



Wintersemester 2005/06

**Fundamente der Computational Intelligence**  
**(Vorlesung)**

Prof. Dr. Günter Rudolph

Fachbereich Informatik

Lehrstuhl für Algorithm Engineering





## Inhalt

- Fuzzy Mengen
- Fuzzy Relationen
- Fuzzy Logik
- Approximatives Schließen (Teil 1)
- Approximatives Schließen (Teil 2)
- Approximatives Schließen (Teil 3)
- Fuzzy Regelung (Teil 1)
- Fuzzy Regelung (Teil 2)  → Heute



### Defuzzifizierung

- Maximummethode

- nur aktive Regel mit höchstem Erfüllungsgrad wird berücksichtigt
  - geeignet für Mustererkennung / Klassifikation
  - Entscheidung für eine Alternative von endlich vielen
- Auswahl unabhängig von Erfüllungsgrad der Regel (0.05 vs. 0.95)
- bei Regelung: unstetiger Ausgangsgrößenverlauf (Sprünge)

- Maximummittelwertmethode

- alle aktive Regeln mit höchstem Erfüllungsgrad werden berücksichtigt
  - Interpolationen möglich, können aber nicht benutzbar sein
  - wohl nur sinnvoll bei benachbarten Regeln mit max. Erfüllung
- Auswahl unabhängig von Erfüllungsgrad der Regel (0.05 vs. 0.95)
- bei Regelung: unstetiger Ausgangsgrößenverlauf (Sprünge)



### Defuzzifizierung

- Schwerpunktmethode (Center of Gravity, COG)
  - alle aktiven Regeln werden berücksichtigt
    - aber numerisch aufwändig ...      ...gilt heute nur für HW-Lösung
    - Ränder können nicht in Ausgabe erscheinen ( ∃ work-around )
  - bei nur einer aktiven Regel: Auswahl unabh. vom Erfüllungsgrad
  - stetige Verläufe der Ausgangsgrößen
- „Flächenmethode“ (Center of Area, COA)
  - gedacht als Approximation von COG
  - seien  $\hat{y}_k$  die Schwerpunkte der Ausgabemengen  $B'_k(y)$ :

$$y_A = \frac{\sum_k A_k(x_0) \cdot \hat{y}_k}{\sum_k A_k(x_0)}$$

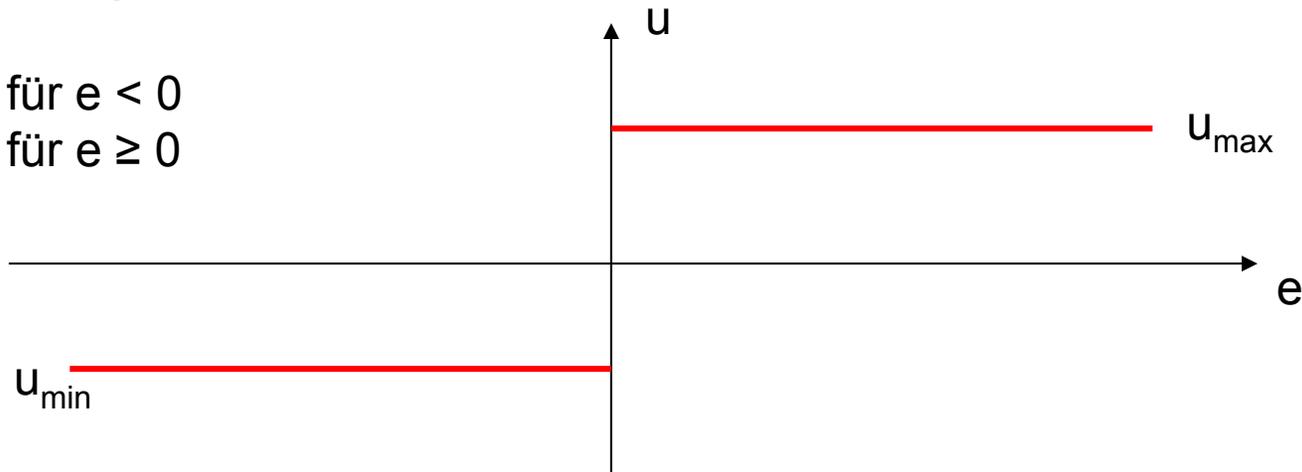


## Kennfeldregler

- Regelabweichung  $e(t) = w(t) - y(t) = \text{Sollwert} - \text{Istwert}$
- für jede mögliche Regelabweichung wird Steuergröße hinterlegt:
  - dargestellt als Kennlinie  $e$  vs.  $u$   
(bzw. als Kennfeld bei höheren Dimensionen)

### Bsp: Zweipunktregler

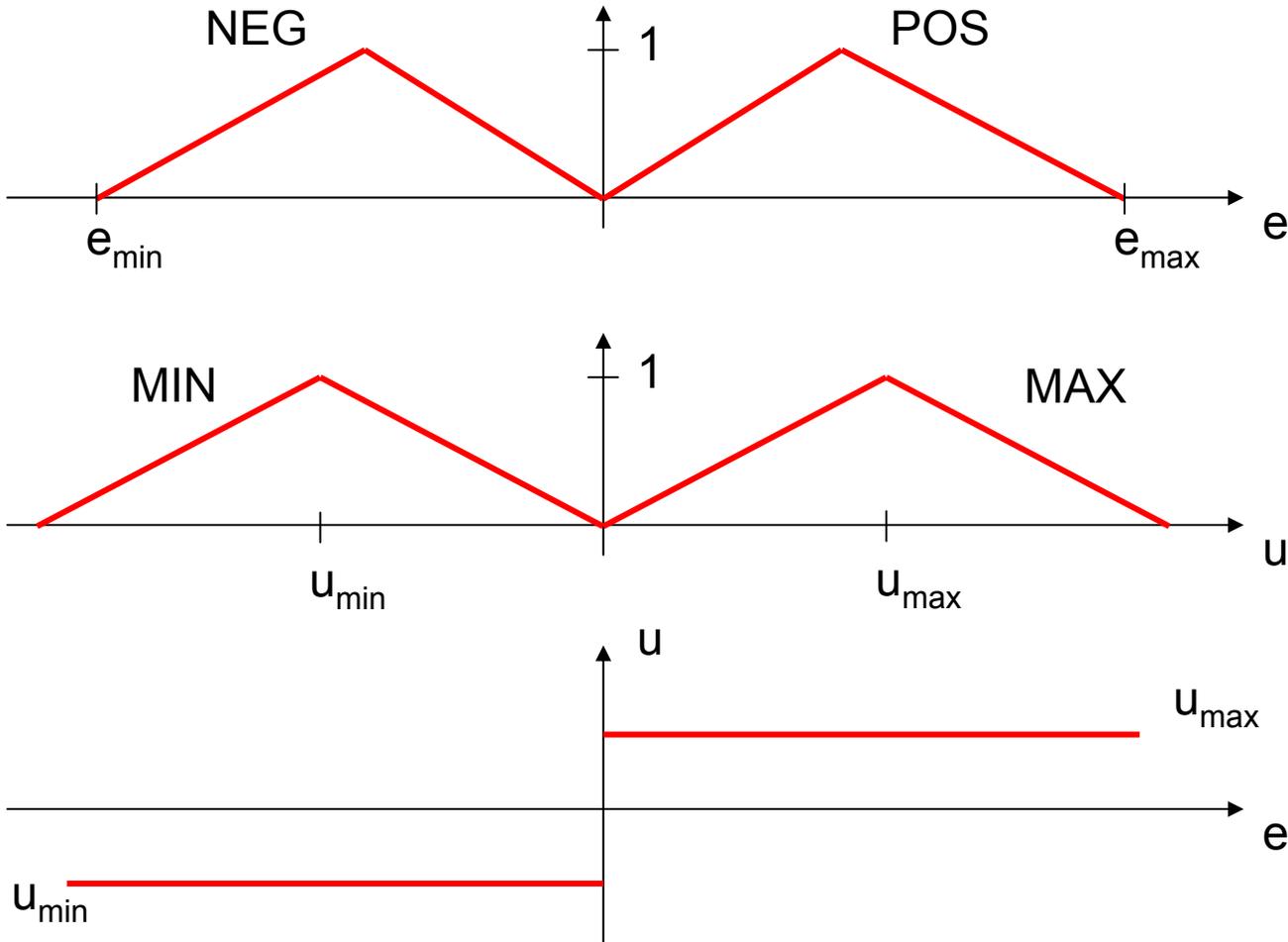
$$u = \begin{cases} u_{\min}, & \text{für } e < 0 \\ u_{\max}, & \text{für } e \geq 0 \end{cases}$$





## Fuzzy-Version des Zweipunktreglers

IF e=NEG THEN u=MIN  
IF e=POS THEN u=MAX





### Fazit:

- Fuzzy-Regler stellen keinen neuen Reglertyp dar
- Fuzzy-Regler sind Kennfeldregler
  - ⇒ typischerweise ist Kennfeld stark nichtlinear

### Neu:

- Parametrisierung des Reglers:
  - nicht explizit durch Grafik, Formel, Angabe von Steigung / Knickpunkte
  - sondern implizit in linguistischer Form durch
    - Festlegung der Zugehörigkeitsfunktionen für Eingangs- und Stellgrößen
    - Formulierung der Regelbasis
      - ⇒ viele Freiheitsgrade!



### TSK-Regler

- Takagi, Sugeno, Kang (ab ca. 1985)
- Keine linguistische Variable für Stellgröße  $u$

IF  $e_1 = A_1$  AND  $e_2 = A_2$  AND ... AND  $e_n = A_n$  THEN

$$u = p_0 + p_1 \cdot e_1 + \dots + p_n \cdot e_n$$

- $p_i \in \mathbb{R}$  sind Parameter
- keine Defuzzifizierung i.e.S. mehr
- man erhält von Regel  $k$  einen Vorschlag  $u^{(k)}$  für Stellgröße  $u$
- Aggregation:

$$u = \frac{\sum_k A^{(k)}(e) \cdot u^{(k)}}{\sum_k A^{(k)}(e)}$$



### TSK-Regler

- Beispiel: Auto um die Kurve lenken

M. Sugeno & M. Nishida (1985):  
Fuzzy Control of a Model Car,  
in Fuzzy Sets and Systems 16:103-113.



### TSK-Regler: Aufgaben

1. Bestimmung der linguistischen Terme für Eingangsgrößen
2. Bestimmung der Zugehörigkeitsfunktionen
3. Bestimmung der  $m \cdot (n + 1)$  Parameter bei  $m$  Regeln

← wenn lineare Funktion

### Punkte 1 + 2 wie bisher → wie kommt man an die Parameter?

- numerische Optimierung (z.B. evolutionäre Algorithmen)
- „Lernen“ an Beispielen durch z.B. neuronale Netze
- Identifikation des Verhaltens eines menschlichen Reglers (protokollieren)

⇒ wenn via Optimierung: was wären Gütekriterien?



### Güte von Reglern: Integralkriterien

1. quadratische Regelfläche

$$Q = \int_{t=0}^{\infty} e_t^2 dt \quad \rightarrow \text{min!}$$

2. betragslineare Regelfläche

$$Q = \int_{t=0}^{\infty} |e_t| dt \quad \rightarrow \text{min!}$$

3. zeitgewichtete Regelflächen k-ter Ordnung

$$Q = \int_{t=0}^{\infty} t \cdot |e_t|^k dt \quad \rightarrow \text{min!}$$



### Güte von Reglern: Kenngrößenkriterien (Beispiele)

1. bleibende Regelabweichung

$$Q = e_B \rightarrow \text{min!}$$

2. Abweichung von vorgegebener Überschwingweite  $\Delta h^*$

$$Q = |\Delta h - \Delta h^*| \rightarrow \text{min!}$$

### Güte von Reglern: Verlaufskriterien

- z.B. Abweichung von vorgegebenem Sollverlauf  $y^*(t)$

$$Q = \int_{t=0}^{\infty} |y(t) - y^*(t)|^k dt \rightarrow \text{min!}$$