

Fuzzy-Regler

In diesem Kurs werden nur die Grundlagen anhand von Beispielen behandelt. Für Fuzzifizierung, Inferenz und Defuzzifizierung gibt es viele unterschiedliche Methoden, die je nach Anwendung ihre Vor- und Nachteile haben. Wir beschränken uns zum besseren Verständnis auf eine.

1. Warum Fuzzy-Regler?

a) Die Vorgehensweise der klassischen Regelungstechnik

Will man eine Regelstrecke mit analogen oder digitalen PID-Reglern regeln, geht man im allgemeinen folgendermaßen vor:

- Bestimmung der Eigenschaften der Strecke
(aus der Sprungantwort, oder durch die Erstellung eines mathematischen Modells)
- Festlegung der Anforderungen an den Regelkreis
(maximales Überschwingen, Ausregelzeit usw.)
- Wahl einer Reglerstruktur
(Einfacher Regelkreis, Kaskadenregelung, Stör- oder Hilfsgrößenaufschaltung ...)
- Optimierung
(Bestimmung der Reglerparameter)
- Simulation des Regelkreises
(bevor man Schlimmes riskiert)
- Praxistest und weitere Optimierung von Hand

b) Die Grenzen der klassischen Methode

In der Praxis sind die Eigenschaften der Regelstrecke nicht immer konstant. Ausserdem sind sie nicht immer einfach zu berücksichtigen

Beispiel:

Ein Zug kann mit sehr unterschiedlicher Passagierzahl fahren, das Verhalten ist stark vom Wetter abhängig (kalt, warm, regnerisch, vereist ...)

Man kann also nicht ein einziges gültiges Modell für die Regelstrecke angeben.

Ein erfahrener Lokführer wird aber wissen, wie er all diese Faktoren berücksichtigen muss (auch wenn er über die physikalischen Hintergründe keine Ahnung hat).

c) Die Idee des Fuzzy-Reglers

Wenn es gelingt, das Knowhow eines menschlichen Experten möglichst vollständig auf einen Regler zu übertragen, dann kann dieser die Funktion eines menschlichen Experten übernehmen und automatisch ausführen.

2. Struktur eines Fuzzy-Reglers

Die Regelbasis

Befragt man in unserem Beispiel den Lokführer, wird er „REGELN“ formulieren, etwa in der Art

„WENN es nicht regnet UND es warmes Wetter ist, UND viele Passagiere an Bord sind, DANN „

Der Entwickler eines Fuzzy-Systems muss nach der Befragung von Experten eine möglichst vollständige Liste von solchen Regeln zusammenstellen, in der jeder vorstellbare Fall vorkommt.

Diese Liste von Regeln ist die Regelbasis oder Wissensbasis des Fuzzy-Reglers

Die Fuzzifizierung

In der Umgangssprache sind Begriffe wie „warm“, „kalt“, „regnerisch“, „vereist“ zwar klar verständlich, aber mit einer gewissen Unschärfe verbunden.

Die Anwendung mathematischer Methoden die es erlauben, solche unscharfen Begriffe zu verarbeiten, hat den Fuzzy-Reglern ihren Namen gegeben (fuzzy = unscharf, verschwommen).

Nun hat aber ein Signal welches am Reglereingang liegt, einen klar definierten Wert, der nicht unscharf ist. Aus diesem Wert wird eine „Zugehörigkeit“ μ zu den unscharfen Begriffen wie „warm“, „kalt“ usw. abgeleitet

Beispiel: Temperatur = 18°C
 $\mu(\text{sehr kalt}) = 0\%$
 $\mu(\text{kalt}) = 20\%$
 $\mu(\text{mittel}) = 80\%$
 $\mu(\text{warm}) = 0\%$

Die Inferenz (Verarbeitung)

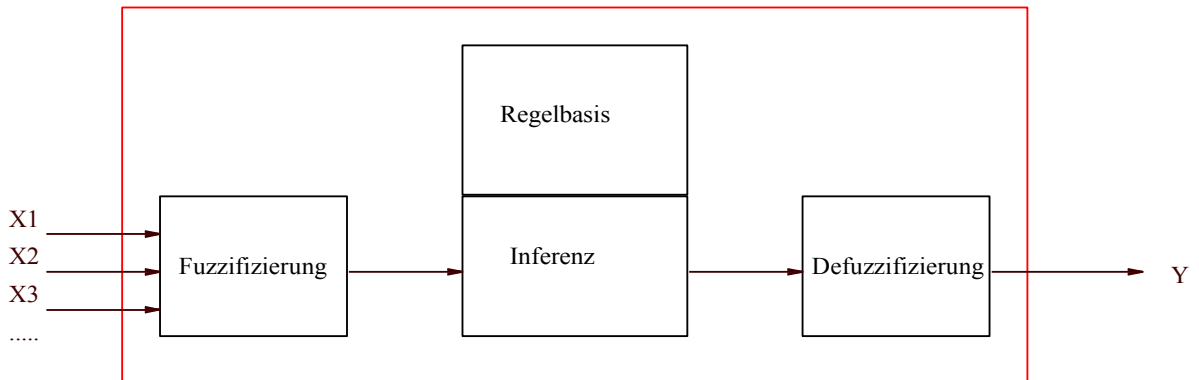
Mithilfe der Regelbasis werden die „fuzzifizierten“ Eingangssignale verarbeitet. Aus den mehr oder weniger erfüllten Prämissen der Regeln („WENNUND ...“) ergeben sich Folgerungen („...DANN....“). Diese können sich teilweise widersprechen. Diese Folgerungen sind meist nicht zu 100%, sondern mit einer gewissen „Zugehörigkeit“ oder einem gewissen „Erfülltheitsgrad“ wirksam.

Die Defuzzifizierung

Aus allen mehr oder weniger wirksamen Folgerungen der Regelbasis zusammengenommen muss eine klar definierte Stellgröße gebildet werden.

Mit diesen Überlegungen ergibt sich folgende Struktur für einen Fuzzy-Regler:

FUZZY CONTROLLER



Oft wird nicht nur die Hauptregelgröße X_1 erfasst, sondern es werden zusätzliche Signale ausgewertet, z.B. die Änderungsgeschwindigkeit von X_1 , oder andere physikalische Größen die nach Meinung des befragten Experten eine Rolle spielen.

In diesem Beispiel ist der Sollwert implizit in den Regeln enthalten.

Es kann natürlich auch mit der Regeldifferenz $E = W - X$ gearbeitet werden. In diesem Fall ist ein Vergleich erforderlich, wie beim klassischen Regler.

Als Hardware für den Fuzzy-Regler wird oft ein PC mit AD- und DA-Wandlerkarten benutzt, oder ein Mikrocontroller, oder speziell entwickelte Fuzzy Controller Chips.

3. Fuzzifizierung und Zugehörigkeitsfunktionen

Beispiel 1:

Ein befragter Experte hat zur Beschreibung der Temperatur X eines Ofens die Begriffe „niedrig“, „mittel“ und „hoch“ benutzt.

Der interessierende Bereich für die Temperatur reicht von 150-220°C.

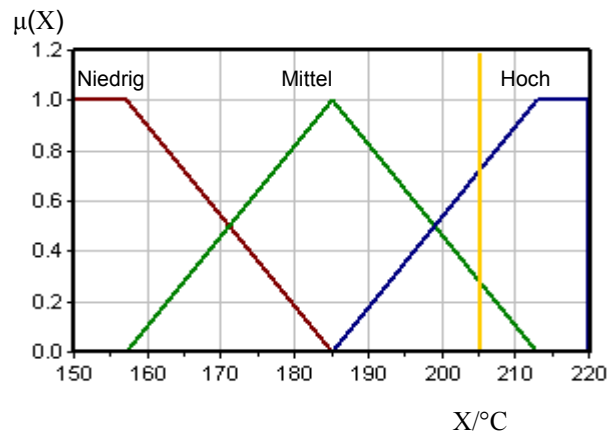
Die beschreibenden Begriffe werden **Terme** genannt.

Der hier benutzte Begriff „Temperatur“ ist eine **linguistische Variable** (im Gegensatz zur physikalisch messbaren Temperatur)

Die Terme werden durch **Zugehörigkeitsfunktionen** $\mu(X)$ beschrieben:

Diese müssen vom Regelungstechniker festgelegt werden, normalerweise in Dreieck- oder Trapezform, der einfachen Berechnung wegen.

Beispiel:



Für $X = 205^{\circ}\text{C}$ ergibt sich

$$\begin{aligned}\mu_{\text{Niedrig}}(X) &= 0 \\ \mu_{\text{Mittel}}(X) &= 0.28 \\ \mu_{\text{Hoch}}(X) &= 0.72\end{aligned}$$

Tipp:

In WINFACT – FLOP (Fuzzy Shell) können sehr einfach Fuzzy-Regler entwickelt und getestet werden. Diese lassen sich dann auch in BORIS übernehmen.

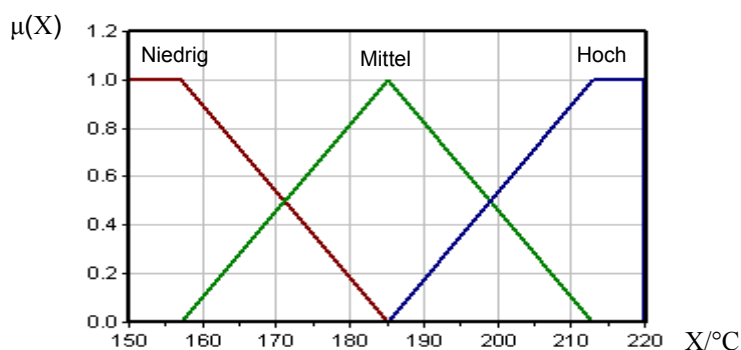
Beispiel 2:

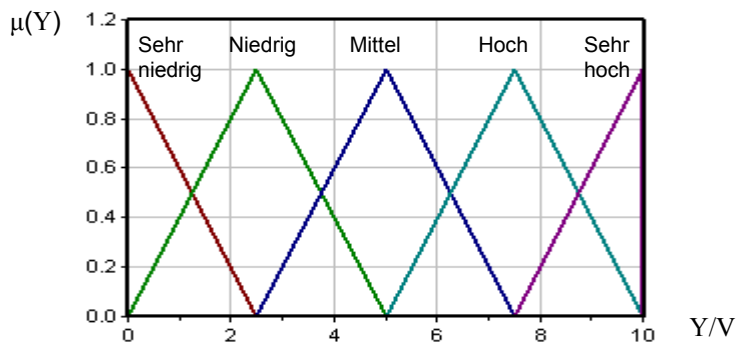
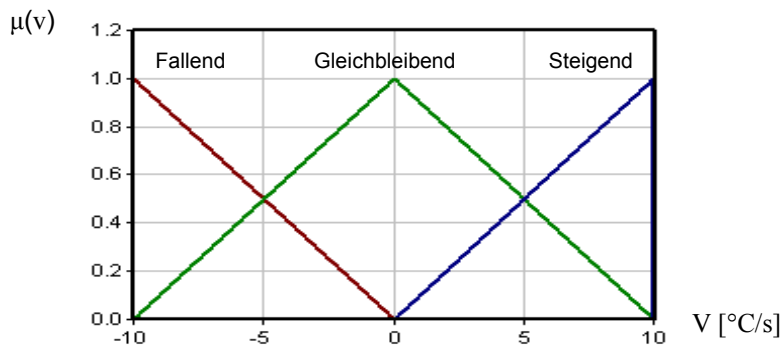
Für eine effizientere Regelung soll das Beispiel 1 ergänzt werden, so dass auch die zeitliche Änderung $v = dX/dt$ der Temperatur erfasst wird.

Dazu wird eine zweite linguistische Variable „Temperaturtrend“ mit den Termen „fallend“, „gleichbleibend“ und „steigend“ definiert, wobei der betrachtete Bereich der Eingangsgröße $v = dX/dt$ von -10°C/s bis $+10^{\circ}\text{C/s}$ gehen soll.

Für die Ausgangsgröße wird die linguistische Variable „Leistung“ für die Stellgröße festgelegt. Die zugehörige physikalische Größe ist die Steuerspannung für den Leistungsteil des Ofens (0...10V). Dabei geht die Steuerspannung für den Leistungsteil des Ofens von 0...10V.

Nach Befragen eines Experten werden für die linguistische Variable „Leistung“ die Terme „sehr niedrig“, „niedrig“, „mittel“, „hoch“ und „sehr hoch“ festgelegt.





Aufgabe Fuzzy 1

Ermittle für den Fall $X = 180^{\circ}\text{C}$ und $v = -5^{\circ}\text{C/s}$ die Zugehörigkeitswerte die sich bei der Fuzzifizierung ergeben.

4. Die Regelbasis

Für unser Beispiel wird der Experte Regeln formulieren in der Art

R1:
 WENN Temperatur = „niedrig“ UND Temperaturtrend = „fallend“ DANN
 Leistung = „sehr hoch“

R2:
 WENN Temperatur = „niedrig“ UND Temperaturtrend = „gleichbleibend“ DANN
 Leistung = „hoch“

usw.

Bemerkung:

Je nachdem welchen Experten man befragt können die Regeln unterschiedlich ausfallen. Ein Praxistest muss zeigen ob die Regelbasis etwas taugt.

Aufgabe Fuzzy 2

Erstelle eine „vernünftige“ Regelbasis für unser Beispiel.

Die Regelbasis kann als Liste oder als Tabelle dargestellt werden.

Beispiel für eine Listendarstellung:

R1: WENN Temperatur = niedrig UND Temp-Trend = fallend DANN Leistung = sehr hoch
 R2: WENN Temperatur = niedrig UND Temp-Trend = gleich DANN Leistung = hoch
 R3: WENN Temperatur = niedrig UND Temp-Trend = steigend DANN Leistung = mittel
 R4: WENN Temperatur = mittel UND Temp-Trend = fallend DANN Leistung = mittel
 R5: WENN Temperatur = mittel UND Temp-Trend = gleich DANN Leistung = mittel
 R6: WENN Temperatur = mittel UND Temp-Trend = steigend DANN Leistung = mittel
 R7: WENN Temperatur = hoch UND Temp-Trend = fallend DANN Leistung = mittel
 R8: WENN Temperatur = hoch UND Temp-Trend = gleich DANN Leistung = niedrig
 R9: WENN Temperatur = hoch UND Temp-Trend = steigend DANN Leistung = sehr niedrig

Beispiel für eine Tabellendarstellung:

X↓	dX/dt→	fallend	gleich	mittel
niedrig		sehr hoch	hoch	mittel
mittel		mittel	mittel	mittel
hoch		mittel	niedrig	sehr niedrig

Aufgabe Fuzzy 3

Ermittle für den Fall $X = 180^\circ\text{C}$ und $v = -5^\circ\text{C/s}$ die aktiven Regeln.

Kontrolle in FLOP im interaktiven Debug-Modus.

(Inferenzmethode auf MAX-MIN einstellen!)

5. Die Inferenz (Verarbeitung)

Für die Inferenz gibt es viele unterschiedliche Methoden. Wir betrachten hier nur die MAX-MIN-Methode.

Die Regeln sind grundsätzlich von der Form

Prämisse
Konklusion

WENN UND DANN

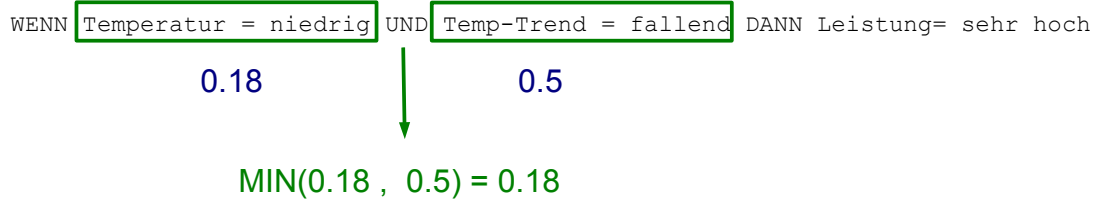
Die Inferenz geschieht in 3 Schritten:

- Aggregation = Bestimmen des Erfülltheitsgrades der Prämisse
- Implikation = Bestimmen des Erfülltheitsgrades der Konklusion
- Akkumulation = Zusammenfassen der Ergebnisse aus allen Regeln

Bei der **Aggregation** wird für eine UND-Verknüpfung der Minimum-Operator auf die Erfülltheitsgrade der Einzelprämisen angewendet. Damit erhält man den Erfülltheitsgrad der Gesamtprämisse, also praktisch den Prozentsatz, zu dem die Regel gültig ist.

Wenn in der Prämisse eine ODER-Verknüpfung steht, wird der Maximum-Operator angewendet.

Für unser Beispiel $X = 180^{\circ}\text{C}$ und $v = -5^{\circ}\text{C/s}$ ergibt sich bei R1:



Bei der **Implikation** muss berücksichtigt werden, dass die Konklusion der Regel nicht mehr mit 100%, sondern mit einem geringeren Anteil berücksichtigt werden darf.

Bei der MAX-MIN-Inferenz wird das dadurch berücksichtigt, dass der MIN-Operator auf die Zugehörigkeitsfunktion der Konklusion angewendet wird, was bedeutet, dass sie beim ermittelten Erfülltheitsgrad abgeschnitten wird.

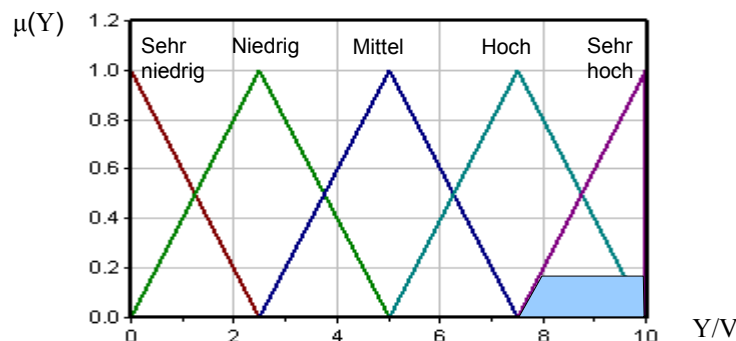
Für unser Beispiel ist die Konklusion

.... DANN Leistung= sehr hoch

mit einem Erfülltheitsgrad von 0.18.

Wir schneiden also die Zugehörigkeitsfunktion $\mu_Y(\text{sehr hoch})$ bei 0.18 ab.

Um die Kurve nicht neu zeichnen zu müssen, können wir auch die unterhalb von 0.18 liegende Fläche markieren:



Bei der MAX-PROD-Inferenz multipliziert man stattdessen die Zugehörigkeitsfunktion mit dem Erfülltheitsgrad. Welche Methode bessere Ergebnisse gibt, hängt von der konkreten Anwendung ab.

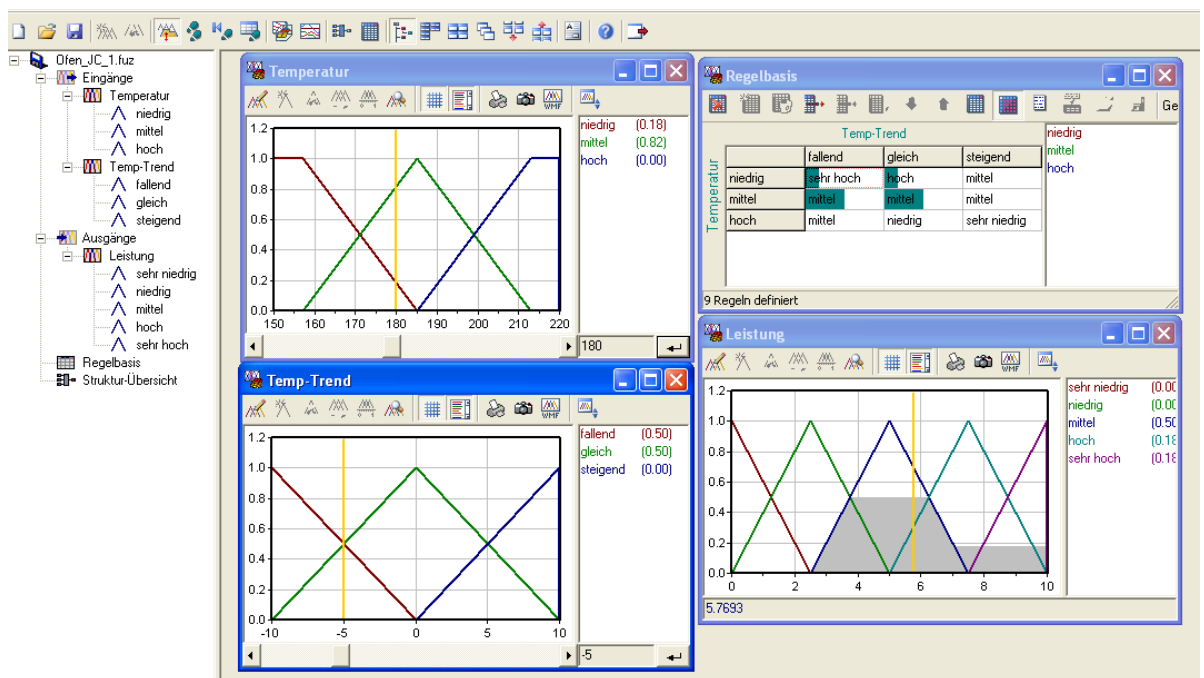
Die Schritte Aggregation und Implikation müssen für jede aktive Regel durchgeführt werden.

Anschließend werden im letzten Schritt, der **Akkumulation**, die Ergebnisse der einzelnen Regeln zusammengeführt. Dies geschieht bei der MAX-MIN-Inferenz einfach durch Bilden der Gesamtfläche.

Aufgabe Fuzzy 4

Führe für den Fall $X = 180^{\circ}\text{C}$ und $v = -5^{\circ}\text{C/s}$ die Inferenz durch und markiere im Diagramm für die Zugehörigkeitsfunktionen der Stellgröße die wirksame Gesamtfläche.

Das Ergebnis kann in FLOP kontrolliert werden:



6. Defuzzifizierung

Das Ergebnis der Inferenz liegt nun als Fläche in einem Diagramm vor.

Daraus muss ein (scharfer) Wert für die Stellgröße berechnet werden. Auch hierfür gibt es unterschiedliche Methoden.

Eine häufig verwendete Methode ist die Flächenschwerpunkt-Methode (COA = Center of Area, COG = Center of Gravity)

Es wird der Flächenschwerpunkt der wirksamen Fläche berechnet, dessen Koordinate für die Stellgröße ist dann der gesuchte Wert.

Diese Berechnung erfolgt nach der Formel

$$y_s = \frac{\int_a^b y \cdot \mu_{gesamt}(y) dy}{\int_a^b \mu_{gesamt}(y) dy}$$

Wegen der linearen Kurvenform vereinfacht sich diese Berechnung wesentlich.

Aufgabe Fuzzy 5

Berechne für den Fall $X = 180^\circ\text{C}$ und $v = -5^\circ\text{C/s}$ die Stellgröße aus der wirksamen Gesamtfläche.

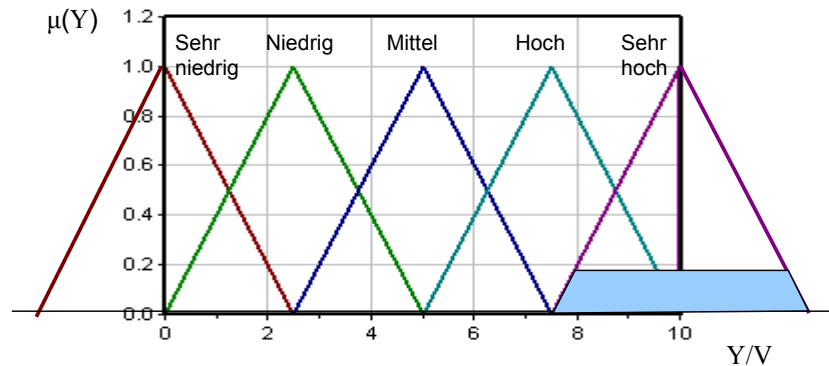
Kontrolliere das Ergebnis mit FLOP

Bemerkung:

Bei der einfachen Schwerpunktmethode kann die Stellgröße nicht bis zu den Bereichsgrenzen von Y variieren. Es kann also z.B. keinen Wert null für die Stellgröße

geben, was aber meist erforderlich ist. Um dieses Problem zu vermeiden, wird oft die **randereiterte Schwerpunktmethod**e benutzt. Dabei werden die Zugehörigkeitsfunktionen links und rechts über die Bereichsgrenzen hinaus erweitert.

Beispiel:

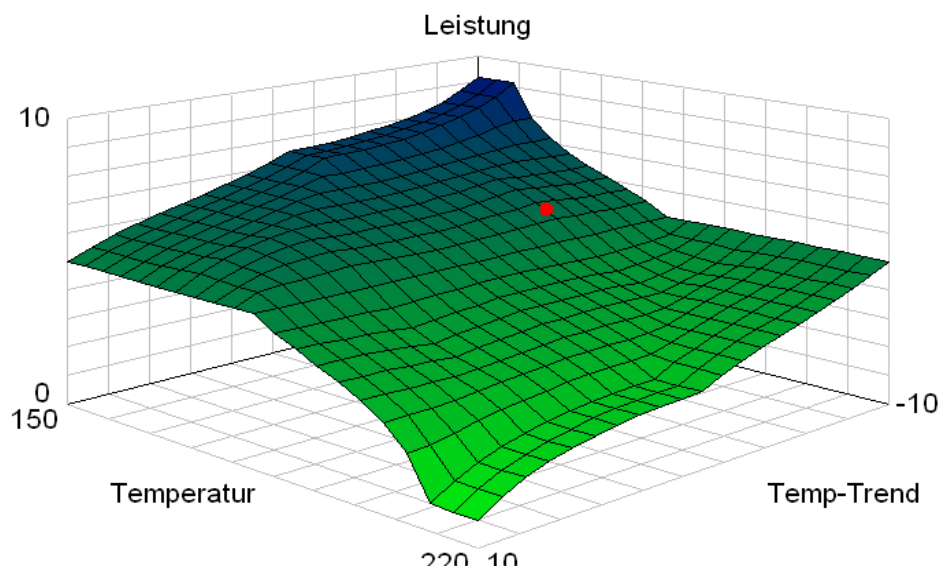


Im Beispiel kann die Stellgröße von 0...10V variieren.

7. Test des Reglers

Nachdem Eingangs- und Ausgangsvariablen, Regelbasis und Inferenzmethode festgelegt sind, kann man den Fuzzyregler in FLOP im interaktiven Debug-Modus testen.

Interessant ist hier auch die Kennfeld-Darstellung bei der das Verhalten dreidimensional dargestellt wird:



Der rote Punkt markiert hier den aktiven Betriebszustand.

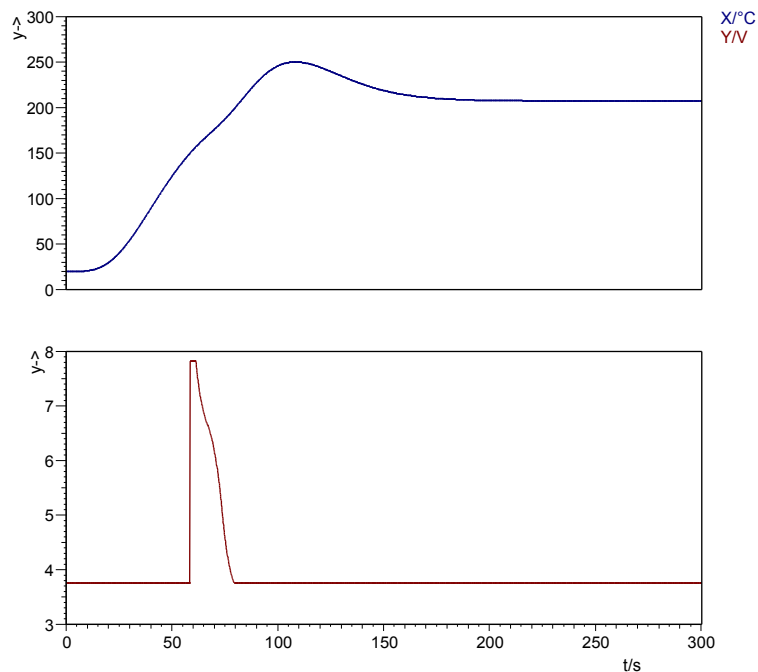
Als nächsten Test kann der Regler als Online-Fuzzy-Controller in BORIS zusammen mit einem Modell der Strecke betrieben werden. Der Temperatur-Trend wird hier durch ein DT1-Glied ($T_D = 1s$, $T = 50ms$) erzeugt. Es ist vorsichtiger, ein DT1-Glied zu verwenden, denn ein reines D-Glied führt zu Problemen bei der Simulation (siehe Diskussion über D_0/DT_1).

Vorsicht: die Schrittweite muss klein genug gegenüber T gewählt werden!

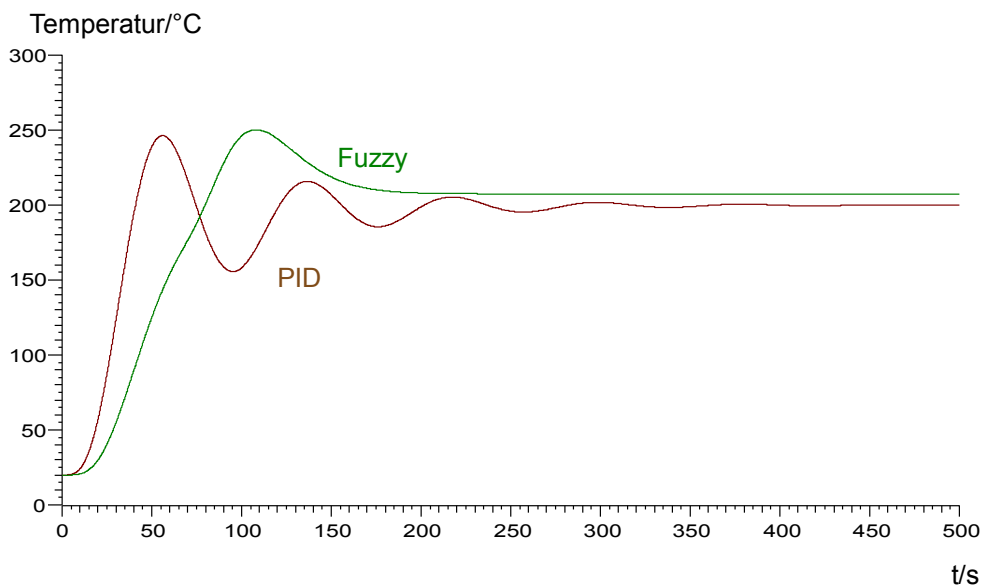
Wenn FLOP gleichzeitig mit BORIS geöffnet ist, kann man sehen wie sich der Betriebszustand im Kennfeld ändert.

Achtung: so wie unser Regler definiert wurde, ist bei einer Anfangstemperatur von 20°C keine Regel aktiv. Das Gleiche gilt für Temperaturen oberhalb von 220°C. Am einfachsten editiert man die Zugehörigkeitsfunktionen so dass sie sich links und rechts bis zu den kleinsten und größten vorkommenden Werten erstrecken.

Beispiel für das Führungsverhalten des oben entwickelten Fuzzy-Reglers mit einer PT5-Strecke mit $K_{PS} = 50^\circ\text{C}/\text{V}$ (also $x_{\text{max}}=500^\circ\text{C}$), $T_s = 10\text{s}$:



Im folgenden Bild wurde der Fuzzy-Regler mit einem nach CHR für bestes Führungsverhalten optimierten PID-Regler verglichen ($W = 200^\circ\text{C}$):



Zu bedenken ist hier, dass der Fuzzy-Regler noch nicht optimiert wurde. Das Ergebnis kommt zustande durch das Zusammenspiel der definierten Regeln mit den definierten linguistischen Variablen und Zugehörigkeitsfunktionen.

Aufgabe Fuzzy 6

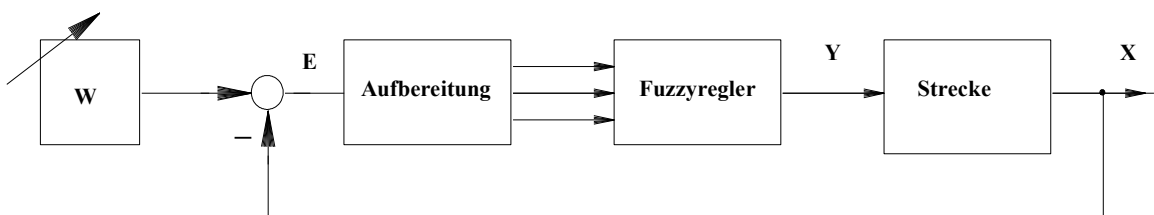
Experimentiere mit den Zugehörigkeitsfunktionen (enger, breiter).

Untersuche das Führungsverhalten des geänderten Reglers mit der oben benutzten PT5-Strecke ($K_{PS} = 50^\circ\text{C}/\text{V}$, $T_s = 10\text{s}$) und vergleiche die Ergebnisse.

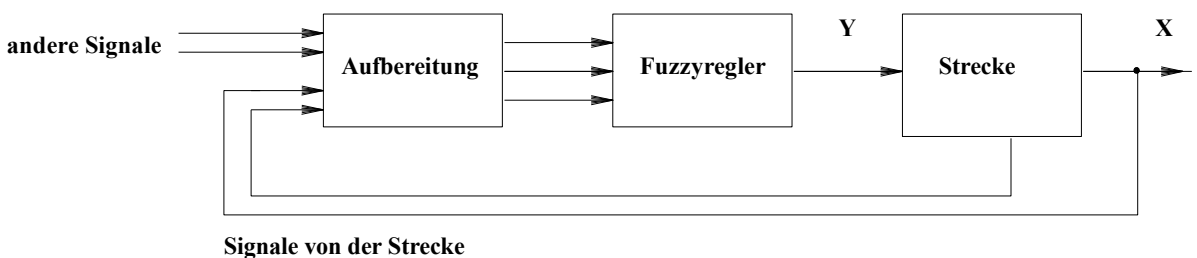
8. Varianten der Fuzzy-Regelung

Unser erstes Fuzzy-Beispiel hat keinen Sollwerteingang, der Endwert der Temperatur ergibt sich aus dem Zusammenspiel von Regeln und Zugehörigkeitsfunktionen mit den Eigenschaften der Strecke.

Ein Fuzzy-System kann ähnlich wie ein klassischer Regelkreis mit PID-Regler aufgebaut sein. Die Regeldifferenz wird meist noch aufbereitet, z.B. durch ein D-Glied um den Trend der Regelgröße zu erfassen.



Die Vorteile der Fuzzy-Regelung werden oft durch eine allgemeinere Struktur ausgeschöpft:



Hierbei werden nicht nur die Regelgröße selbst, sondern auch noch andere Signale von der Strecke benutzt (z.B. dX/dt), wenn sie für den befragten Experten eine Bedeutung haben.

Zusätzlich kann man andere Signale von außen benutzen, z.B. Informationen über die Umgebung beim Beispiel des Zuges, oder das Signal eines Sollwertgebers.