
Wärme- und Stoffübertragung I

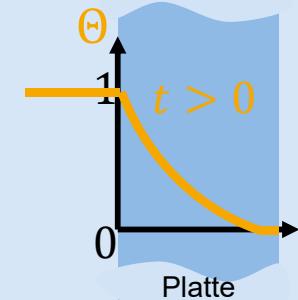
Halbunendliche Körper

Prof. Dr.-Ing. Reinhold Kneer
Dr.-Ing. Dr. rer. pol. Wilko Rohlfs

Lernziele

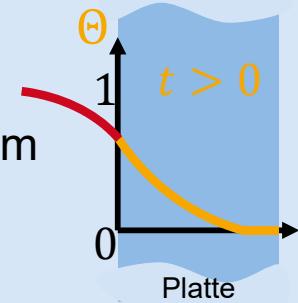
- Mit aufgeprägter Wandtemperatur

- Verständnis der eingesetzten Randbedingungen von halbunendlichem Körper mit aufgeprägter Wandtemperatur
- Lösung des Problems mittels tabellarischer Fehlerfunktion

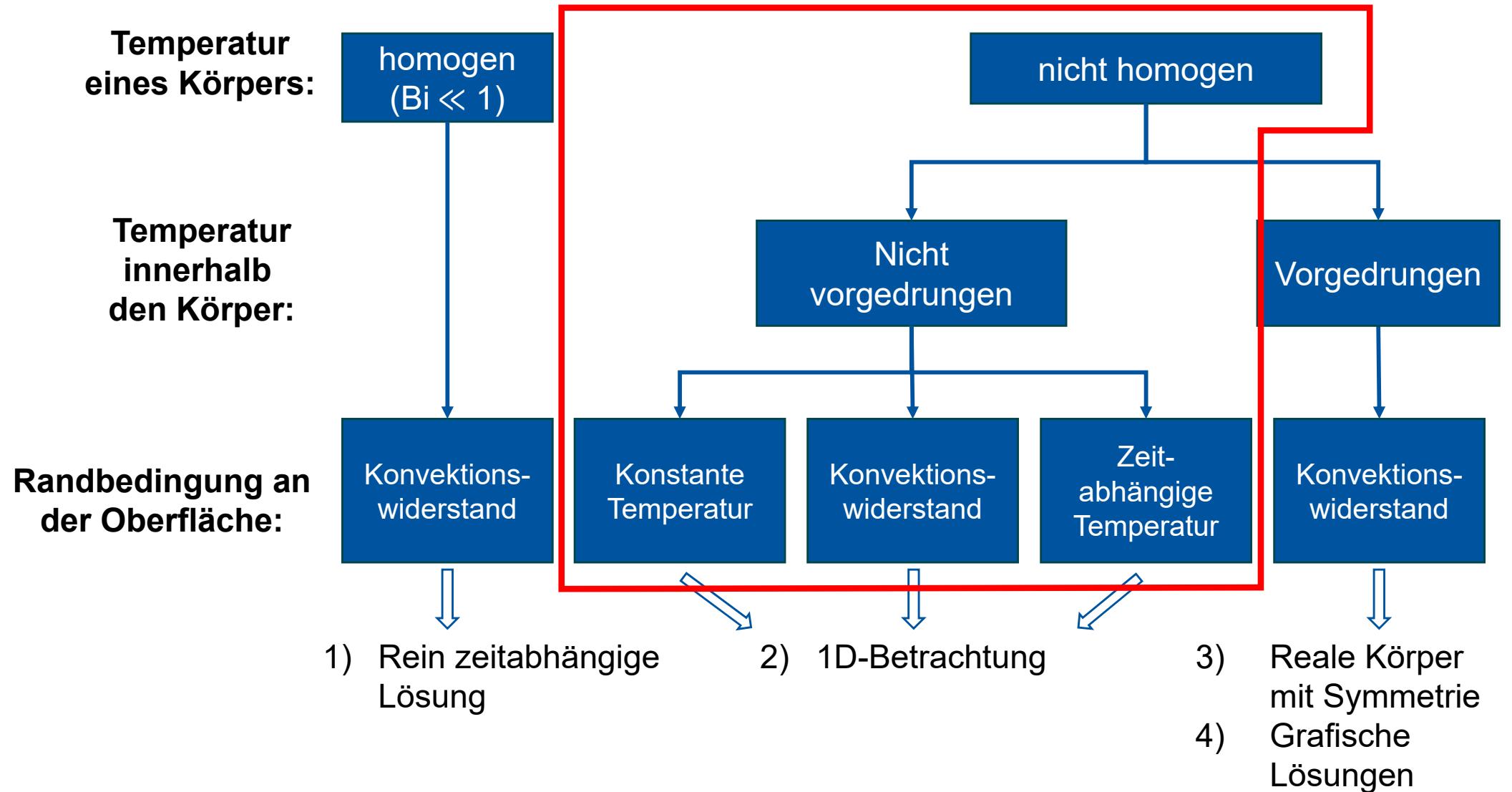


- Mit nichtvernachlässigbarem Wärmeübergangswiderstand

- Verständnis der eingesetzten Randbedingungen von halbunendlichem Körper mit nichtvernachlässigbarem Wärmeübergangswiderstand

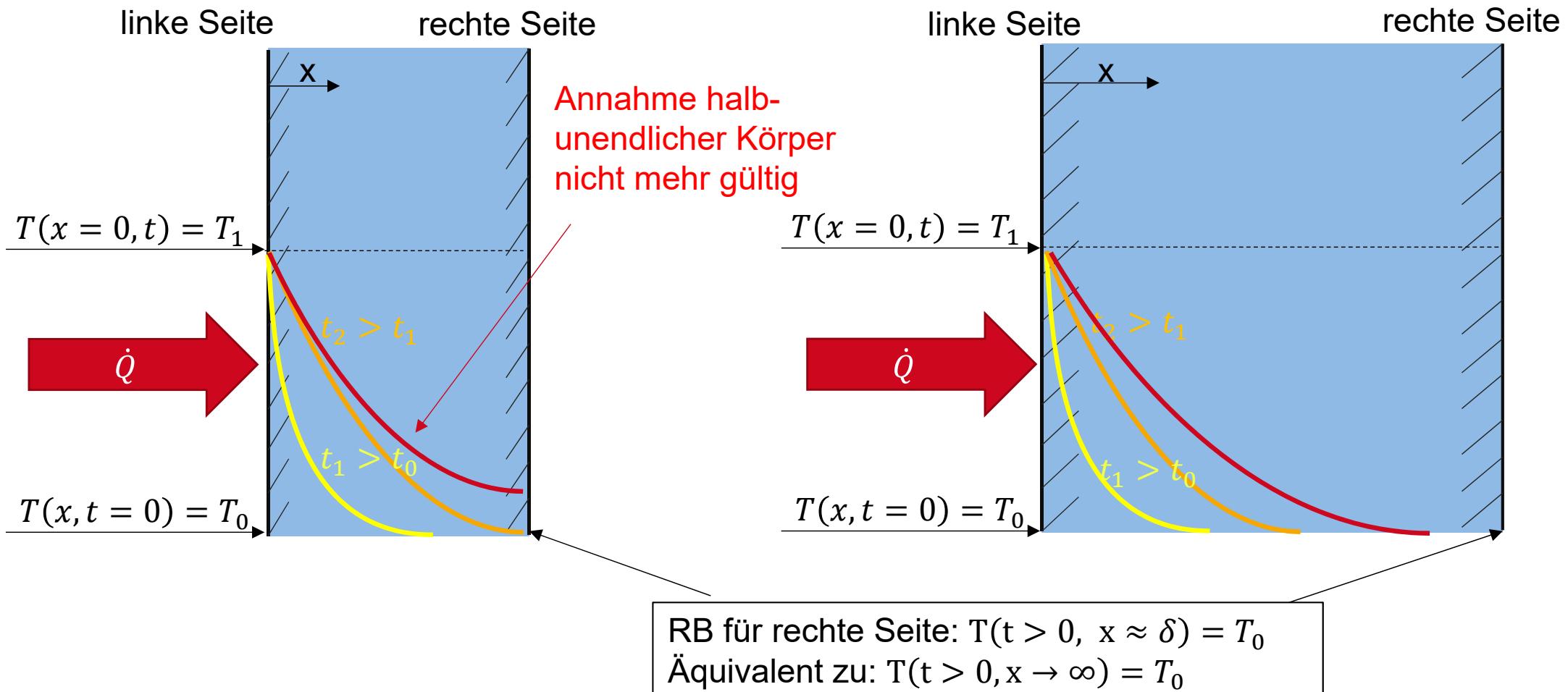


Wie lässt sich das Problem vereinfachen?



Definition der Halbunendliche Körper

Temperaturverlauf in einem Körper ist abhängig von Ort und Zeit $T = T(x,y,z,t)$. Die Temperaturänderung auf der rechten Seite ist vernachlässigbar gering, sodass die Plattendicke kein Einflussparameter des Problems ist.



Differenzialgleichung sowie Anfangs- und Randbedingungen

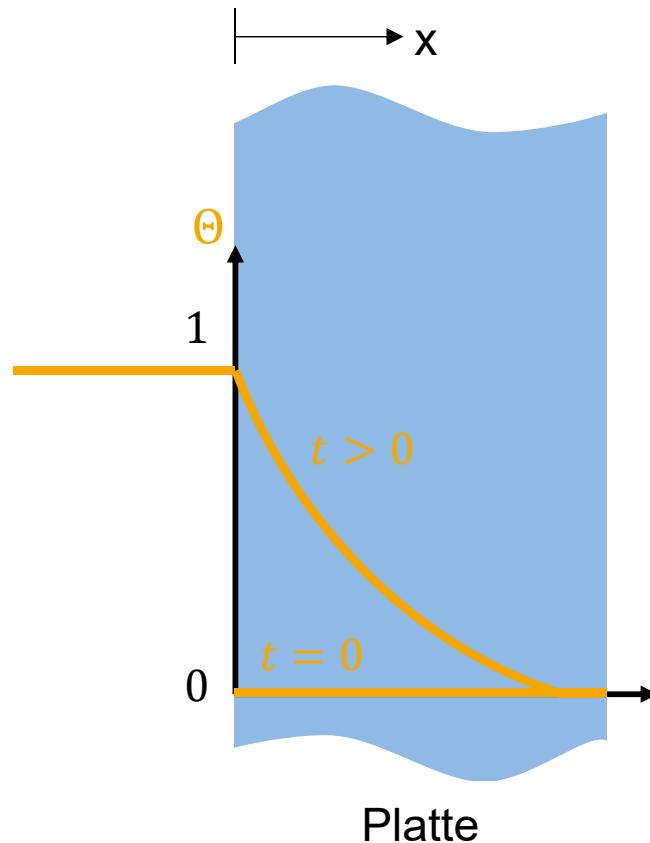
DGL

1^{ter} Ordnung in der Zeit

→ 1 AB

2^{ter} Ordnung im Raum

→ 2 RB



Differenzialgleichung

$$\frac{\partial \Theta^*}{\partial t} = a \frac{\partial^2 \Theta^*}{\partial x^2}$$

mit

$$a = \frac{\lambda}{\rho c_p}$$

Dimensionslose Übertemperatur

$$\Theta^* = \frac{T - T_0}{T_U - T_0}$$

Anfangs- und Randbedingungen

Anfangsbedingung

$$\left. \begin{array}{l} t = 0 \\ 0 \leq x \leq \infty \end{array} \right\} T = T_0 \mid \Theta^* = 0$$

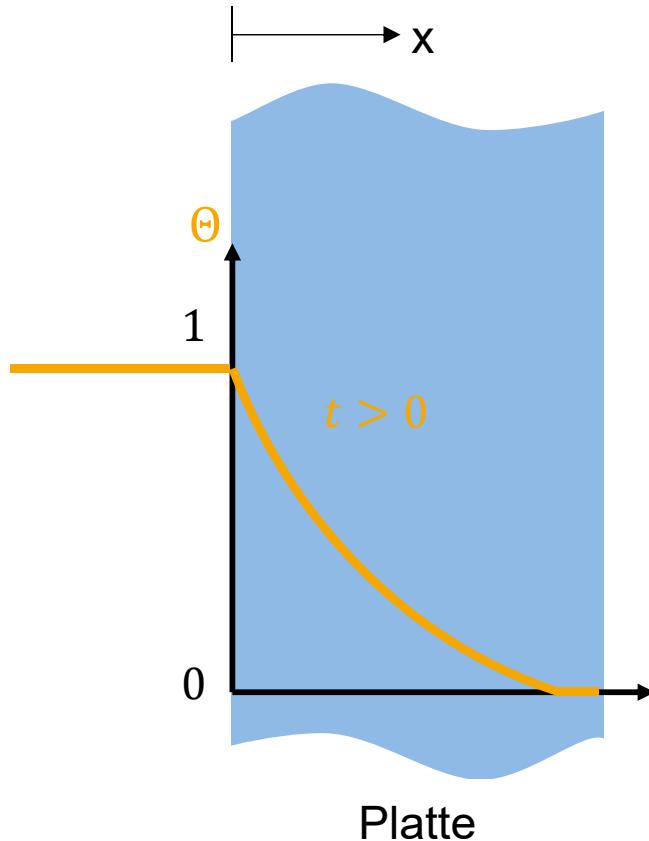
Randbedingungen

$$\textcircled{1} \quad \left. \begin{array}{l} t > 0 \\ x = 0 \end{array} \right\} T = T_U \mid \Theta^* = 1$$

$$\textcircled{2} \quad \left. \begin{array}{l} t > 0 \\ x \rightarrow \infty \end{array} \right\} T = T_0 \mid \Theta^* = 0$$

halbunendlicher Körper

Verbinden von Zeit- und Raumkoordinate durch Substitution



Substitution

$$\frac{\partial \Theta^*}{\partial t} = a \frac{\partial^2 \Theta^*}{\partial x^2} \quad \text{Einführen von } \eta = \frac{x}{\sqrt{4at}}$$

$$\frac{\partial \Theta^*}{\partial t} = \frac{\partial \Theta^*}{\partial \eta} \cdot \frac{\partial \eta}{\partial t} = -\frac{x}{\sqrt{4at^3}} \frac{\partial \Theta^*}{\partial \eta}$$

$$\frac{\partial^2 \Theta^*}{\partial x^2} = \frac{\partial^2 \Theta^*}{\partial \eta^2} \left(\frac{\partial \eta}{\partial x} \right)^2 + \frac{\partial \Theta^*}{\partial \eta} \cdot \frac{\partial^2 \eta}{\partial x^2}$$

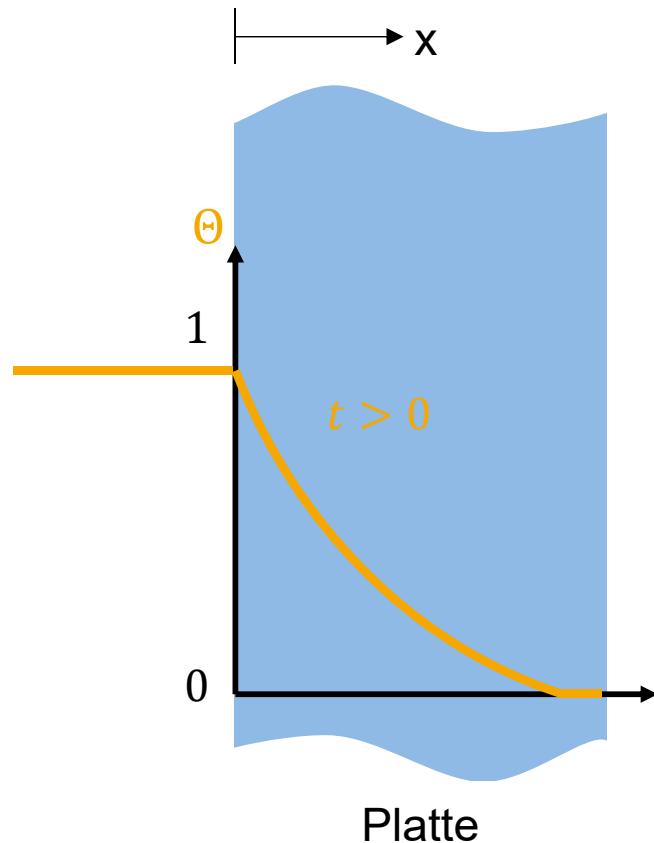
Herleitung
am Ende des
Videos

DGL in Abhängigkeit von $\eta(t, x)$

$$-\frac{x}{\sqrt{4at^3}} \frac{\partial \Theta^*}{\partial \eta} \cdot = a \frac{1}{4at} \frac{\partial^2 \Theta^*}{\partial \eta^2}$$

$$\frac{\partial^2 \Theta^*}{\partial \eta^2} + 2\eta \frac{\partial \Theta^*}{\partial \eta} = 0$$

Lösung der substituierten DGL



2. Substitution zur Lösung der DGL

$$\frac{\partial \Theta^*}{\partial \eta} = Z \quad \frac{\partial Z}{\partial \eta} = \frac{\partial^2 \Theta^*}{\partial \eta^2}$$

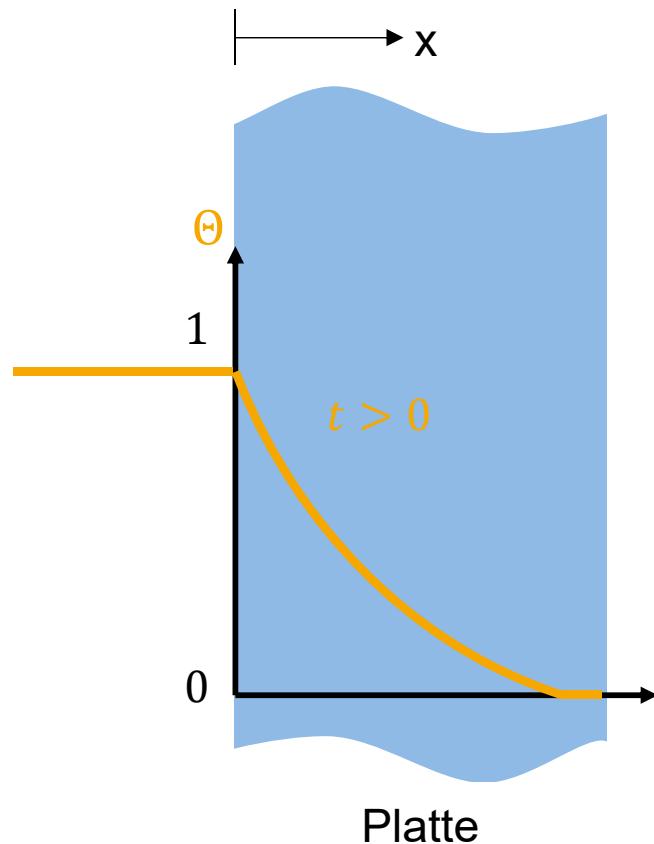
$$\frac{\partial Z}{\partial \eta} + 2\eta Z = 0$$

$$\frac{\partial Z}{Z} = -2\eta d\eta$$

DGL in Abhängigkeit von $\eta(t, x)$

$$\frac{d^2 \Theta^*}{d\eta^2} + 2\eta \frac{d\Theta^*}{d\eta} = 0$$

Lösung der substituierten DGL



2. Substitution zur Lösung der DGL

$$\frac{\partial \Theta^*}{\partial \eta} = Z \quad \frac{\partial Z}{\partial \eta} = \frac{\partial^2 \Theta^*}{\partial \eta^2}$$

$$\frac{\partial Z}{\partial \eta} + 2\eta Z = 0$$

$$\frac{dZ}{Z} = -2\eta d\eta$$

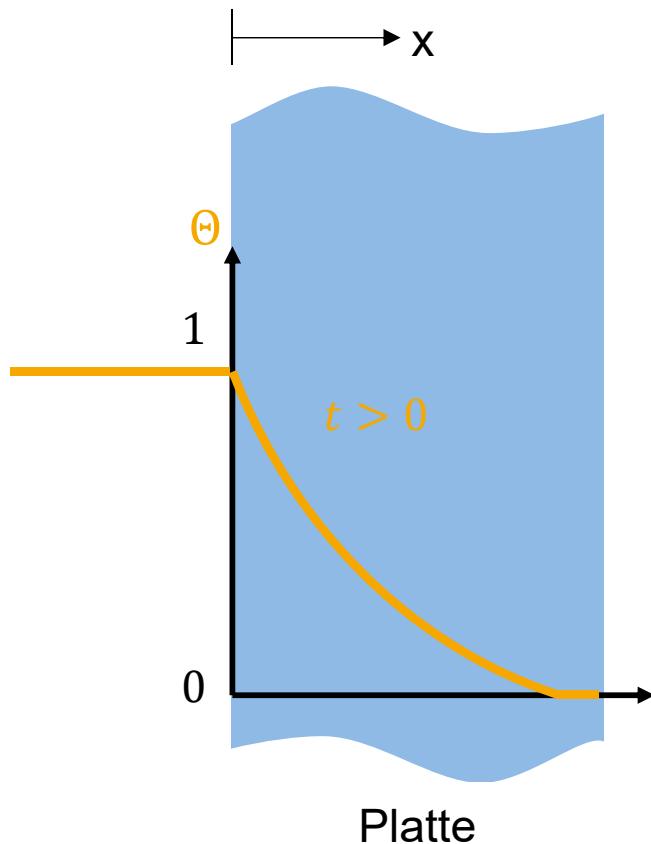
Integration

$$\ln Z = -\eta^2 + C_1$$

$$Z = \frac{d\Theta^*}{d\eta} = e^{-\eta^2+C_1} = C_2 e^{-\eta^2}$$

$$\int_{\Theta^*_1}^{\Theta^*_2} d\Theta^* = C_2 \int_{\eta_1}^{\eta_2} e^{-\eta^2} d\eta$$

Lösung der substituierten DGL



Randbedingungen

Randbedingungen

$$\textcircled{1} \quad \eta = 0 \quad | \Theta^* = 1$$

$$\textcircled{2} \quad \eta = \infty \quad | \Theta^* = 0$$

$$\eta = \frac{x}{\sqrt{4at}}$$

$$\Theta^*_{\eta=\infty} - \Theta^*_{\eta=0} = -1 = C_2 \int_0^\infty e^{-\eta^2} d\eta = \frac{\sqrt{\pi}}{2}$$

WolframAlpha

Integration

$$\ln Z = -\eta^2 + C_1$$

$$Z = \frac{d\Theta^*}{d\eta} = e^{-\eta^2+C_1} = C_2 e^{-\eta^2}$$

$$\int_{\Theta^*_{\eta=1}}^{\Theta^*_{\eta=2}} d\Theta^* = C_2 \int_{\eta_1}^{\eta_2} e^{-\eta^2} d\eta$$



int_0^infinity e^{-x^2} dx



Extended Keyboard

Upload

Examples

Random

Definite integral:

More digits

$$\int_0^\infty e^{-x^2} dx = \frac{\sqrt{\pi}}{2} \approx 0.886227$$

Indefinite integral:

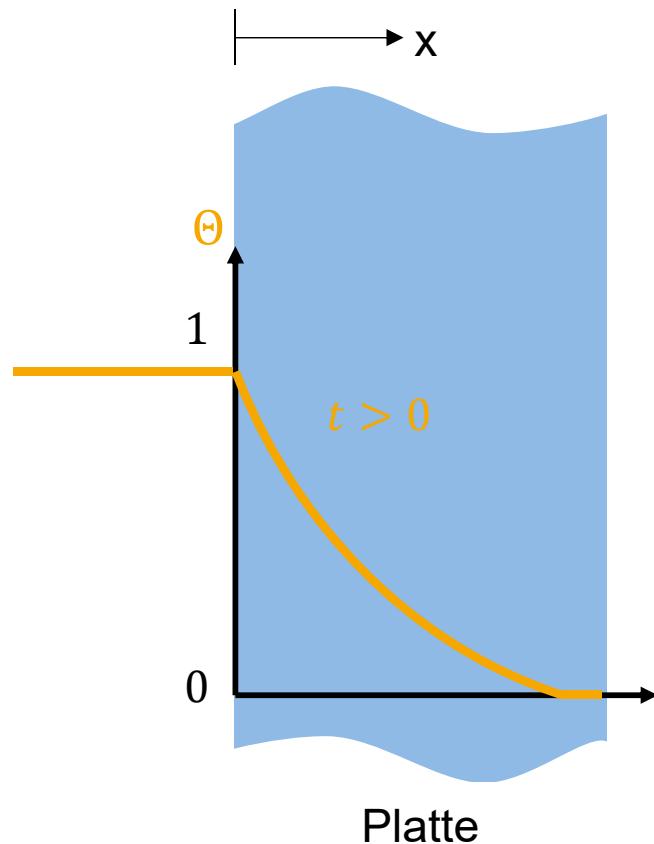
$$\int e^{-x^2} dx = \frac{1}{2} \sqrt{\pi} \operatorname{erf}(x) + \text{constant}$$

$\operatorname{erf}(x)$ is the error function

Download Page

POWERED BY THE WOLFRAM LANGUAGE

Lösung der substituierten DGL



Randbedingungen

Randbedingungen

$$\textcircled{1} \quad \eta = 0 \quad | \Theta^* = 1$$

$$\textcircled{2} \quad \eta = \infty \quad | \Theta^* = 0$$

$$\eta = \frac{x}{\sqrt{4at}}$$

$$\Theta^*_{\eta=\infty} - \Theta^*_{\eta=0} = -1 = C_2 \int_0^{\infty} e^{-\eta^2} d\eta = \frac{\sqrt{\pi}}{2}$$

WolframAlpha

Lösung

$$C_2 = -\frac{2}{\sqrt{\pi}}$$

$$\Theta^*(\eta) = 1 - \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^{\eta} e^{-\xi^2} d\xi$$

Beschreibung der Fehlerfunktion

Formelsammlung Anhang B

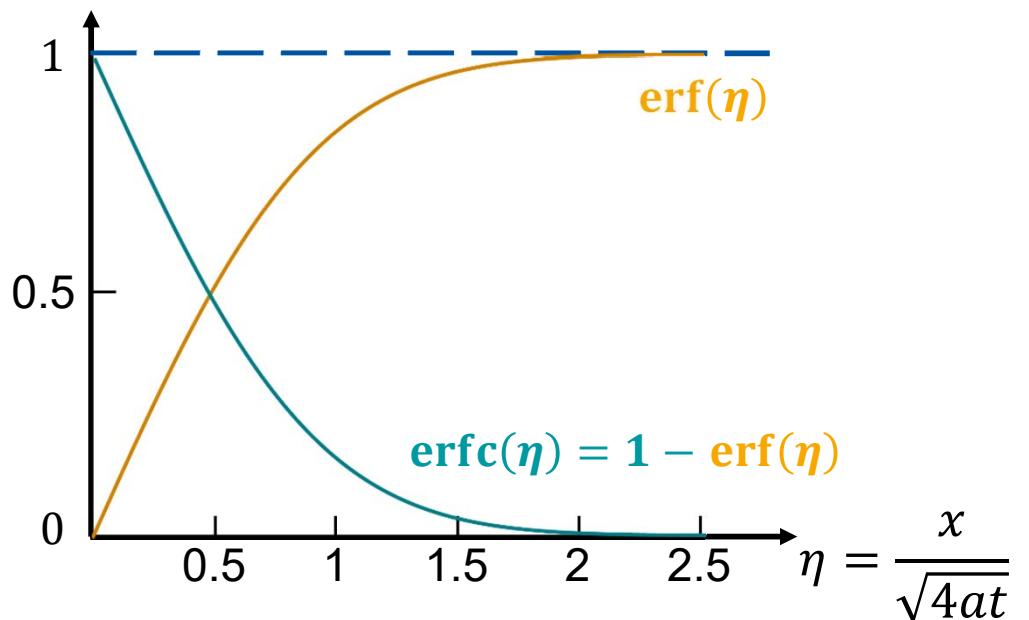
Tabelle 8: Auswertung
der Fehlerfunktion

| η | $\text{erf}(\eta)$ | $\text{erfc}(\eta)$ | $2/\sqrt{\pi} \exp(-\eta^2)$ |
|--------|--------------------|---------------------|------------------------------|
| 0 | 0 | 1 | 1,128 |
| 0,05 | 0,056 | 0,944 | 1,126 |
| 0,1 | 0,112 | 0,888 | 1,117 |
| 0,15 | 0,168 | 0,832 | 1,103 |
| 0,2 | 0,223 | 0,777 | 1,084 |
| 0,25 | 0,276 | 0,724 | 1,060 |
| 0,3 | 0,329 | 0,671 | 1,031 |
| 0,35 | 0,379 | 0,621 | 0,998 |
| 0,4 | 0,428 | 0,572 | 0,962 |
| 0,45 | 0,475 | 0,525 | 0,922 |
| 0,5 | 0,520 | 0,480 | 0,879 |
| 0,55 | 0,563 | 0,437 | 0,834 |
| 0,6 | 0,604 | 0,396 | 0,787 |
| 0,65 | 0,642 | 0,378 | 0,740 |
| 0,7 | 0,678 | 0,322 | 0,691 |
| 0,75 | 0,711 | 0,289 | 0,643 |
| 0,8 | 0,742 | 0,258 | 0,595 |
| 0,85 | 0,771 | 0,229 | 0,548 |
| 0,9 | 0,797 | 0,203 | 0,502 |
| 0,95 | 0,821 | 0,179 | 0,458 |
| 1 | 0,843 | 0,157 | 0,415 |
| 1,1 | 0,880 | 0,120 | 0,337 |
| 1,2 | 0,910 | 0,090 | 0,267 |
| 1,3 | 0,934 | 0,066 | 0,208 |
| 1,4 | 0,952 | 0,048 | 0,159 |
| 1,5 | 0,966 | 0,034 | 0,119 |
| 1,6 | 0,976 | 0,024 | 0,087 |
| 1,7 | 0,984 | 0,016 | 0,063 |
| 1,8 | 0,989 | 0,011 | 0,044 |
| 1,9 | 0,993 | 0,007 | 0,030 |
| 2 | 0,995 | 0,005 | 0,021 |

Fehlerfunktion $\text{erf}(\eta)$

$$\Theta^*(\eta) = 1 - \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^\eta e^{-\xi^2} d\xi$$

oder: $\Theta^*(\eta) = 1 - \text{erf}(\eta)$



Beispiel: Vergleich der thermische Eindringtiefe unterschiedlicher Werkstoffe

An welcher Stelle x wird $\Theta^*(\eta) = 0,01$ nach $t = 10s$ erreicht?

$$\Theta^*(\eta) = 0,01 = 1 - \text{erf}(\eta) \rightarrow \text{erf}(\eta) = 1 - 0,01 = 0,99$$

$$\rightarrow \eta = 1,8$$

$$\eta = \frac{x}{\sqrt{4at}} \quad \rightarrow \quad x = 2 \cdot \eta \cdot \sqrt{at}$$

A) Kupfer mit $a = 117 \cdot 10^{-6} \frac{m^2}{s}$

$$x = 2 \cdot 1,8 \cdot \sqrt{117 \cdot 10^{-6} \frac{m^2}{s} \cdot 10s}$$

$$x_K = 0,123 \text{ m}$$

B) Papier mit $a = 0,14 \cdot 10^{-6} \frac{m^2}{s}$

$$x = 2 \cdot 1,8 \cdot \sqrt{0,14 \cdot 10^{-6} \frac{m^2}{s} \cdot 10s}$$

$$x_P = 0,0043 \text{ m}$$

Vgl. beider Eindringtiefen

$$28 \cdot x_K \approx x_P$$

Tabelle 8: Auswertung der Fehlerfunktion

| η | $\text{erf}(\eta)$ | $\text{erfc}(\eta)$ | $2/\sqrt{\pi} \exp(-\eta^2)$ |
|--------|--------------------|---------------------|------------------------------|
| 0 | 0 | 1 | 1,128 |
| 0,05 | 0,056 | 0,944 | 1,126 |
| 0,1 | 0,112 | 0,888 | 1,117 |
| 0,15 | 0,168 | 0,832 | 1,103 |
| 0,2 | 0,223 | 0,777 | 1,084 |
| 0,25 | 0,276 | 0,724 | 1,060 |
| 0,3 | 0,329 | 0,671 | 1,031 |
| 0,35 | 0,379 | 0,621 | 0,998 |
| 0,4 | 0,428 | 0,572 | 0,962 |
| 0,45 | 0,475 | 0,525 | 0,922 |
| 0,5 | 0,520 | 0,480 | 0,879 |
| 0,55 | 0,563 | 0,437 | 0,834 |
| 0,6 | 0,604 | 0,396 | 0,787 |
| 0,65 | 0,642 | 0,378 | 0,740 |
| 0,7 | 0,678 | 0,322 | 0,691 |
| 0,75 | 0,711 | 0,289 | 0,643 |
| 0,8 | 0,742 | 0,258 | 0,595 |
| 0,85 | 0,771 | 0,229 | 0,548 |
| 0,9 | 0,797 | 0,203 | 0,502 |
| 0,95 | 0,821 | 0,179 | 0,458 |
| 1 | 0,843 | 0,157 | 0,415 |
| 1,1 | 0,880 | 0,120 | 0,337 |
| 1,2 | 0,910 | 0,090 | 0,267 |
| 1,3 | 0,934 | 0,066 | 0,208 |
| 1,4 | 0,952 | 0,048 | 0,159 |
| 1,5 | 0,966 | 0,034 | 0,119 |
| 1,6 | 0,976 | 0,024 | 0,087 |
| 1,7 | 0,984 | 0,016 | 0,063 |
| 1,8 | 0,989 | 0,011 | 0,044 |
| 1,9 | 0,993 | 0,007 | 0,030 |
| 2 | 0,995 | 0,005 | 0,021 |

Die Temperaturleitfähigkeit a bestimmt die Geschwindigkeit, mit der sich eine Temperaturinformation in einem Körper ausbreitet!

Wie lässt sich das Problem vereinfachen?

Temperatur
eines Körpers:

Uniform
($Bi \ll 1$)

Temperatur
im Inneren
des Körpers:

Uneinheitlich

Nicht vordrungen

vorgedrungen

Oberfläche
Randbedingung:

Konvektions-
widerstand

Konstante
Temperatur

Konvektions-
widerstand

Periodische
Temperatur

Konvektions-
widerstand

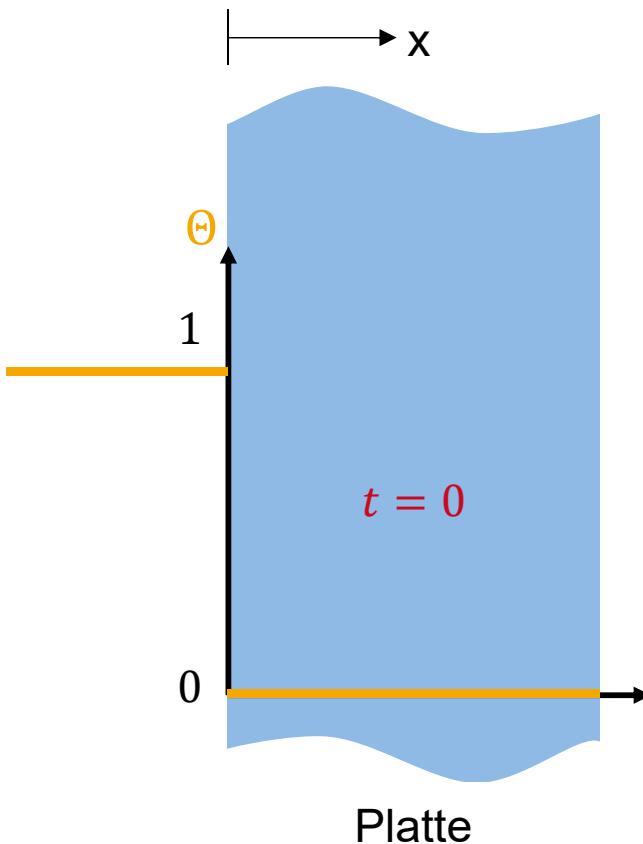
1) die Ortsabhängigkeit
vermeiden

2) 1D-Betrachtung

3) Reale Körper
mit Symmetrie
Vorgefertigte
Lösungen
4)

Mit nicht vernachlässigbarem Wärmeübergangswiderstand

Äußerer Wärmeübergangs-widerstand ist **nicht** vernachlässigbar



Differenzialgleichung

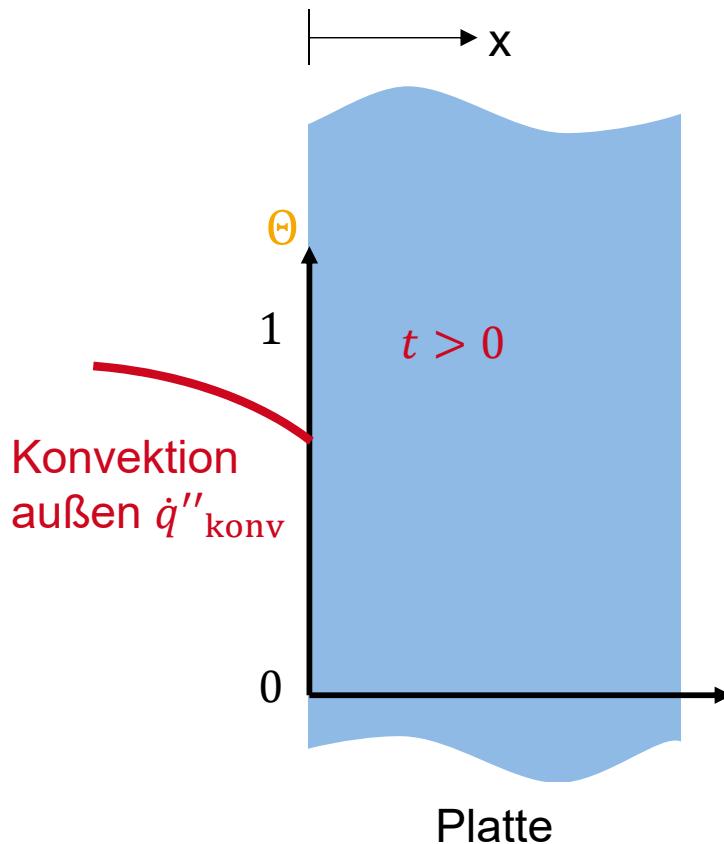
$$\frac{\partial \Theta^*}{\partial t} = a \frac{\partial^2 \Theta^*}{\partial x^2} \quad \text{mit} \quad a = \frac{\lambda}{\rho c_p}$$

Dimensionsloser Übertemperatur

$$\Theta^* = \frac{T - T_0}{T_U - T_0}$$

Mit nicht-vernachlässigbarem Wärmeübergangswiderstand

Äußerer Wärmeübergangswiderstand ist **nicht** vernachlässigbar



Differenzialgleichung

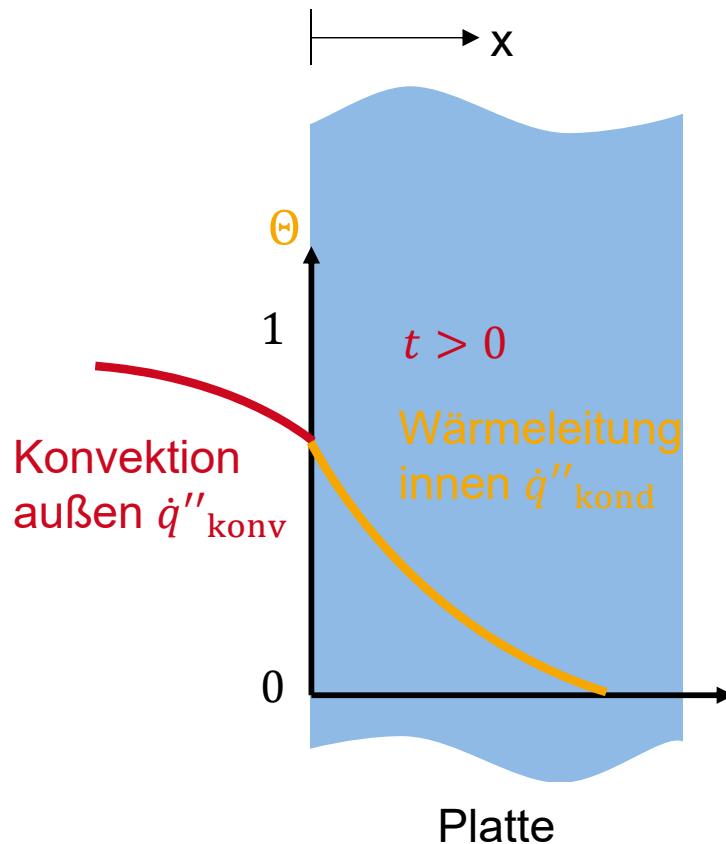
$$\frac{\partial \Theta^*}{\partial t} = a \frac{\partial^2 \Theta^*}{\partial x^2} \quad \text{mit} \quad a = \frac{\lambda}{\rho c_p}$$

Dimensionsloser Übertemperatur

$$\Theta^* = \frac{T - T_0}{T_U - T_0}$$

Mit nicht-vernachlässigbarem Wärmeübergangswiderstand

Äußerer Wärmeübergangswiderstand ist **nicht** vernachlässigbar



Differenzialgleichung

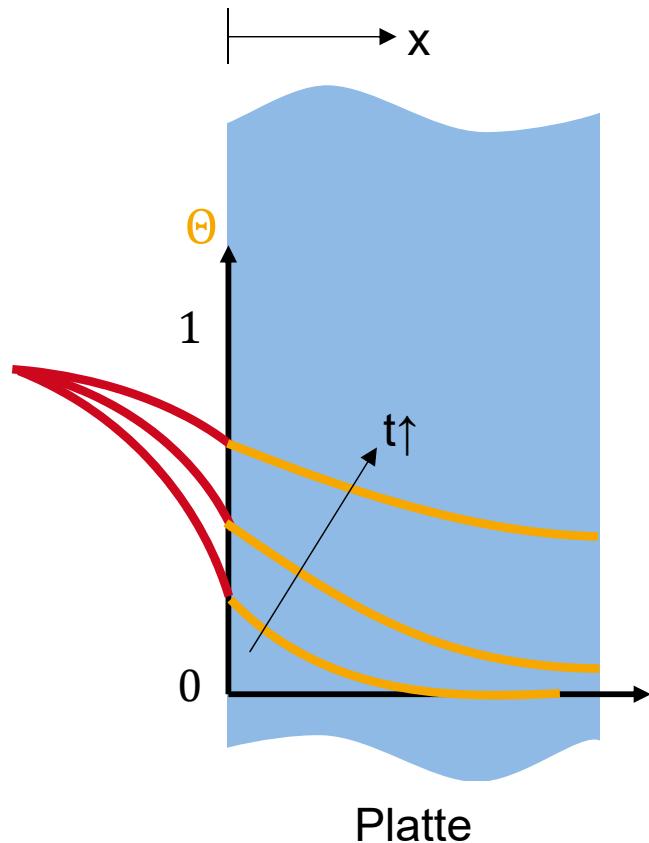
$$\frac{\partial \Theta^*}{\partial t} = a \frac{\partial^2 \Theta^*}{\partial x^2} \quad \text{mit} \quad a = \frac{\lambda}{\rho c_p}$$

Dimensionsloser Übertemperatur

$$\Theta^* = \frac{T - T_0}{T_U - T_0}$$

Mit nicht-vernachlässigbarem Wärmeübergangswiderstand

Wärmeübergangswiderstand
ist nicht vernachlässigbar



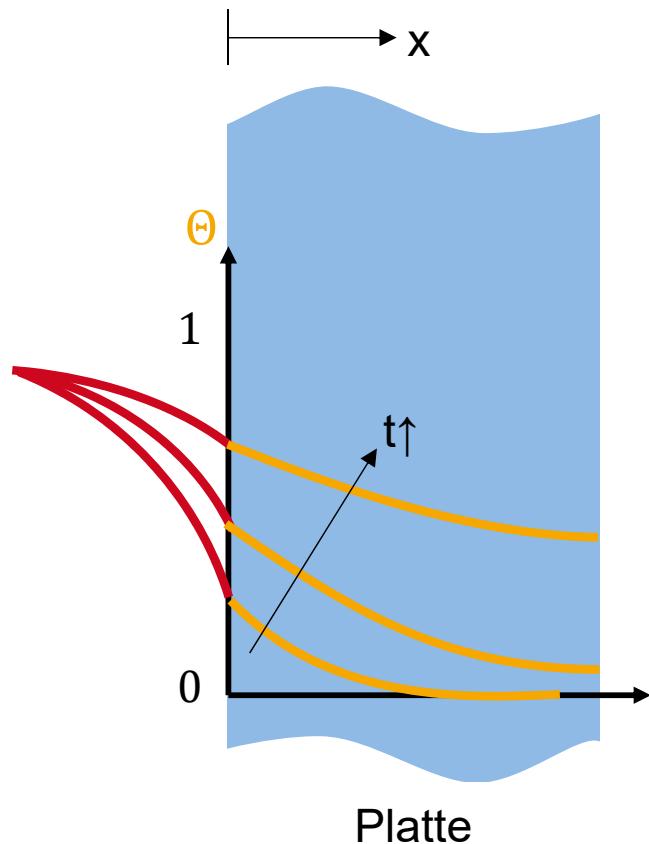
Randbedingungen

Randbedingen
① $\begin{cases} t > 0 \\ x = 0 \end{cases}$

$$\frac{\alpha(T_U - T_{x=0})}{\dot{q}''_{\text{kond}}} = -\lambda \frac{\partial T}{\partial x} \Big|_{x=0} \quad \rightarrow \quad \frac{\partial T}{\partial x} \Big|_{x=0} = \frac{\alpha}{\lambda} (T_{x=0} - T_U)$$

Mit nicht-vernachlässigbarem Wärmeübergangswiderstand

Wärmeübergangswiderstand
ist nicht vernachlässigbar



Randbedingungen

Randbedingungen

$$\textcircled{1} \quad \left. t > 0 \right\} |_{x=0} \quad \left. \frac{\partial \Theta^*}{\partial x} \right|_{x=0} = -\frac{\alpha}{\lambda}$$

$$\underbrace{\alpha(T_U - T_{x=0})}_{\dot{q}''_{\text{kond}}} = -\lambda \underbrace{\frac{\partial T}{\partial x}}_{\dot{q}''_{\text{konv}}} \Big|_{x=0} \rightarrow \left. \frac{\partial T}{\partial x} \right|_{x=0} = \frac{\alpha}{\lambda} (T_{x=0} - T_U)$$

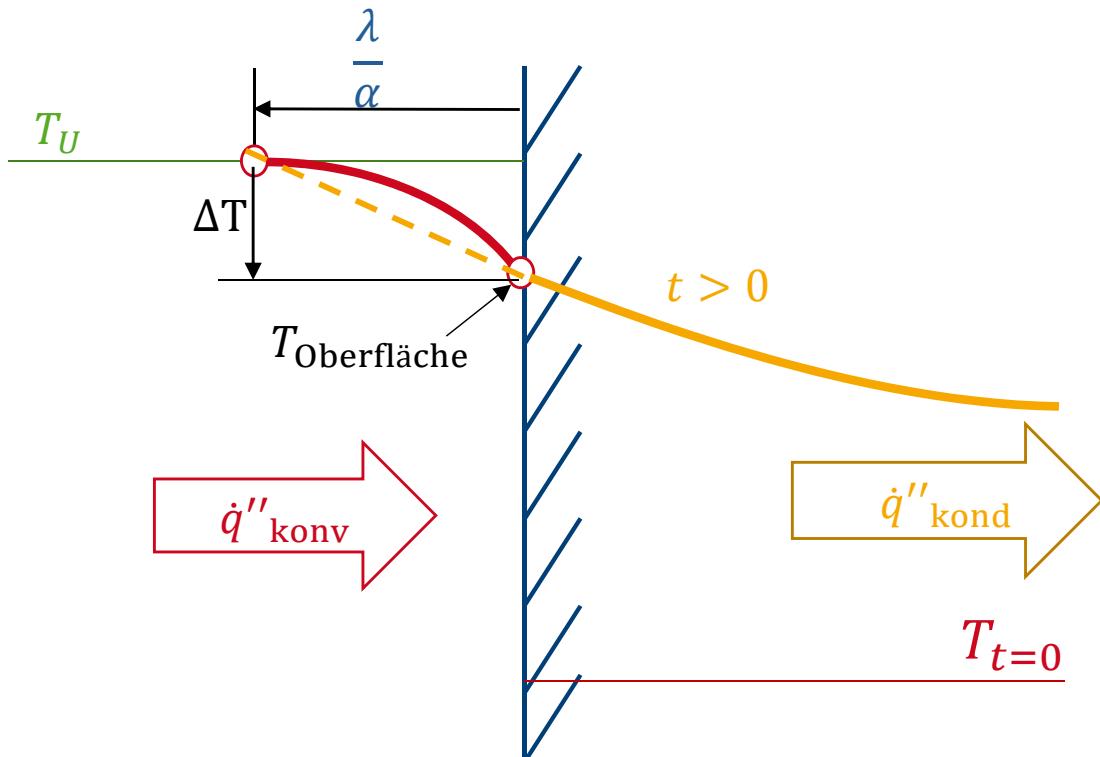
$$\textcircled{2} \quad \left. \begin{array}{l} t > 0 \\ x \rightarrow \infty \end{array} \right\} T = T_0 \mid \Theta^* = 0$$

Anfangsbedingung

$$\left. \begin{array}{l} t = 0 \\ 0 \leq x \leq \infty \end{array} \right\} T = T_0 \mid \Theta^* = 0$$

Grafischer Lösungsansatz

Bestimmung des Temperaturgradienten an der Wand für RB \dot{q}''_{kond}



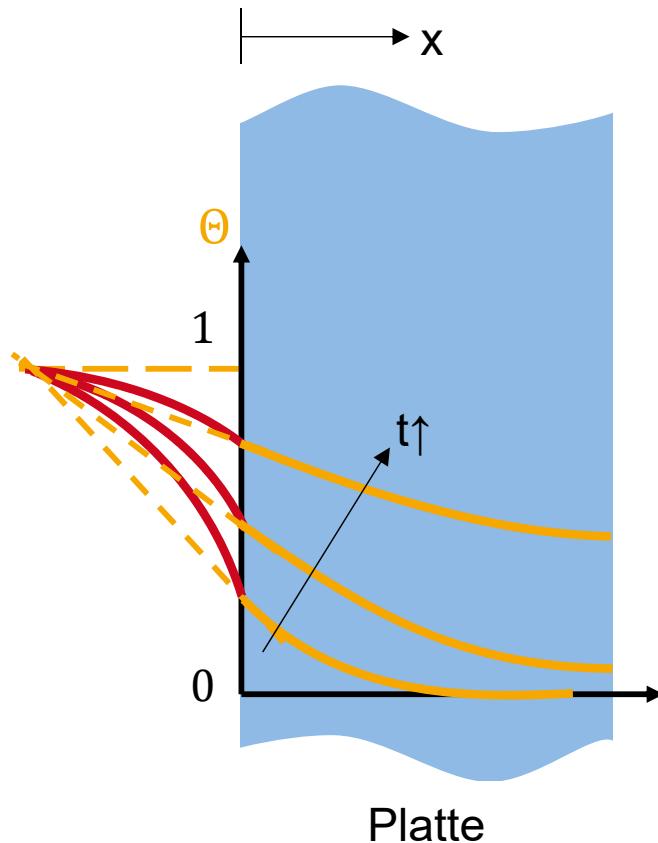
$$\underbrace{\alpha(T_U - T_{x=0})}_{\dot{q}''_{\text{kond}}} = -\lambda \underbrace{\frac{\partial T}{\partial x}}_{\dot{q}''_{\text{kond}}} \Big|_{x=0}$$

$$\frac{\partial T}{\partial x} \Big|_{x=0} = \boxed{\frac{\alpha}{\lambda}} (T_{x=0} - T_U) \quad [1/m]$$

$\frac{\lambda}{\alpha}$ ist der räumliche Abstand
zwischen T_U und $T_{\text{Oberfläche}}$

Mit nicht-vernachlässigbarem Wärmeübergangswiderstand

Wärmeübergangswiderstand
ist nicht vernachlässigbar



Randbedingungen

Randbedingungen

$$\textcircled{1} \quad \left. t > 0 \right\} |_{x=0} \quad \left. \frac{\partial \Theta^*}{\partial x} \right|_{x=0} = -\frac{\alpha}{\lambda}$$

$$\underbrace{\alpha(T_U - T_{x=0})}_{\dot{q}''_{\text{kond}}} = -\lambda \underbrace{\frac{\partial T}{\partial x}}_{\dot{q}''_{\text{kond}}} \Big|_{x=0} \rightarrow \left. \frac{\partial T}{\partial x} \right|_{x=0} = \frac{\alpha}{\lambda} (T_{x=0} - T_U)$$

$$\textcircled{2} \quad \left. \begin{array}{l} t > 0 \\ x \rightarrow \infty \end{array} \right\} T = T_0 \mid \Theta^* = 0$$

Anfangsbedingung

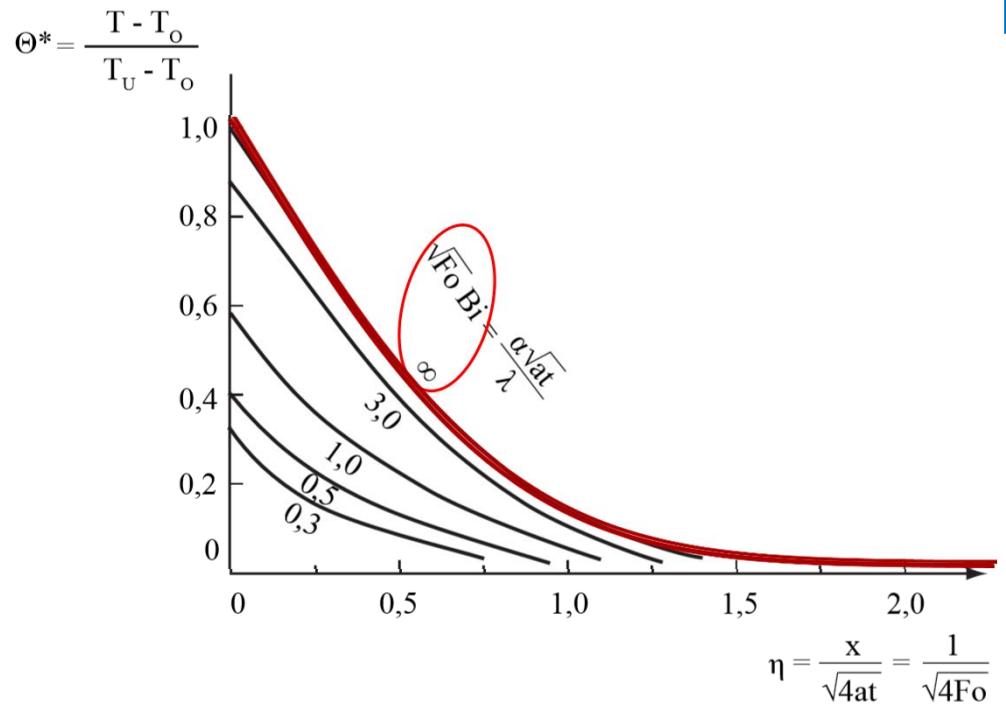
$$\left. \begin{array}{l} t = 0 \\ 0 \leq x \leq \infty \end{array} \right\} T = T_0 \mid \Theta^* = 0$$

Mit nicht-vernachlässigbarem Wärmeübergangswiderstand

Rückblick $\alpha = \infty$

$$\Theta^*(\eta) = 1 - \text{erf}(\eta) = 1 - \text{erf}\left(\frac{x}{\sqrt{4at}}\right)$$

$$\Theta^*(\eta) = 1 - \text{erf}\left(\frac{1}{\sqrt{4Fo}}\right)$$



Ergebnis $\alpha \neq \infty$

$$\Theta^*(\eta) = 1 - \text{erf}\left(\frac{1}{\sqrt{4Fo}}\right)$$

$$-e^{Bi + FoBi^2} \left[1 - \text{erf}\left(\frac{1}{\sqrt{4Fo}} + \sqrt{Fo} \cdot Bi\right) \right]$$

mit

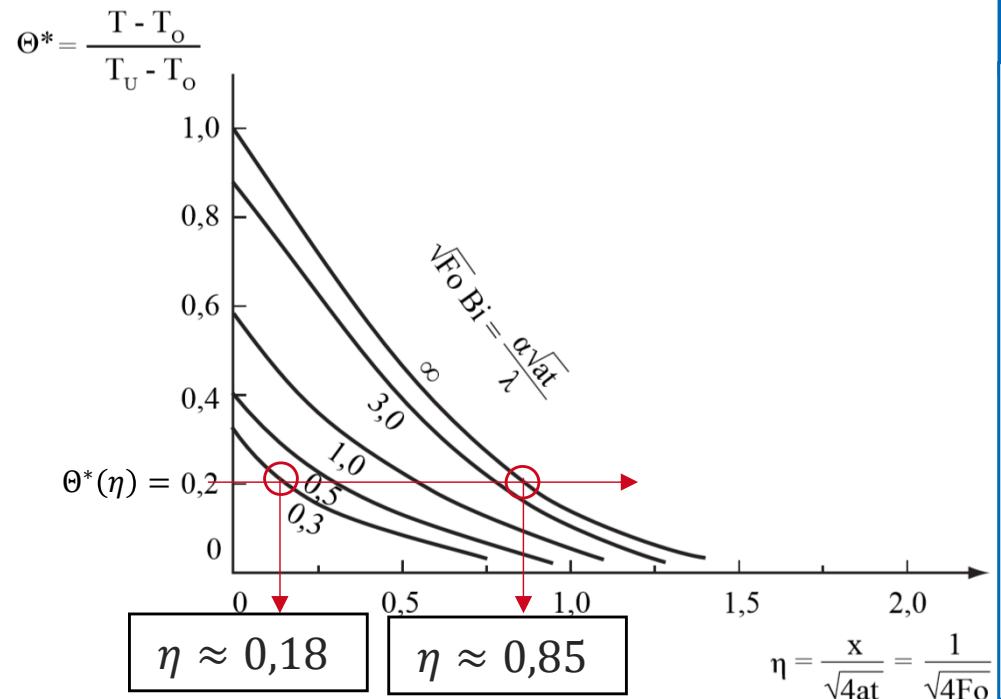
$$Fo = \frac{at}{L^2} \quad Bi = \frac{\alpha x}{\lambda}$$

Beispiel: Thermische Eindringtiefe mit konvektivem Widerstand

An welcher Stelle x wird $\Theta^*(\eta) = 0,2$ bei $t = 10 \text{ s}$ für Kupfer erreicht?

$$a_K = 117 \cdot 10^{-6} \frac{\text{m}^2}{\text{s}} ; \lambda_K = 401 \frac{\text{W}}{\text{m} \cdot \text{K}}$$

$$\sqrt{Fo} \cdot Bi = \frac{\alpha \sqrt{a \cdot t}}{\lambda} = \frac{\alpha \sqrt{117 \cdot 10^{-6} \frac{\text{m}^2}{\text{s}} \cdot 10 \text{ s}}}{401 \frac{\text{W}}{\text{m} \cdot \text{K}}} = \alpha \cdot 8,53 \cdot 10^{-5} \frac{\text{m}^2 \cdot \text{K}}{\text{W}}$$



Betrachtung unterschiedlicher Fälle

A) $\alpha \rightarrow \infty$: aufgeprägte Wandtemperatur

$$\sqrt{Fo} \cdot Bi = \frac{\alpha \sqrt{a \cdot t}}{\lambda} = \infty \rightarrow \eta \approx 0,85$$

$$x = \eta \sqrt{4at} = 0,85 \sqrt{4 \cdot 117 \cdot 10^{-6} \frac{\text{m}^2}{\text{s}} \cdot 10 \text{ s}} = 0,058 \text{ m}$$

B) Thermischer Widerstand ($\sqrt{Fo} \cdot Bi = 0,3$)

$$\sqrt{Fo} \cdot Bi = \frac{\alpha \sqrt{a \cdot t}}{\lambda} = 0,3 \rightarrow \alpha \approx 3,517 \frac{\text{W}}{\text{mK}}$$

$$\rightarrow \eta \approx 0,2$$

$$x = \eta \sqrt{4at} = 0,2 \sqrt{4 \cdot 117 \cdot 10^{-6} \frac{\text{m}^2}{\text{s}} \cdot 10 \text{ s}} = 0,0136 \text{ m}$$

Vergleich – Lösung mit Fehlerfunktion und mit Diagramm

An welcher Stelle x wird $\Theta^*(\eta) = 0,2$ bei $t = 10s$ für Kupfer erreicht?

$$\Theta^*(\eta) = 0,2 = 1 - \text{erf}(\eta) \rightarrow \text{erf}(\eta) = 1 - 0,2 = 0,8$$

$$\rightarrow \eta = 0,9$$

$$\eta = \frac{x}{\sqrt{4at}} \rightarrow x = 2 \cdot \eta \cdot \sqrt{at}$$

Mit tabellierter Fehlerfunktion

$$x = 2 \cdot 0,9 \cdot \sqrt{117 \cdot 10^{-6} \frac{m^2}{s} \cdot 10s}$$

$$x_{K,e} = 0,0615m$$

Aus Diagramm

$$x = 0,85 \sqrt{4 \cdot 117 \cdot 10^{-6} \frac{m^2}{s} \cdot 10s}$$

$$x_{K,d} = 0,058m$$

Differenz erfolgt aufgrund von Ableseungenauigkeiten, da die Gleichungen für einen vernachlässigbaren thermischen Widerstand identisch sind.

Tabelle 8: Auswertung der Fehlerfunktion

| η | $\text{erf}(\eta)$ | $\text{erfc}(\eta)$ | $2/\sqrt{\pi} \exp(-\eta^2)$ |
|--------|--------------------|---------------------|------------------------------|
| 0 | 0 | 1 | 1,128 |
| 0,05 | 0,056 | 0,944 | 1,126 |
| 0,1 | 0,112 | 0,888 | 1,117 |
| 0,15 | 0,168 | 0,832 | 1,103 |
| 0,2 | 0,223 | 0,777 | 1,084 |
| 0,25 | 0,276 | 0,724 | 1,060 |
| 0,3 | 0,329 | 0,671 | 1,031 |
| 0,35 | 0,379 | 0,621 | 0,998 |
| 0,4 | 0,428 | 0,572 | 0,962 |
| 0,45 | 0,475 | 0,525 | 0,922 |
| 0,5 | 0,520 | 0,480 | 0,879 |
| 0,55 | 0,563 | 0,437 | 0,834 |
| 0,6 | 0,604 | 0,396 | 0,787 |
| 0,65 | 0,642 | 0,378 | 0,740 |
| 0,7 | 0,678 | 0,322 | 0,691 |
| 0,75 | 0,711 | 0,289 | 0,643 |
| 0,8 | 0,742 | 0,258 | 0,595 |
| 0,85 | 0,771 | 0,229 | 0,548 |
| 0,9 | 0,797 | 0,203 | 0,502 |
| 0,95 | 0,821 | 0,179 | 0,458 |
| 1 | 0,843 | 0,157 | 0,415 |
| 1,1 | 0,880 | 0,120 | 0,337 |
| 1,2 | 0,910 | 0,090 | 0,267 |
| 1,3 | 0,934 | 0,066 | 0,208 |
| 1,4 | 0,952 | 0,048 | 0,159 |
| 1,5 | 0,966 | 0,034 | 0,119 |
| 1,6 | 0,976 | 0,024 | 0,087 |
| 1,7 | 0,984 | 0,016 | 0,063 |
| 1,8 | 0,989 | 0,011 | 0,044 |
| 1,9 | 0,993 | 0,007 | 0,030 |
| 2 | 0,995 | 0,005 | 0,021 |

Verständnisfragen

Was ist unter einem halbunendlichen Körper zu verstehen und wie ist dieser definiert?

Welche zwei dimensionslosen Kennzahlen beschreiben den instationären Temperaturverlauf innerhalb eines (halbunendlichen) Körpers mit relevantem konvektivem Widerstand?

Was ist unter der thermischen Eindringtiefe zu verstehen?

Ableitung

$$\frac{\partial^2 \Theta^*}{\partial x^2} = \frac{d^2 \Theta^*}{d\eta^2} \left(\frac{\partial \eta}{\partial x} \right)^2 + \frac{d\Theta^*}{d\eta} \cdot \frac{\partial^2 \eta}{\partial x^2}$$

$$\begin{aligned}\frac{\partial^2 \Theta^*}{\partial x^2} &= \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\partial \Theta^*}{\partial x} \right) \\ &= \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\partial \Theta^*}{\partial \eta} \cdot \frac{\partial \eta}{\partial x} \right) \quad \xrightarrow{\text{Kettenregel}} \quad u'v + v'u \\ &\qquad \qquad \qquad u \quad v\end{aligned}$$

$$= \frac{\partial \eta}{\partial x} \cdot \left[\frac{\partial}{\partial \eta} \left(\frac{\partial \Theta^*}{\partial \eta} \right) \cdot \frac{\partial \eta}{\partial x} \right] + \frac{\partial \Theta^*}{\partial \eta} \cdot \frac{\partial^2 \eta}{\partial x^2}$$
$$\qquad \qquad \qquad v \qquad \qquad \qquad u \quad v'$$

$$= \frac{d^2 \Theta^*}{d\eta^2} \left(\frac{\partial \eta}{\partial x} \right)^2 + \frac{d\Theta^*}{d\eta} \cdot \frac{\partial^2 \eta}{\partial x^2}$$