

Statische Prozessoptimierung/ Prozessoptimierung 1

Kapitel 1: Einführung

Prof. Dr.-Ing. habil. Pu Li

Fachgebiet Prozessoptimierung

Chemieindustrie

Welche ist die optimale Betriebsstrategie, damit die Produktspezifikationen erfüllt und zugleich die benötigten Betriebskosten minimiert werden?



Welche ist die optimale Führungsstrategie, damit die Umweltauflage erfüllt und zugleich die benötigten Betriebskosten minimiert werden?

Kraftwerke



Welcher ist der optimale Betrieb, damit der Kundenbedarf erfüllt und zugleich die benötigten Betriebskosten minimiert werden?

Warum Optimierung?

Wichtig für jeden

Was ist Optimierung?

Maximierung (Minimierung) unter Nebenbedingungen

Warum jetzt ein gefragtes Thema?

- Modelle
- Optimierungsansätze
- Computer

Wie macht man Optimierung?

Modellbasierte, mathematische bzw. numerische Lösung

Notwendigkeit der Prozessoptimierung

Beispiel: Veränderungen in der Chemieindustrie

Von 1950 bis 1970 (Golden Age):

- Produktionswachstum von ca. 20 % pro Jahr.
- Chemieindustrie war damals wie Softwareindustrie von heute!

Von 1970 bis 1990 (Survival Period):

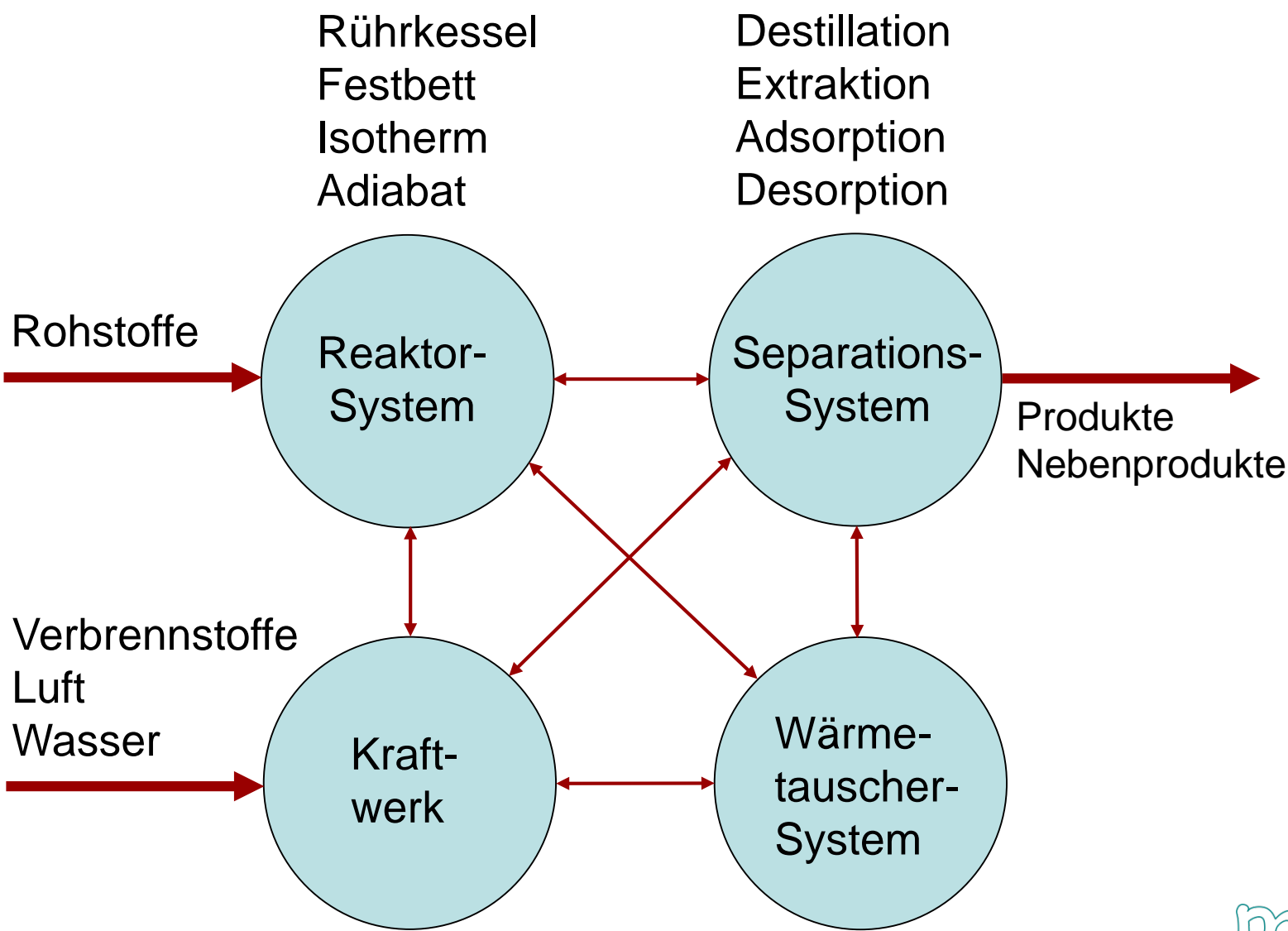
- Produktionswachstum kleiner als 5 % pro Jahr.
- Verstärkter Wettbewerb.
- Profit durch Prozessoptimierung (Potenzial ausnutzen).
- Optimales Design, optimale Synthese, optimaler Betrieb ...

Ab 1990 (Time of Restructuring):

- Der Markt ist gesättigt.
- Viele Firmen sind aus dem Wettbewerb ausgeschieden.
- Wer effizient ist, wird am Markt bestehen.
- Wer optimieren kann, wird Gewinn erwirtschaften!



Prozessanalyse:



Entscheidungen:

- Welche Teilprozesse (Kolonne, Reaktor usw.) sollen ausgewählt werden?
- Wie sollen diese Teilprozesse verschaltet werden?
- Wie groß soll jeder Teilprozess sein?
- Wo liegt der optimale Betriebspunkt (Druck, Temperatur, usw.)?

Entscheidungskriterien:

- Kapitalinvestment
- Kosten der Rohstoffe
- Betreibbarkeit
- Energieverbrauch
- Umweltbelastung

Wärmetauscherdesign: Kostenminimierung

Strom A (hohe Temperatur T_H) soll mit Strom B (niedrige Temperatur T_L) Wärme austauschen.

Wie groß soll die Wärmeaustauschfläche sein?

Nach Carnot:

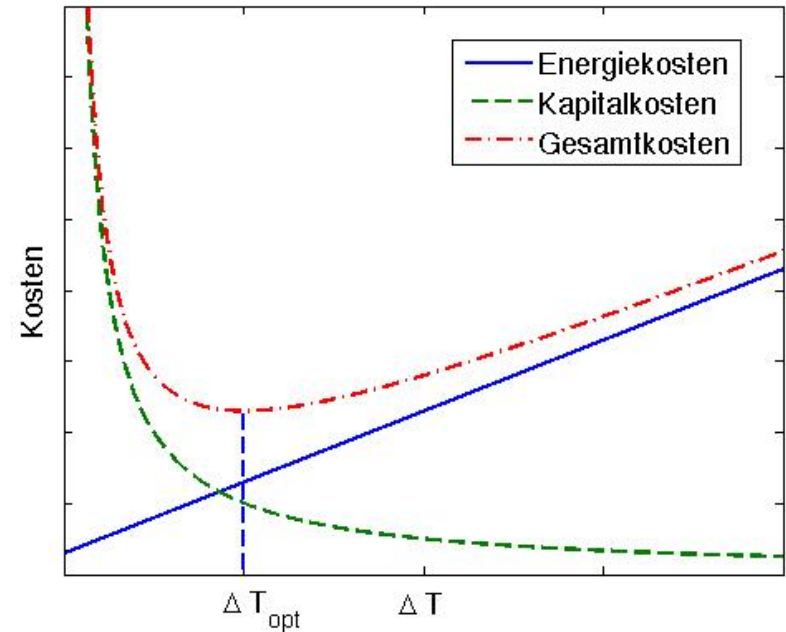
$$\dot{W}_H = \dot{Q} \frac{T_H - T_U}{T_H} \quad \dot{W}_L = \dot{Q} \frac{T_L - T_U}{T_L}$$

Energieverlust beim Betrieb:

$$\begin{aligned} \dot{E}_V &= \dot{W}_H - \dot{W}_L \\ &= \dot{Q} \left(\frac{T_H - T_U}{T_H} - \frac{T_L - T_U}{T_L} \right) \\ &= \dot{Q} \frac{T_H - T_L}{T_H T_L} T_U \end{aligned}$$

Andererseits

$$\dot{Q} \approx UA(T_H - T_L) = UA\Delta T$$



Gesamtkosten =
Anlagenkosten + Betriebskosten

Herausforderungen (Schwierigkeiten):

Ein Optimierungsproblem wird formuliert, welches die folgenden Eigenschaften hat:

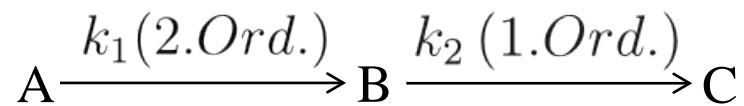
- Große Systeme
- Nichtlinear
- Kombinatorisch
- Dynamisch

Lösungsansätze:

- Empirisch / heuristisch
- Mit dem thermodynamischen Prinzip
- Durch Simulation
- **Optimierung**

Optimierung der Betriebsweise eines Batch-Reaktors

Reaktionstyp:



Problemformulierung:

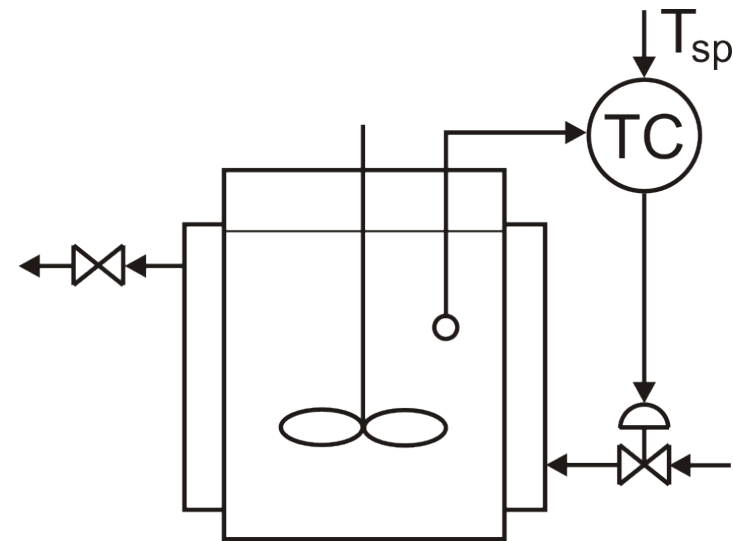
$$\max_{C_A, C_B, T} C_B(1h)$$

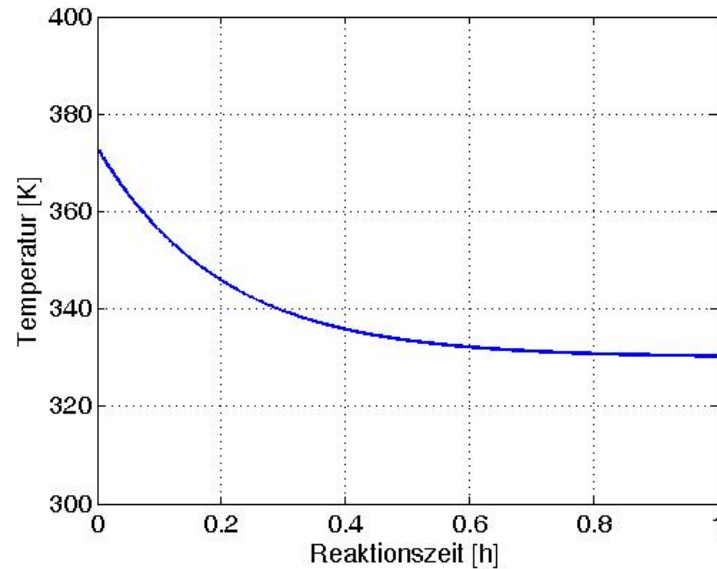
$$\text{mit } \frac{dC_A}{dt} = -k_1(T) C_A^2 \quad C_A(0) = 1$$

$$\frac{dC_B}{dt} = k_1(T) C_A^2 - k_2(T) C_B \quad C_B(0) = 0$$

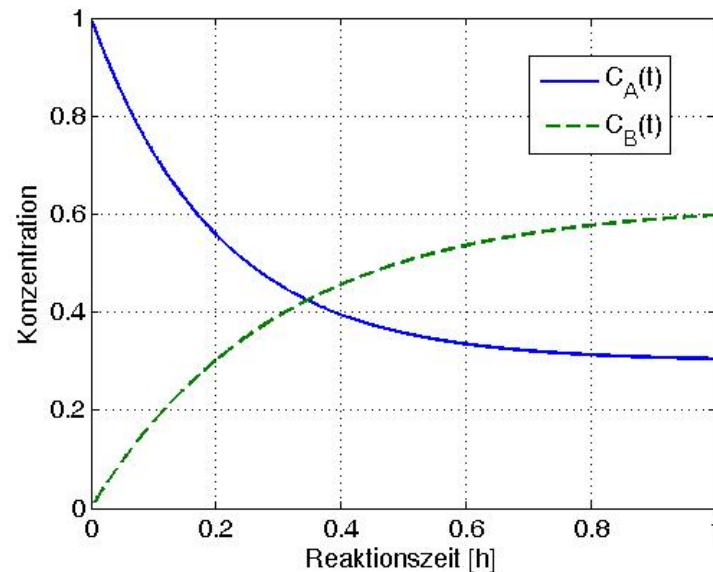
$$k_i(T) = k_{i0} \exp(-E_i/RT) \quad i = 1, 2$$

$$298^\circ K \leq T \leq 398^\circ K$$

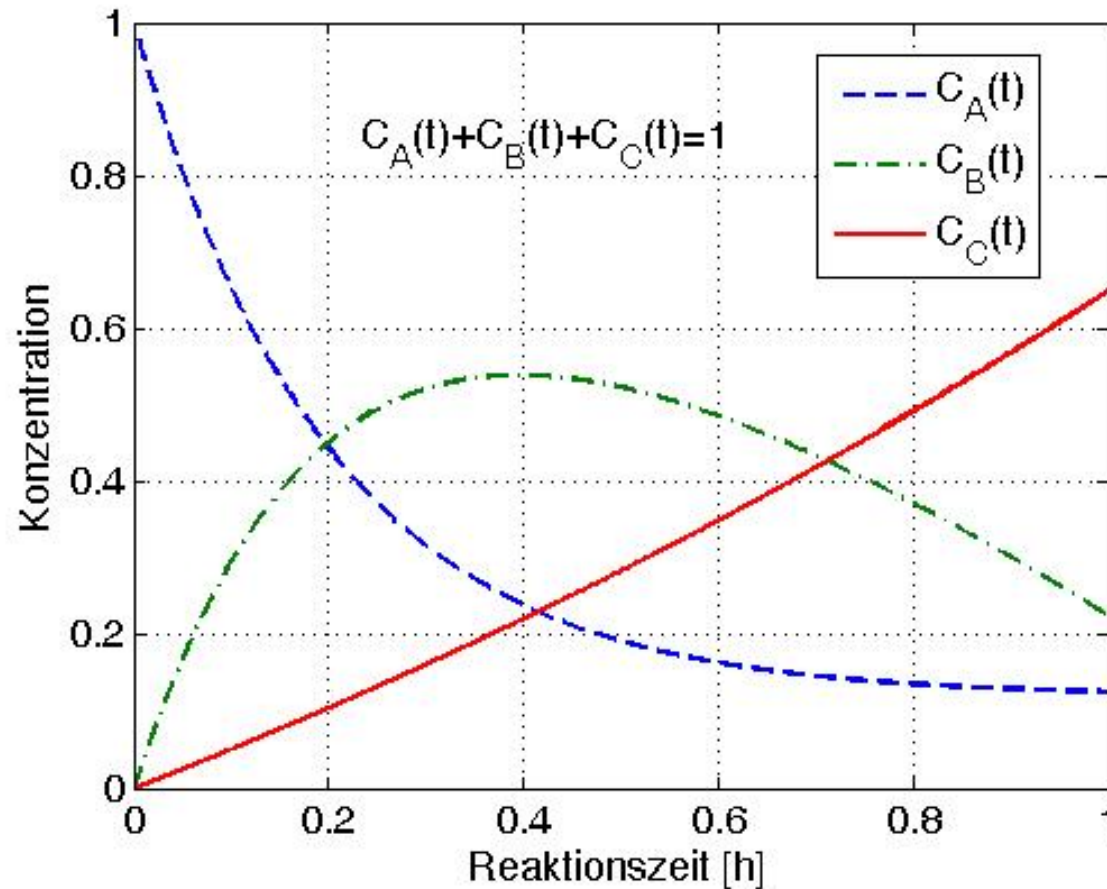


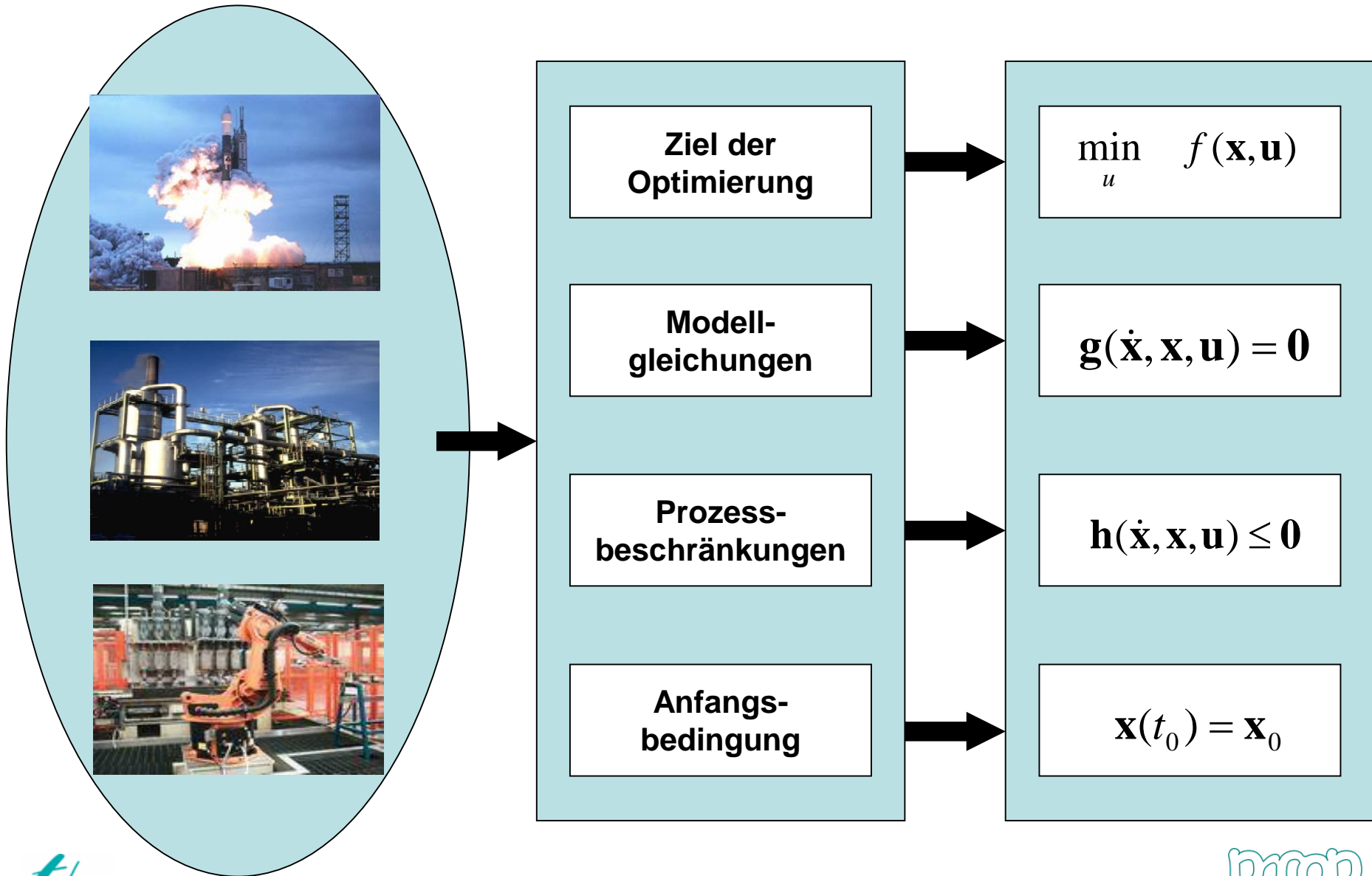


Entsprechende optimale Konzentrationsverläufe



Konzentrationsverläufe bei der Maximaltemperatur





Optimierungsaufgaben in der Chemieindustrie

- **Optimales Produktdesign**

Erzielung erwünschter Produkteigenschaften durch Auswahl geeigneter Basiselemente

- **Optimaler Prozessentwurf**

Kostenminimierung durch Auswahl, Dimensionierung und Strukturauslegung einzelner Anlagen

- **Optimale Produktionsplanung**

Profitmaximierung durch Optimierung der Einkaufs- und Verkaufsstrategien unter Marktbedingungen

- **Optimale Prozessführung**

Kostenminimierung durch Optimierung des Betriebspunktes bzw. der Führungsstrategie

- **Ausnutzung von Prozessdaten**

Zustandsbeobachtung, Modellparameteranpassung und Identifikation nicht messbarer Prozessgrößen

Vorgehen zur Durchführung der Optimierung

- **Prozessanalyse**

Definition der Optimierungsaufgabe, des Verbesserungspotenzials, der Freiheitsgrade

- **Modellierung**

Definition des Modellierungsraumes und der Annahmen, Aufstellen der Modellgleichungen, Simulation, Modellvalidierung

- **Problemformulierung**

Mathematische Problemformulierung mit Zielfunktion, Beschränkungen, Optimierungsvariablen (mit vordefinierten Prozessbedingungen!)

- **Lösung mittels geeigneten Optimierungsansatzes/Software**

Anpassung an den Ansatz/die Software, Initialisierung, Skalierung und Feineinstellung

Ansätze für große, komplexe Systeme sind nicht vorhanden!

- **Implementierung der Optimierungsergebnisse**

Resultatbewertung, Offline- oder Online-Realisierung

Vorgehensweise der Prozessoptimierung mit mathematischen Methoden 18

1. Prozessanalyse

- Ziel der Optimierung:
Minimierung der Betriebszeit
bzw. –kosten
Maximierung der Ausbeute
bzw. des Profits
- Optimierungsvariablen:
Analyse des Freiheitsgrades
Entscheidungsvariablen

2. Formulierung des Optimierungsproblems

- Zielfunktion
- Nebenbedingungen:
Modellgleichungen
Prozessbeschränkungen

3. Lösung mit einem Optimierungsansatz

- Auswahl eines Algorithmus
- Kodierung in einer Software
- Analyse des Ergebnisses

4. Realisierung On-Site

- Implementierung
- Echtzeitoptimierung

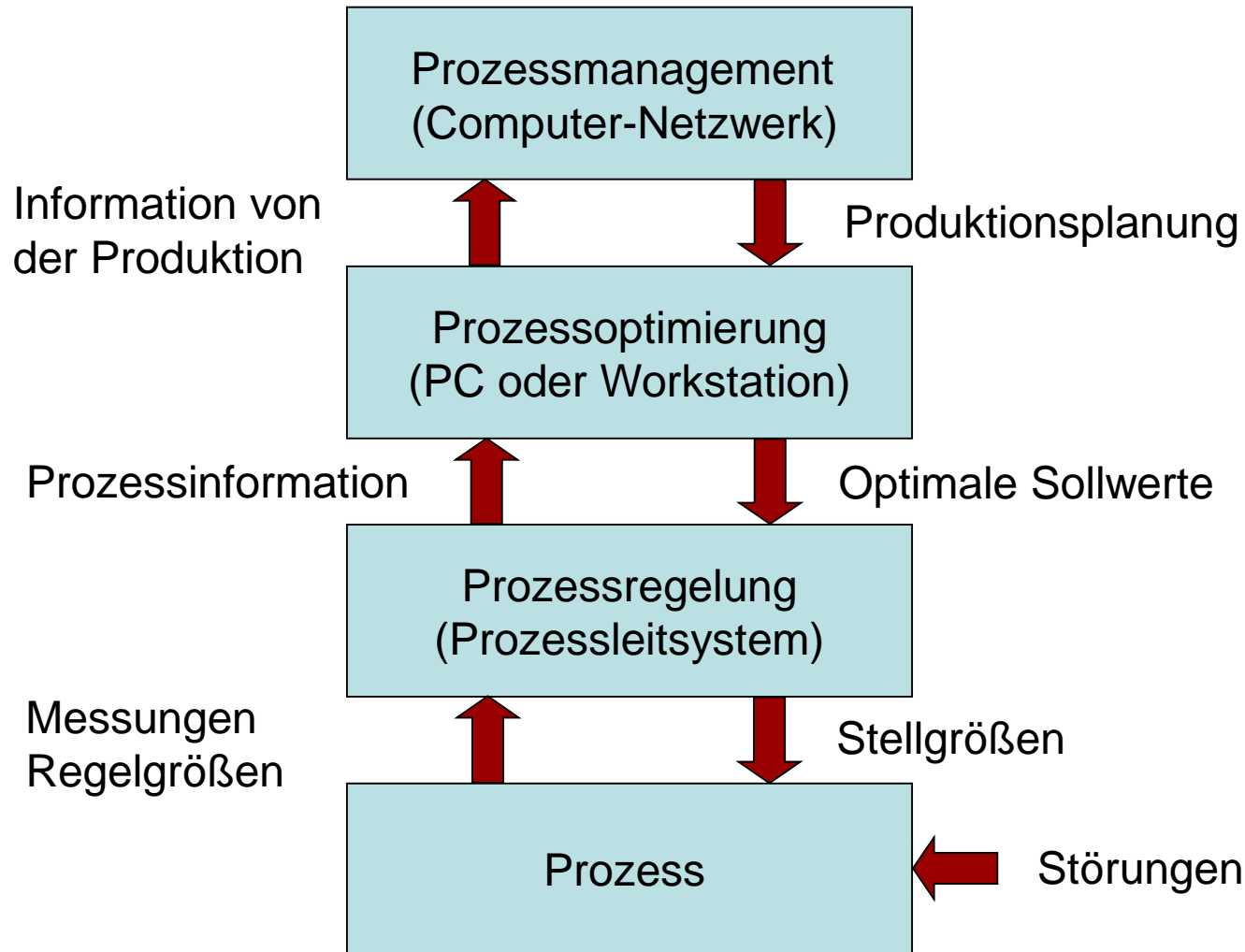
Der Betriebspunkt soll adaptiv zu folgenden Faktoren verändert werden:

- Belastung des Prozesses
- Aktivität des Katalysators
- Prozess-Startup und Batch-Prozesse
- Marktbedingungen
- Andere Störungen

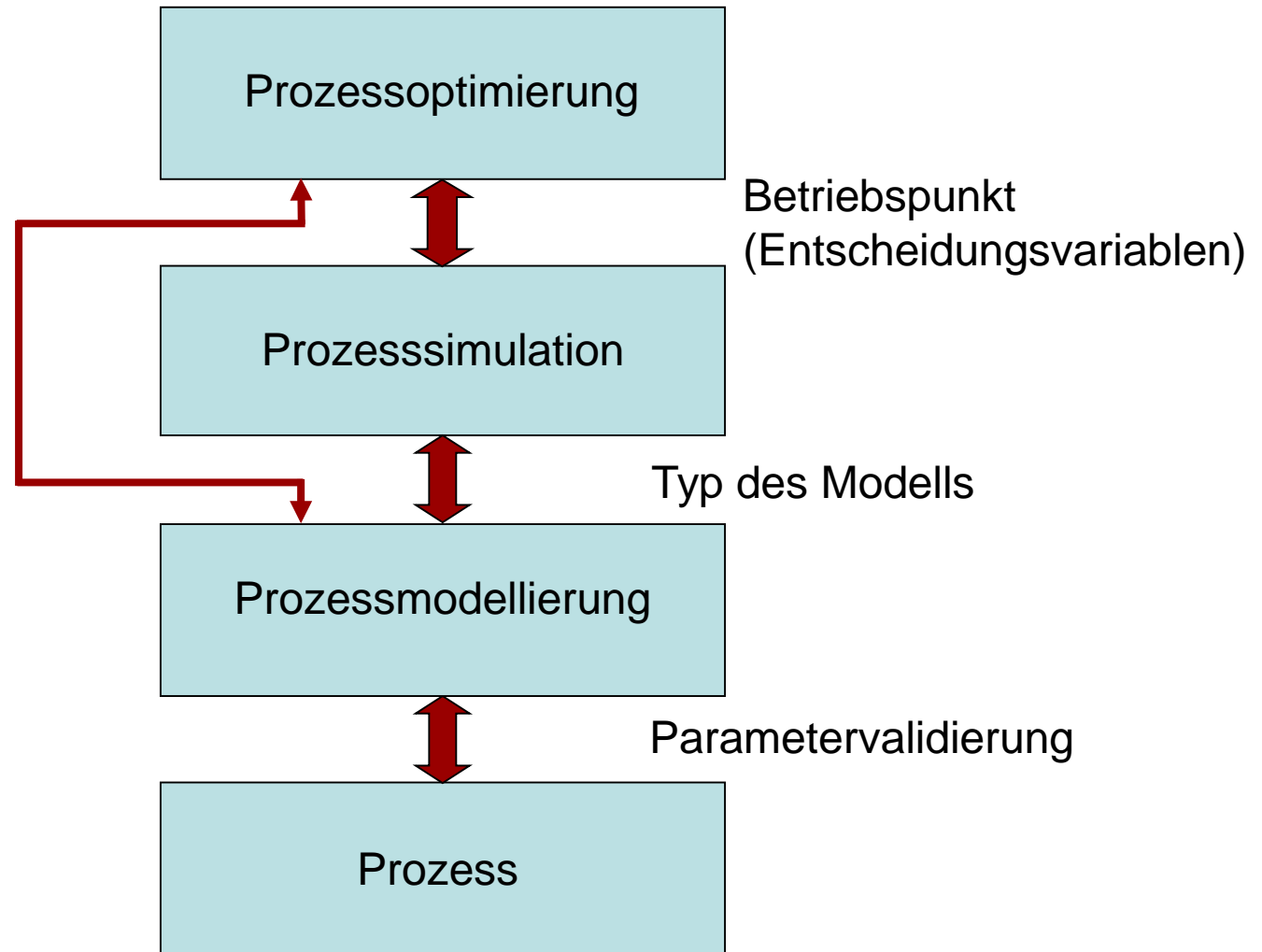
Lösung: Echtzeitoptimierung!

Position der Optimierung im Betrieb verfahrenstechnischer Prozesse

(Konzeption der Online-Optimierung)



Position der Optimierung in der Prozesssynthese



Mathematische Methoden:

- **Lineare Optimierung (LP)**
- **Nichtlineare Optimierung (NLP)**
 - Eindimensional
 - Mehrdimensional:
 - Ohne Nebenbedingungen
 - Mit Nebenbedingungen
- **Mixed-Integer Optimierung**
 - Mixed-Integer lineare Optimierung (MILP)
 - Mixed-Integer nichtlineare Optimierung (MINLP)
- **Stochastische Suchverfahren**
 - Simulated Annealing

Anwendungsbeispiele:

- Reaktorkaskade
- Wärmetauscher-Netzwerk
- Destillationskolonnen
- Batch-Reaktoren
- Batch-Destillation

Vorlesung (2 SWS):

Prof. Dr.-Ing. Pu Li

- Problemformulierung
- Lösungsansätze
- Anwendungsbeispiele

Übung (1 SWS):

Dr. Abebe Geletu

- Learning by doing (PC-Pool)
- Werkzeuge (GAMS)
- Lösung praktischer Probleme

Literatur:

U. Hoffmann, H. Hoffmann

Einführung in die Optimierung

Verlag Chemie, Weinheim, 1971

T. F. Edgar, D. M. Himmelblau

Optimization of Chemical Processes

McGraw-Hill, New York, 1989

Teo, K. L., Goh, C. J., Wong, K. H

A Unified Computational Approach to Optimal Control Problems

John Wiley & Sons, New York, 1991

C. A. Floudas

Nonlinear and Mixed-Integer Optimization

Oxford University Press, 1995

L. T. Biegler, I. E. Grossmann, A. W. Westerberg

Systematic Methods of Chemical Processes Design

Prentice Hall, New Jersey, 1997

M. Papageorgiou

Optimierung

Oldenbourg Verlag, München, 1996