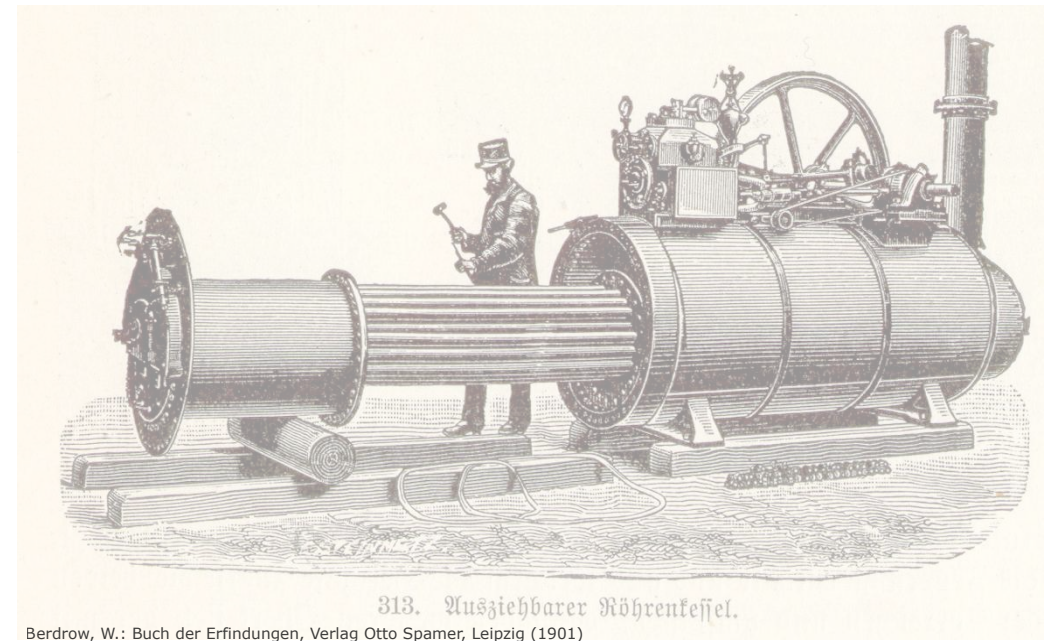


Thomas Rieckmann Prof. Dr.-Ing.

Institut für Anlagen und Verfahrenstechnik
Technische Hochschule Köln

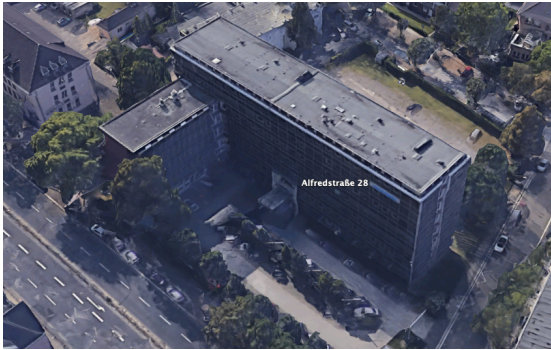
thomas.rieckmann@th-koeln.de



313. Ausziehbarer Röhrenkessel.

Berdrow, W.: Buch der Erfindungen, Verlag Otto Spamer, Leipzig (1901)

Technische Hochschule Köln, Hochschullehrer,
Reaktionstechnik und Prozessentwicklung



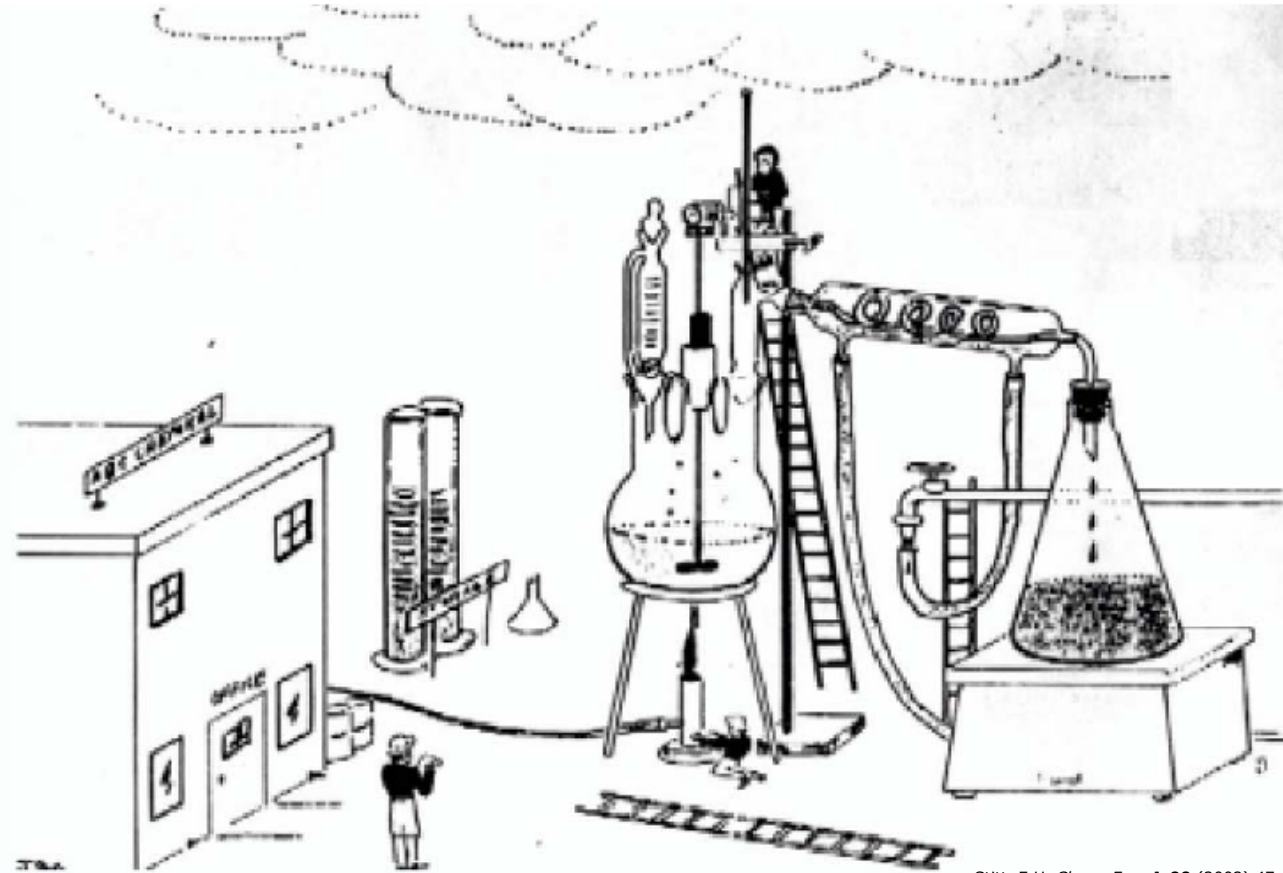
John Brown Deutsche Engineering GmbH, Essen
Chemieanlagenbau, Leiter F&E für Polymere und Fasern

Promotion - Technische Universität Clausthal
Katalytischen Abgasreinigung von Dieselmotoren

Studium - Technische Universität Clausthal
Maschinenbau, Verfahrenstechnik



“The bench scale results were so good that we by-passed the pilot-plant”



Stitt, E.H. Chem. Eng. J. 90 (2002) 47

Prozessentwicklung

Vorplanung

Basisplanung

Prozesssimulation

Maßstabsvergrößerung

Kostenschätzung

Reaktionstechnik

Wärme- und Stofftransport

Polymerverfahrenstechnik

PET-Recycling

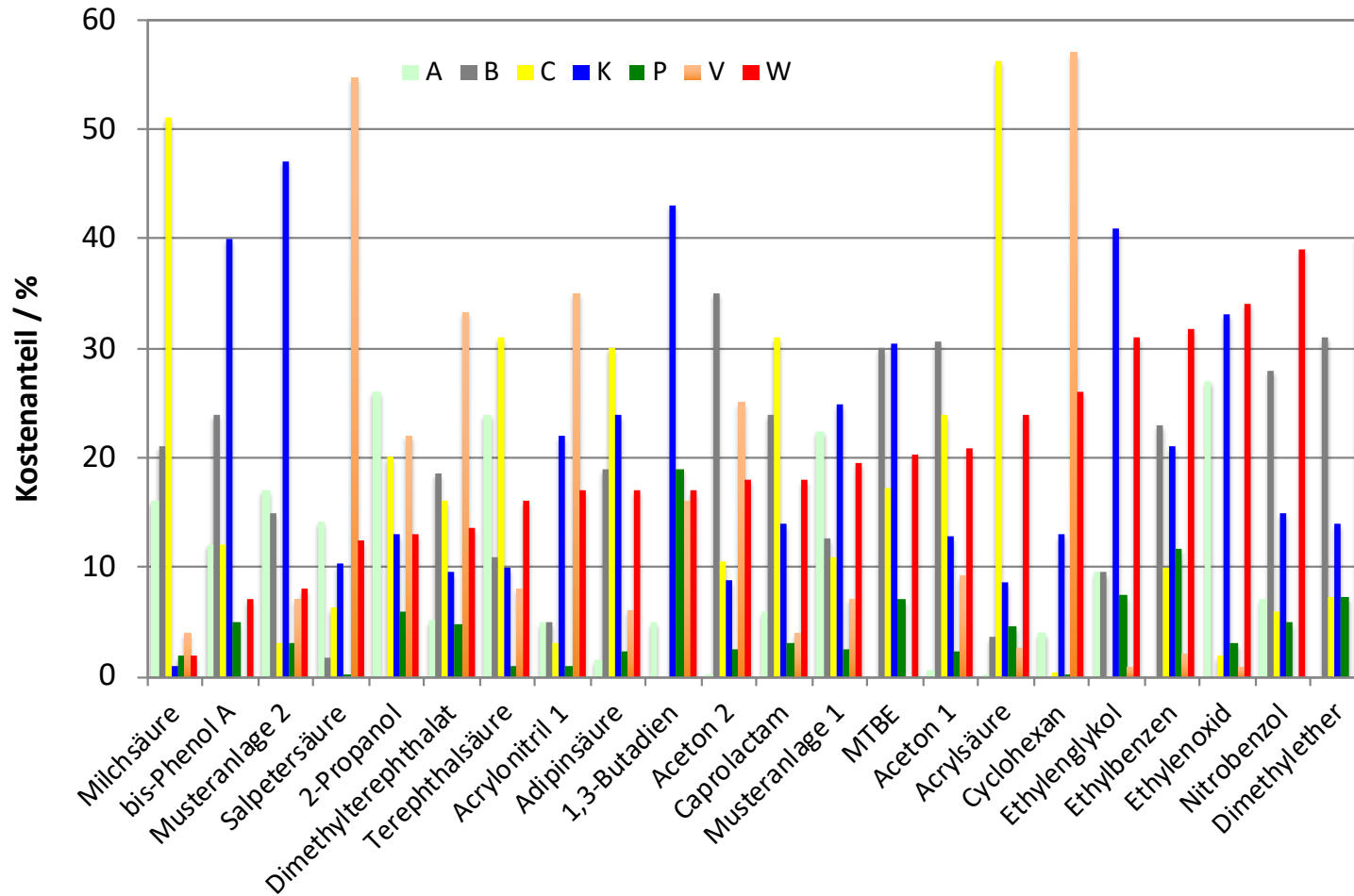
CO₂ und Wasser als C- und H-Quellen

- 1 Prozesstechnische Dimensionierung von Wärmeübertragern
Durchmesser, Länge,
Anzahl der Rohre
- 2 Fouling
unerwünschte Ablagerungen
- 3 Produktionskosten
variable Kosten / Druckverlust
- 4 Optimierung variable Kosten vs. fixe Kosten
Strömungsgeschwindigkeit / Fouling
- 5 Schlussfolgerungen
fixe Kosten / Investitionsausgaben
wärmeübertragende Fläche
- 6 Ausblick

Perspektive: Prozessindustrie, Chemische Industrie

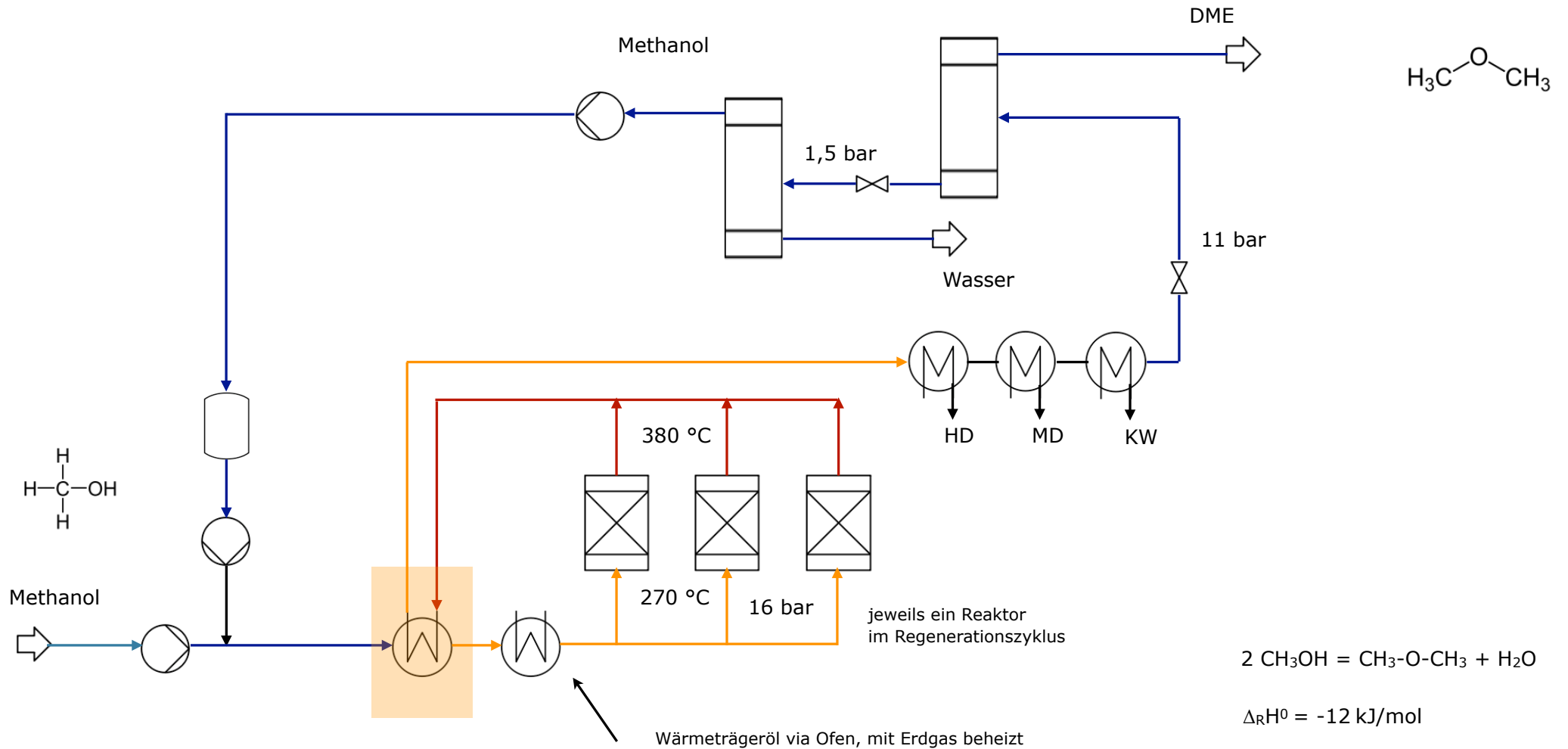
→ Anlagenplanung, Prozessentwicklung, Basisplanung, Neubau, Erweiterung

Kostenstrukturen chemischer Prozesse - hoher Anteil Wärmeübertrager



- A: = allgemein
- B: = Behälter
- C: = Reaktoren
- K: = Kolonnen
- P: = Pumpen
- V: = Verdichter
- W: = Wärmeübertrager

Herstellung von Dimethylether - Energieintegration, Vorwärmung des Reaktanten

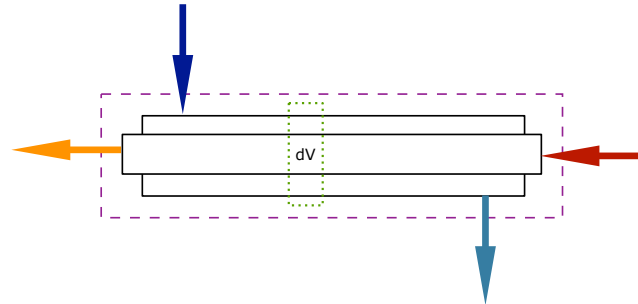


Herstellung von Dimethylether aus Methanol - Charakterisierung

Stöchiometrische Beziehung der Hauptreaktion	$2 \text{ CH}_3\text{OH} = \text{CH}_3\text{-O-CH}_3 + \text{H}_2\text{O}$
Standardreaktionsenthalpie $\Delta_R H^0$	-12 kJ/mol (leicht exotherm)
freie Standardreaktionsenthalpie $\Delta_R G^0$	-17 kJ/mol (leicht exergonisch)
Gleichgewichtskonstante K_{298}	780
Gleichgewichtskonstante $K(329 \text{ °C})$	57
adiabate Temperaturerhöhung $\Delta T_{\text{ad}} (x=1)$	178 K
Reaktionstemperatur	246 - 388 °C
Temperaturführung	adiabat
Umsatz	80 %
Katalysatorstandzeit	Stunden
Reaktionsdruck	11 bar (abs.)
Katalysatorwirkungsgrad	0,94
Raum-Zeit-Ausbeute (GHSV)	$400 \text{ m}^3_{\text{Edukt}}/(\text{m}^3_{\text{KAT}} \cdot \text{h})$
mittlere Verweilzeit	4,85 s

keine analytische Lösung der Bilanzgleichungen, numerische Lösung mit Matlab

1. HS - Enthalpiebilanz



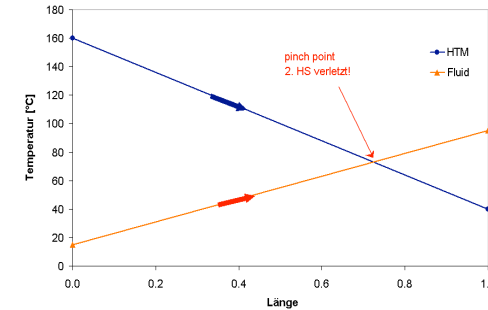
2. HS - Richtung des Wärmestroms

ohne Phasenübergang

$$\dot{Q} = \dot{m} \cdot \bar{c}_p \cdot (T_{\text{ein}} - T_{\text{aus}})$$

mit Phasenübergang

$$\dot{Q}_V = \dot{m} \cdot \Delta_V H$$

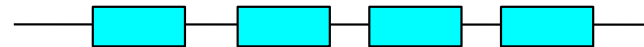


Fluss = Leitfähigkeit • treibendes Potential

$$I = \frac{1}{R} \cdot U$$

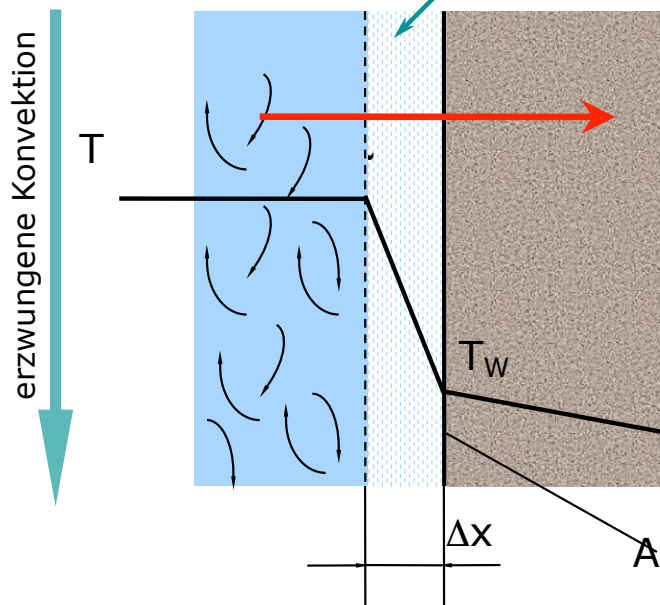
$$\dot{Q} = k \cdot A \cdot \Delta T$$

Reihenschaltung thermischer Widerstände



$$R_{\text{ges}} = \sum_{i=1}^n R_i$$

Thermische Grenzschicht.
Wärmetransport nur durch Wärmeleitung
senkrecht zur konvektiven Strömungsrichtung.



$$\dot{Q} = -\lambda A \frac{dT}{dx}$$

$$\dot{Q} = A \frac{\lambda}{\Delta x} \Delta T$$

Definition des
Wärmeübergangskoeffizienten

$$\alpha \equiv \frac{\lambda}{\Delta x}$$

Wärmestrom

$$\dot{Q} = \alpha \cdot A \cdot (T - T_w)$$

Erzwungene Konvektion in einer durchströmten Rohrleitung

Turbulente Rohrströmung (Gnielinski)

$$Nu_0 = \frac{\frac{\xi}{8} (Re - 1000) \cdot Pr}{1 + 12,7 \cdot \sqrt{\frac{\xi}{8}} \cdot (Pr^{2/3} - 1)} \cdot \left[1 + \left(\frac{d_i}{L} \right)^{2/3} \right]$$

$$\xi = (1,82 \cdot \log(Re) - 1,64)^{-2}$$

Gültigkeitsbereiche
(auch im Übergangsbereich anwendbar)

$$2300 < Re < 10^6$$

$$\frac{d_i}{L} < 1$$

$$0,5 < Pr < 10^4$$

Nußelt-Zahl $Nu = \frac{\alpha \cdot d_i}{\lambda}$

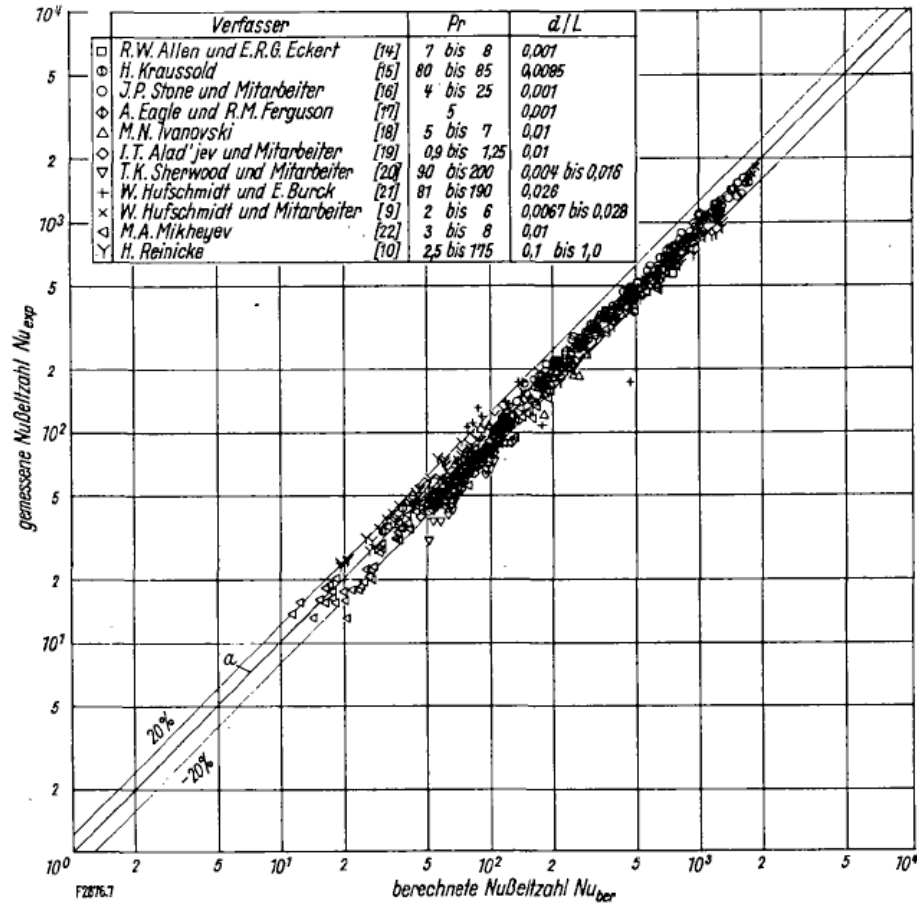
Reynolds-Zahl $Re = \frac{u \cdot d_i}{\nu}$

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

→ Dimensionsanalyse, Ähnlichkeitstheorie

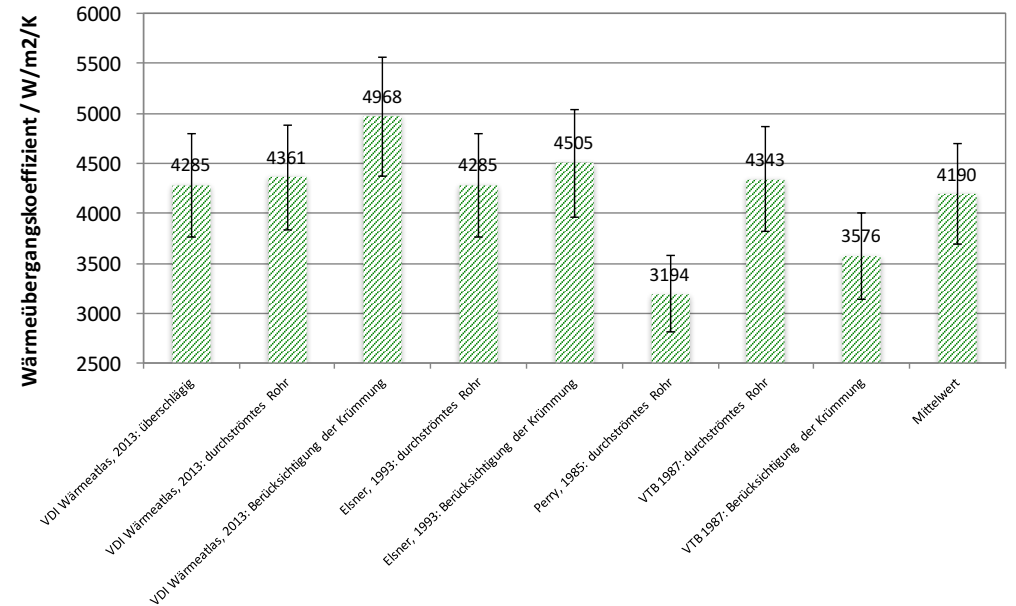
nach: VDI-Wärmeatlas, G1, 12. Auflage, Springer Vieweg, 2019

Wärmeübergang, $Nu=f(Re, Pr, d/L)$ – Vergleich Messwerte vs. Korrelation



Gnielinski, V.: Forsch. Ing.-Wes. 41 (1975) 8-16

Wärmeübergang - Strömung durch gekrümmte Rohre

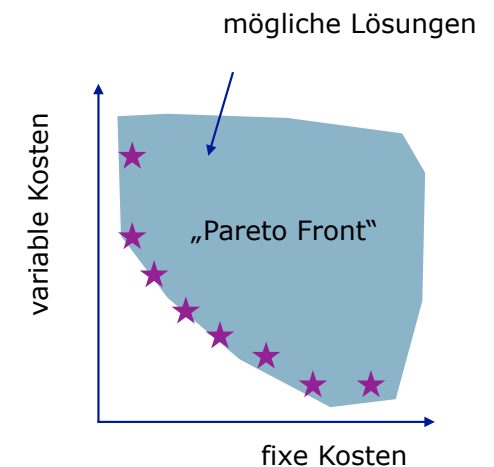


Unbegrenzte Anzahl Lösungen - Suche nach einem Optimum

- ▶ variable Kosten: Druckverlust, Energiebedarf pumpen / verdichten, Fouling, Wartung und Instandhaltung
- ▶ fixe Kosten:
Investitionsausgaben bzw. Abschreibung
Anzahl der Rohre, Länge, Durchmesser → wärmeübertragende Fläche → Preis

Designparameter

- **fixiert** (Aufgabe, Komponenten)
- **frei** (Freiheitsgrade der Optimierung)
- **begrenzt** (Nebenbedingungen)



fixierte Parameter

- ▶ Massenstrom Produkt
- ▶ Zulufttemperatur und Ablauftemperatur Produkt
- ▶ Stoffwerte: Viskosität, Wärmeleitfähigkeit, Dichte, spez. Wärmekapazität
- ▶ Strömungsführung: Gegenstrom

freie Parameter

- ▶ Zulufttemperatur und Massenstrom Servicefluid
- ▶ Innendurchmesser der Rohre, Länge der Rohre, Anzahl der Rohre
- ▶ Anzahl und Geometrie der Umlenkbleche

begrenzte Parameter

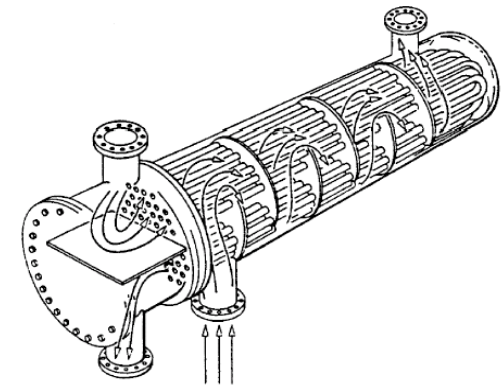
- ▶ Reynolds-Zahl ≥ 10.000 (turbulent)
- ▶ Strömungsgeschwindigkeit $\geq x$ (Fouling)
- ▶ Temperaturdifferenz $\geq x$ (Effizienz, ΔT ca. 10 - 20 K)
- ▶ Druck $\leq x$ (fixe Kosten), Druckverlust $\leq x$ (variable Kosten)

Auftrag

Lastenheft

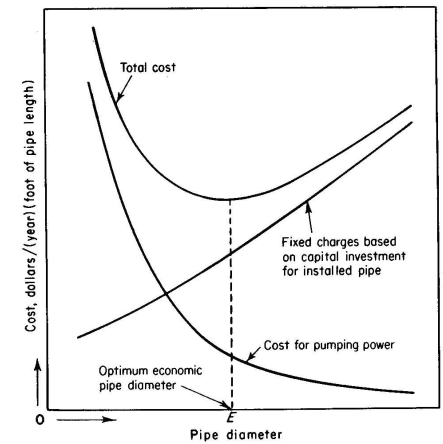
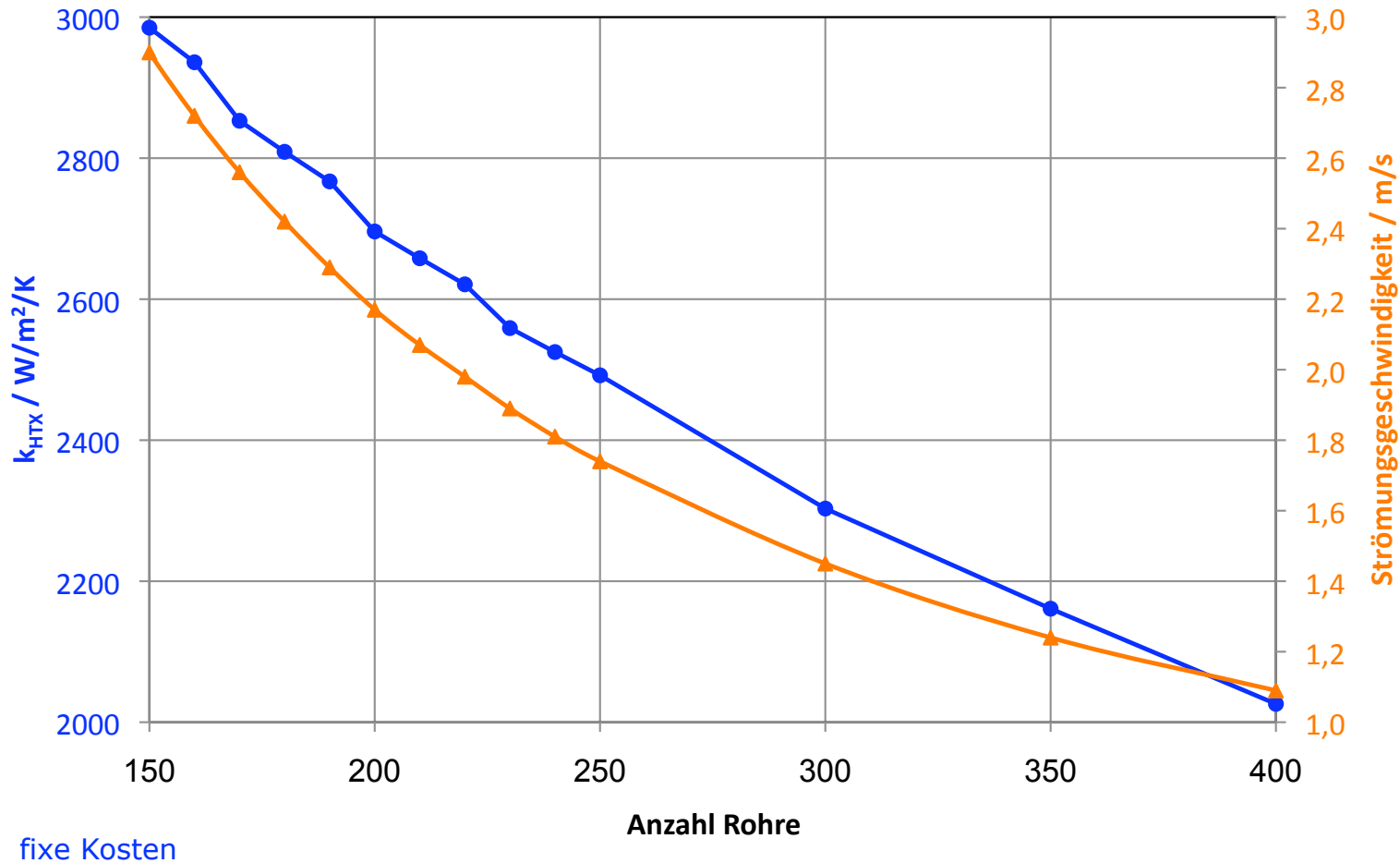
„Job“

Fouling?



Perry, Robert, H.; Green, D. W.:
Perry's Chemical Engineer's Handbook, McGraw-Hill, 2007

Auslegung eines Kondensators - Optimierung der Anzahl der Rohre



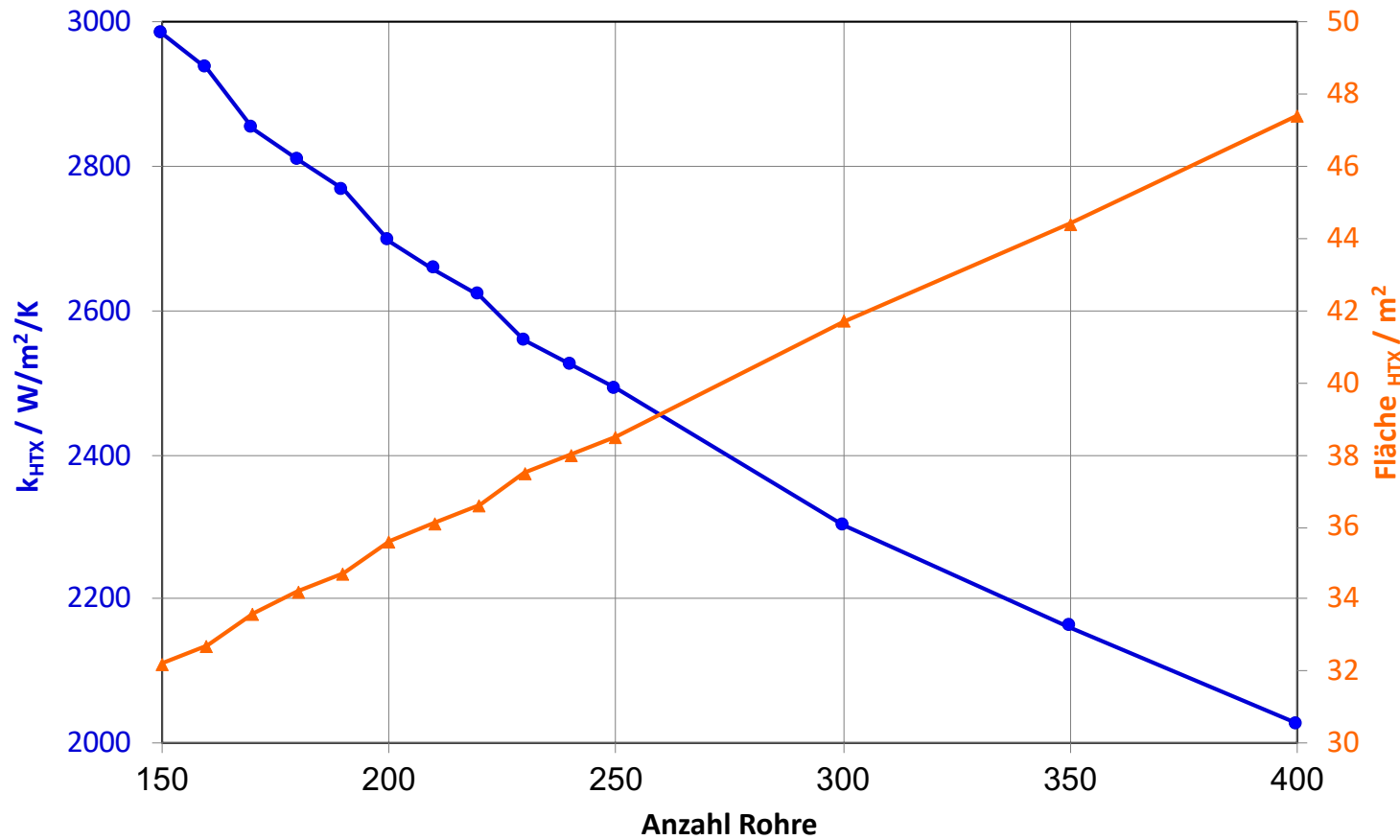
Peters, M. S.; Timmerhaus, K. D.:
Plant Design and Economics for Chemical Engineers,
McGraw-Hill, New York (1991)

$$u \approx 50 / \sqrt{\rho}$$

u in m/s; ρ in kg/m³

Vogel, G.H.: Process Development, Wiley-VCH (2005))

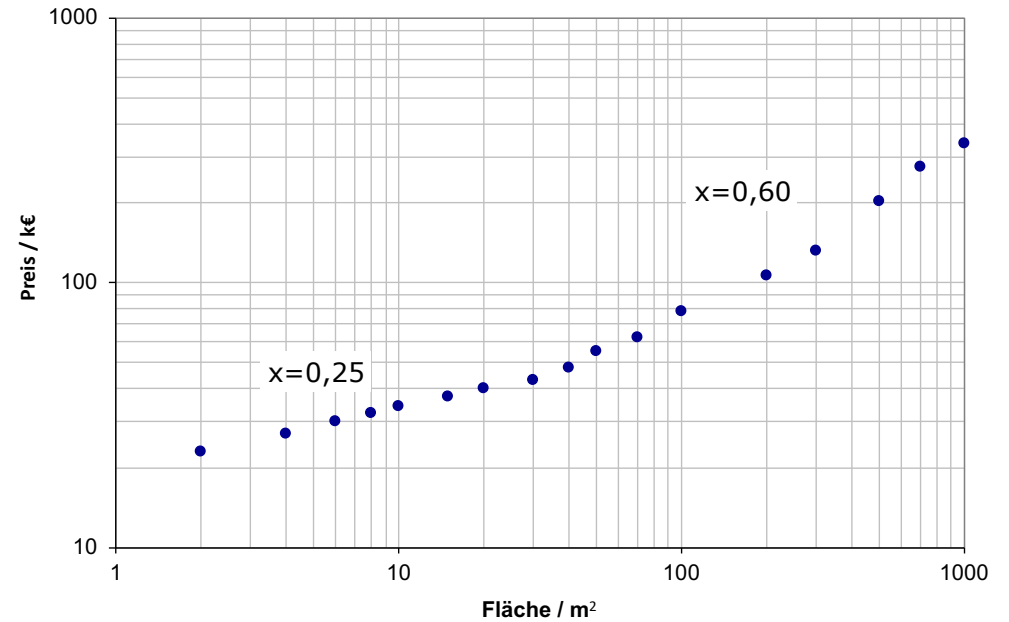
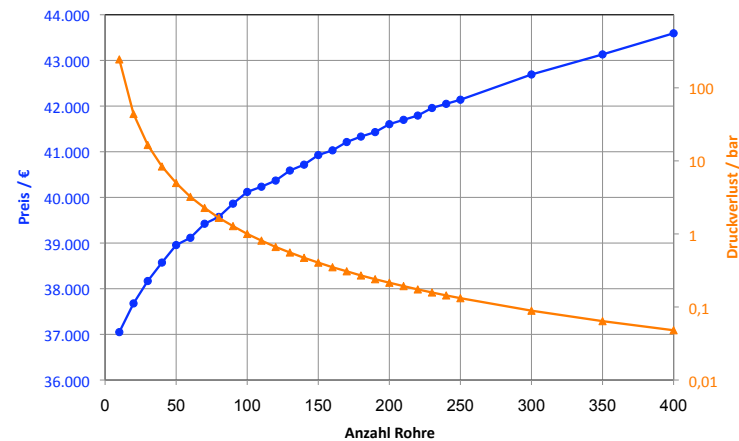
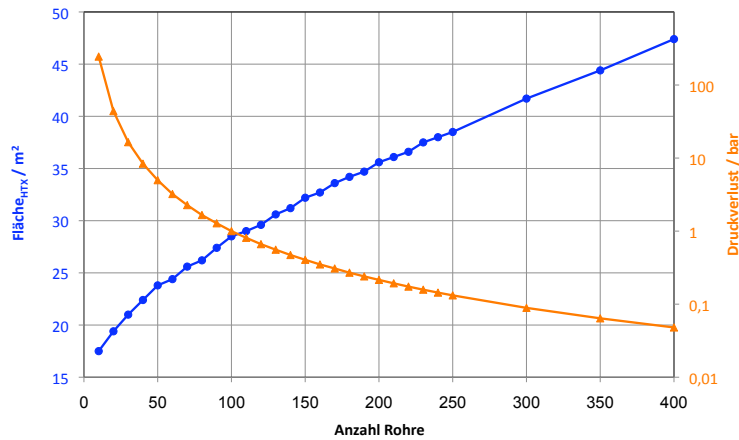
Auslegung eines Kondensators - Optimierung der Anzahl der Rohre



$$\dot{Q}_{\text{Übergang}} = k \cdot A \cdot \Delta T_{\log,m}$$

$$A_{HTX} = n \cdot \pi \cdot d_a \cdot L$$

Auslegung eines Kondensators - Optimierung der Anzahl der Rohre



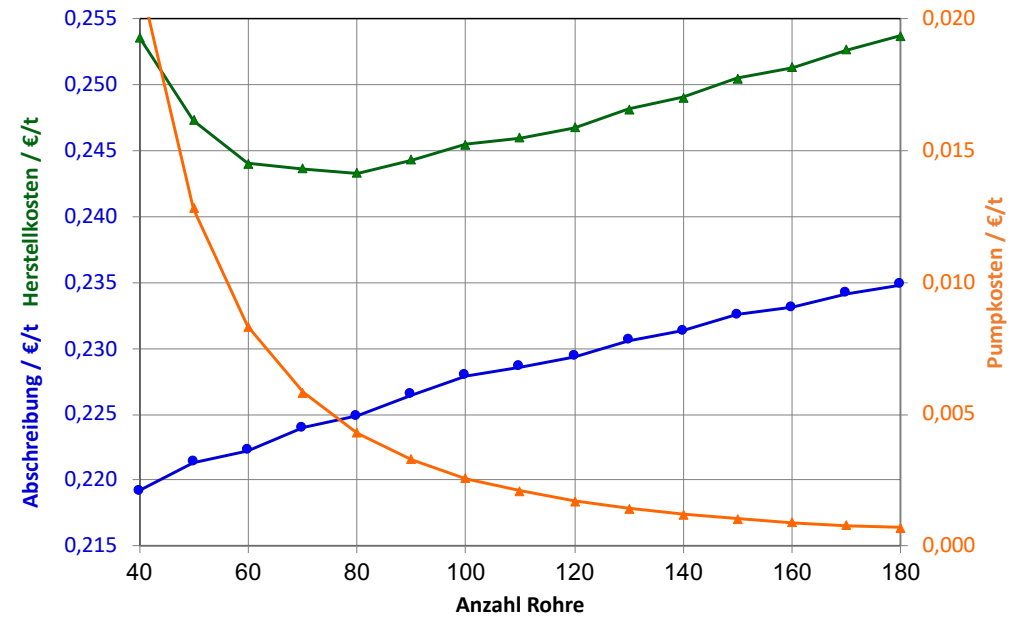
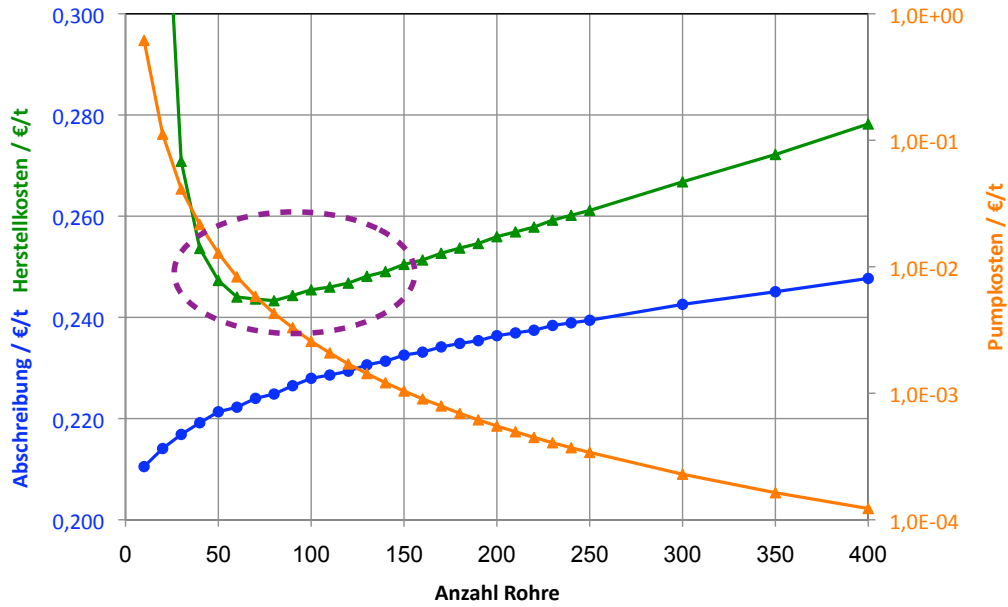
$$Preis_2 = Preis_1 \left(\frac{A_2}{A_1} \right)^x$$

x := Degressionskoeffizient
für A > 50 m²: x ~ 0,60

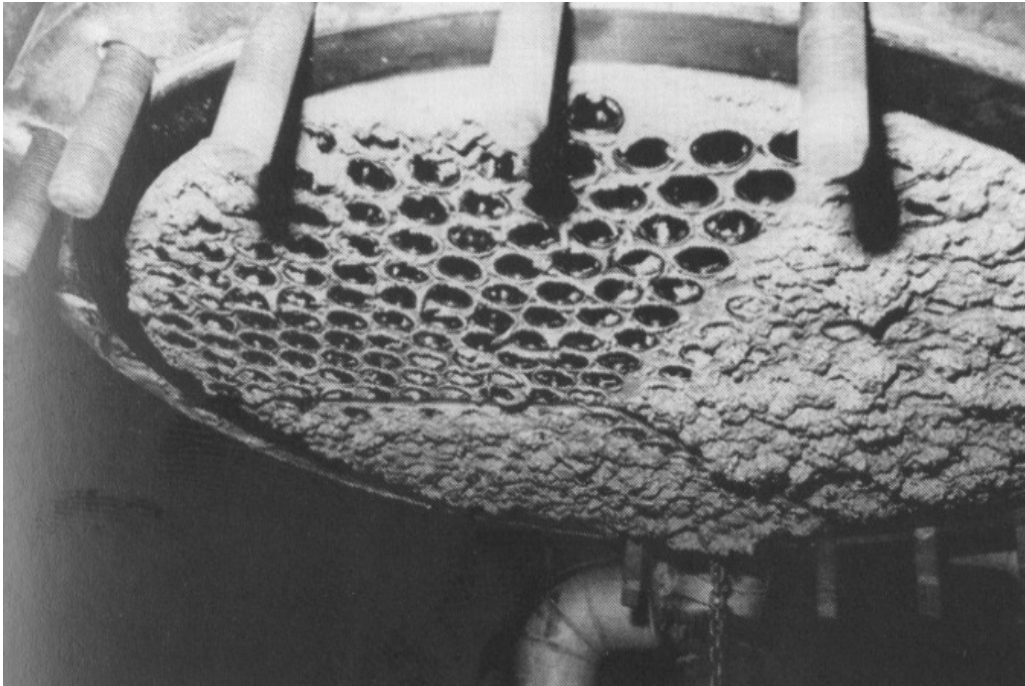
Maschinen, Apparate, Anlagen:

„0,6-Regel“: $0,25 \leq x \leq 0,95$

Auslegung eines Kondensators - Optimierung der Anzahl der Rohre



Verringerung des Wärmedurchgangskoeffizienten durch Ablagerungen



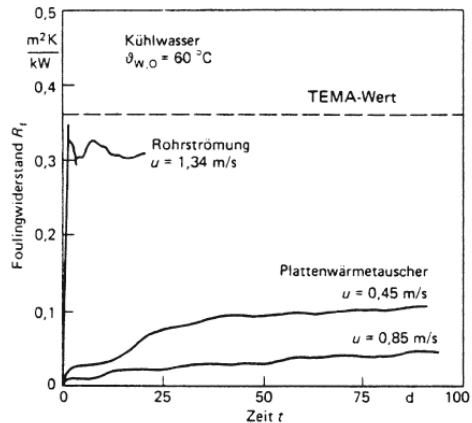
Müller-Steinhagen, H. Wärmeübertragerreinigungssysteme, PP Publico Publications, 2013



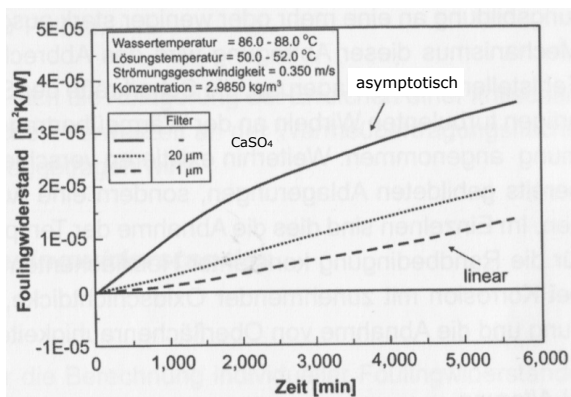
Tempco, Fouling factor negli scambiatori a piastre, www.tempcoblog.it, 2013



Wikimedia, High-Pressure-Cleaning-of-Heat-Exchanger-Parts, www.wikimedia.org, 2013



VDI-Wärmeatlas, 10. Auflage, Springer (2006)



Müller-Steinhagen, H. Wärmeübertragerreinigungssysteme, PP Publico Publications, 2013

Überdimensionierung

- ▶ Flächenzuschlag zur Berücksichtigung sich zukünftig einstellender zusätzlicher thermischer Widerstände
- ▶ Berücksichtigung von Produkt und Servicefluid
- ▶ Erfahrungswerte
- ▶ Wissen der Produzenten
- ▶ Zeitaufwändige Experimente zur Messung der sich zeitlich ändernden Fouling-Widerstände
- ▶ Fouling-Monitoring während der Produktion möglich

Fouling - Verringerung des Wärmedurchgangskoeffizienten durch Ablagerungen

Ablagerung	λ_{sch} [W/m/K]
Kesselstein, gipsreich	0,6 - 2,3
Kesselstein, silikatreich	0,08 - 0,18
Ruß, trocken	0,035 - 0,070
Kohlenstäube, trocken	0,11
Eis	1,75 - 2,30
Salz	~ 0,6

→ zwei Unbekannte:

- Schichtdicke
- Wärmeleitfähigkeit

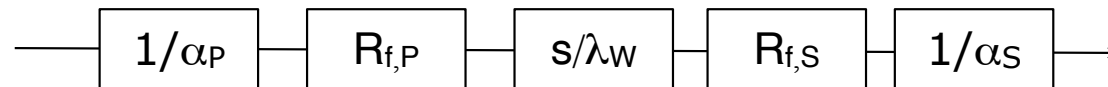
Zusammenfassung zu einem thermischen Widerstand durch Ablagerungen

$$R_f \equiv \frac{b}{\lambda}$$

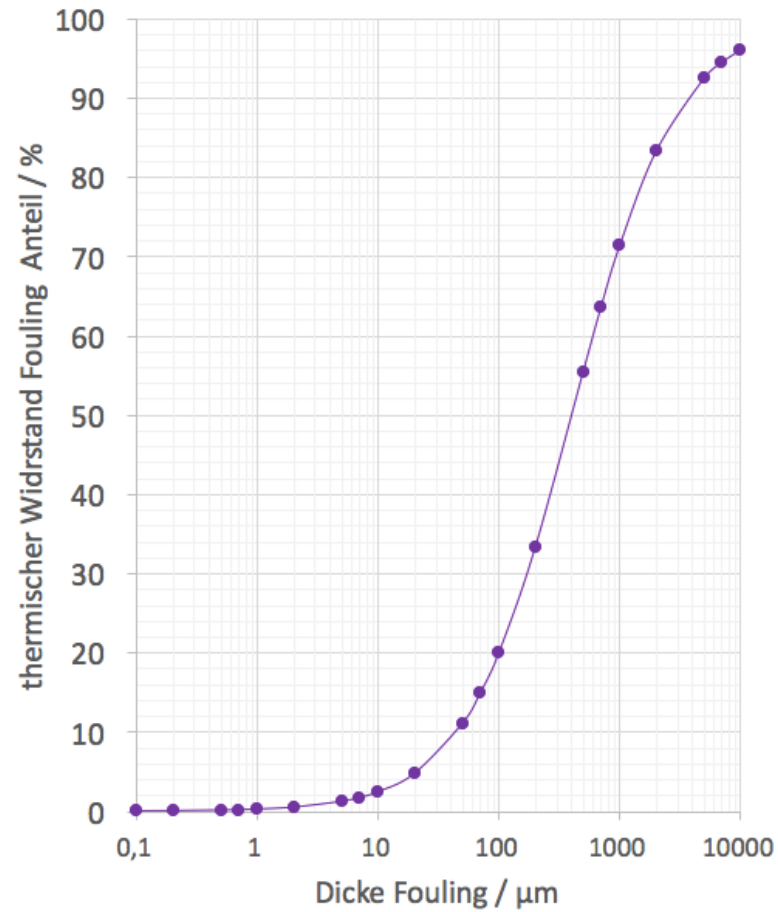
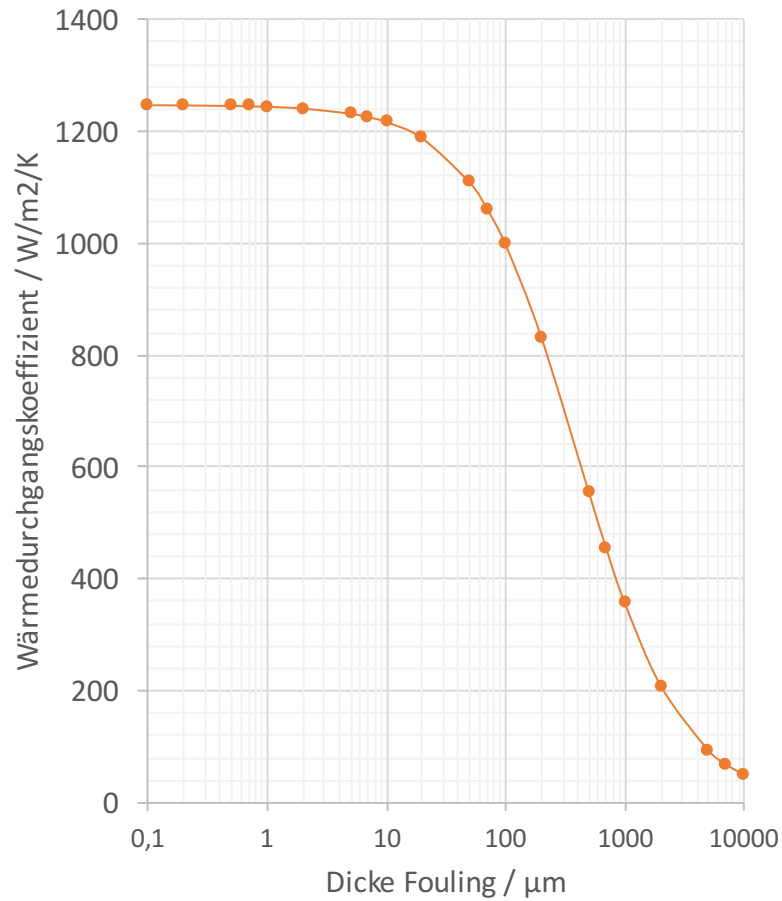
typischer Wert: 0,00018 m²K/W



Abhängig von Medium, Temperatur, Bauform, Oberflächenbeschaffenheit, Strömungsgeschwindigkeit

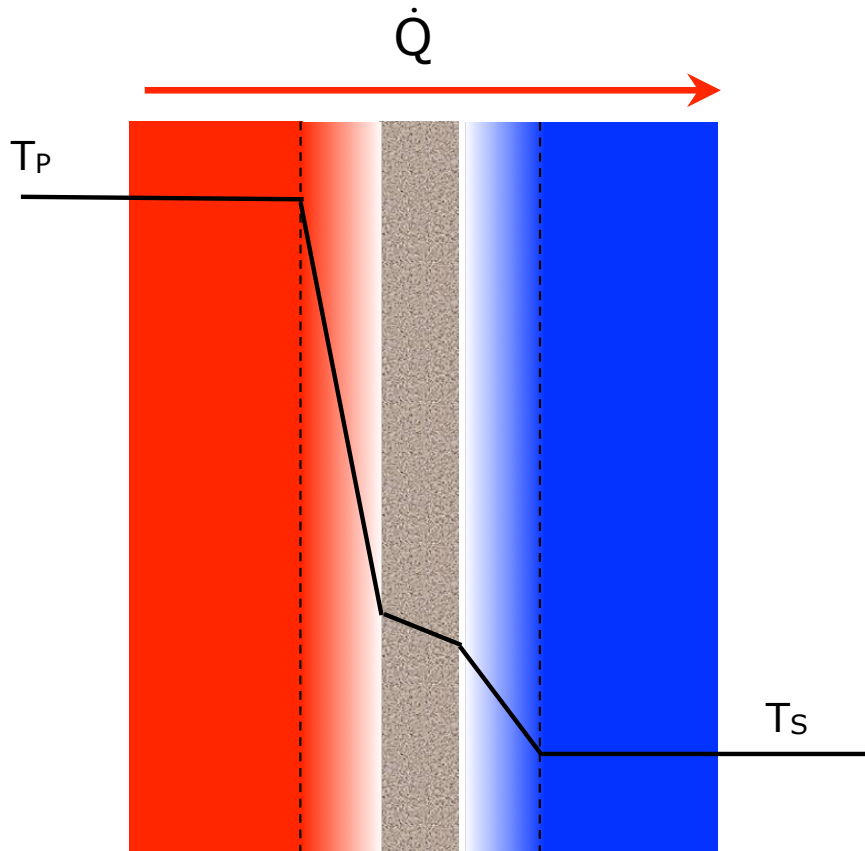


Fouling - Verringerung des Wärmedurchgangskoeffizienten durch Ablagerungen



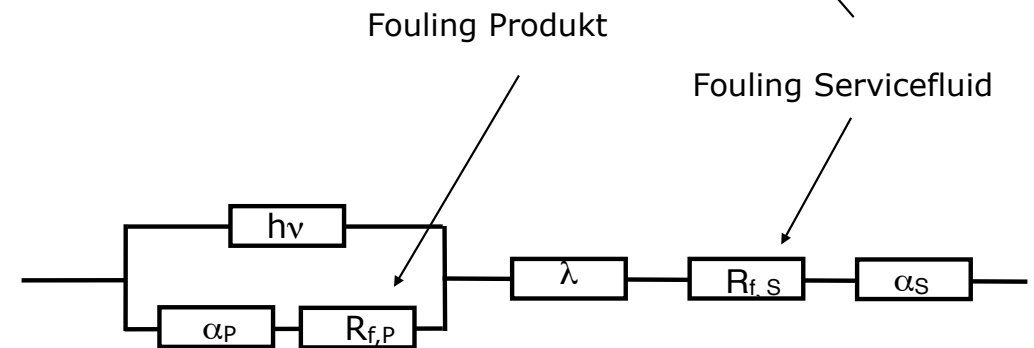
$$R_f = \frac{s_{sch}}{\lambda_{sch}} = \frac{1}{\alpha_{sch}}$$

Wärmedurchgang - Rohrwand oder Behälterwand, Berücksichtigung von Fouling



$$\dot{Q}_{\text{Übergang}} = k \cdot A \cdot \Delta T_{\log,m}$$

$$k = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_P} + R_{f,P} + \frac{r_a}{\lambda} \ln\left(\frac{r_a}{r_i}\right) + R_{f,S} + \frac{1}{\alpha_S} \frac{r_a}{r_i}}$$



thermische Widerstände

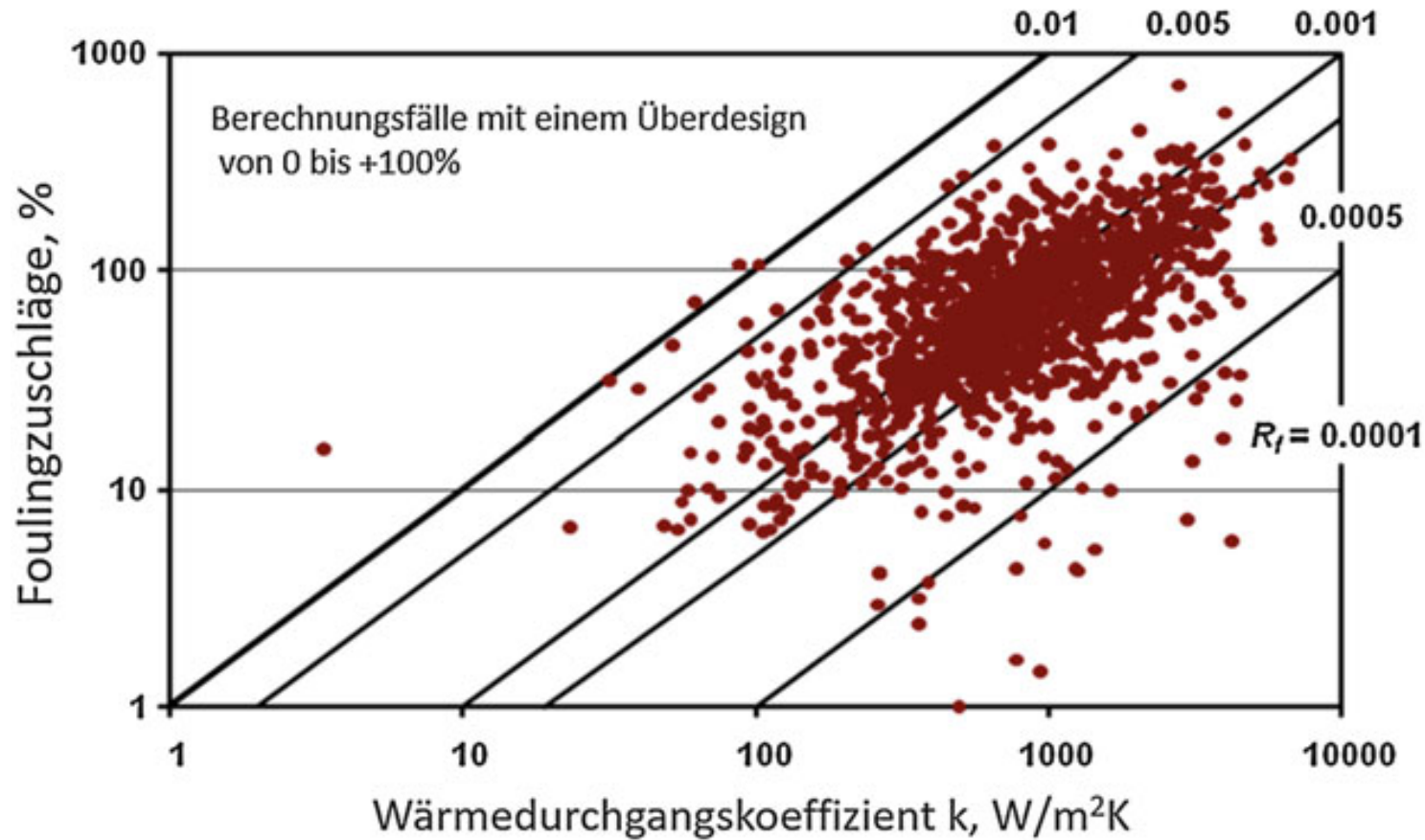
Zusätzliche wärmeübertragende Fläche bei verschiedenen Wärmeübertragern

Bauart / Fluid	$k_{\text{sauber}} / \text{W/m}^2/\text{K}$	zusätzliche Fläche / %
Rohrbündelwärmeübertrager Gas/Gas	50	1,8
Rohrbündelwärmeübertrager Gas/Flüssigkeit	150	5,4
Rohrbündelwärmeübertrager Flüssigkeit/Flüssigkeit	1000	36
Rohrbündelwärmeübertrager Wasser/Dampf	4500	162
Plattenwärmeübertrager Flüssigkeit/Flüssigkeit	3000	108

$$\frac{A_{\text{Fouling}}}{A_{\text{sauber}}} = 1 + k_{\text{sauber}} \cdot R_f$$

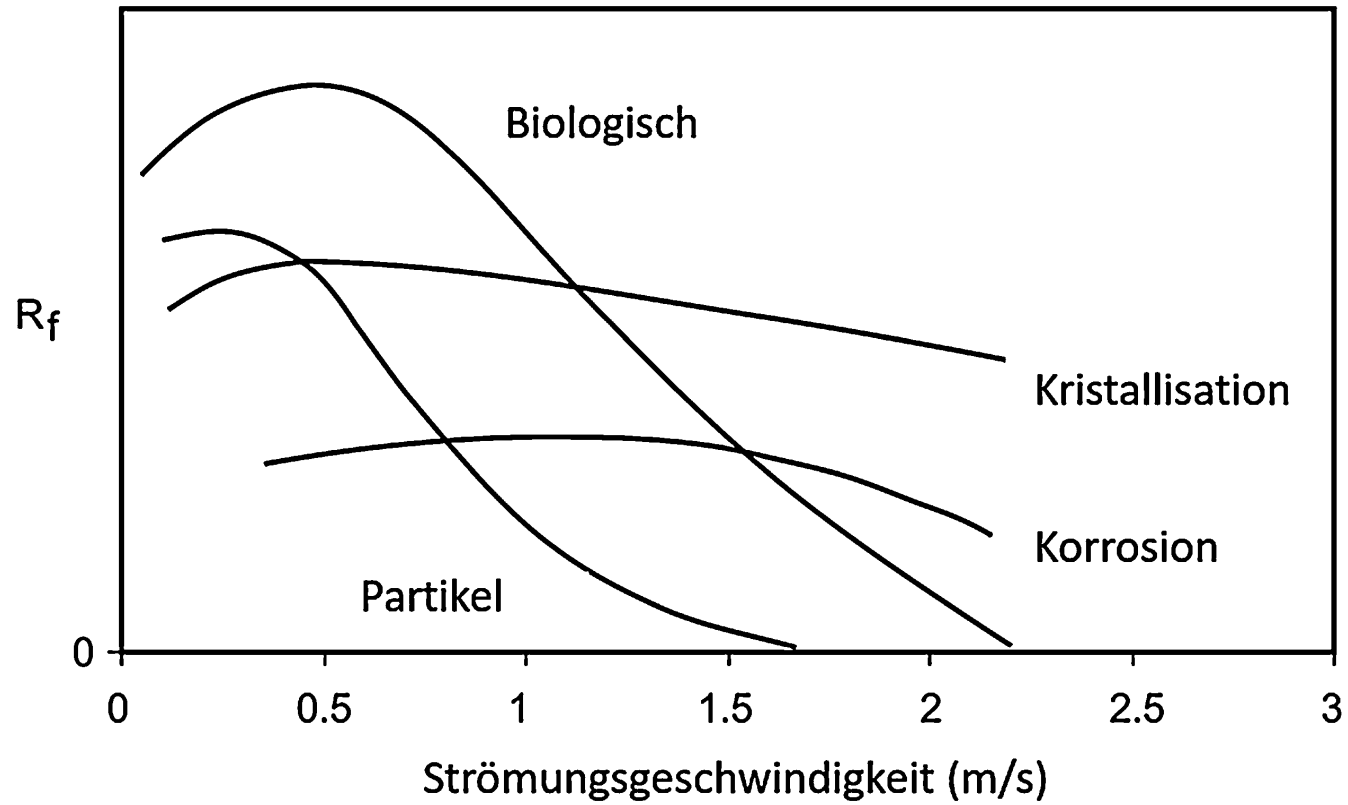
$$R_{f,i} = R_{f,a} = 1,8 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2/\text{K}/\text{W}$$

Überdimensionierung industrieller Wärmeübertrager, 2003 - 2008



VDI-Wärmeatlas, C3, 12. Auflage, Springer Vieweg, 2019

Einfluss der Strömungsgeschwindigkeit auf Fouling in Kühlwasser



VDI-Wärmeatlas, C3, 12. Auflage, Springer Vieweg, 2019

Fouling - Bekämpfung

Prozesstechnische Auslegung und Konstruktion

- ▶ Strömungsgeschwindigkeit $1,5 < u < 3,5$ m/s
- ▶ Toträume, Bypassing vermeiden

Mechanisch

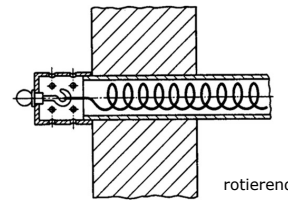
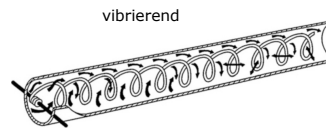
- ▶ Turbulenzerzeuger
- ▶ Bürstenverfahren (kleine Apparate)
- ▶ Schwammkugelfverfahren (große Apparate)
- ▶ gasseitig Rußbläser: Dampf, Druckluft, Wasser
- ▶ gasseitig akustische Schwingungen: Hörner
- ▶ flüssigkeitsseitig: Druckstöße (*kick valve*)

Thermisch

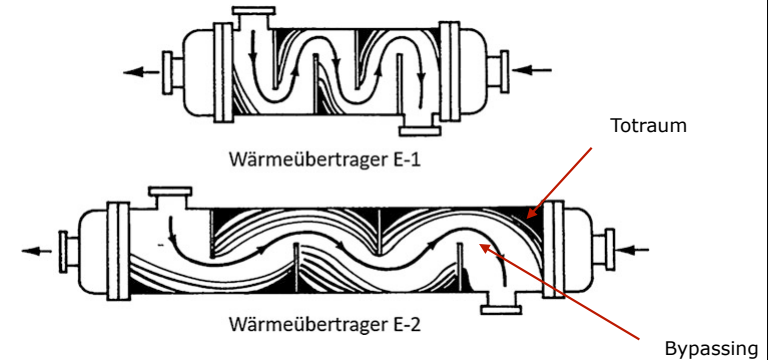
- ▶ Bio-Fouling: 121°C (2,0 bar Wasserdampf), 20 min

Chemisch

- ▶ Lösen
- ▶ Depolymerisieren, z.B. bei PET mit Ethylenglykol



VDI-Wärmeatlas, C3, 12. Auflage, Springer Vieweg, 2019

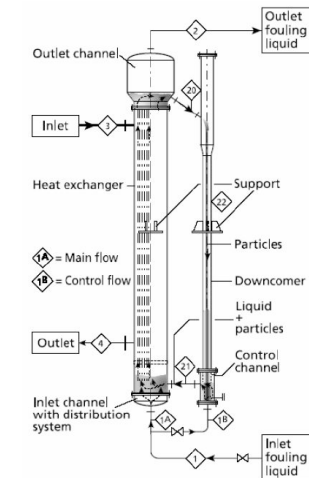


VDI-Wärmeatlas, C3, 12. Auflage, Springer Vieweg, 2019



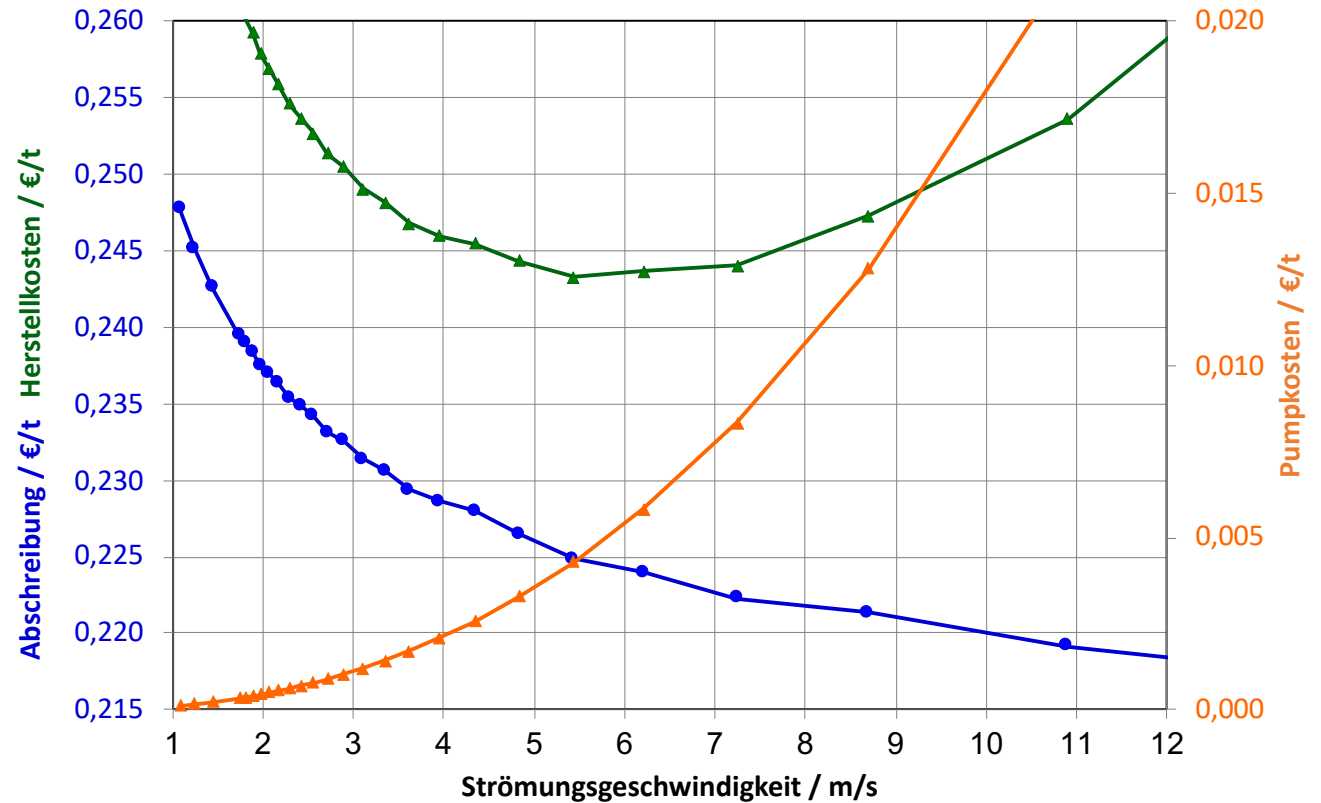
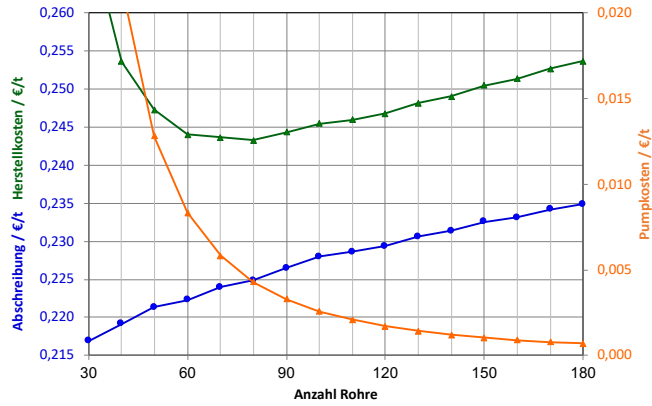
www.taprogge.de

$T < 125$ °C
 Δp ca. 70 mbar



Klaren, D., Self-Cleaning Heat Exchangers: Principal, Industrial Applications and Operating Installations, 2000

Auslegung eines Kondensators - Optimierung der Strömungsgeschwindigkeit



Fouling!

Unerwünschte Ablagerungen erhöhen den spezifischen Energiebedarf bzw. verringern den effizienten Energieeinsatz in der Prozessindustrie

In der Vergangenheit wurden Wärmeübertrager vielfach bezüglich Fouling mit zu geringen Strömungsgeschwindigkeiten ausgelegt

- ▶ im Fokus der variablen Kosten stand der Druckverlust
- ▶ zu wenig beachtet: Erhöhung des spezifischen Energiebedarfs, Kosten für Wartung und Instandhaltung, Produktionsstillstand durch / wegen Fouling, Beeinträchtigung der Energieintegration

Zielfunktion der prozesstechnischen Dimensionierung

- Minimum der Produktionskosten
- nicht Minimum der Investitionsausgaben

Notwendig: mehr experimentelle Befunde

- ▶ Fouling-Kinetik, „d(Fouling) nach dt“ wird benötigt

$$\frac{dR_f}{dt} = A_I Re^{-\beta} \exp\left(\frac{-E_I}{RT_f}\right) - C_I \tau_w$$

Wie wird die Situation in 20 Jahren sein?

- ▶ Der Apparat „Wärmeübertrager“ wird „von der Wiege zur Wiege“ entwickelt
- ▶ Wärmeübertrager werden durch numerische Lösung der Bilanzgleichungen prozesstechnisch dimensioniert
- ▶ Ansätze der Ähnlichkeitstheorie (Nu , Re , Pr , d/L) werden nur noch für die überschlägige Dimensionierung, z.B. bei der Prozessentwicklung und im Rahmen der Vorplanung genutzt
- ▶ Wir haben Fouling-Prozesse besser verstanden, können Fouling besser vorhersagen und bekämpfen
- ▶ Die Produktionskosten der Prozessindustrie werden weniger externalisiert
- ▶ Energiewandlungsprozesse werden überwiegend ohne fossile Energieträger auskommen
- ▶ Ingenieur:innen werden über den Stand der Wissenschaft und Technik zur Zeit Ihres Hochschulabschlusses lächeln
- ▶ Produktionsleiter:innen werden am Montagmorgen den Vorschlag der KI verwerfen und selbst entscheiden

