

Vorlesung Computational Intelligence:

Teil 2: Fuzzy-Logik

Defuzzifizierung, Fuzzy-Regelungen, Praktische Empfehlungen

Ralf Mikut, Wilfried Jakob, Markus Reischl

Karlsruher Institut für Technologie, Institut für Automation und angewandte Informatik

E-Mail: ralf.mikut@kit.edu, wilfried.jakob@kit.edu

jeden Donnerstag 14:00-15:30 Uhr, Nusselt-Hörsaal

- 2 Fuzzy-Logik
 - 2.1 Von der scharfen Logik zur Fuzzy-Logik
 - 2.2 Fuzzy-Mengen
 - 2.3 Fuzzifizierung
 - 2.4 Fuzzy-Operatoren
 - 2.5 Inferenz
 - 2.6 Defuzzifizierung**
 - 2.7 Fuzzy-Regelungen
 - 2.8 Praktische Empfehlungen

Operation: Berechnung eines scharfen Wertes aus der Fuzzy-Menge der Ausgangsgröße (Ergebnis der Akkumulation)

Mehrere Varianten:

1. Maximum-Methode (Wert mit der höchsten Zugehörigkeit)
2. Schwerpunkt -Methode (COG - Center of Gravity)
3. Schwerpunkt -Methode für Singleton-Systeme (COGS - Center of Gravity for Singletons) und Takagi-Sugeno-Systeme (COGTS)

Weitere Methoden existieren (hier nicht behandelt) :

- Flächenmedianmethode
- Hyperdefuzzifizierung (Umgang mit negativen Empfehlungen)

- **Operation:** Berechnung eines scharfen Wertes aus der Fuzzy-Menge der Ausgangsgröße (Ergebnis der Akkumulation bei Mamdani-Systemen, sonst Ergebnis der Aktivierung)

$$y = \operatorname{argmax}_y \mu_y(y, \mathbf{x}) \text{ (Mamdani-Systeme)}$$

$$y = \operatorname{argmax}_{C_r} \mu_{C_r}(\mathbf{x}) \text{ (Singleton- und Takagi-Sugeno-Systeme)}$$

- Auflösung des Konfliktes, wenn mehrere Maxima existieren (z.B. bei Verwendung von Minimum als UND-Operator)
 - linkes Maximum (LM)
 - rechtes Maximum (RM)
 - mittleres Maximum (Mean of Maxima - MOM)
- Kommentare:
 - erzeugt Sprünge im Ein-Ausgangs-Verhalten
 - besonders geeignet, wenn die Ausgangsterme wertediskret sein müssen (Beispiel Gänge im Schaltgetriebe, Fehlertypen usw.)

- **Operation:** Berechnung eines scharfen Wertes aus der Fuzzy-Menge der Ausgangsgröße (Ergebnis von Akkumulation)

$$\hat{y} = \frac{\int y \cdot \mu_y(y, \mathbf{x}) \cdot dy}{\int \mu_y(y, \mathbf{x}) \cdot dy}$$

- Bemerkungen:
 - geeignet, wenn stetiges Ein-Ausgangs-Verhalten gewünscht ist
 - Trapezfunktionen als Randzugehörigkeitsfunktionen unzulässig (defuzzifizierter Wert unendlich)
 - asymmetrische Dreieckfunktionen am Rand u.U. problematisch (z.B. $m_1=m_2=0$, $b_1=0$, $b_2=1$: defuzzifizierter Wert kann Maximum der ZGF nicht erreichen)
 - Reparatur durch "erweiterte Schwerpunktmethode", die dann ohne Rücksicht auf wirkliche ZGF $b_1=b_2$ setzt, so dass alle Werte aus dem Definitionsbereich im Ergebnis der Defuzzifizierung auftreten können

- COGS: Verwendung von Singletons als Ausgangs-ZGF oder Umwandlung von dreieckförmigen ZGF in Singletons in der Berechnung der Defuzzifizierung, entweder auf den Ergebnissen der Aktivierung oder der Akkumulation I:

$$\hat{y} = \frac{\sum_{r=1}^{r_{max}} y_r \cdot \mu_{C_r}(\mathbf{x})}{\sum_{r=1}^{r_{max}} \mu_{C_r}(\mathbf{x})}$$

$$\hat{y} = \frac{\sum_{c=1}^{m_y} b_c \cdot \mu_{B_c, AkI}(\mathbf{x})}{\sum_{c=1}^{m_y} \mu_{B_c, AkI}(\mathbf{x})}$$

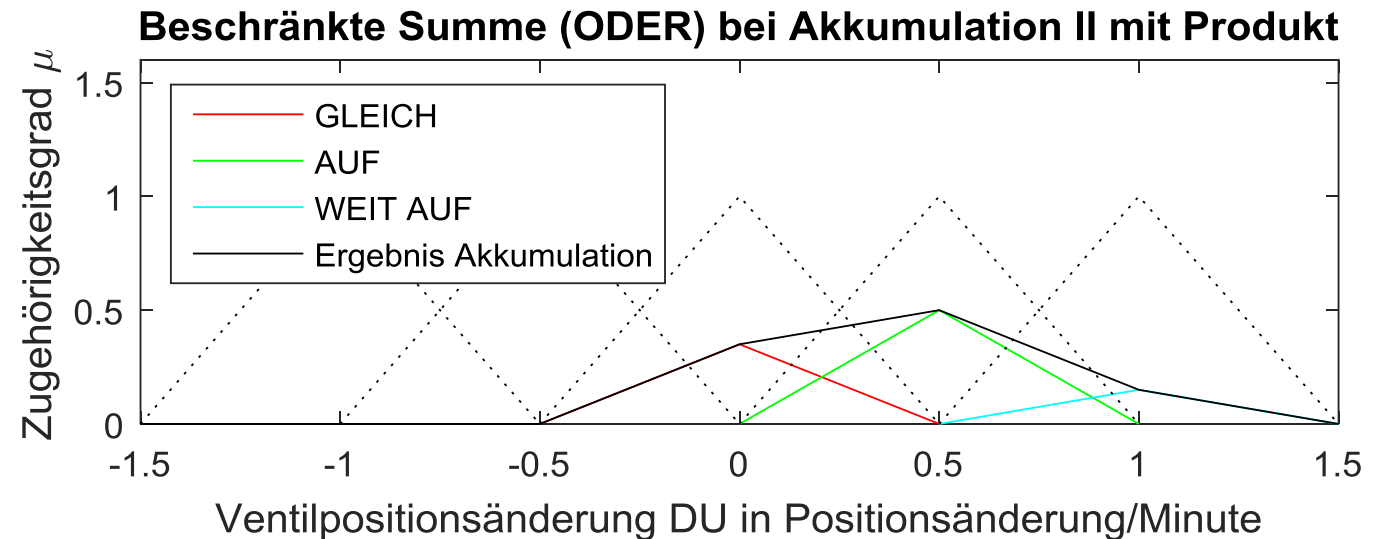
- COGTS: jede Regel hat eine Funktion als Konklusion

$$\hat{y} = \frac{\sum_{r=1}^{r_{max}} f_r(\mathbf{x}) \cdot \mu_{C_r}(\mathbf{x})}{\sum_{r=1}^{r_{max}} \mu_{C_r}(\mathbf{x})} \quad (\text{Takagi-Sugeno-Systeme})$$

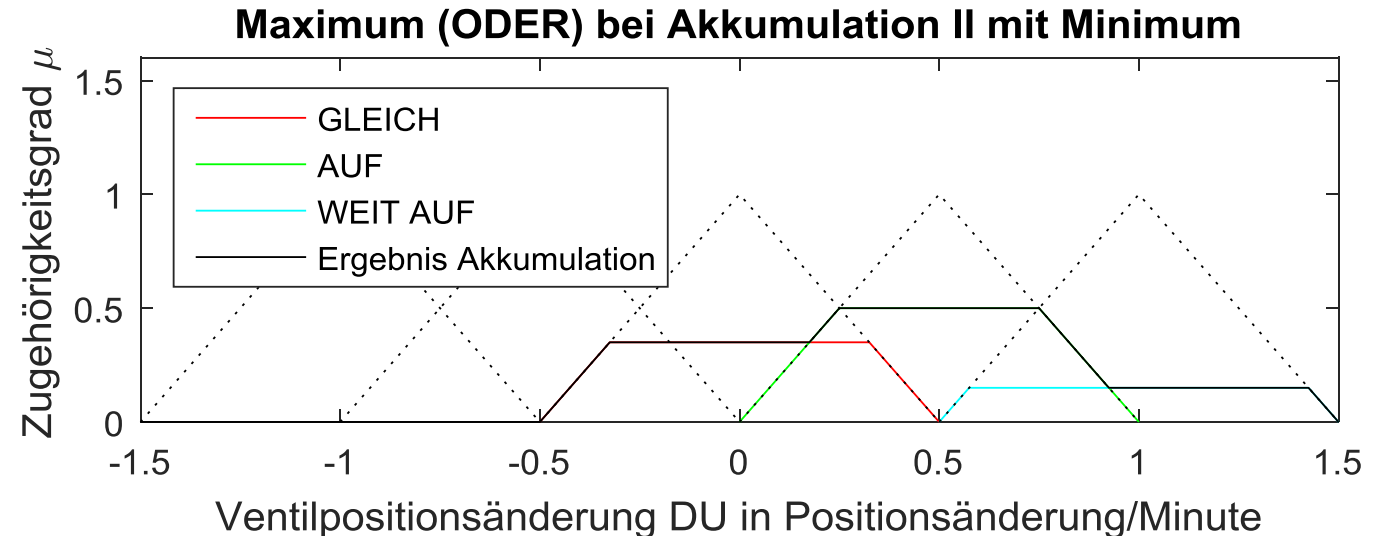
- Bemerkungen:
 - ersetzt Akkumulation
 - sehr geringer Rechenaufwand und gute Ergebnisse

Beispiel Defuzzifizierung

- Oberes Bild:
 $y = 0.4$ (COG-Methode)
 $y = 0.4$ (COGS-Methode)
 $y = 0.5$ (Maximum-Methode)



- Unteres Bild
 $y = 0.25$ (LM-Methode)
 $y = 0.4$ (COGS-Methode)
 $y = 0.5$ (MOM-Methode)
 $y = 0.75$ (RM-Methode)
 $y = ?$ (COG-Methode)
HAUSAUFGABE



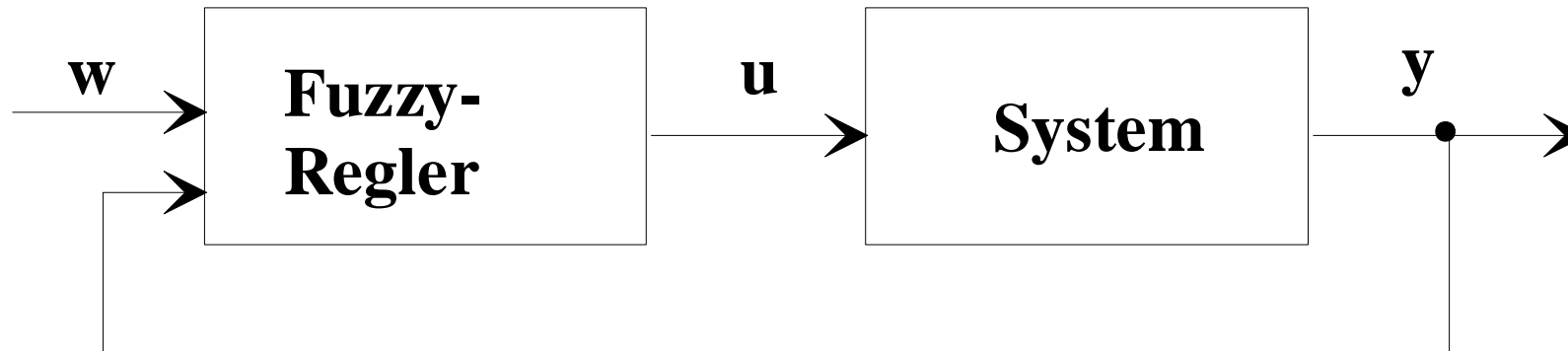
ACHTUNG! In beiden Bildern $y = \Delta U$ wegen des Namens der Ausgangsgröße im Beispiel!

- 2 Fuzzy-Logik
 - 2.1 Von der scharfen Logik zur Fuzzy-Logik
 - 2.2 Fuzzy-Mengen
 - 2.3 Fuzzifizierung
 - 2.4 Fuzzy-Operatoren
 - 2.5 Inferenz
 - 2.6 Defuzzifizierung
 - 2.7 Fuzzy-Regelungen**
 - 2.8 Praktische Empfehlungen

- fast alle Fuzzy-Systeme statisch:
 - Ausgang hängt nur von den Eingangsgrößen, nicht von inneren Zuständen ab
 - kann als nichtlineares Kennfeld interpretiert werden
 - Fuzzy-Systeme mit interner Dynamik werden in dieser Vorlesung nicht behandelt
- Dynamik entsteht durch Vor- oder Nachschalten von meist linearen Teilsystemen wie Integrator/Summe, Differenz/Differenzierer
- auch TS-Systeme können durch geeignete Eingänge oder Rückkopplungen von Ausgängen dynamisch gestaltet werden

Strukturen von Fuzzy-Reglern (1)

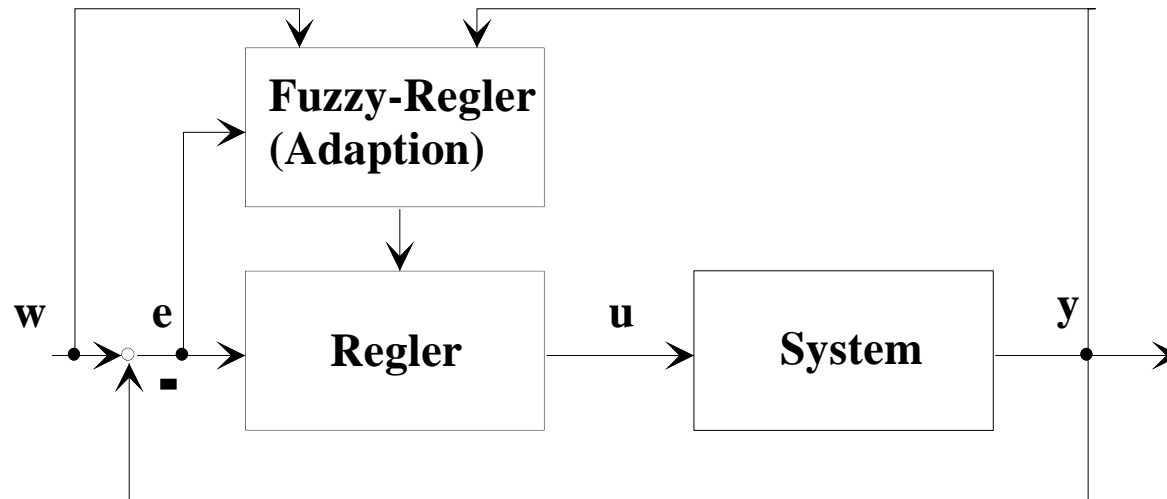
- Häufigste Struktur: Fuzzy-Regler anstelle eines konventionellen Reglers, im einfachsten Fall so:



- Fuzzy-Regler kann Mamdani-, Singleton- oder Takagi-Sugeno-System sein
- Mögliche Modifikationen:
 - zusätzliche Dynamik durch Vor- oder Nachschalten von meist linearen Teilsystemen wie Integrator/Summe, Differenz/Differenzierer
 - zusätzliche Eingangsgrößen wie gemessene Störgrößen usw.
 - berechnete Größen wie Regeldifferenz $e = \text{Führungsgröße } w - \text{Regelgröße } y$ statt Eingänge w, y
- Takagi-Sugeno-System mit linearen Reglern in den Konklusionen kann auch als weiches Umschalten zwischen verschiedenen Reglern interpretiert werden

Strukturen von Fuzzy-Reglern (2)

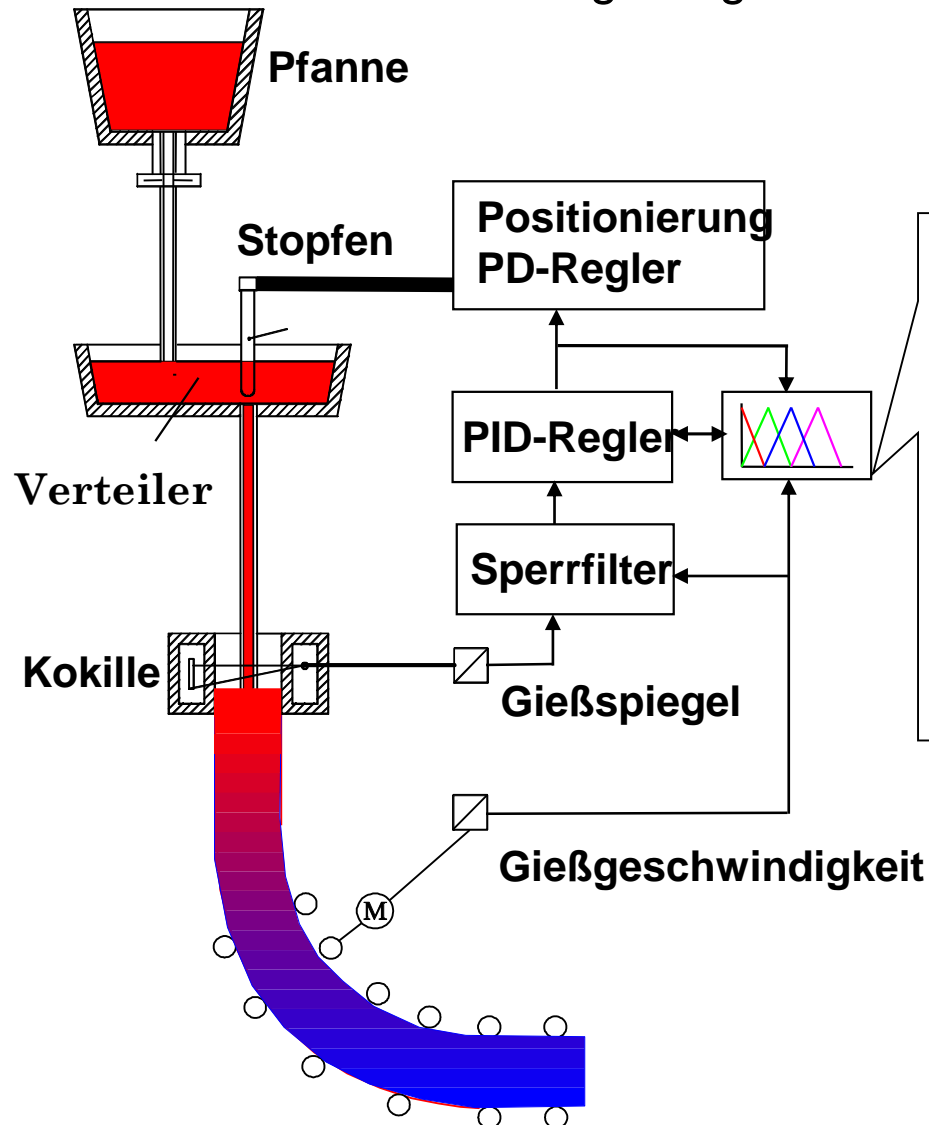
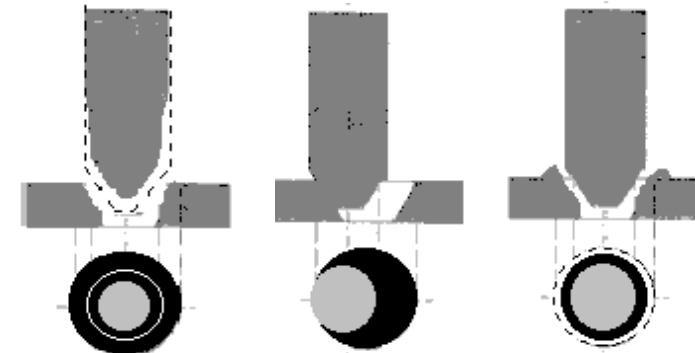
- Alternative Struktur: Fuzzy-adaptiver Regler: Ausgangsgröße des Fuzzy-Reglers sind die Parameter eines unterlagerten Reglers (z.B. PID-Regler)



- Fuzzy-Regler kann hier meistens Mamdani-System
- Mögliche Modifikationen:
 - zusätzliche Dynamik durch Vor- oder Nachschalten von meist linearen Teilsystemen wie Integrator/Summe, Differenz/Differenzierer
 - zusätzliche Eingangsgrößen wie gemessene Störgrößen usw.
- identisches Verhalten kann auch als Takagi-Sugeno-System mit linearen Reglern in den Konklusionen realisiert werden (siehe vorherige Folie)

Beispiel für Fuzzy-adaptiven Regler (1)

Probleme beim Stopfen:
Abnutzung, Exzentrizität,
Ablagerungen

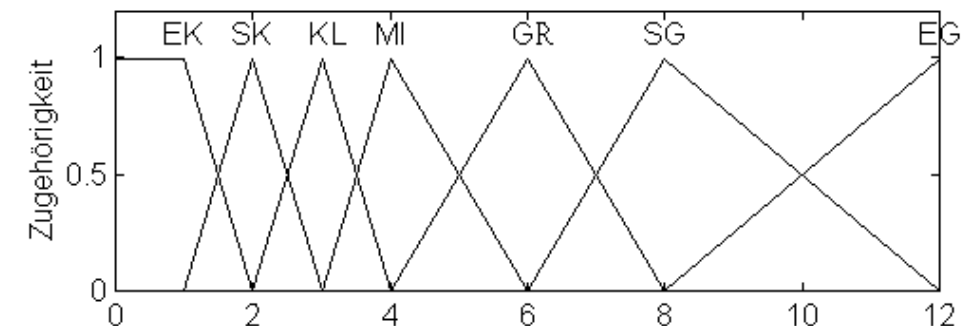
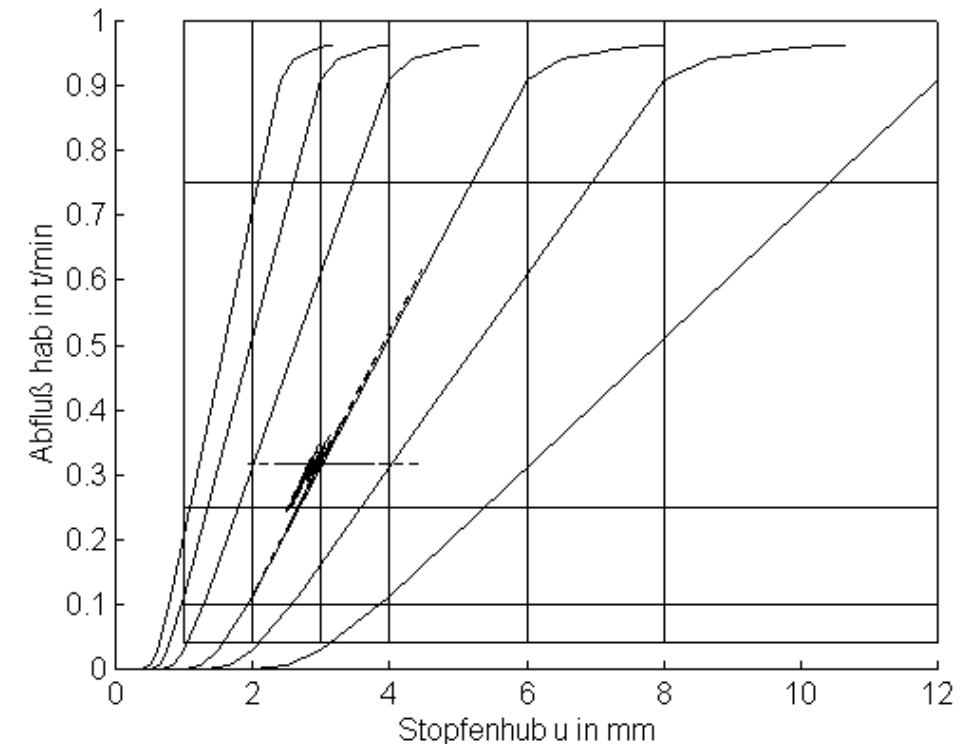
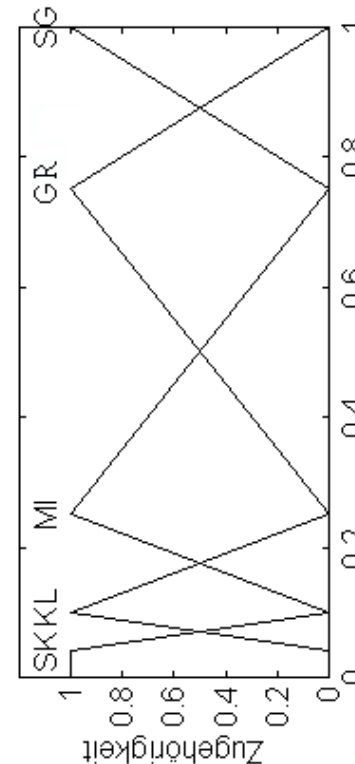


- Datenbank (Formate, Stahlsorten)
- Störungsüberwachung
- Start / Stop Gießen
- **Fuzzy-Plausibilität**
- **Fuzzy-Adaption**
- Fuzzy-Korrektur Filter
- Identifikation Stopfenkennlinie
- Störgrößenaufschaltung

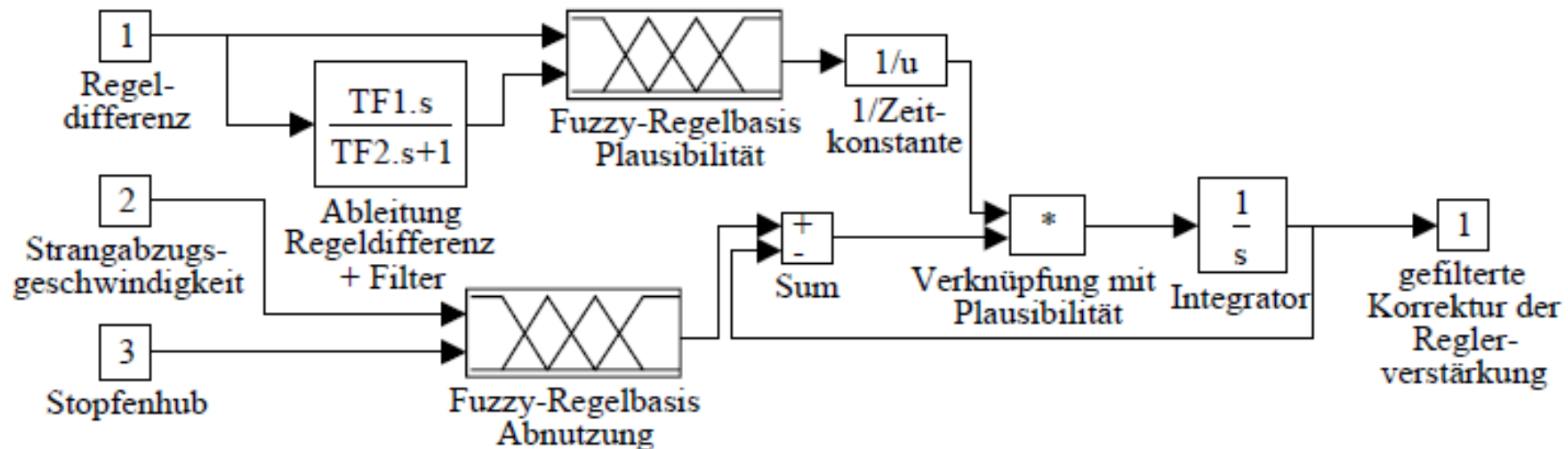
Adaptionsblock mit Fuzzy-Komponenten

Beispiel für Fuzzy-adaptiven Regler (2)

- Idee:
- Erkennung der Abnutzung (= Steilheit der Stopfenkennlinie)
- Eingangsgrößen:
 - Stopfenhub U
 - Abzugsgeschwindigkeit (Störgröße) AB
- Ausgangsgrößen:
 - Abnutzung
 - Reglerverstärkung
- Ergebnis wird nur übernommen, wenn System eingeschwungen ist (Plausibilität)
- Absicherung durch Abschaltvorrichtungen



Beispiel für Fuzzy-adaptiven Regler (3)



Plausibilität

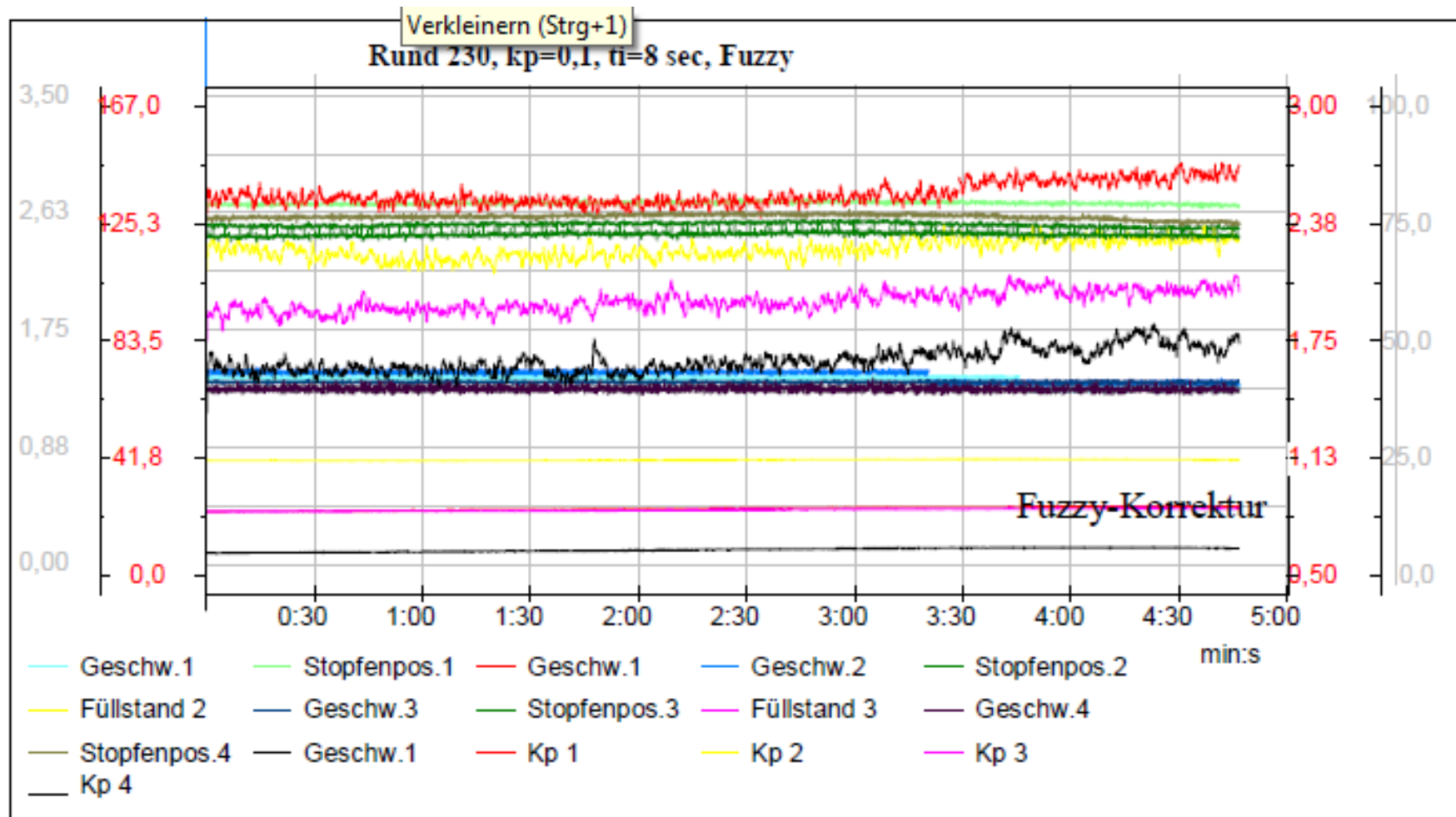
E	NEG	N	POS
DE			
NEG	NA / GR	NA / GR	NA / GR
N	NA / GR	AG / KL	NA / GR
POS	NA / GR	NA / GR	NA / GR

Abnutzung (1. Term) und Reglerverstärkung (2. Term)

	AB	SK	KL	MI	GR	SG
U						
EK		GR / KL	SG / SK	EG / EK	EG / EK	EG / EK
SK		K / GR	MI / MI	GR / KL	EG / EK	EG / EK
KL		SK / SG	SK / SG	MI / MI	GR / KL	EG / EK
MI		SK / SG	SK / SG	KL / GR	MI / MI	EG / EK
GR		SK / SG	SK / SG	SK / SG	MI / MI	EG / EK
SG		SK / SG	SK / SG	SK / SG	K / GR	EG / EK
EG		SK / SG	SK / SG	SK / SG	SK / SG	EG / EK

Beispiel für Fuzzy-adaptiven Regler (4)

- Verläufe der Gießspiegel und Stopfenpositionen für Fuzzy-adaptive PID-Regler mit variablen Parametern (Baotou, China)
- vergleichbare Regelgüten und tolerable Schwankungen

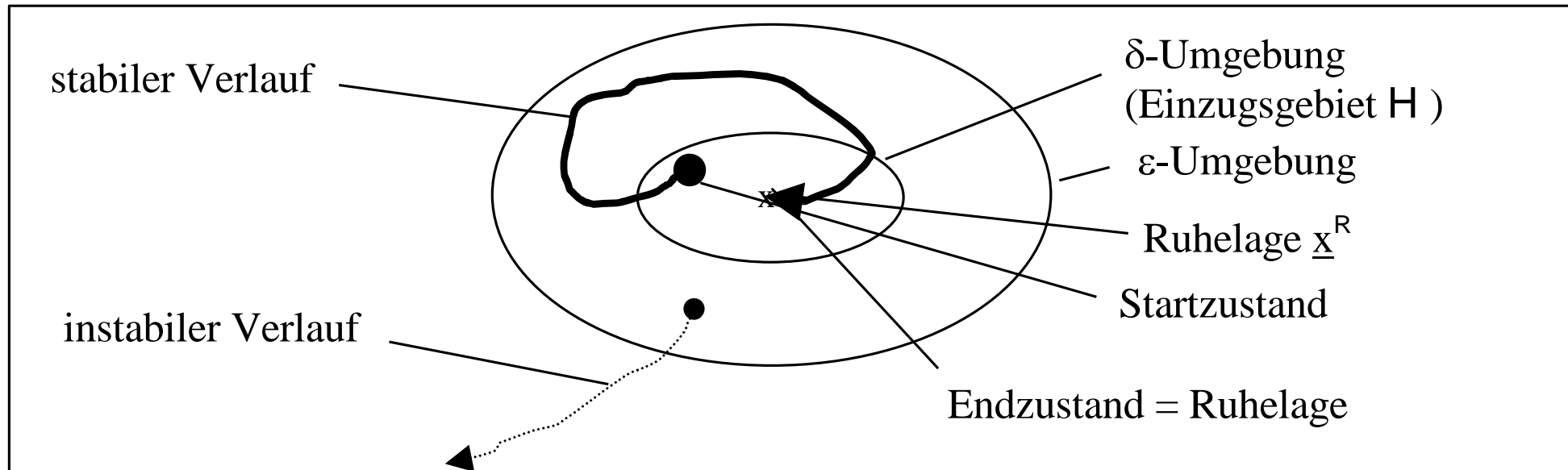


Zusammenfassung: Strukturen von Fuzzy-Reglern

Grundstruktur: Fuzzy-	Eingangsgrößen (zeitdiskrete Realisierung)	Ausgangsgrößen (zeitdiskrete Realisierung)
P-Regler	Regeldifferenz	Stellgröße
P-Regler	Änderung Regeldifferenz	Änderung Stellgröße
I-Regler	Summe Regeldifferenz	Stellgröße
I-Regler	Regeldifferenz	Änderung Stellgröße
D-Regler	Änderung Regeldifferenz	Stellgröße
PI-Regler	Änderung Regeldifferenz und Regeldifferenz	Änderung Stellgröße
Führungsgrößen- aufschaltung	Führungsgröße	Stellgröße bzw. Änderung der Stellgröße
Störgrößen- aufschaltung	(messbare) Störgröße	Stellgröße bzw. Änderung der Stellgröße
Fuzzy-adaptiver Regler	Regeldifferenz, Führungs-, Regel-, Stör-, Stellgrößen	Parameter für andere Regler (z.B. Verstärkungen für PID-Regler, Regelauswahl für Fuzzy-Regler)

- Nichtlinearität des Fuzzy-Reglers bedeutet Schwierigkeiten beim Nachweisen von Eigenschaften des geschlossenen Regelkreises (z.B. Stabilität, Robustheit usw.)
- Stabilität:
 - Modell der Regelstrecke unbekannt:
 - hier kein Stabilitätsnachweis möglich
 - Eigenschaften müssen durch Testen am realen System gezeigt werden
 - nur für nicht sicherheitskritische Systeme oder Überwachung zur Laufzeit, bei Bedarf Umschalten auf sicheren Betrieb oder Abschaltung
 - Modell der Regelstrecke bekannt:
 - formeller Stabilitätsnachweis für nichtlineares Gesamtsystem, siehe folgende Folien
 - simulative Erprobung (nur für nicht sicherheitskritische Systeme) und dann Testen am realen System
 - Überwachung zur Laufzeit, bei Bedarf Umschalten auf sicheren Betrieb oder Abschaltung

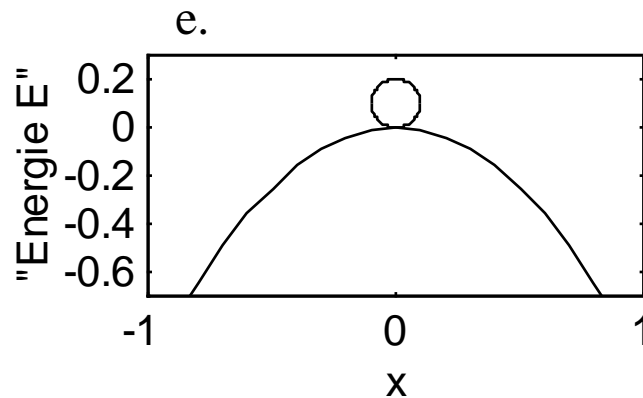
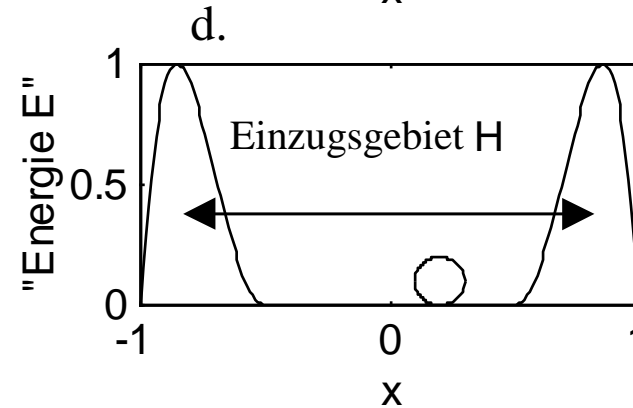
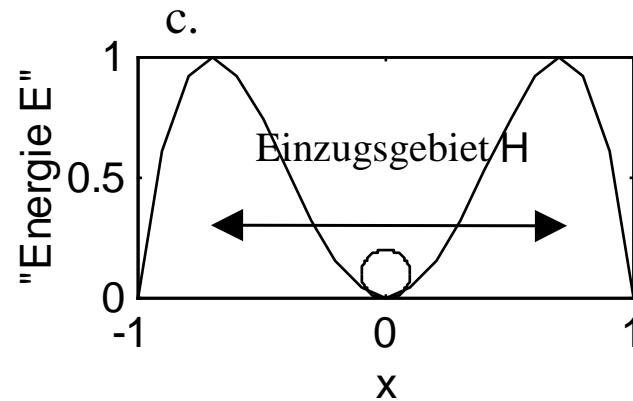
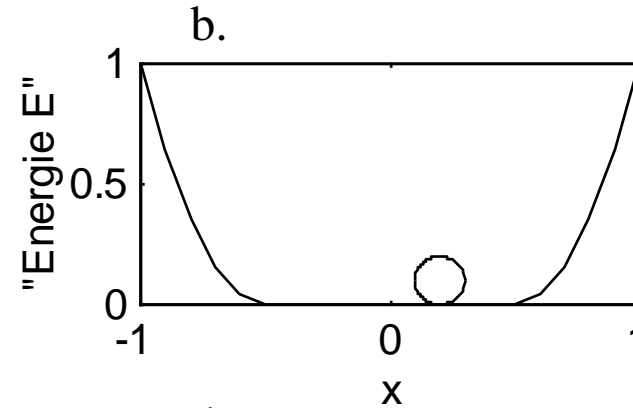
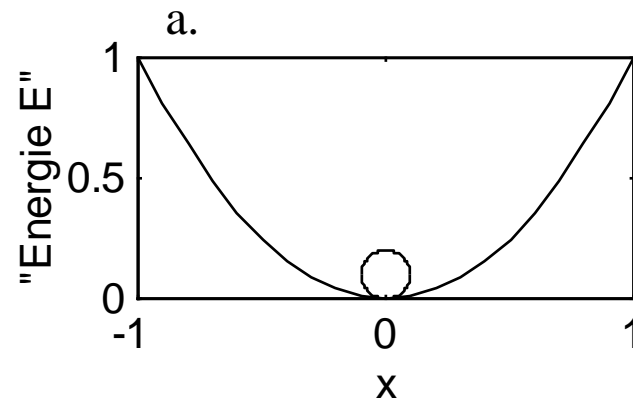
Stabilität Ruhelage (Ljapunov-S.): δ - ε -Stabilität



Minimalforderung (vereinfachte Erklärung):

alle Verläufe, die in einer δ -Umgebung um eine Ruhelage starten, bleiben zumindest in einer ε -Umgebung

Arten von Ruhelagen



a. global asymptotisch stabile Ruhelage (oben links)

b. global stabile, nicht asymptotisch stabile Ruhelage (oben rechts)

c. regional stabile, asymptotisch stabile Ruhelage (Mitte links)

d. regional stabile, nicht asymptotisch stabile Ruhelage (Mitte rechts)

e. instabile Ruhelage (unten)

Idee:

- Aussage über die Stabilität der Ruhelage treffen, ohne die das System beschreibende Differentialgleichung explizit zu lösen
- wichtig besonders für nichtlineare Systeme

Gedankengang:

- Ruhelage eines physikalischen Systems dadurch charakterisiert, dass Gesamtsumme der Energie gleich Null ist (z.B. Pendel: Summe aus kinetischer und potenzieller Energie)
- in jedem anderen Zustand ist Energie positiv
- Gesamtenergie autonomer (nicht von außen beeinflusster), passiver Systeme kann nicht zunehmen
- stabile Ruhelage dadurch gekennzeichnet, dass die zeitliche Änderung der Gesamtenergie des Systems in der Umgebung der Ruhelage nie positiv ist

Direkte Methode von Ljapunov (2)

- Aufstellen einer Energiefunktion $V(\mathbf{x})$, \mathbf{x} Zustandsvektor
Notwendige Eigenschaften:
 1. $V(\mathbf{x}) > 0$ für alle \mathbf{x} in einem regionalen Einzugsgebiet H außer $\mathbf{x} = \mathbf{0}$
 2. $V(\mathbf{x}) = 0$ für $\mathbf{x} = \mathbf{0}$
 3. $dV(\mathbf{x})/dt \leq 0$ für alle \mathbf{x} in einem Einzugsgebiet H
- Einsetzen der Systembeschreibung $dx/dt = f(x)$ und Nachweis der obengenannten Eigenschaften 1.-3.
- Beispiel:
System mit eindimensionalem Zustandsraum:
 $V = 0.5 \cdot x^2$
- Beispiele für Systeme, Bedingungen für a :
 $dV/dt = x \cdot dx/dt$,
Bedingungen 1.-3. gelten z.B. für
 $dx/dt = ax$, $dV/dt = ax^2$ für $a < 0$
 $dx/dt = ax^3$, $dV/dt = ax^4$ für $a < 0$

Bemerkungen zur Ljapunov-Funktion:

- Aufstellen einer "geeigneten" Ljapunov-Funktion erforderlich
- Erreichen der Ruhelage kann nur dann garantiert werden, wenn Nachweis $dV(\mathbf{x})/dt < 0$ für alle \mathbf{x} ungleich 0 gelingt (**asymptotische Stabilität**)
- **globale Stabilität** (für alle Anfangszustände) nur dann garantiert, wenn Eigenschaften 1.-3. für alle \mathbf{x} gelten, sonst nur **regionale Stabilität** in Einzugsgebiet H
- Erweiterung auf Systeme mit höherdimensionalem Zustandsraum möglich, Standardansatz $V(\mathbf{x}) = \mathbf{x}'\mathbf{P}\mathbf{x}$ mit positiv definiter Matrix \mathbf{P}
positiv definite Matrix: symmetrische Matrix, alle Eigenwerte größer Null
- ähnliche Ansätze für zeitdiskrete Systeme, dann mit $V(k+1)-V(k)$ statt dV/dt
- keine direkten Aussage zu Systemen mit äußerer Erregung (z.B. Führungsgrößen, ständigen äußeren Störungen) möglich, dazu existieren kompliziertere Erweiterungen
- z.T. unterschiedliche Schreibweisen (Lyapunov, Ljapunow usw. wegen Übersetzung aus dem kyrillischen Alphabet)

Bemerkungen zu Systemen mit Fuzzy-Reglern:

- Nachweis muss für den geschlossenen Regelkreis (Fuzzy-Regler + evtl. dynamische Außenbeschaltung wie Differenzierer/Integrierer + Regelstrecke) erfolgen!
- Fuzzy-Regler wird als statische Nichtlinearität behandelt
- Zustände stammen aus Regelstrecke und dynamischer Außenbeschaltung
- Nachweis oft problematisch, gelingt hauptsächlich für relative einfache Systeme
- relativ standardisierte Ansätze für sogenannte Takagi-Sugeno-Fuzzy-Systeme mit Funktionen der Zustandsgrößen als Regelkonklusion

- Für Fuzzy-Regelungen eventuell geeignet
 - Regelstrecken ohne bekanntes mathematisches Modell mit geringen Sicherheits- und Güteanforderungen, insbesondere bei mehreren Eingangsgrößen und bekannten menschlichen Regelstrategien
 - Nichtlineare Regelstrecken mit nur an bestimmten Stützpunkten identifiziertem Modell
- Für Fuzzy-Regelungen ungeeignet
 - Regelstrecken mit bekanntem oder identifizierbarem linearen Modell
(Besser: Lineare Regler wie PID- und Zustandsregler)
 - Regelstrecken mit bekanntem nichtlinearen Modell
(Besser: Nichtlineare Regler, z.B. basierend auf exakter Linearisierung oder Modellprädiktive Regler)

- 2 Fuzzy-Logik
 - 2.1 Von der scharfen Logik zur Fuzzy-Logik
 - 2.2 Fuzzy-Mengen
 - 2.3 Fuzzifizierung
 - 2.4 Fuzzy-Operatoren
 - 2.5 Inferenz
 - 2.6 Defuzzifizierung
 - 2.7 Fuzzy-Regelungen
 - 2.8 Praktische Empfehlungen**

- Fuzzy-Clustering (Vorlesung Datenanalyse für Ingenieure im Sommersemester):
 - Verallgemeinerung der Clusteranalyse
 - für jedes Objekt werden Zugehörigkeitswerte zwischen Null und Eins zu allen Clustern (Klassen) ermittelt
 - Zugehörigkeitswerte sind umso größer, je geringer der Abstand zum Referenzpunkt des jeweiligen Clusters ist
 - unterschiedliche Abstandsmaße (z.B. euklidischer Abstand) und Referenzpunkte (z.B. Klassenmittelpunkt) können verwendet werden
- Fuzzy-Klassifikation (z.B. für Fehlerdiagnose):
 - Verallgemeinerung der Klassifikation
 - für jedes Objekt werden Zugehörigkeitswerte zwischen Null und Eins zu allen Klassen ermittelt

- Befragung von Experten
- Einfache Heuristiken (z.B. zum Entwurf von Zugehörigkeitsfunktionen)
- Lernen aus Daten
 - Aufstellen und Bewerten von Regeln, z.B. auf Basis von Entscheidungsbäumen
(Vorlesung "Datenanalyse für Ingenieure" im Sommersemester)
 - Clustern zum Entwurf von Zugehörigkeitsfunktionen
(Vorlesung "Datenanalyse für Ingenieure" im Sommersemester)
 - Optimieren von Fuzzy-Systemen auf der Basis von Evolutionären Algorithmen
 - für Takagi-Sugeno-Systeme:
 - Aufteilen des Zustandsraums in geeignete Bereiche
 - Identifizieren der Konklusionen mit Hilfe von linearen Methoden
 - Neuro-Fuzzy-Systeme:
Anlernen eines Neuronalen Netzes, das aufgrund seiner Struktur direkt in ein Fuzzy-Systeme umgewandelt werden kann

- Sprache: international genormte Sprache (IEC 61131-7) für die Implementierung von Fuzzy-Logik in speicherprogrammierbaren Steuerungen, die auf den Sprachen Funktionsbaustein (FBS) und Strukturierter Text (ST) aufbaut. Dabei existieren eine Basisebene mit vorgeschriebenen Eigenschaften, eine Erweiterungsebene mit optionalen Eigenschaften und eine offene Ebene. Synonym FCL
- Strategien:
 - als nichtlineares zwei- oder dreidimensionales Kennfeld
 - spezielle Softwaretools, z.B.
 - fuzzyTECH (siehe Übung)
 - NEFCLASS für Neuro-Fuzzy-Systeme
 - Erweiterungsmodule für Softwarepakete, z.B.
 - MATLAB: Fuzzy Logic Toolbox
 - SIMATIC Fuzzy Control (für Siemens SPS)
 - Übersicht: [Alcalá-Fdez15], <http://sci2s.ugr.es/fss>