Seebeck-Effekt: Beschreibt Entstehung einer Spannung infolge Kontakts zweier unterschiedlicher elektrischer Leiter auf unterschiedlichen Temperaturen. Stromfluss ist nicht Teil des Effekts: tritt im offenen und geschlossenen Leiterstreifen auf

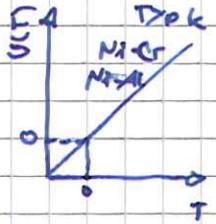
Peltier-Effekt: Gegenüber dem Seebeck-Effekt umgekehrte Verhältnisse, elektrischer Strom bewirkt einen Wärmetransport.

Einige verschiedene Thermoelement-Typen in Tabelle [4.72] in Skript

Infrarot-Thermografie

Berührungslose bildgebende Temperatur-Messmethode

Grundprinzip ist, dass jede Oberfläche mit $T > 0K$ elektromagnetische Wärmestrahlung mit $\lambda > 75nm$ emittiert. Messung der Strahlungsintensität für Rückschluss auf Temperatur des ausstrahlenden Körpers



Einschub zu Thermoelementen: Messspitzentypen von Mantel-Thermoelementen

- Geerdet: Eignen sich für Messungen von ruhenden und fließenden Medien wie Gase oder Flüssigkeiten. Gilt auch bei korrosiven Flüssigkeiten oder hohen Drücken
- Offenliegend: Eignen sich für ruhende oder strömende, nicht-korrosive Gase, wenn schnelle Ansprechzeit gefordert ist.
- Nicht geerdet: Eignen sich für Messungen in korrosiven Umgebungen, Thermoelement ist von Mantel durch Magnesiumoxid isoliert.

Problem: Materialübergänge von Messaufbau zu Messgerät verfälschen das Ergebnis, also entweder gleiches Material wie Messgerät verwenden, oder die Temperatur beider Messgeräteverbindungen muss gleich sein.

Alternative: Elektrische Kompensation

Relevante Strahlungsgesetze sind Planck'sches Strahlungsgesetz, Stefan-Boltzmann'sches Gesetz, Wiensches Verschiebungsgesetz.

Typen: Thermische Detektoren

Auftreffende Strahlung wird absorbiert, Erwärmung. z.B. Mikrobolometer (beruht auf Widerstandsänderung), arbeitet bei Raumtemperatur, leicht, geringer Energieverbrauch. Aber kleine therm. Auflösung, Langsame Reaktionszeit (ms)

Typen: Quanten- bzw. Photodetektoren

Elektrisches Signal entspricht Menge empfangener Photonen, reagiert schneller (µs, ns) große thermische Auflösung, hohe Genauigkeit und Stabilität, Aber muss auf sehr niedrige Temperaturen gekühlt werden → größere Abmessungen, Gewicht, Kosten, vor allem stationär betriebene Kameras

Thermalfarben TP

~~Reaktionstemperatur Messung an hoch erdeter Analyse~~
~~oder Analyse Energiekomponente~~

Ansprechzeiten min. 5 min, irreversibel, zeigen also nur die höchste aufgetretene Temperatur an. Widerstehen aggressiven Umgebungen. Hohe Oberflächenklebrkraft bei hohen Temperaturen, auf den meisten Oberflächen keine Grundierung nötig, keine Zusatzstoffe benötigt.

Einsatzgebiete bei schwer zugänglichen Bauteilen

- Anwendung:
- Manuelles Einzeichnen der Isothermen unter Nutzung bestimmter Beleuchtungen, geht auch automatisch
 - Beschichtung bei periodischen Lastfällen mit mehreren Farben → Genauigkeitssteigerung durch überlappende Temp. bereiche
 - Zeitnahe Kalibrierung empfehlenswert.

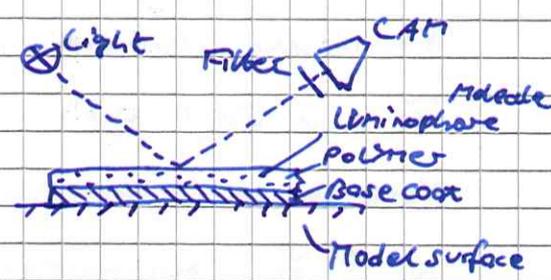
Thermosensitive Farben TSP

UV Licht (eintreffend) ~~erregt~~ bewirkt Emission in anderer Wellenlänge

Photolumineszenz bei Anregung durch UV-Licht

Floureszenz: Schnelles Abklingen (ms)

Phosphoreszenz: Nachleuchten (Sekunden-Stunden)



Thermochromatische Flüssigkristalle TLC

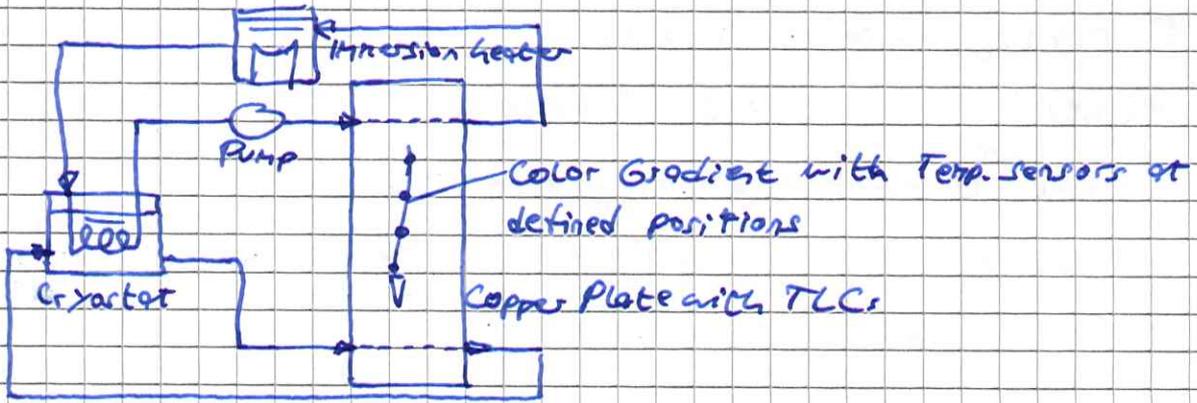
Selektive Reflektion weißer Lichts durch Dünnschichteffekte

Schubspannungs- und Druckeffekt unterdrücken ^{ung} mit mikroverkapselten TLCs

Reflektierte Wellenlänge ist Temperaturabhängig

Schwarzer Hintergrund absorbiert durchscheinenden Lichtanteil

Kalibrierung zur Zuordnung des Grünmaximums nötig



Messung des Energietransports über stationäre und instationäre Verfahren

Stationäre Verfahren

- Dauert in der Regel lange ($\approx h$)
- Leichtes auswertbar (Energiebilanzen)
- Begrenzte Genauigkeit durch starken Einfluss der Umgebung

Instationäre Verfahren

- In der Regel schnell ($\approx \text{min}$)
- Schwerer auswertbar (Differentialgleichungen)
- Begrenzter Einfluss der Umgebung \rightarrow Erhöhte Genauigkeit

Stationäre Verfahren

Ungeeignet für hohe Wärmeströme oder hohe Temperaturen

Nutzung von TLC-Farben für Isothermen

Instationäre Verfahren

Anwendung des Prinzips der Wärmeleitung in halbunendlicher Wand.

Wärmeleitung in halbunendlicher Wand - Allgemeine Vorbetrachtung

Fouriersche Wärmeleitungsgleichung ohne Quellen und Senken (Intern)

$$\nabla_{\vec{x}} \cdot k \nabla_{\vec{x}} T(\vec{x}, t) = \rho c \frac{\partial}{\partial t} T(\vec{x}, t) \quad [5.26]$$

Vorkommende Stoffgrößen werden konstant angenommen und zu

$$\kappa \stackrel{\text{def}}{=} \frac{k}{\rho c} \text{ zusammengefasst}$$

Vernachlässigung von \vec{y} - und \vec{z} -Richtung

$$\frac{\partial^2}{\partial x^2} T(x, t) \stackrel{\text{def}}{=} \frac{1}{\kappa} \frac{\partial}{\partial t} T(x, t)$$

Mit Definition der Differenzen ergibt sich $\Psi(x, t) \stackrel{\text{def}}{=} T(x, t) - T(x, t)|_{t=0}$

$$\frac{\partial^2}{\partial x^2} \{ \Psi(x, t) + T(x, t)|_{t=0} \} = \frac{1}{\kappa} \frac{\partial}{\partial t} \{ \Psi(x, t) + T(x, t)|_{t=0} \} \quad [5.30]$$

Anfangstemperatur als ortsunabhängige Konstante

$$T_i \stackrel{\text{def}}{=} T(x, t)|_{t=0} = \text{const} \quad \forall x \geq 0$$

$$\frac{\partial^2}{\partial x^2} \Psi(x, t) = \frac{1}{\kappa} \frac{\partial}{\partial t} \Psi(x, t) \quad [5.32]$$

Dies ist eine ^{Part.} Differentialgleichung zweiter Ordnung

\rightarrow Anwendung der Laplace-Transformation mit $\bar{\Psi}(x, s) = \mathcal{L}_t \{ \Psi(x, t) \}$

Um eine gewöhnliche DGL zweiter Ordnung zu erhalten

Messverfahren des Wärmetransports - Wärmeübergangsmessung

$$\frac{\partial^2}{\partial x^2} \bar{\Psi}(x,s) - \frac{s}{\alpha} \bar{\Psi}(x,s) = - \frac{1}{\alpha} \underbrace{\Psi(x,t)|_{t=0}}_{=0} \quad [5.36]$$

$$\frac{\partial^2}{\partial x^2} \bar{\Psi}(x,s) - \frac{s}{\alpha} \bar{\Psi}(x,s) = 0 \quad [5.39]$$

Lösen des DGL über charakteristisches Polynom

$$\bar{\Psi}(x,s) = A \exp\left(x \sqrt{\frac{s}{\alpha}}\right) + B \exp\left(-x \sqrt{\frac{s}{\alpha}}\right) \quad [5.42]$$

Bestimmung von A und B über Randbedingungen:

- Zeitabhängiger Wärmestrom an der Oberfläche

$$\dot{q}(x,s)|_{x=0} = -k \frac{\partial}{\partial x} \bar{\Psi}(x,s)|_{x=0} \quad [5.47]$$

- Temperatur im Unendlichen

$$\lim_{x \rightarrow \infty} \bar{\Psi}(x,s) = 0$$

Es ergibt sich: $A = 0$ und $B = \frac{\dot{q}(x,s)|_{x=0}}{k \sqrt{\frac{s}{\alpha}}}$

Einsetzen liefert:

$$\bar{\Psi}(x,s) = \frac{\dot{q}(x,s)|_{x=0}}{\sqrt{ksc} \sqrt{s}} \exp\left(-x \sqrt{\frac{s}{\alpha}}\right) \quad [5.60]$$

An der Oberfläche der betrachteten Wand bei $x=0$ gilt dann

$$\bar{\Psi}(x,s)|_{x=0} = \frac{\dot{q}(x,s)|_{x=0}}{\sqrt{ksc} \sqrt{s}} \quad [5.67]$$

Darstellung des Oberflächenwärmestroms als konvektive Randbedingung

Da sich Wärmeströme nur indirekt über Temperaturen messen lassen,

soll der zeitabhängige Oberflächenwärmestrom $\dot{q}(x,t)|_{x=0}$ als konvektive

Randbedingung mit konstantem Wärmeübergangskoeffizienten h ausgedrückt werden.

$$\dot{q}(x,t)|_{x=0} = h (T_{aw}(t) - T_w(t)) \quad [5.62]$$

Mit $T_{aw}(t) = T(x,t)|_{x=0}$ für $\dot{q}(x,t)|_{x=0} = 0$

und $T_w(t) = T(x,t)|_{x=0}$ für $\dot{q}(x,t)|_{x=0} > 0$

Oder, durch Bezug auf Anfangstemperatur:

$$\dot{q}(x,t)|_{x=0} = h [\Psi_{aw}(t) - \Psi_w(t)] \quad [5.65]$$

Mit $\Psi_{aw}(t) \stackrel{\text{def}}{=} \Psi(x,t)|_{x=0} = T_{aw}(t) - T_i$ für $\dot{q}(x,t)|_{x=0} = 0$ [5.66]

und $\Psi_w(t) \stackrel{\text{def}}{=} \Psi(x,t)|_{x=0} = T_w(t) - T_i$ für $\dot{q}(x,t)|_{x=0} > 0$ [5.67]

Lösungsvariante zur Darstellung der Wandtemperaturfunktion

Um den zeitlichen Temperaturverlauf an der Oberfläche zu bestimmen, muss Gleichung 5.67 aus dem Laplace-Raum transformiert werden.

Es zeigt sich jedoch, dass es sinnvoll ist, zunächst Gleichung 5.65 ebenfalls in den Laplace Raum zu transformieren (zur weiteren Verwendung)

Weil sonst eine Integralgleichung bei der Lösung entsteht. (nur num. lösbar)

$$\bar{q}(x,s)|_{x=0} = h [\bar{\Psi}_{\text{aw}}(s) - \bar{\Psi}_w(s)] \quad [5.75]$$

Einsetzen in 5.67 und umstellen nach der gesuchten Wandtemperaturfkt. liefert:

$$\bar{\Psi}_w(s) = \frac{h}{\sqrt{hsc}} \cdot \frac{\bar{\Psi}_{\text{aw}}(s)}{\sqrt{s} + \frac{h}{\sqrt{hsc}}}$$

Bei Anwendung der Rücktransformation fällt auf, dass es notwendig ist, den zeitlichen Verlauf der adiabaten Wandtemperatur anzugeben, dieser wird als konstant angenommen \rightarrow Temperatursprung ideal

Rücktransformation ergibt sich zu:

$$\frac{T_w(t) - T_i}{T_{\text{aw}} - T_i} = 1 - \exp\left(-\frac{h^2}{hsc} t\right) \operatorname{erfc}\left(\frac{h}{\sqrt{hsc}} \sqrt{t}\right) \quad [5.88]$$

Duhamel Superpositionsprinzip

Mit $\Theta_w = \frac{T_w(t) - T_i}{T_{\text{aw}} - T_i}$ und $\beta = \frac{h}{\sqrt{hsc}} \sqrt{t}$

folgt $\Theta_w = 1 - \exp(-\beta^2) \operatorname{erfc}(\beta)$ [5.93]

Und mit Duhamel:

$$T_w(t) - T_i = \sum_{j=1}^N \Theta_w(t - \tau_j) [T_{\text{aw},j} - T_{\text{aw},j-1}] \quad [5.94]$$

Funktioniert nur unter bestimmten Annahmen (im Text grün unterstrichen) und bei Betrachtung der unendlich dünnen Wandoberfläche

$\operatorname{erfc}(\beta)$ kann zur Erhöhung der numerischen Stabilität angenähert werden, mit Reihenentwicklung

Dünnschichtmethode

"Cook and Fieldmann-Technik", die Idee ist es, den Wärmeübergang zeit aufgelöst zu messen

Umstellen von Gleichung 5.67 liefert

$$\bar{q}(x,s)|_{x=0} = \sqrt{hsc} \cdot \frac{1}{\sqrt{s}} \cdot s \bar{\Psi}(x,s)|_{x=0} \quad [5.773]$$

Rücktransformation der beiden enthaltenen Terme und Faltung liefert

$$\dot{q}(x,t)|_{x=0} = \sqrt{\frac{k\rho c}{\pi}} \int_0^t \frac{\frac{\partial \psi(x,\tau)}{\partial x} |_{x=0}}{\sqrt{t-\tau}} d\tau \quad [5.727]$$

Weitere Umformung und Partielle Integration ergibt

$$\dot{q}(x,t)|_{x=0} = -\sqrt{\frac{k\rho c}{\pi}} \left\{ \left[\frac{\psi(t) - \psi(\tau)}{\sqrt{t-\tau}} \right]_{\tau=0}^t - \frac{1}{2} \int_0^t \frac{\psi(\tau) - \psi(\tau')}{(t-\tau)^{3/2}} d\tau \right\} \quad [5.726]$$

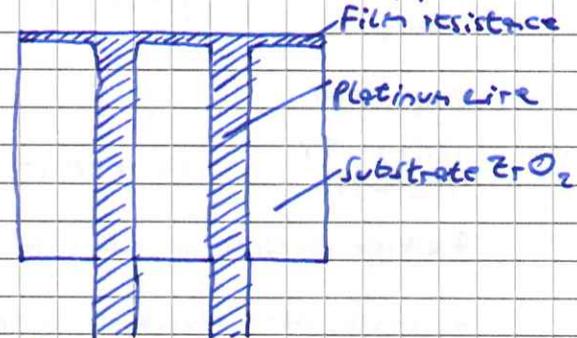
Weiter mit Linearisierung, um diskrete Messergebnisse in Integral nutzen zu können

$$\dot{q}(x,t)|_{x=0} = 2 \sqrt{\frac{k\rho c}{\pi}} \sum_{i=1}^n \frac{T_i - T_{i-1}}{\sqrt{t_n - t_i} + \sqrt{t_n - t_{i-1}}} \quad [5.732]$$

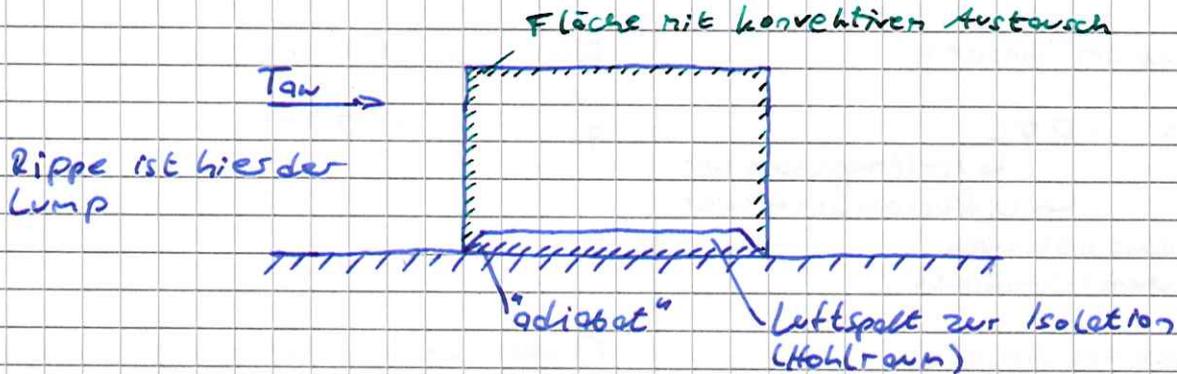
Lumped capacitance Methode

- kalorimetrische Methode [Chi+99]
- Anfangs isothermer Festkörper wird einem Temperatursprung ausgesetzt
- Voraussetzung: zu jedem Zeitpunkt isothermer Körper \rightarrow Temp.gradient vernachlässigen!

Dünnschicht-Sensor (Bsp.)



~~Wärmeleitfähigkeit~~ \rightarrow Temperaturänderung ist, Lumped Körper



Idee: Wärmestrom zwischen Körper und Umgebung äußert sich in Temperaturänderung des Körpers

Aus Fouriersgleichung folgt: Wärmeleitung ohne örtlichen Temperaturgradient erfordert unendlich hohe Wärmeleitung [5.26]

Daher sehr kleine Biot-Zahlen benötigt $Bi = \frac{hL}{k_s} < 0,1$

\rightarrow Wärmeleitfähigkeit möglichst groß, Lump möglichst klein

(L ist die längst mögliche Strecke innerhalb des Lumps)

Messverfahren des Wärmetransports - Wärmeübergangsmessung

Aufstellen einer globalen Energiebilanz:

$$hA [T_{\infty} - T_w(t)] = m c_p \frac{d}{dt} T_w(t) \quad [5.733]$$

Definition einer Temperaturdifferenz und umstellen:

$$T_w(t) = T_{\infty} - \psi_w(t)$$

Einsetzen liefert die DGL:

$$\cancel{hA} \frac{hA}{m c_p} \psi_w(t) = - \frac{d}{dt} \psi_w(t) \quad [5.737]$$

Lösen durch Trennung der Variablen und Integrieren liefert:

$$- \frac{hA}{m c_p} t = \ln \left(\frac{\psi}{\psi_i} \right) \quad [5.740]$$

Umgeformt

$$\frac{T_w(t) - T_i}{T_{\infty} - T_i} = \tau - \exp \left(- \frac{hA}{m c_p} t \right) \quad [5.747]$$

Fertige Gleichung hat ähnliche Form wie bei der Lebnendlichen Wand Methode

Analogien über Massentransport

Rückschlüsse von Massentransport auf Wärmetransport (und umgekehrt)

Diffusion

1. Ficksches Gesetz

$$\vec{J}_A = -D \nabla c$$

↳ Stoffmengenkonzentr.
↳ Diffusionskoeffizient

↳ Flächenspezifisch
↳ Teilchenstromdichte

2. Ficksches Gesetz

$$\nabla \cdot D \cdot \nabla c = \frac{\partial c}{\partial t}$$

Wärmetransport

Fourierscher Erfahrungssatz

$$\vec{q}_A = -k \nabla T$$

Fouriersche Wärmeleitungsgleichung

$$\nabla \cdot k \nabla T + \dot{q}_V = \rho c_p \frac{\partial T}{\partial t}$$

Theorie

Schmidt [Sch 76] + Nußelt [Nuß 30]

$$Nu_L = \frac{hL}{k_f} = \frac{\partial \tilde{T}}{\partial \tilde{y}} \Big|_{\tilde{y}=0^+} \quad \text{mit } \tilde{y} = \frac{y}{L} \quad \text{und } \tilde{T} = \frac{T - T_w}{T_{\infty} - T_w}$$

$$Sh_L = \frac{h_m L}{D} = \frac{\partial \tilde{c}}{\partial \tilde{y}} \Big|_{\tilde{y}=0^+} \quad \text{mit } \tilde{y} = \frac{y}{L} \quad \text{und } \tilde{c} = \frac{c - c_w}{c_{\infty} - c_w}$$



Nach Schmidt und Nußelt sind beide Prozesse analog wenn $Pr = Sc$,

so dass grundlegende Analogie folgt

$$Nu = Sh \quad \text{wenn} \quad Pr = Sc \quad [5.750]$$

$$Nu = F \cdot Sh \quad \text{wenn} \quad Pr \neq Sc \quad [5.757]$$

↳ Analogiefaktor

$$Nu = c Re^m Pr^n$$

$$Sh = c Re^m Sc^n$$

"So sieht in der Regel eine Korrelation aus"

Im allgemeinen Fall ist F eine Funktion der oben betrachteten

Ähnlichkeitsparameter. Es folgt:

$$\frac{Nu}{Sh} = \left(\frac{Pr}{Sc} \right)^n = F$$

n wird empirisch bestimmt, typisch ca. $\frac{1}{3} - 0,4$

↳ für flache Platten, laminar

Naphthalin-Sublimations-Methode

- Griech. naphtha = Erdöl
- Farbloser Feststoff
- Sublimiert bei Raumtemperatur
- Kohlenwasserstoff C₁₀H₈
- Charakteristischer Teer-Geruch
- Gesundheits- / Umweltschädlich
- $Sc = 2,5$ bei 25°C für Naphthalin-Dampf in Luft (vgl. Luft 0,77, Wasser 7,14)

Testablauf

1. Bauteil mit Naphthalin beschichten
2. Anfangsoberflächenprofil oder -gewicht messen
3. Massentransport Experiment durchführen
4. Endoberflächenprofil oder -gewicht messen
5. Auswertung nach Massentransferkoeffizient oder Sherwood-Zahl
6. Übertragung auf Wärmeübergangskoeffizient oder Nußelt-Zahl

Vorteile

- Sehr genau
- Reine Konvektion, keine Wärmeleitungs- oder Strahlungsverluste
- Einfache Herstellbarkeit des Testkörpers

Nachteile

- Stoffwerte müssen exakt bekannt sein
- Vermessung oft aufwändig
- Teils Korrektur für natürliche Konvektion notwendig

Aufgeteilt in stationäre und instationäre Verfahren

Stationäre Verfahren

Fouriersche Wärmeleitungsgleichung allgemein

$$\nabla \cdot k \nabla T + \dot{q}_v = \rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} \quad [6.7]$$

Stationäre Methode basiert auf reduzierte Form (Terme entfallen)

~~Stationäre Methode basiert auf reduzierte Form (Terme entfallen)~~

~~Stationäre Methode basiert auf reduzierte Form (Terme entfallen)~~

mit $k = \text{const.}$ folgt:

$$\frac{d}{dx} \left(k \frac{dT}{dx} \right) = 0 \quad \text{(Laplace Gleichung) [6.4]}$$

$$T(x) = C_1 x + C_2$$

Parallel-Platte-Technik

Fluid zwischen zwei horizontalen Platten obere Platte beheizt

Randbedingungen der zwei Platten zum

Lösen der Laplace-Gleichung:



$$T(0) = T_1 \quad T(D) = T_2$$

$$T(x) = (T_2 - T_1) \frac{x}{D} + T_1 \quad \text{stationärer Prozess} \rightarrow \text{unabhängig von } k$$

Aus Fourierschen Erfahrungssatz folgt nun:

$$\dot{q}_A = k \frac{T_1 - T_2}{D} \quad [6.72]$$

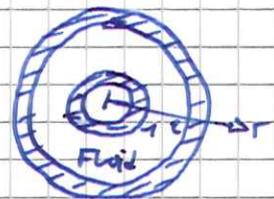
↳ Effektive Fläche aus Korrekturfaktor \cdot geom. Fläche $\hat{=} A_{eff}$

Koaxial-Zylindertechnik

Beide Zylinder auf konstanter Temperatur

$$\dot{q}_L = \frac{2\pi k_f}{\log\left(\frac{r_2}{r_1}\right)} (T_1 - T_2)$$

$$\dot{q}_L = \frac{k_s}{C} (T_1 - T_2) \quad \text{mit } C \hat{=} \text{Geometriekonstante}$$



C ist mit bereits bekannten Fluid bestimmt werden, und dann bei Unbekanntes Fluiden verwendet werden.

Beide Zylinder werden auf konstanter Temperatur gehalten.

Messverfahren des Wärmetransports - Wärmeleitfähigkeitsmessung

Instationäre Verfahren

Es ist wichtig, im Experiment nur Wärmeleitung anzuregen

→ Schnelle Durchführung, dünne Fluidfilm messen wenn möglich

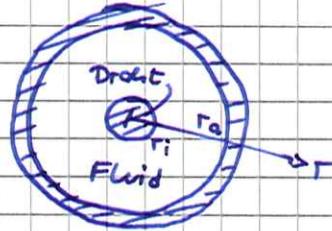
Hot-Wire-Technik

Zeitabhängige Störung in Form eines Wärmestroms wird auf das anfangs im thermodynamischen Gleichgewicht befindliche Fluid aufgeprägt.

Wärmeleitfähigkeit aus Gleichung, die beobachtete Antwort auf Störung in Zusammenhang bringt.

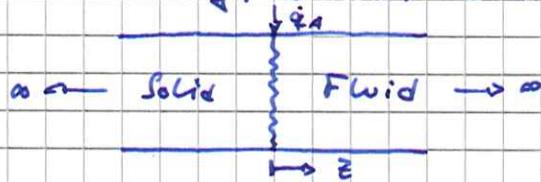
Nicht in Nähe des kritischen Punktes anwendbar

Fluid ist etwas wie unendliche Wand, Versuch



läuft nur sehr kurz, um Konvektion möglichst kurz zu schließen

Ende Effekte können mit zwei unterschiedlich lange Drähte herausgerechnet werden.



Interferometrische Messtechnik

Alleinstellungsmerkmal ist Genauigkeit der Messung in Nähe des kritischen Punktes

Beim kritischen Punkt wird die Wärmeleitfähigkeit ∞ unendlich und die thermische Diffusivität wird null.

Grundprinzip: Infinitesimal dünne, gleichmäßige Wärmequelle an der Trennfläche zwischen halbunendlichem Fluid und halbunendlichem Festkörper

→ Temperaturanstieg aufgrund der Wärmequelle

$$T(z, t) - T_0 = - \frac{2 \dot{q} a \sqrt{\pi t}}{k_f} \operatorname{ierfc} \left(\frac{z}{2\sqrt{\pi t}} \right)$$

Keser

Laser durch Fluid interferiert mit Laser nicht durch das Fluid, Interferenz ist Temperaturabhängig

Messverfahren des Wärmetransports - Fragenammlung

Sie möchten eine Infrarothamera verwenden. Welche Gesetzmäßigkeiten sind dafür relevant, wie wird die Wärme übertragen?

Plancksches Strahlungsgesetz, beschreibt spektrale spezifische Ausstrahlung der von einem schwarzen Strahler ausgesendeten Strahlung in Abhängigkeit seiner Temperatur

$$M_\lambda(T, \lambda) = \frac{C_1}{\lambda^5} \frac{1}{\exp\left(\frac{C_2}{\lambda T}\right) - 1} \quad C_1, C_2 \hat{=} \text{Strahlungskonstanten}$$

Vereinfachung für $\lambda T \rightarrow 0$: Wiensches Strahlungsgesetz
Vereinfachung für $\lambda T \rightarrow \infty$: Rayleigh-Jeans-Gesetz

Wärme wird über Wärmestrahlung übertragen

Welche anderen Gesetzmäßigkeiten gibt es? Wieso können diese nicht genutzt werden?

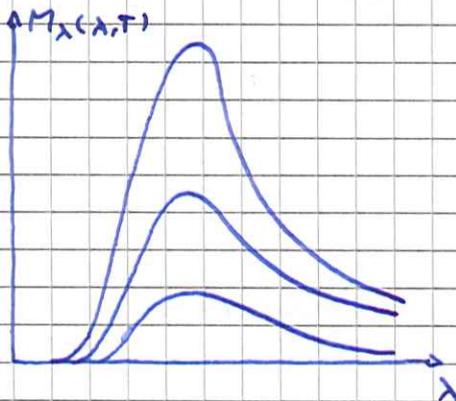
Stefan-Boltzmann-Gesetz: Beschreibt die Gesamtmenge der in alle Richtungen ausgesendeten Strahlung eines schwarzen Strahlers in Abhängigkeit seiner Temperatur.

$$M(T) = \int_0^\infty M_\lambda(\lambda, T) d\lambda \quad \rightarrow \text{kein Sensor misst über alle Wellenlängen}$$

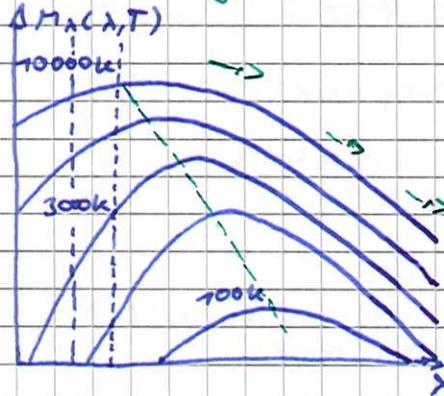
Wiensches Verschiebungsgesetz: Beschreibt die Wellenlänge des spektralen Strahlungsmaximums eines schwarzen Strahlers in Abhängigkeit seiner Temperatur

$$\lambda_{\max} = \frac{b}{T} \quad b \hat{=} \text{konstante} \quad \rightarrow \text{Gibt nur Lage des Maximums an}$$

Zeichnen sie die Intensität über die Wellenlänge auf.



Doppelt lineare Darstellung



Doppelt log. Darstellung

Wieso nutzt man eine Infrarothamera und keine andere Kamera?

Lage des Strahlungsmaximums bei Raumtemperatur

Jetzt soll mit der Infrarothamera im instationären Versuch an einer geschlossenen Plexiglschleife der Wärmeübergangskoeffizient bestimmt werden. Wie gehen sie vor?

- Sichtfenster aus Quarzglas für Kamera
- Beschichtung der zu untersuchenden Oberfläche mit schwarzer Farbe
- Dünnwand-Prinzip zur Annäherung des Sprungs
- Kamera nicht parallel zu Glas um Spiegeln zu vermeiden
- Möglichst ideale Temperatur-Sprung im Fluid erzeugen

Wie kann die Temperatur der anströmenden Luft gemessen werden?

(2)

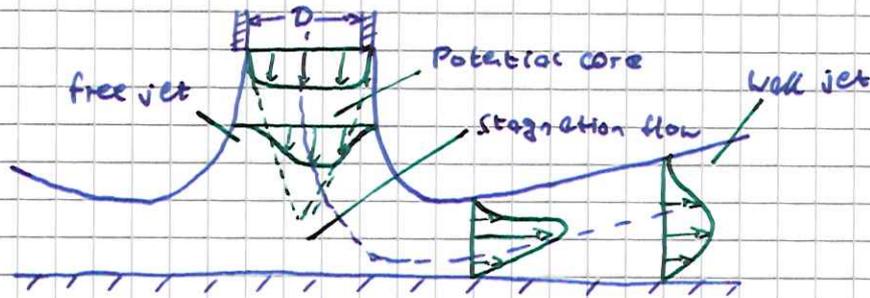
Widerstandsthermometer oder Thermoelement

Centerline- oder Bulktemperatur

Bei welcher Art von Strömung muss zwingend die Bulk-Temperatur verwendet werden?

Schlecht durchmischte Strömungen, Prallstrahl

Zeichnen sie das Geschwindigkeitsprofil an relevanten Stellen des Prallstrahls.



Instationäre Methode: welche Formel ist hier zur Bestimmung des Wärmeübergangskoeffizienten relevant?

Fouriersche Wärmeleitungsgleichung $\rho \cdot k \cdot \Delta T + \dot{q}_v = \rho c_p \frac{\partial T}{\partial t}$
Beschreibt räumzeitliche Temperaturfeld $T(x, t)$
Temp. Leitfähigkeit, Dichte, Spez. Wärmekapazität, Quellterm

Worauf beziehen sich die Stoffwerte dieser Gleichung?

Es sind die Stoffwerte der Wand

Was ist die physikalische Bedeutung und Einheit von \dot{q}_v ?

Volumenspezifische Wärmequelle in $\frac{W}{m^3}$

Was ist im Versuchsraum zu beachten?

Konstante Temperatur

Was sind Analogien, wie können sie eingesetzt werden und welche Rolle spielen Ähnlichkeitskennzahlen dabei?

- Rückschluss auf Wärmetransport aus Stofftransport
- Naphthalin-Sublimationsmethode
- Ähnlichkeit von Sherwood- und Nusselt-Zahl

$$Nu = Sh, \text{ wenn } Pr = Sc; \quad Nu = F \cdot Sh \text{ wenn } Pr \neq Sc$$

$$F = \left(\frac{Pr}{Sc} \right)^n = \frac{Nu}{Sh}$$

n wird empirisch bestimmt, typisch ca. 0,33 - 0,4

For flache Platten, laminar

Messverfahren des Wärmetransports - Fragenammlung

7

Was können sie mir über die Wärmestrahlung sagen?

Benötigt kein Medium

Wird durch Plancksches Strahlungsgesetz beschrieben

$$M_\lambda(\lambda, T) = \frac{c_1}{\lambda^5} \frac{1}{\exp\left(\frac{c_2}{\lambda T}\right) - 1} \quad - \quad \text{Planck}$$

Beschreibt spezifische spektrale Ausstrahlung eines schwarzen Strahlers abhängig seiner Temperatur

Bei $\lambda T \rightarrow 0$ gilt \sim Wiensches Strahlungsgesetz $M_\lambda(\lambda, T) = \frac{c_1}{\lambda^5} \exp\left(-\frac{c_2}{\lambda T}\right)$

Bei $\lambda T \rightarrow \infty$ gilt \sim Rayleigh-Jeans-Gesetz $M_\lambda(\lambda, T) = \frac{c_1}{c_2} \frac{T}{\lambda^4}$

Weitere Gesetze:

Stefan Boltzmann-Gesetz

$$M(T) = \int_0^\infty M_\lambda(\lambda, T) d\lambda = \sigma_{SB} T^4$$

Beschreibt Gesamtmenge der in alle Richtungen ausgesendete Strahlung eines schwarzen Strahlers abhängig seiner Temperatur

Wiensches Verschiebungsgesetz

Beschreibt Wellenlänge des spektralen Strahlungsmaximums eines schwarzen Strahlers abhängig seiner Temperatur

$$\lambda_{max} = \frac{b}{T}$$

Wir möchten IR-Thermografie verwenden, was ist die Verbindung zu diesen Strahlungsgesetzen und was muss man beachten?

Stefan-Boltzmann und Wiensches Gesetz nicht für diese Messmethode anwendbar, weil Stefan-Boltzmann alle Wellenlängen zusammen beschreibt und Wiensches, weil es nur die Wellenlänge des Strahlungsmaximums beschreibt.

Nur Plancksches Strahlungsgesetz bringt Strahlungsintensität zu Temp. für jede Wellenlänge, was für IR-Thermografie nötig ist.

Wie könnte ich die stationäre Temperatur einer Körper messen?

Widerstandsthermometer

Thermoelement

Wie funktioniert ein Widerstandsthermometer?

4

Funktionsprinzip: Vibrationen des Atomgitters sind temperaturabhängig (und materialspezifisch) \rightarrow Bewegung freier Elektronen in elektrischen Leitern ist temperatur- und materialabhängig \rightarrow Elektrischer Widerstand eines Leiters auch \rightarrow Materialspezifische Kennlinie $R(T)$ zur Temperaturbestimmung nutzen, solange diese streng monoton

Zwei Bauformen:

Metall-Widerstandsthermometer

Einer der genauesten Temp-sensoren, weil sehr gut verstandenes Material

Kennlinie hängt sehr stark vom Material ab.

Halbleiter-Widerstandsthermometer

Materialien können frei kombiniert werden

Widerstand steigt bei bestimmten Temperatur plötzlich stark an, kann als Schalter benutzt werden

NTC: Widerstand sinkt mit steigender Temp.

PTC: Widerstand steigt mit steigender Temp.

Enger Temp. Bereich im Vergleich mit Metall-Widerstandsthermometern.

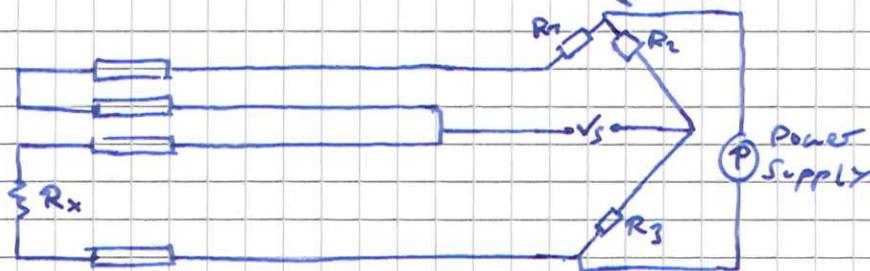
Gut zur Messung kleiner Temp. Änderungen

Messung des Widerstands wird über Wheatstone-Bridge gemacht

Was muss man bei der Messung bezüglich der Kabelwiderstände beachten?

Drahtwiderstand des Messgeräts beeinflusst den gemessenen

Widerstand des Sensors \rightarrow Lösung ist die vier-Draht-Schaltung



$$\frac{R_2}{R_1} = \frac{R_x}{R_3}$$

Verfahren, bei dem man absichtlich Strom zur Temperaturmessung verwendet?

Hitzdraht-Anemometrie

Was kann mit diesem Verfahren gemessen werden?

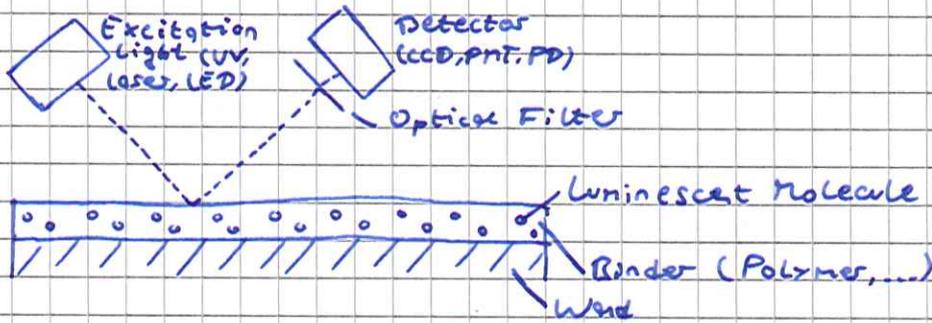
Temperatur- und Geschwindigkeitsfelder von Strömungen in drei Raumrichtungen

Welche Art der Messung bei diesem Verfahren die sinnvollste, wenn man eine turbulente Strömung messen will?

CTA - konstante Temp - Gut für sehr feine schnelle Temp. Änderungen

Messverfahren der Wärmetransports - Fragenammlung

Zur Wärmeübergangsmessung: man möchte einen instationären Fall mit TSP messen, was ist der Versuchsaufbau und wie gehe ich vor?



Wie geht man bei dieser Methode vor?

Annahmen für halbunendliche Wandmethode: Stoffgröße konstant, Vernachlässigung von y - und z -Richtung, Anfangstemperatur als ortsunabhängige Konstante, Temperatur im Unendlichen entspricht Anfangstemperatur ~~Wandtemperatur~~, konstantes Wärmeübergangskoeff., idealer Temperatursprung

Was kann man dann über den ermittelten Wärmeübergangskoeffizienten sagen?

Er wird über den gesamten Versuch als konstant angenommen und ist linear.

Wie ist das Vorgehen, wenn es keinen idealen Temperatursprung gibt?

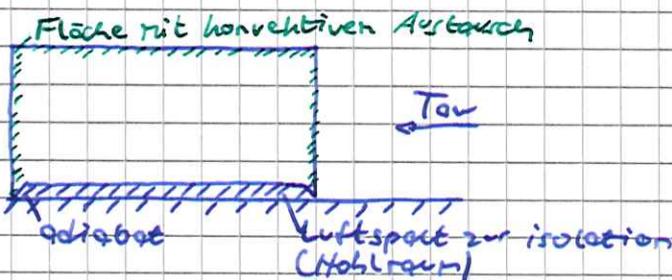
Verwendung des Duhamel Superpositionsprinzips

Wie gehe ich vor, wenn ich großflächig instationär messen möchte?
(Geneigt ist Wärmestrommessung)

Temperatur ist lokale Zustandsgröße, Wärmestrom ist flächenbezogene Transportgröße \rightarrow Dünnschicht-Methode, beides bei der Herleitung nicht nach der Temperatur, sondern nach dem Wärmestrom aufgelöst wird.

Was, wenn keine 1D-Wärmeleitung vorliegt?

Anwendung der Lumped-Capacitance-Methode



- Anfangs isothermer Festkörper wird Temperatursprung aufgesetzt
- Voraussetzung: zu jedem Zeitpunkt isothermer Körper
- \rightarrow Temperaturgradient vernachlässigen

Idee: Wärmestrom zw. Körper und Umgebung äußert sich in Temp.änderung des Körpers
kleine Biotzahl $Bi = \frac{hL}{k_s} < 0,1 \rightarrow k_s$ groß, L möglichst klein

Wie sieht der Ansatz zur Lösung des Problems aus?

6

Aufstellen einer globalen Energiebilanz

$$hA [T_{\infty} - T_w(t)] = m c_p \frac{d}{dt} T_w(t)$$

Lässt sich umformen zu DGL:

$$\frac{T_w(t) - T_i}{T_{\infty} - T_i} = \tau \cdot \exp\left(-\frac{hA}{m c_p} t\right)$$

Was kann man hier über den Wärmeübergangskoeffizienten sagen?

Er ist lokal und über den gesamten Lump gemittelt

1. Term: Newtons law of cooling

2. Term: Thermische Trägheit des Körpers

"Was an Wärme reinkommt geht vollständig in die Temp.änderung des Körpers"

Analogie: Welche dimensionslosen Kennzahlen sind relevant und wie hängen sie zusammen?

Prandtl-Zahl $Pr = \frac{\nu}{\alpha}$

Schmidt-Zahl $Sc = \frac{\nu}{D_{12}}$

Nusselt-Zahl $Nu = \frac{hL}{k_f}$

Sherwood-Zahl $Sh = \frac{h_m L}{D_{12}}$

Zusammenhang:

$Nu = Sh$ wenn $Pr = Sc$

$Nu = F \cdot Sh$ wenn $Pr \neq Sc$

mit $F = \left(\frac{Pr}{Sc}\right)^n = \frac{Nu}{Sh}$

mit $n \approx 0,33 - 0,4$

↳ Für flache Platten, laminar.