

**MULTI-STAGE-FLASH
MEERWASSERENTSALZUNG**

**HYBRIDE MODELLBILDUNG UND REGELUNG
EINES BRINE HEATERS**

Matthias Fertig

Juli 2001

Ziel der Arbeit

Aufgabenstellung

- Entwicklung eines hybriden dynamischen Modells eines Brine-Heaters
 - Modelle der Literatur
 - thermodynamische Gesetzmäßigkeiten
- Regelung des Brine-Heaters in verschiedenen Arbeitspunkten
 - optimierte PID-Regelung
 - stoßfreie Umschaltung

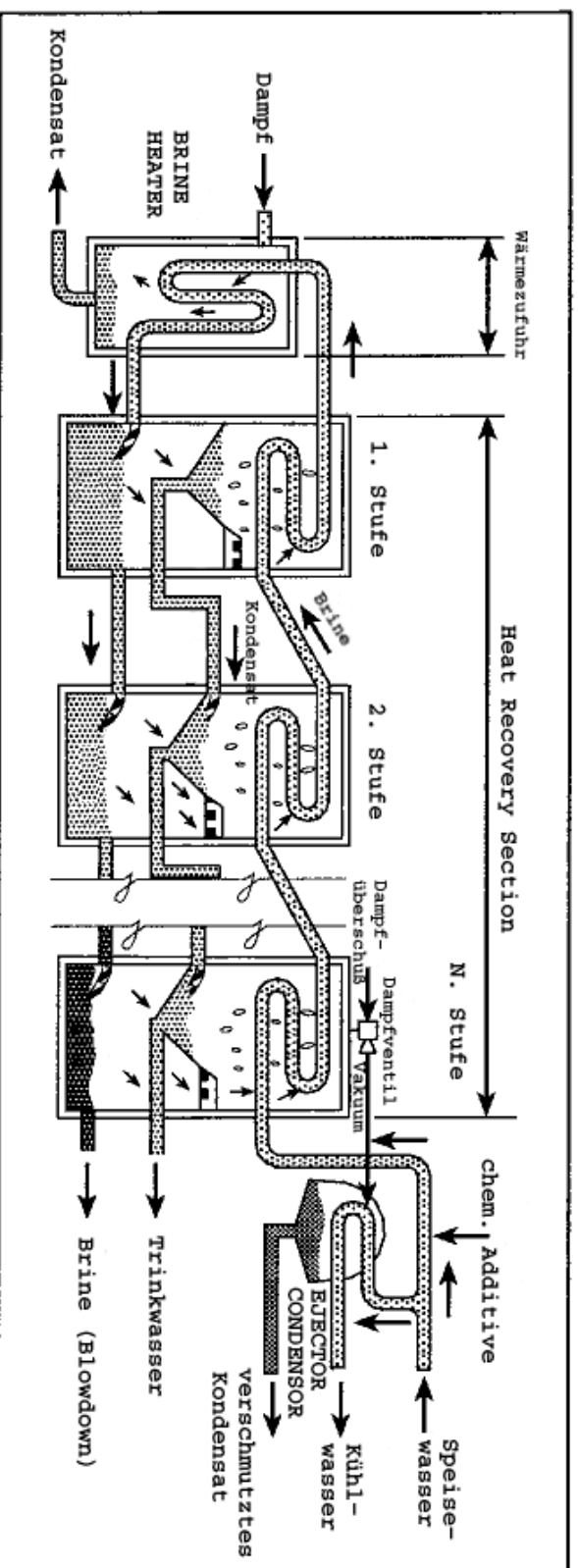
Struktur des Vortrags

5 Abschnitte

- Hybrides dynamisches Modell auf Basis von thermodynamischen Gesetzmäßigkeiten (physikalisch gesteuerter hybrider Automat)
- Optimierte PID-Regelung in 4 Arbeitspunkten
- Parameterwechsel durch hybriden Automaten (technisch gesteuerter hybrider Automat)
- Szenariogenerator
- Die grafische Benutzerschnittstelle

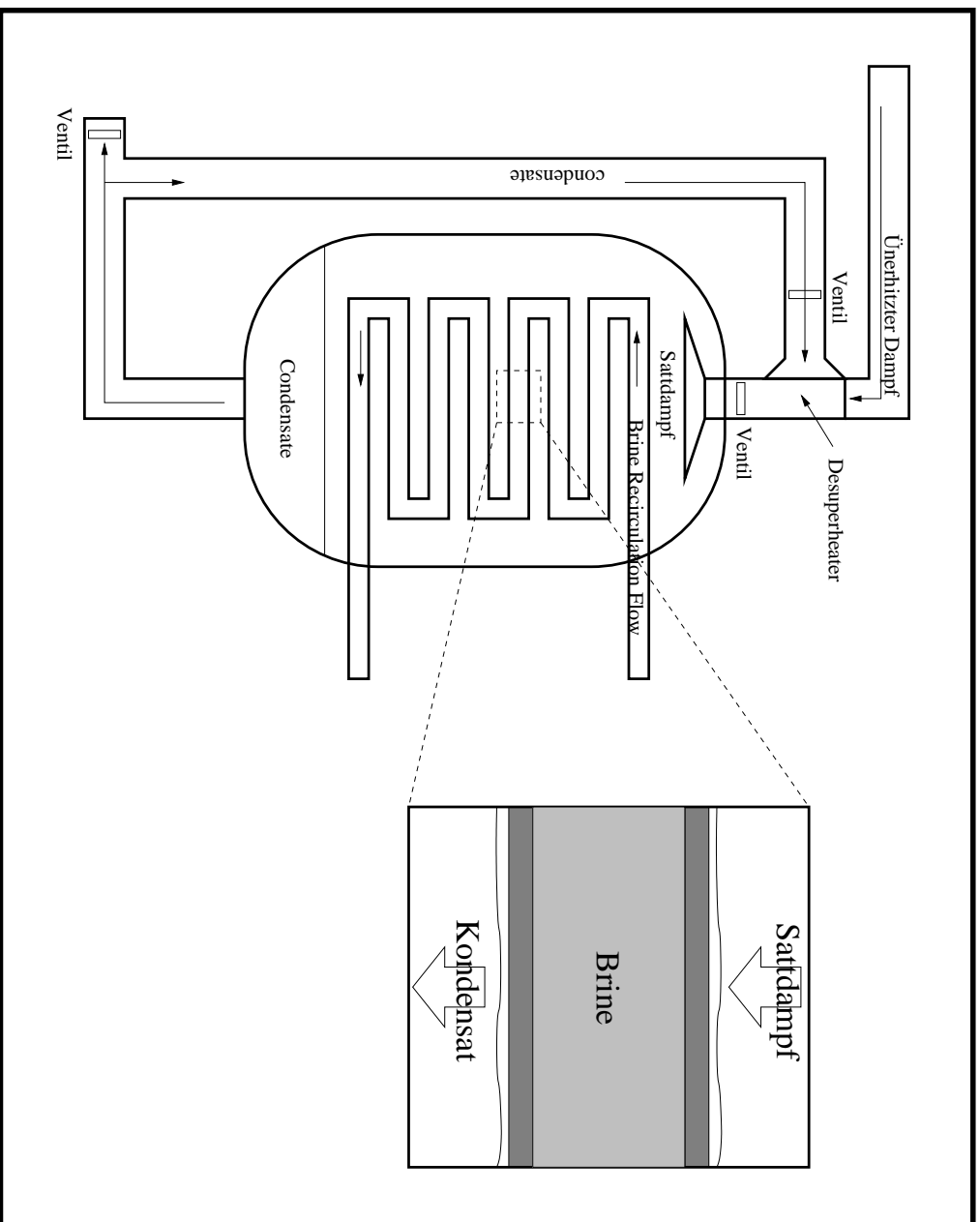
Thermale Entsalzungsverfahren

Multi-Stage-Flash Anlage



Das dynamische Modell

Der Brine-Heater



Das dynamische Modell

Verwendungszweck

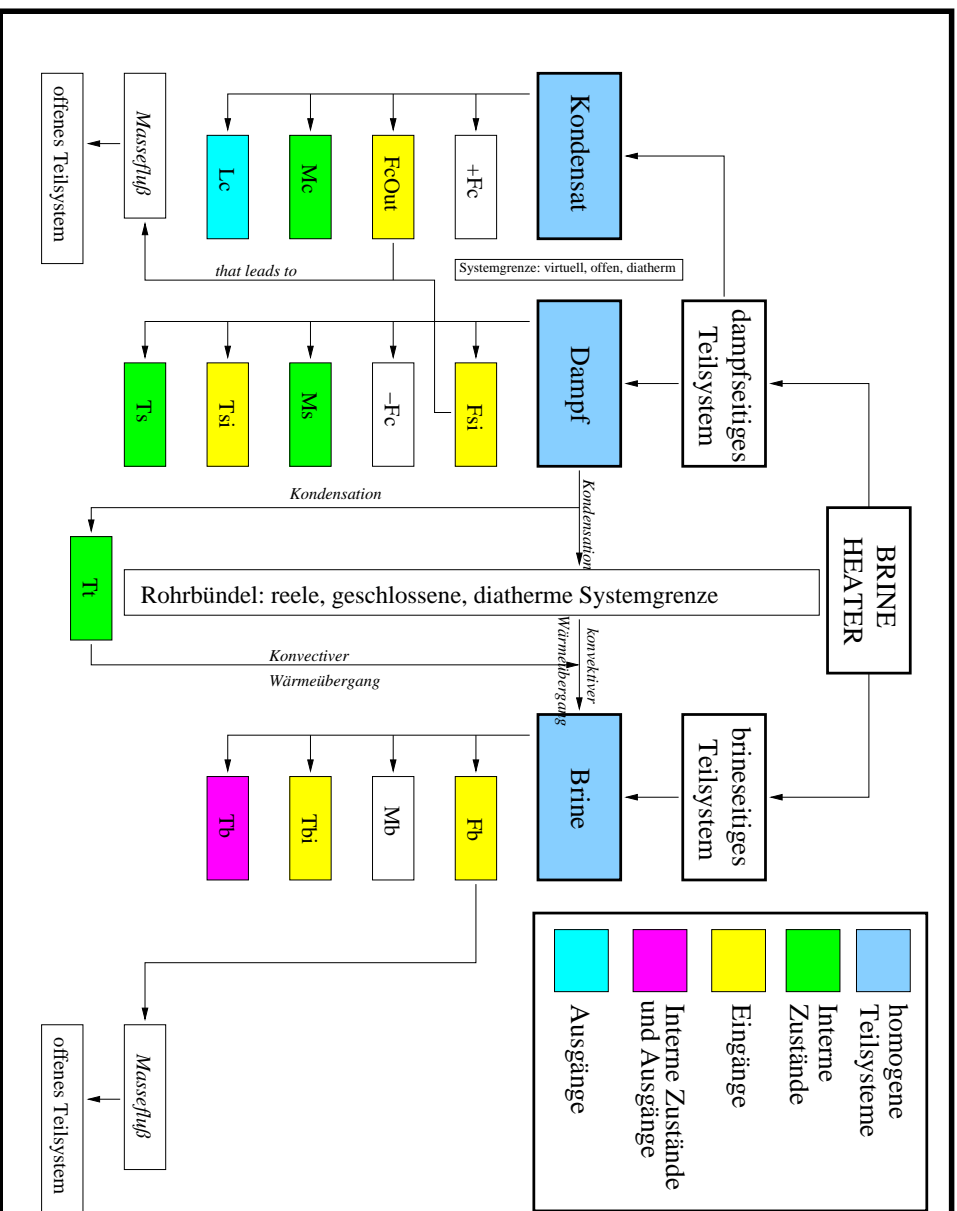
- Erforschung und Entwicklung innovativer Regelkonzepte
 - Wechselwirkung der zugeführten Wärme mit der Brinetemperatur
 - Zeitkonstanten und dynamisches Verhalten
 - statische Zustände
- Vorteile moderner Regelstrategien

Das dynamische Modell

Decomposition und Coordination

1. **Decomposition** (→ Zerlegung des Systems in Teilsysteme)
2. **Vereinfachende Annahmen** (→ Verwendungszweck)
3. **Identifikation** (→ Eingänge, interne Zustände, Ausgänge)
4. **Energie- und Massebilanzgleichungen** (→ Interaktion der Teilsysteme)
5. **Differentialgleichungen** (→ Verfeinerung der Bilanzgleichungen)
6. **Freiheitsgrad bestimmen** (→ Lösbarkeit)
7. **Simulation und Validierung** (→ Ist das Modell geeignet?)
8. **Coordination** (→ Fusion der Teilsysteme)

Das dynamische Modell Decomposition



Das dynamische Modell

Vereinfachungen (1)

- Kein Desuperheater
[keine direkte Wechselwirkung mit Brine]
- Ideale thermische Isolation des Systems
[keine Wärmeverluste an die Umgebung]
- Änderung der Brinedichte vernachlässigt
[$F_{B_i} = F_B$]
- Brine füllt Rohre voll aus
[Luft als Isolator → Effizienz]

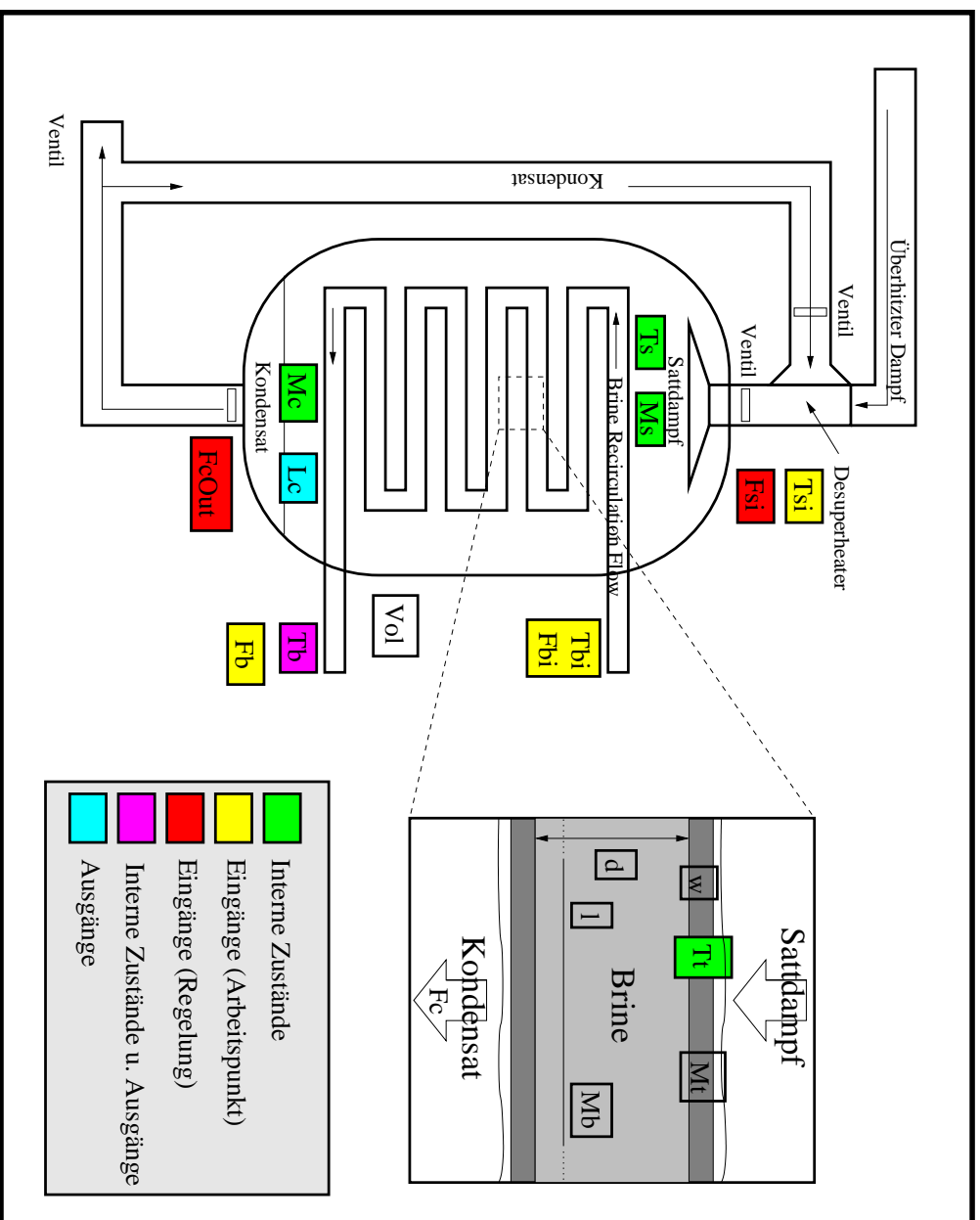
Das dynamische Modell

Vereinfachungen (2)

- Abtropfendes Kondensat liefert keine zusätzliche Wärme
[Druckvariation klein]
- Oxidation und Kesselsteinbildung in Rohren wird vernachlässigt
[anlagenspezifisch, Validierung]
- keine lokale Temperaturvariation ($\frac{\partial T}{\partial x} = \frac{\partial T}{\partial y} = \frac{\partial T}{\partial z} = 0$)
 - Modell mit verteilten Parametern
 - Partielle Differentialgleichungen

Das dynamische Modell

Identifikation - Schema



Das dynamische Modell

Energie- und Massebilanzgleichungen

$$\frac{dQ_S}{dt} = \frac{dQ_{Si}}{dt} - \frac{dQ_C}{dt} - \frac{dQ_{Env}}{dt}$$

$$\frac{dQ_T}{dt} = Q_C - Q_{Cv}$$

$$\frac{dQ_B}{dt} = \frac{dQ_{Cv}}{dt} - \frac{dQ_{Bi}}{dt}$$

$$\frac{dM_S}{dt} = F_{Si} - F_C$$

$$\frac{dM_C}{dt} = F_C - F_{COut}$$

Das dynamische Modell

Differential- und algebraische Gleichungen (1)

$$M_S \cdot c_{pS} \cdot \frac{dT_S}{dt} = F_{Si} \cdot [h''_{Si}(T_{Si}, P) - h''_S(T_S, P)] - \alpha_C \cdot A_e \cdot [T_S - T_T]$$

$$M_T \cdot c_{pT} \cdot \frac{dT_T}{dt} = \alpha_C \cdot A_e \cdot [T_S - T_T] - \alpha_{Cv} \cdot A_i \cdot [T_T - T_B]$$

$$M_B \cdot c_{pB} \cdot \frac{dT_B}{dt} = \alpha_{Cv} \cdot A_i \cdot [T_T - T_B] - F_B \cdot [h'_{Bi}(T_{Bi}, C) - h'_B(T_B, C)]$$

$$\frac{dM_S}{dt} = [F_{Si} - F_C]$$

$$\frac{dM_C}{dt} = [F_C - F_{Cout}]$$

Das dynamische Modell

Differential und algebraische Gleichungen (2)

Algebraische Gleichungen:

$$M_S Vol = Vol - v''(T_S, P) \cdot M_S$$

$$F_G = \frac{\dot{Q}}{\Delta h}$$

Das dynamische Modell

Diskrete Ereignisse und Singularitäten

Diskretes Ereignis Eigenschaft

Kein Dampf $M_S = 0$

Kein Kondensat $M_G = 0$

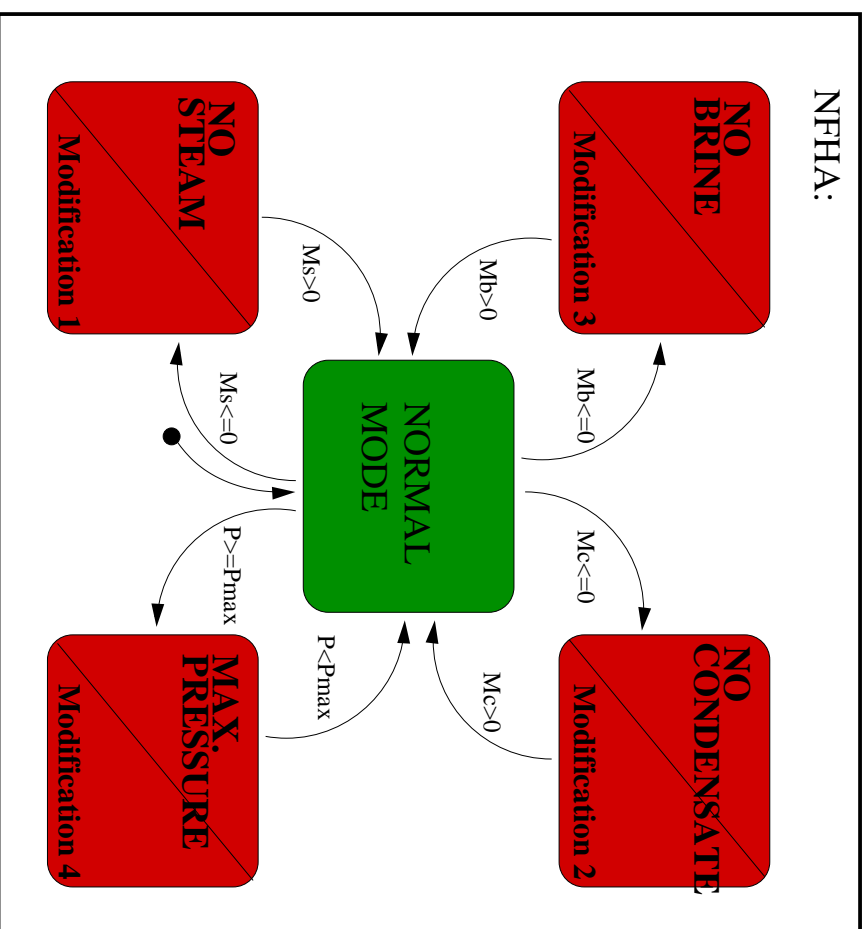
Kein Brine $M_B = 0$

Maximaldruck $P = P_{max}$

Das dynamische Modell

Der hybride Automat

nichtdeterministischer hybrider Automat:



Das dynamische Modell

Modifikation der Differentialgleichungen (1)

Modifikation 1: Kein Dampf ($M_S = 0$)

$$\frac{dT_S}{dt} = 0$$

$$\frac{dM_S}{dt} = F_{Si}$$

Modifikation 2: Kein Kondensat ($M_C = 0$)

$$\frac{dM_C}{dt} = F_C$$

Das dynamische Modell

Modifikation der Differentialgleichungen (2)

Modifikation 3: Kein Brine ($M_B = 0$)

$$\frac{dT_B}{dt} = 0$$

Modifikation 4: Maximaldruck ($P \geq P_{max}$)

$$\frac{dT_S}{dt} = -\frac{Q_C}{M_S \cdot c_{ps}}$$

$$\frac{dM_S}{dt} = -F_C$$

Das dynamische Modell

Die 4 Arbeitspunkte

(Quelle: Desalination, no.73, pp.173-190, 1999)

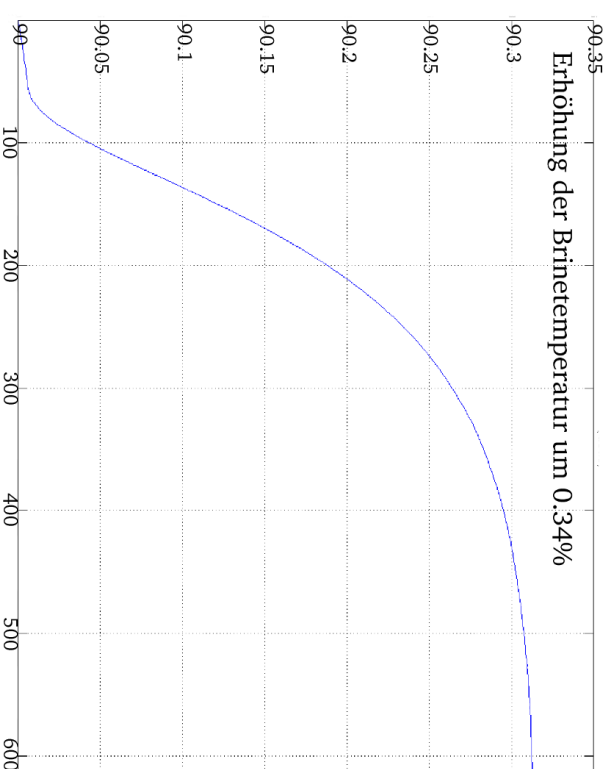
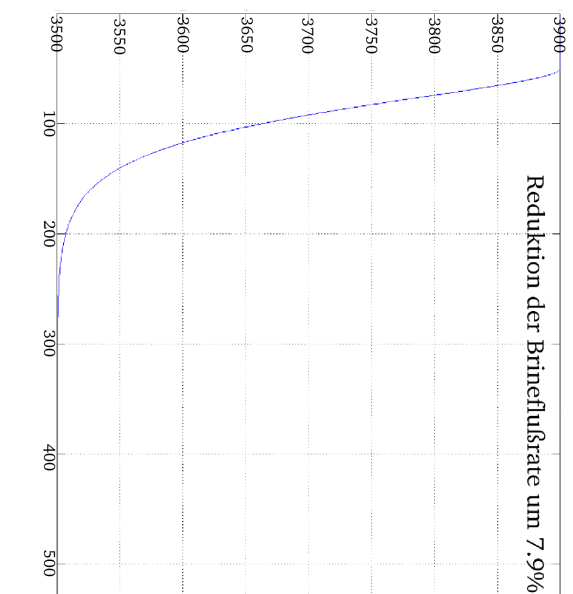
ARBEITSPUNKT 1
SOMMER / NACHT

Prozeßvariable	Quelle	Simulation
T_{Sea}	32.22° C	30° C
T_{B_i}	84.89° C	85° C
T_B (T_{BT})	90.56° C	90° C
T_{S_i}	100° C	100° C
F_B	3986.4 $\frac{kg}{s}$	3900 $\frac{kg}{s}$
F_{S_i}	39.16 $\frac{kg}{s}$	74.5 $\frac{kg}{s}$

- ARBEITSPUNKT 2 - WINTER/NACHT
- ARBEITSPUNKT 3 - SOMMER/TAG
- ARBEITSPUNKT 4 - WINTER/TAG

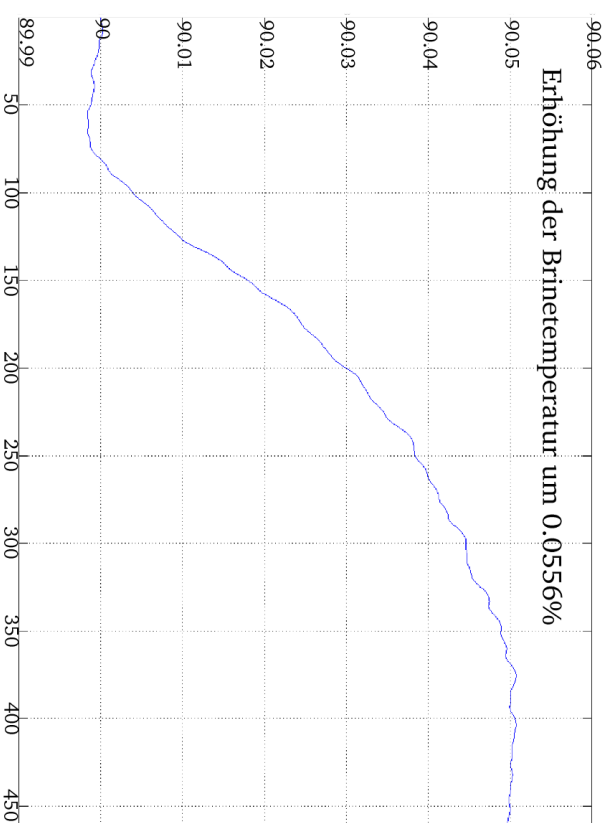
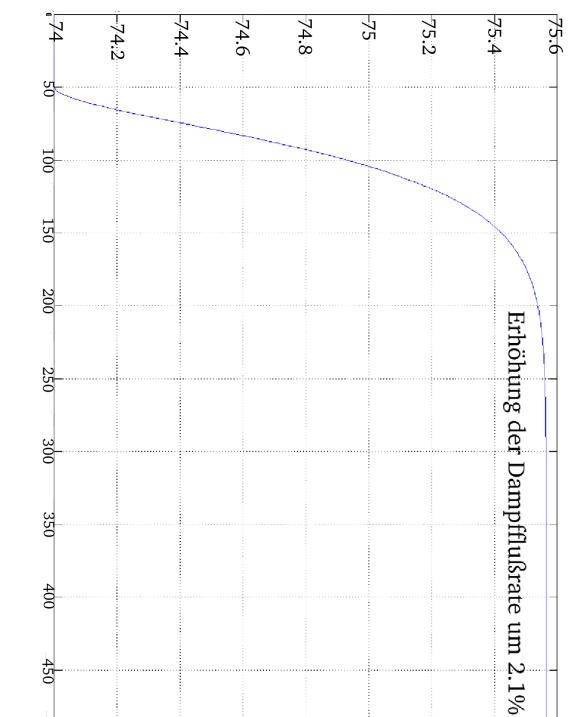
Das dynamische Modell

Simulation - Änderung der Brineflußrate F_{Bi}



Das dynamische Modell

Simulation - Änderung der Dampfflußrate F_{S_i}



Das dynamische Modell

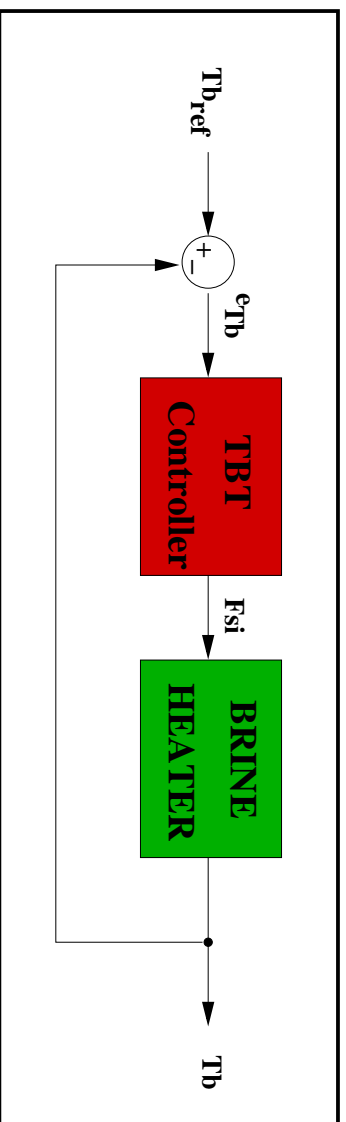
Innovationsgehalt

- Berücksichtigung des konvektiven Überganges (Nußelt-Theorie - "Ähnlichkeitstheorie")
- Wärmewirkungskette: $Q_{Si} \rightarrow Q_S \rightarrow Q_T \rightarrow Q_B$
- Rohrbündel ist eigenständiges Subsystem
- Modellierung von diskreten Ereignissen
- Variation der Sättigungstemperatur in Abhängigkeit des Kesseldrucks berechnet nach der IAPWS-IF97
- Zustandswerte von Wasser und Dampf mit der Genauigkeit der IAPWS-IF97

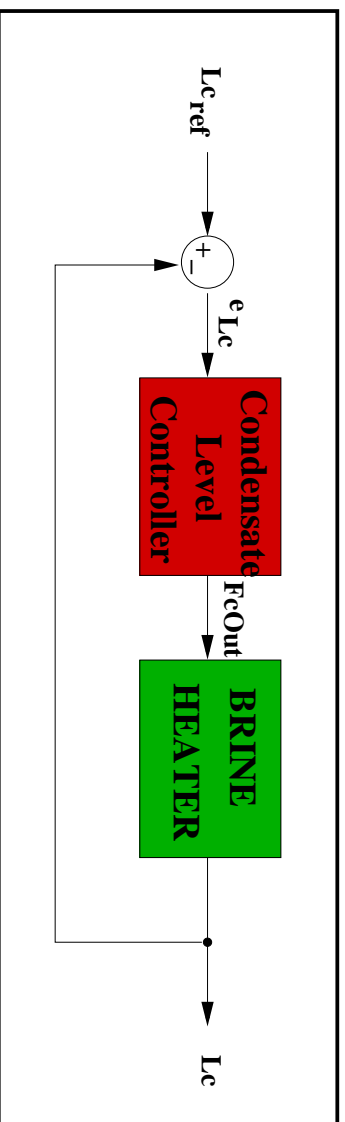
Linearisierung und Regelung

Die Regelschleifen

Top Brine Temperature control loop:



Condensate level control loop:



Linearisierung und Regelung

Die Regelstrategie

PID-Controller:

$$u(t) = K_p \cdot \left[e(t) + T_d \cdot \frac{d}{dt} \cdot e(t) + \frac{1}{T_i} \cdot \int_{t_0}^t e(t) dt \right]$$

Modified PID-Controller:

$$u(t) = K_p \cdot \left[K_b \cdot r(t) - y(t) + T_d \cdot \frac{d}{dt} \cdot e(t) + \frac{1}{T_i} \cdot \int_{t_0}^t e(t) dt \right]$$

Ziegler-Nichols Parameter:

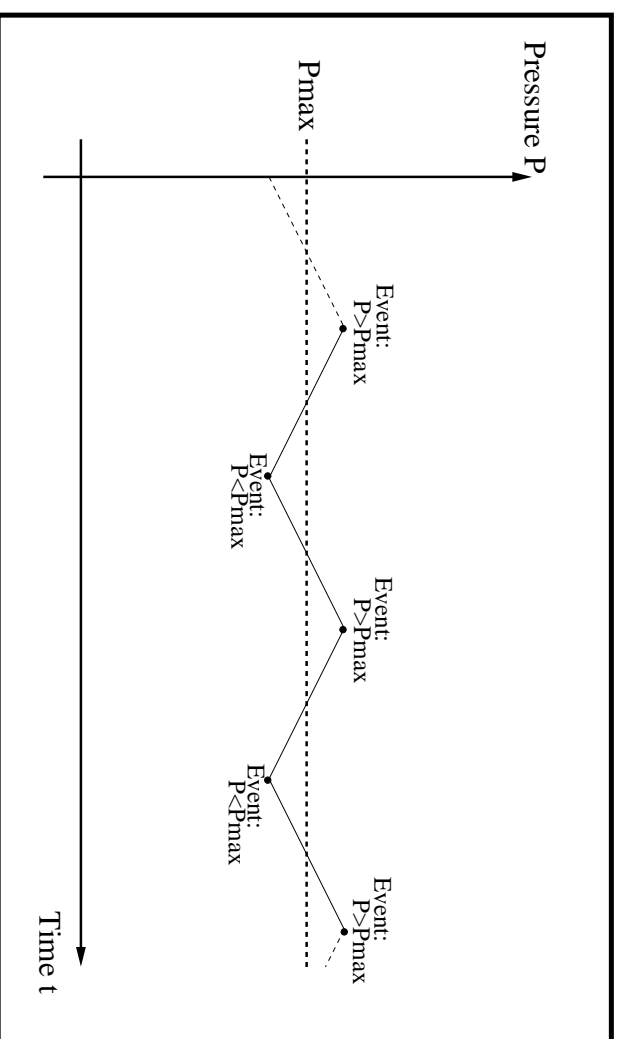
$$\begin{aligned} K_p &= \frac{T_a}{1.2 \cdot K_s \cdot T_u} \\ T_d &= 0.5 \cdot T_a \\ T_i &= 2 \cdot T_u \end{aligned}$$

+ **Anti-Windup Strategies (I-Stop, I-Reset and I-Subtraction)**

Linearisierung und Regelung

Linearisierung in 4 Arbeitspunkten

Problem der Drucksoszillation



BEMERKUNG: Amplitude hängt von der Ventilkennlinie bzw. der Berechnungsgenauigkeit ab, Oszillation

hat Auswirkungen auf Dampf- und Kondensatmasse

Linearisierung und Regelung

Problem der Druckoszillation

PROBLEM:

- Oszillation erschwert die Linearisierung
- Konvergenz des Algorithmus zur Linearisierung (1 im mod 2 ()) nicht gesichert
- Lineares Modell muß die Temperaturvariation und nicht die Druckvariation abbilden

BEOBACHTUNGEN:

- Im stationären Zustand oszillieren Dampf und Kondensatmassen um einen Mittelwert
- Auswirkung der Masseoszillation auf die Temperaturvariation ist gering
- Linearisierung ohne die Kondensatregelung ($F_{cO_{ut}'} = F_{c}$)

LÖSUNGSANSATZ:

- Konstante Masse und Dampfdraten für die Linearisierung
- Modifikation der Differentialgleichungen, sodaß keine Massevariation auftritt
- Konstanter Druck (P_{max})

Linearisierung und Regelung

Modifiziertes dynamisches Modell für die Linearisierung

$$M_S \cdot c_{pS} \cdot \frac{dT_S}{dt} = F_{Si} \cdot [h''_{Si}(T_{Si}, P) - h''_S(T_S, P)] - \alpha_C \cdot A_e \cdot [T_S - T_T]$$

$$M_T \cdot c_{pT} \cdot \frac{dT_T}{dt} = \alpha_C \cdot A_e \cdot [T_S - T_T] - \alpha_{Cv} \cdot A_i \cdot [T_T - T_B]$$

$$M_B \cdot c_{pB} \cdot \frac{dT_B}{dt} = \alpha_{Cv} \cdot A_i \cdot [T_T - T_B] - F_B \cdot [h'_{Bi}(T_{Bi}, C) - h'_B(T_B, C)]$$

$$\frac{dM_S}{dt} = 0$$

$$\frac{dM_C}{dt} = 0$$

$$M_S = 0.5 \cdot \left(M_S^{Pmax+\Delta} + M_S^{Pmax-\Delta} \right)$$

$$M_C = 0.5 \cdot \left(M_C^{Pmax+\Delta} + M_C^{Pmax-\Delta} \right)$$

Linearisierung und Regelung

Integrierte Fehler in 4 Arbeitspunkten

	P_1	P_2	P_3	P_4
SP_1	34.1335	45.7013	39.062	38.3583
SP_2	38.9341	32.4166	38.1411	43.4094
SP_3	72.8779	74.9681	72.5999	79.7223
SP_4	109.9233	111.7416	110.0951	108.9884

BEOBACHTUNG: Zusammengehörige Arbeitspunkte und Parametersätze liefern bessere Ergebnisse,

Motivation für Parameterwechsel

Parameterwechsel und stoßfreier Übergang durch hybriden Automaten

Motivation und Ziel

MOTIVATION:

- Zusammengehörige Arbeitspunkte und Parametersätze besitzen verbesserte Regelgüte
- Stoßfreier Übergang vermeidet potentielle Schäden an der Anlage und verbessert Regelgüte

ZIEL:

- Automatische Detektion des Arbeitspunktwechsels
- Ermittlung des einzusetzenden Parametersatzes
- Stoßfreie Umschaltung der Parameter

ZENTRALE FRAGEN:

- Wann findet ein Arbeitspunktwechsel statt?
- Wie wird der Arbeitspunktwechsel detektiert?
- Zu welchem Zeitpunkt soll der Parameterwechsel stattfinden?
- Wie wird der stoßfreie Übergang realisiert?

Parameterwechsel und stoßfreier Übergang durch hybriden Automaten

Arbeitspunktdetektion durch Fuzzy-Klassifikator

ZIEL:

- Detektion eines Arbeitspunktwechsels

EINGÄNGE:

- normierte Ljapunow-Funktionen, V_i^{norm} , $i = 1 \dots 4$

AUSGÄNGE:

- Arbeitspunkt $N = 1 \dots 4$

FUZZY-KLASSIFIKATOR:

- Regel- und Datenbasis

Parameterwechsel und stoßfreier Übergang durch hybriden Automaten

Fuzzy-Klassifikator - Regel- und Datenbasis

DATENBASIS:

Zugehörigkeitsfunktion für Ein- und Ausgänge

Eingang i - linguistische Variable V_i^{norm} , beschrieben durch
linguistischen Wert $Error_i$

Ausgang - linguistische Variable *Setpoint*, beschrieben durch
4 Singletons

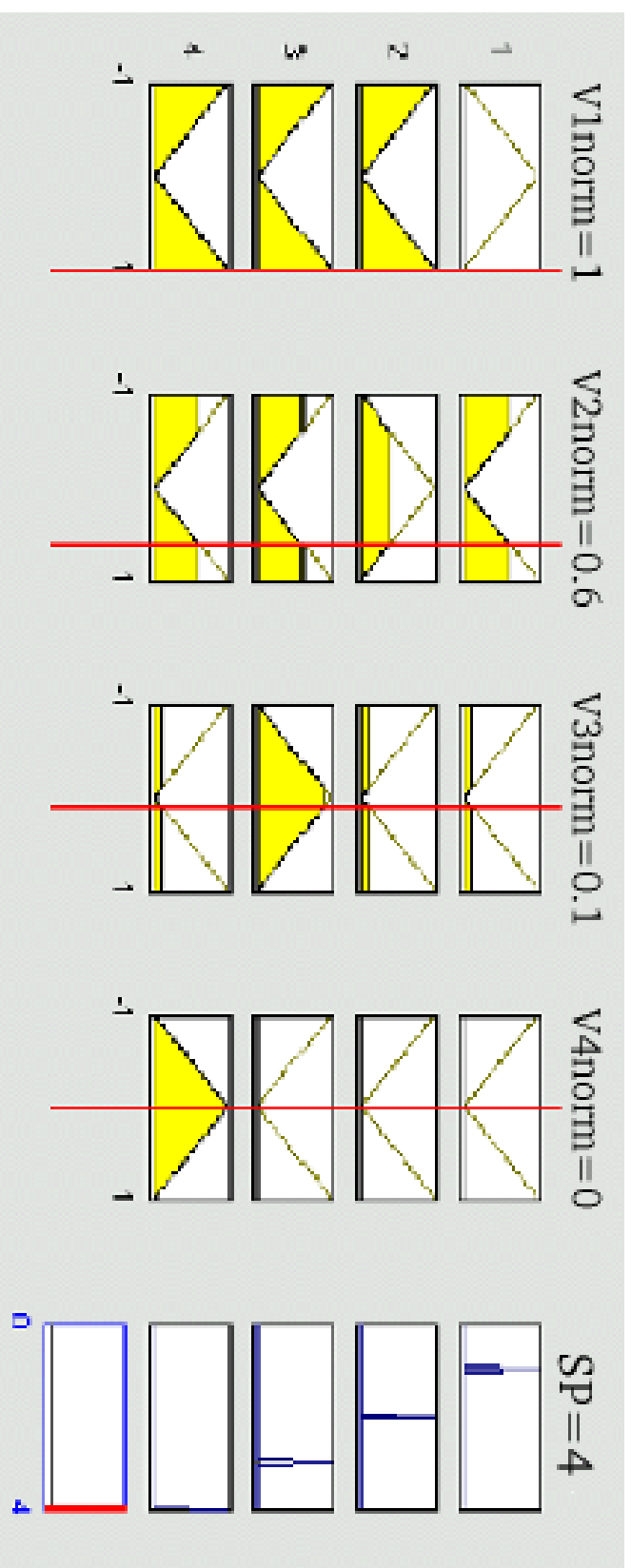
REGELBASIS:

IF ($V_i^{norm} == Error_i$) & ($V_i^{norm} \neq Error_j$) ($\forall j \neq i$)
THEN ($SP = SP_i$)

Parameterwechsel und stoßfreier Übergang durch hybriden Automaten

Fuzzy-Klassifikator - grafische Darstellung

DIE REGELBASIS



Parameterwechsel und stoßfreier Übergang durch hybriden Automaten

Fuzzy Klassifikator - theoretischer Hintergrund

Die Min-Switch Strategie

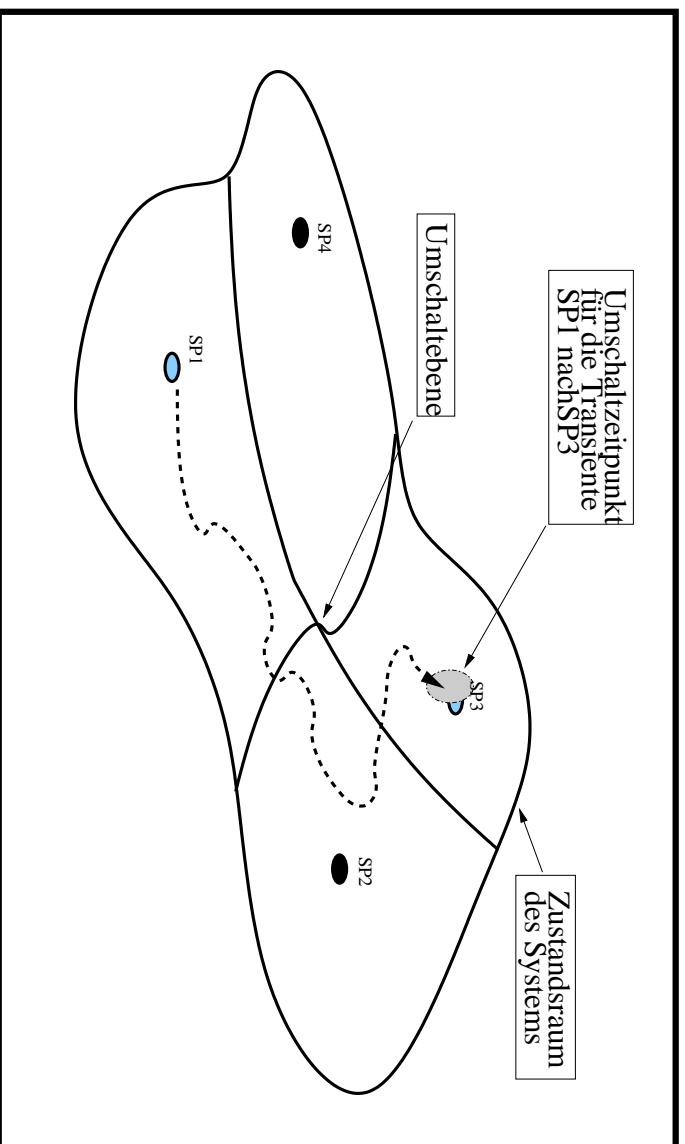
MIN-SWITCH STRATEGIE

- Basierend auf der Ljapunow-Stabilitätstheorie
- Parameterwechsel entsprechend dem minimalen Ljapunov-Kandidaten
- Stabilität durch Min-Switch Strategie garantiert

Parameterwechsel und stoßfreier Übergang durch hybriden Automaten

Zeitpunkt der Parameterumschaltung - 2 Methoden

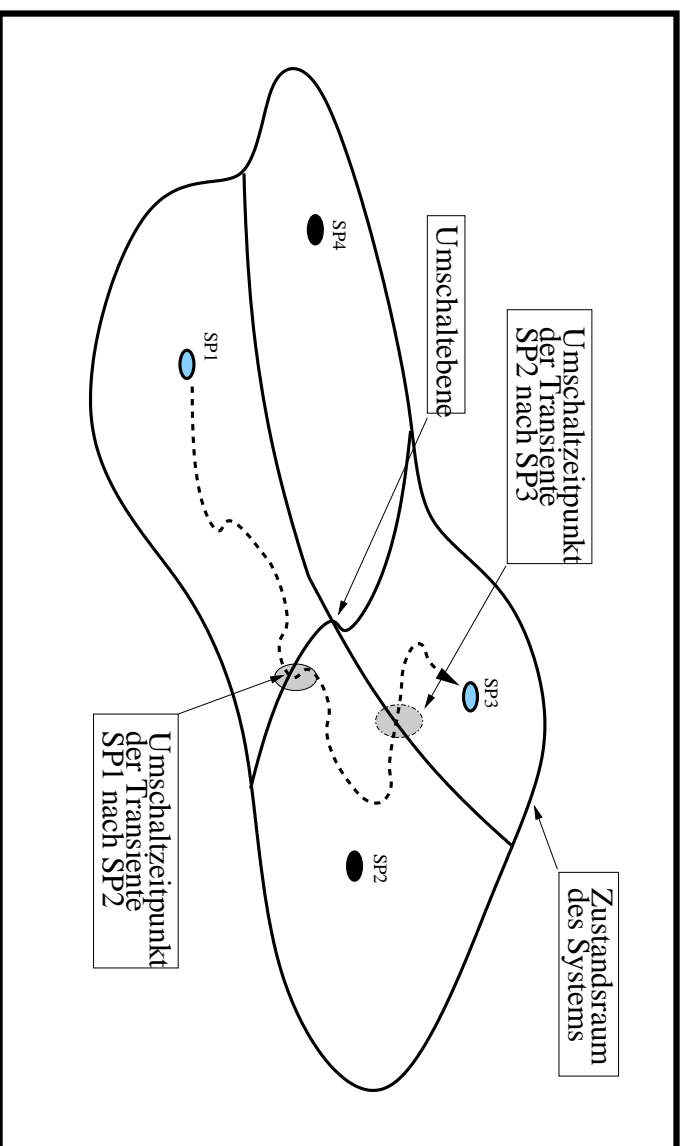
METHODE 1: Umschaltung im Arbeitspunkt



Parameterwechsel und stoßfreier Übergang durch hybriden Automaten

Zeitpunkt der Parameterumschaltung - 2 Methoden

METHODE 2: Umschaltung auf der Transiente



Parameterwechsel und stoßfreier Übergang durch hybriden Automaten

Der stoßfreie Übergang

IDEE: Eliminierung des Regelfehlers

METHODE 1:

$$T_B^{Ref} \leftarrow T_B \text{ einmal (konventioneller Ansatz)}$$

Nachteil: Parameterwechsel im Arbeitspunkt

METHODE 2:

$$T_B^{Ref} \leftarrow T_B \text{ permanent (innovativer Ansatz)}$$

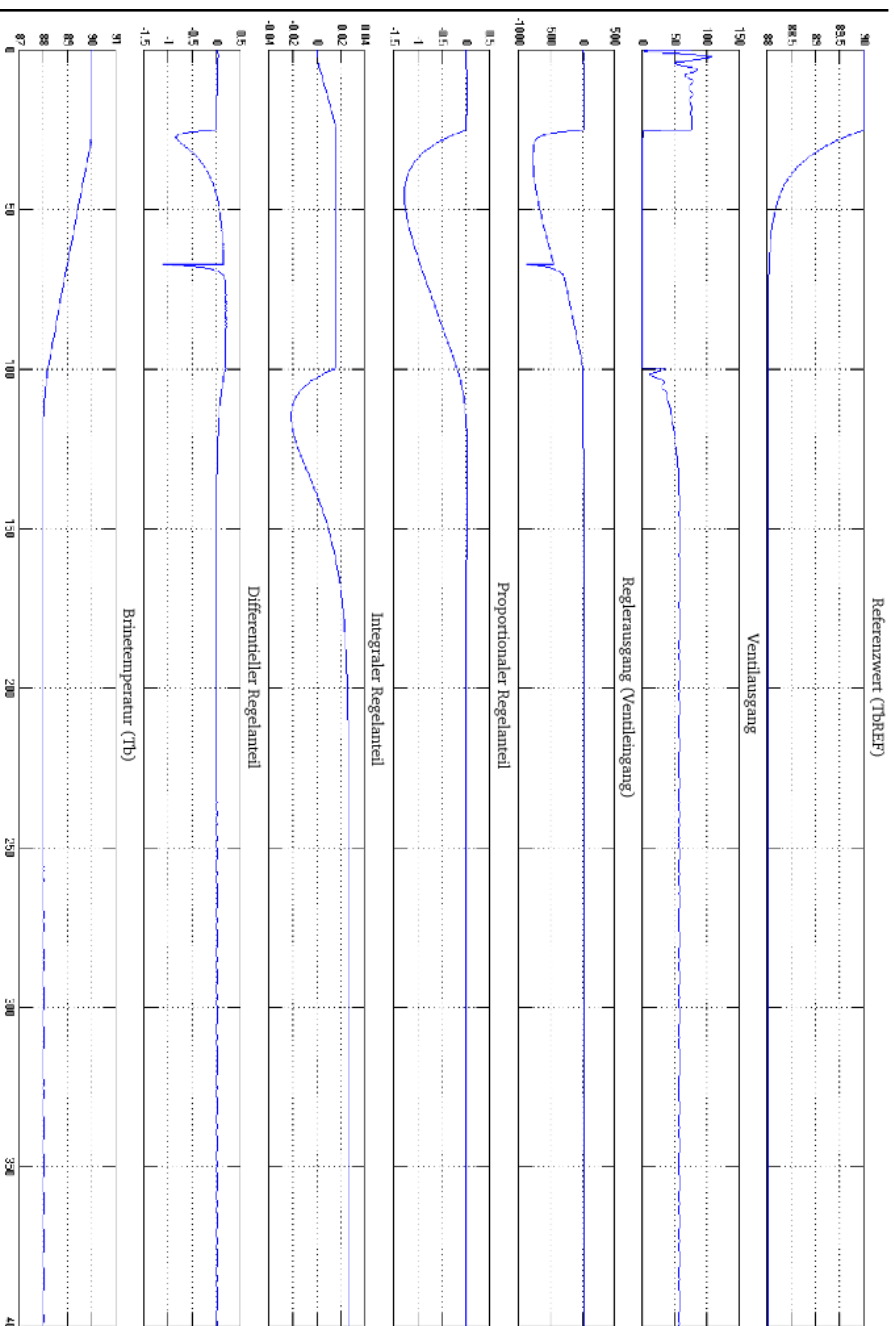
Vorteil: Parameterwechsel bei Detektion des Arbeitspunktwechsels

BEMERKUNGEN:

- Detektion des Arbeitspunktwechsels \neq Arbeitspunkt erreicht
- Hohe Zeitkonstanten des Systems \rightarrow sofortiger Parameterwechsel mit Methode 1 nicht möglich

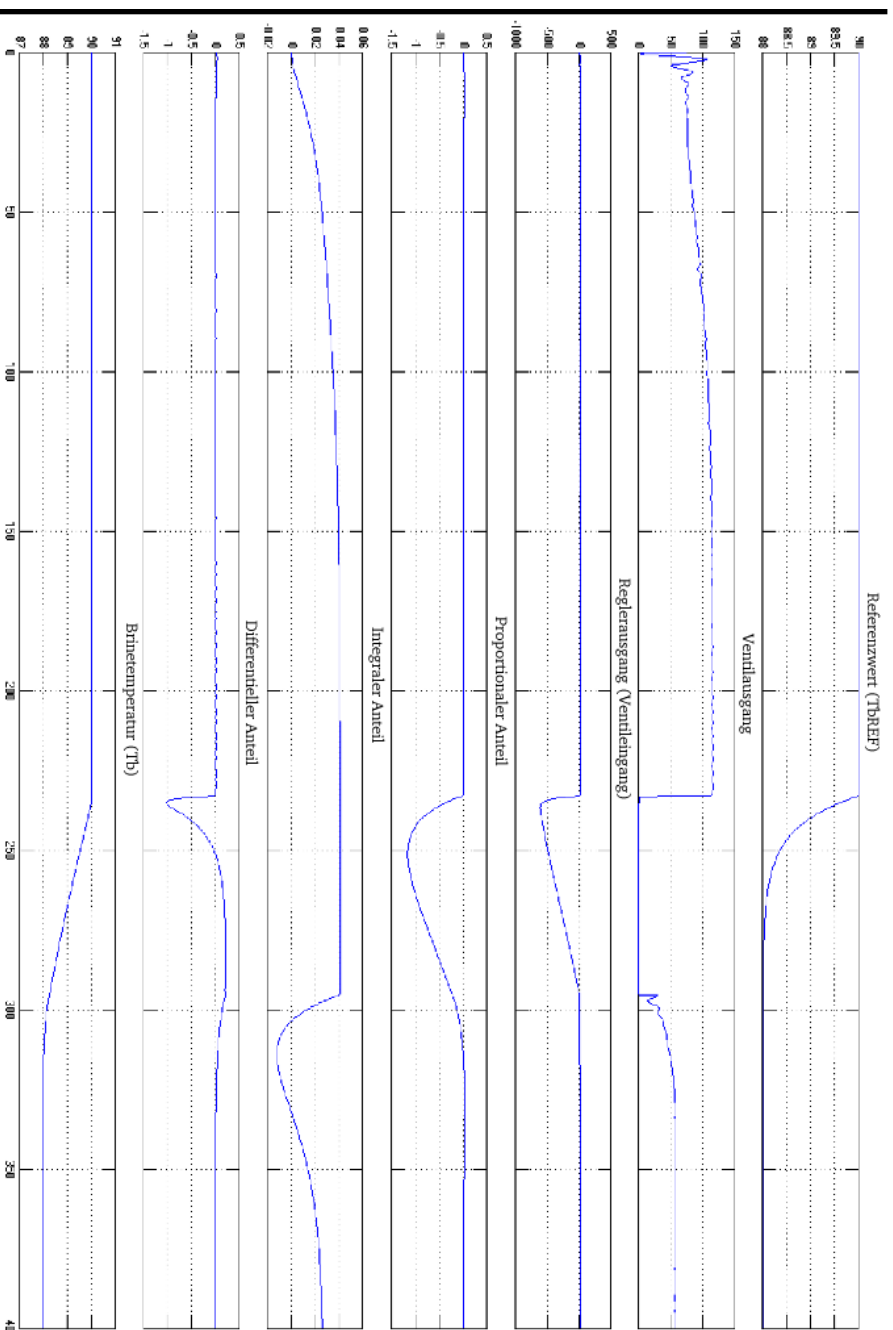
Parameterwechsel und stoßfreier Übergang durch hybriden Automaten

Simulationsergebnisse - keine Methode



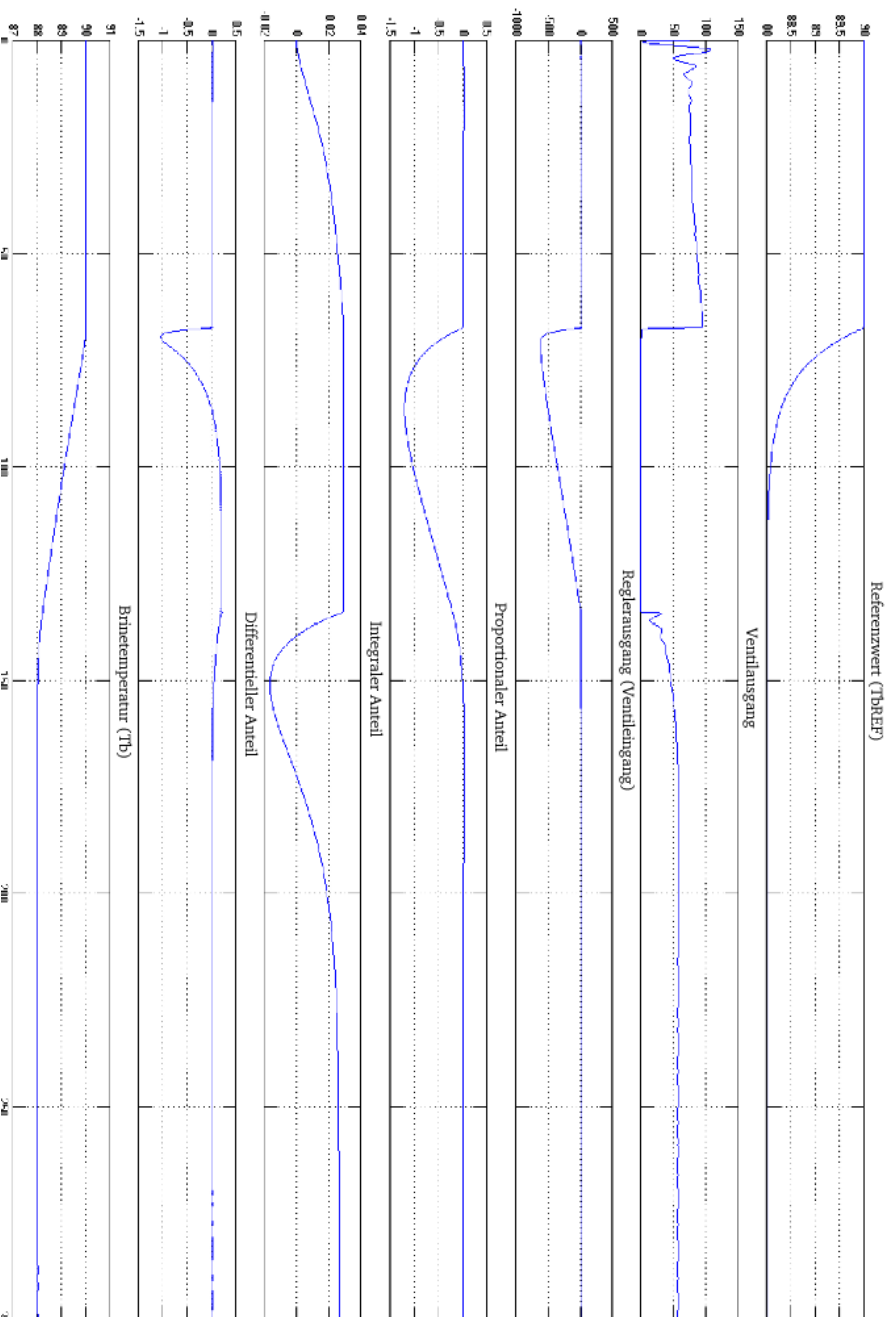
Parameterwechsel und stoßfreier Übergang durch hybriden Automaten

Simulationsergebnisse - Methode 1



Parameterwechsel und stoßfreier Übergang durch hybriden Automaten

Simulationsergebnisse - Methode 2



Parameterumschaltung & Regelung

Innovationsgehalt

- Modifizierter PID-Regler & TBT-Regelung
- Min Switch Strategie & TBT-Regelung
- Linerierungsansatz
- Parameterwechsel auf der Transiente (Methode 2)
- Fuzzy-Klassifikator zur Arbeitspunktdetektion

Szenariogenerator

Fuzzy-Ansatz

MOTIVATION:

Automatische Wahl der Arbeitspunkte in Abhängigkeit der Meerwassertemperatur

EINGANG:

Meerwassertemperatur

AUSGANG:

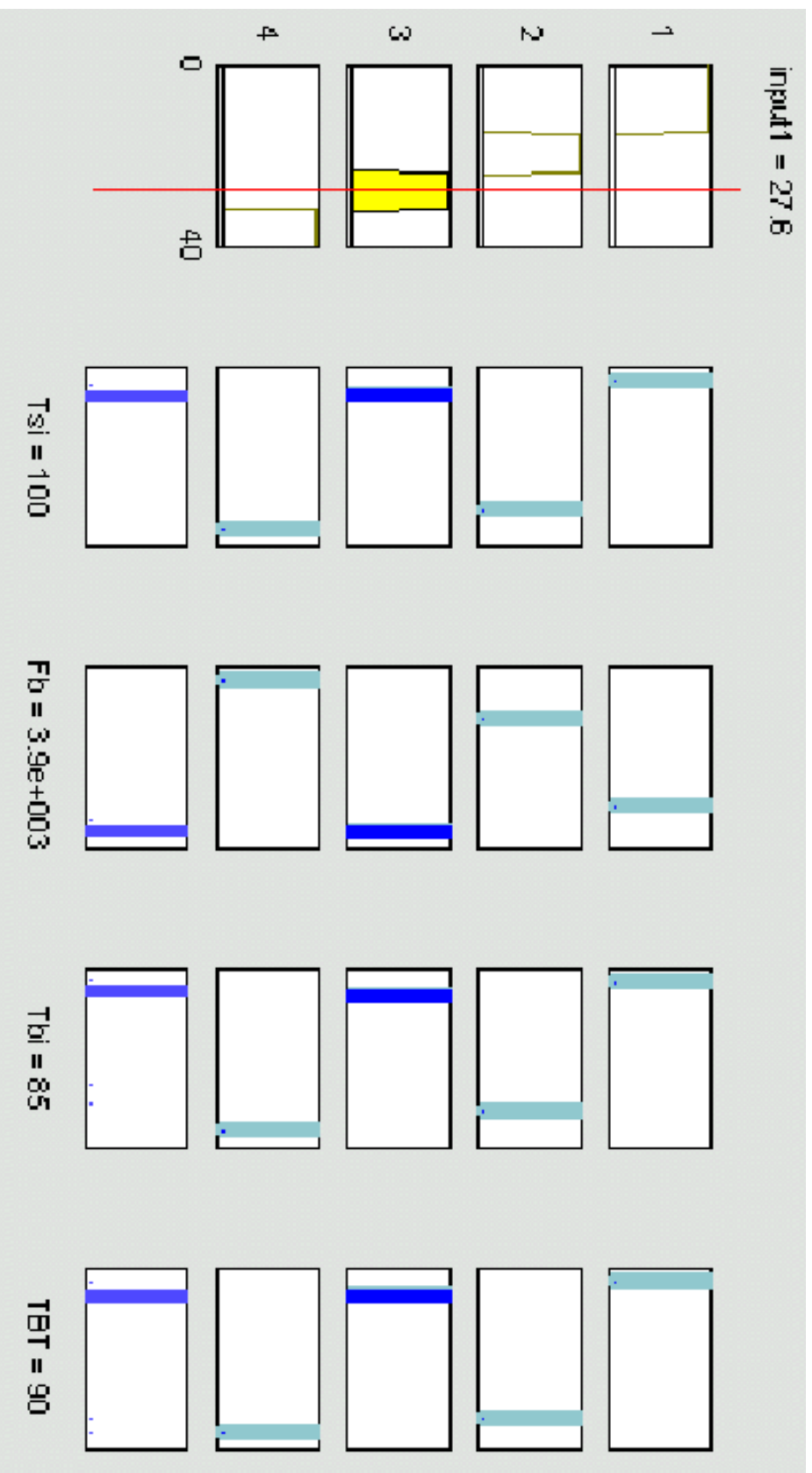
Referenzwerte für die gesamte Entsalzungsanlage

BEMERKUNG:

T_{Sea} nur ein mögliches Kriterium → ökonomische Kriterien (Kosten, Ausbringung)

Scenario Generation

Regel- und Datenbasis



Zusammenfassung und Ausblick

- Hybrides Modell → Parameter, Oxidation und Kesselsteinbildung, zusätzliche Ereignisse
- Regelung → diskrete Regelung, robuste Regelung, ...
- Parameterwechsel → Arbeitspunktdetektion (Matrix P)
- stoßfreie Umschaltung
- Szenariogenerator → ökonomische Kriterien