Robert Salvador salvador@htlinn.ac.at

Fuzzy-Logik und Fuzzy-Regelung

- Mathematische / Fachliche Inhalte in Stichworten:

  Fuzzy-Logik und ihre Anwendung auf die Regelungstechnik

- Kurzzusammenfassung

  Nach Einführung des Begriffes der Fuzzy-Menge und der entsprechenden Mengenoperationen im Vergleich zum klassischen Fall werden die Fuzzy-Ideen auf die Regelungstechnik angewendet. Es wird ein einfacher Fuzzy-P-Regler entwickelt; sein Regelverhalten wird dem eines klassischen Schaltreglers in einer Simulation gegenübergestellt.

- Lehrplanbezug (bzw. Gegenstand / Abteilung / Jahrgang):

  Angewandte Mathematik, Regelungstechnik bzw. Industrielle Elektronik (4. Jg. HTL Elektronik/Elektrotechnik)

- Mathcad-Version:

  Mathcad 2001

- Literaturangabe:

  [1] Kahlert, Jörg: Fuzzy Control für Ingenieure, Vieweg
  [2] Böhme, Gert: Algebra, Anwendungsorientierte Mathematik, Springer
  [3] Spektrum der Wissenschaft, März 1993

INHALT (gewünschten Bereich anklicken!):

Fuzzy-Menge vs klassische Menge **zum Anfang** **Kapitel weiter**

Von Albert Einstein stammt angeblich folgendes Zitat:
"So weit sich die Gesetze der Mathematik auf die Realität beziehen, sind sie nicht sicher. Und so weit sie sicher sind, beziehen sie sich nicht auf die Realität!"

In der klassischen Mengenlehre steht von jedem Objekt eindeutig fest, ob es zu einer bestimmten Menge gehört oder nicht. Der "Zugehörigkeitsgrad" (dieser Begriff wird hiermit intuitiv eingeführt) jedes Objektes zu einer klassischen Menge ist also entweder exakt 0 oder exakt 1.
Andrerseits ist unser Alltagsleben geprägt von unpräzisen Formulierungen, mit denen wir uns trotzdem erstaunlich gut in der Welt zurechtfinden. Man denke an eine Situation, in der wir jemandem bei Einparken helfen. Anweisungen wie "Lenkrad 23.5 ° nach links einschlagen" oder "87 cm zurückfahren" sind zwar recht genau, aber trotzdem wenig hilfreich. Mit Formulierungen wie "ein bisschen nach links", "noch etwas zurück", ... kann dem Fahrer erfahrungsgemäß eher mehr geholfen werden.
In manchen Situationen ist offenbar Genauigkeit, die über ein gewisses Maß hinausgeht, nicht sinnvoll. Diese Erkenntnis hat wohl möglicherweise den Begründer der Fuzzy-Logik, den Mathematiker Lofti A. Zadeh von der Universität von Kalifornien in Berkeley, Anfang der 1970er Jahre zu seinen Arbeiten inspiriert.

Um zum Begriff der Fuzzy-Menge zu gelangen, wollen wir die Temperatur eines Raumes als Beispiel benutzen (wir denken dabei schon etwas voraus: diese Temperatur soll später geregelt werden!):
Auf die Frage, in welchem Bereich die Raumtemperatur als "angenehm" empfunden wird, werden verschiedene Personen wahrscheinlich verschiedene Antworten geben. Es wird sich jedoch vermutlich ein Bereich zwischen etwa 20 ° und 24 ° als für die meisten akzeptabel herausstellen.
Klassisch formuliert: Temperaturwerte im Intervall [20 °, 24 °] gehören zur Menge der angenehmen Temperaturwerte. Diese scharfe Abgrenzung ist aber weder gefühlsmäßig noch technisch gesehen hilfreich.
In gewisser Weise "sinnvoller" werden manche Aussagen, wenn man als Zugehörigkeitsgrad zu einer bestimmten Menge außer 0 und 1 (100%) alle reellen Zahlen zwischen 0 und 1 zulässt.
Hier werden solche Zugehörigkeitsfunktionen definiert:

Definition von möglichen Zugehörigkeitsfunktionen:

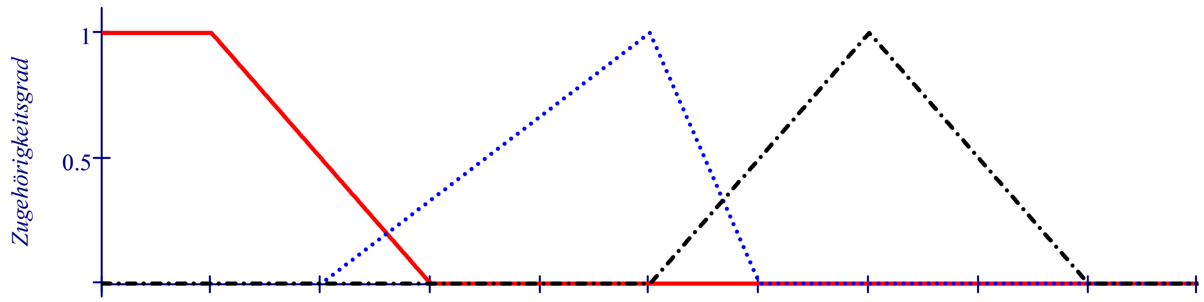
$$trapez(x,l1,l2,r1,r2) := \left| \begin{array}{l} \dfrac{x-l1}{l2-l1} \quad if \ (l1 \le x \le l2)\cdot(l2 \ne l1) \\ \dfrac{x-r2}{r1-r2} \quad if \ (r1 \le x \le r2)\cdot(r2 \ne r1) \\ 1 \quad if \ l2 < x \le r1 \\ 0 \quad otherwise \end{array} \right.$$

Mit $l2 = r1$ wird daraus die (vielverwendete) dreieckige Zugehörigkeitsfunktion.

$$trapez\_inf\_links(x,l,r) := \left| \begin{array}{l} 1 \quad if \ x < l \\ 0 \quad if \ x > r \\ \dfrac{r-x}{r-l} \quad otherwise \end{array} \right.$$

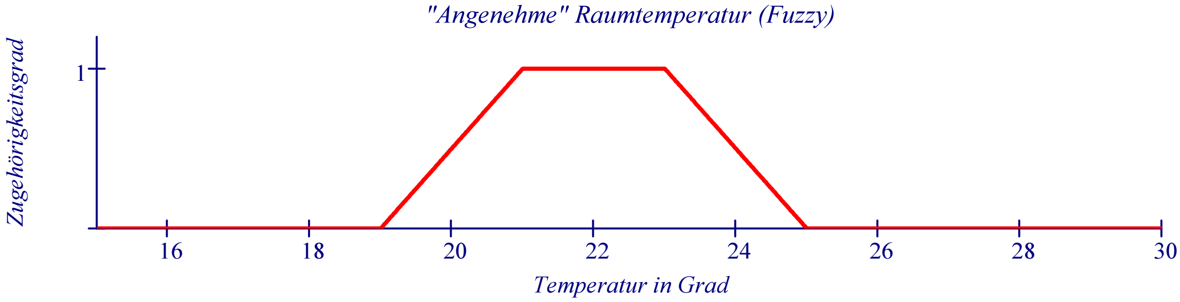
$$trapez\_inf\_rechts(x,l,r) := \left| \begin{array}{l} 0 \quad if \ x < l \\ 1 \quad if \ x > r \\ \dfrac{x-l}{r-l} \quad otherwise \end{array} \right.$$

Beispiele für Zugehörigkeitsfunktionen



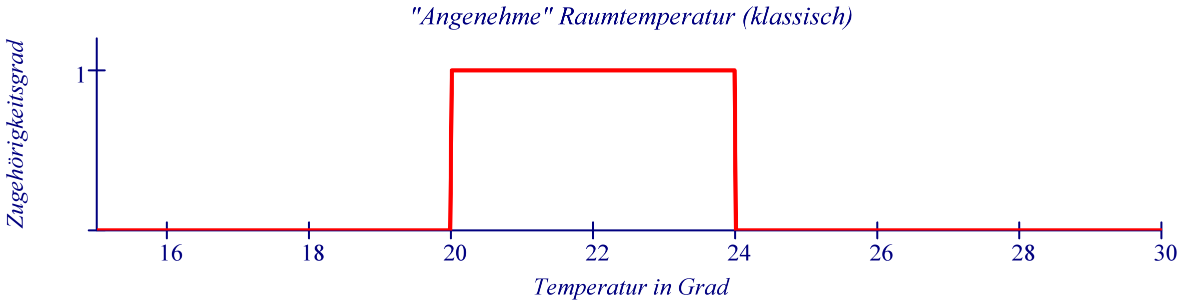
Fuzzy-Mengen

Fuzzy-Mengen (fuzzy (engl.): verwischt, verschwommen, unscharf) werden nun gerade durch solche Zugehörigkeitsfunktionen μ festgelegt, z. B. Dreiecke, Trapeze, ...



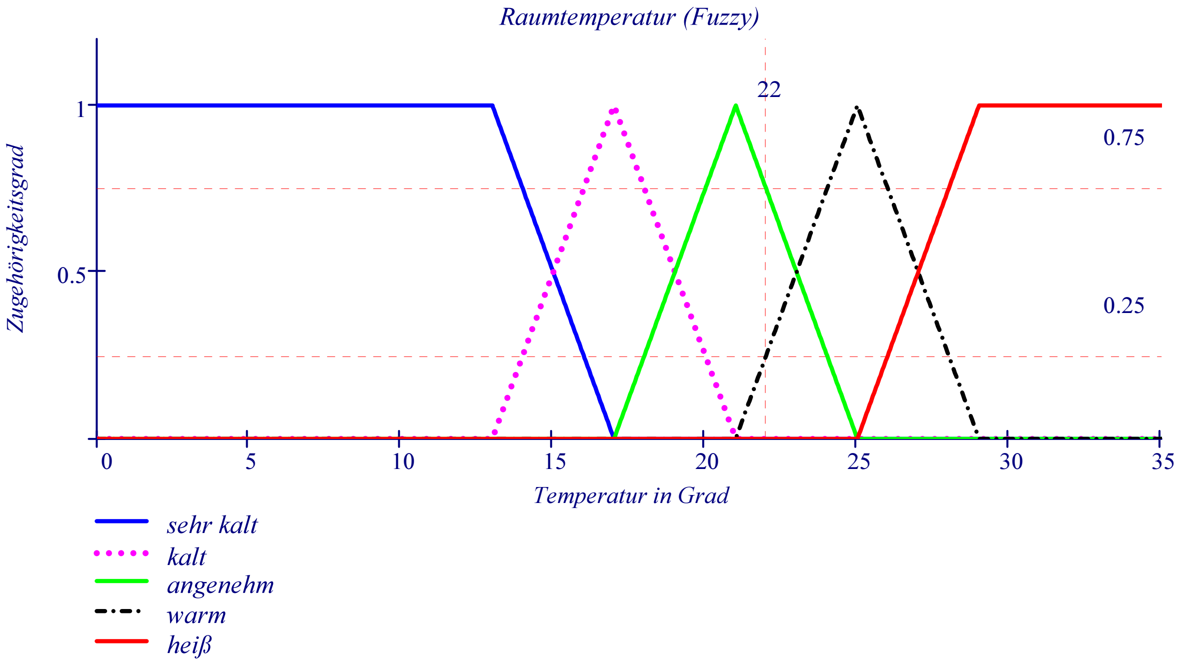
Die "wirklich (100%ig) angenehmen" Temperaturen liegen demgemäß in einem kleineren Bereich zwischen 21 ° und 23 ° (ist natürlich Geschmackssache), während man nach unten und oben immer weniger von angenehm sprechen kann (abnehmende %-Werte). Hier beginnen langsam die Bereiche "kühl" bzw. "warm" wichtig zu werden.

Die klassische Zugehörigkeit kann in diesem Sinn durch eine zweiwertige Zugehörigkeitsfunktion ausgedrückt werden:



Linguistische Variablen, linguistische Terme, Fuzzyfizierung

Um beim Beispiel zu bleiben: die sogenannte *linguistische Variable* Raumtemperatur (z. B. zwischen 0 und 35) kann durch einen Satz von *linguistischen Termen* lückenlos (und im allgemeinen überlappend) etwa folgendermaßen beschrieben werden:

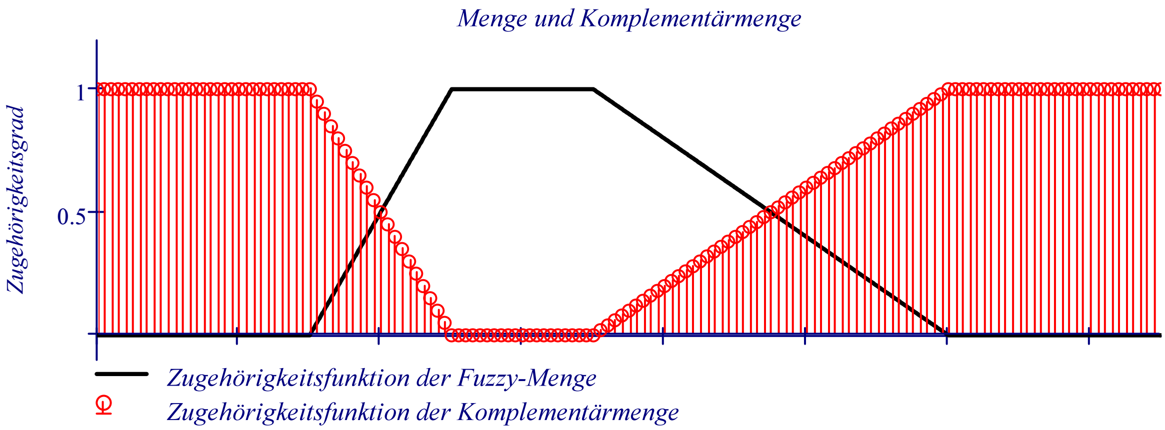


So betrachtet ist der Zugehörigkeitsgrad der Raumtemperatur 22 ° zum Bereich "angenehm" (einer der linguistischen Terme) 75% und zum Bereich "warm" 25%, d. h. 22 ° wird viel eher als angenehm empfunden denn als warm. Der Zugehörigkeitsgrad zu den anderen Temperaturbereichen ist jeweils 0.
Der Vorgang, bei dem man eine linguistische Variable durch linguistische Terme beschreibt, wird als *Fuzzyfizierung* bezeichnet.

Operationen mit Fuzzy-Mengen

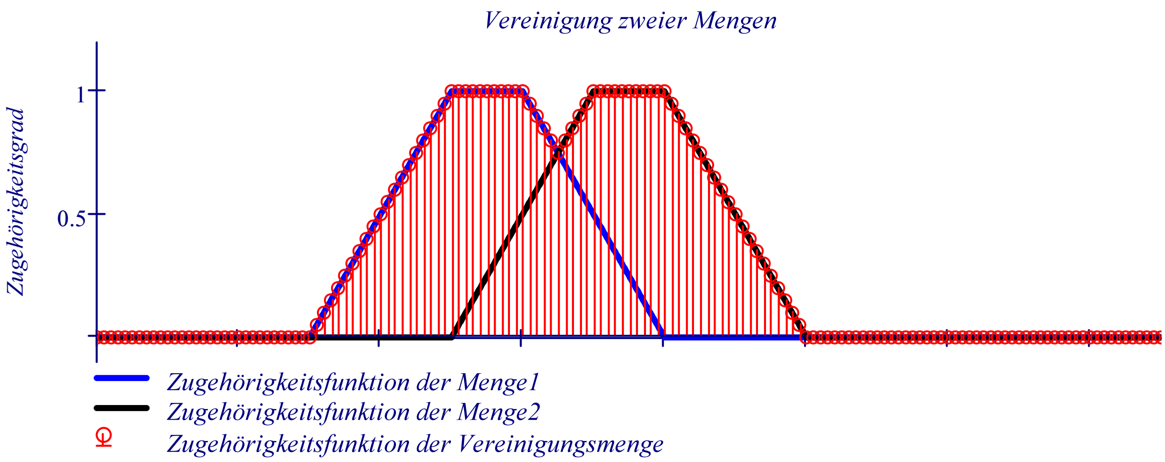
Die Fuzzy-Gegenstücke der klassischen Mengen-Operationen Komplementbildung, Vereinigung und Durchschnitt werden nun anschaulich begründet:
Die Zugehörigkeitsfunktion μ_C der Komplementärmenge liegt auf der Hand: $\mu_C(x) = 1 - \mu(x)$.

$x := 0, 0.01 .. 15$ $\qquad$ $x1 := 0, .1 .. 15$

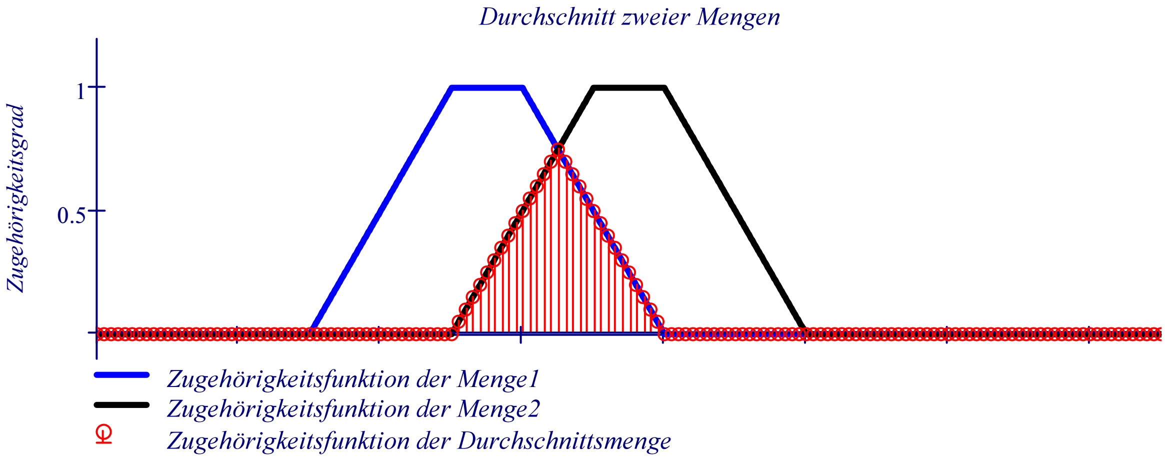


Bei den Zugehörigkeitsfunktionen von Vereinigung und Durchschnitt gibt es mehrere sinnvolle Definitionen. Hier soll jeweils nur eine dargestellt werden:

Die Zugehörigkeitsfunktion μ_V der Vereinigungsmenge ist $\mu_V(x) = max\left(\mu_1(x), \mu_2(x)\right)$; damit entspricht der Vereinigung-Zugehörigkeit immer die größere der beiden Einzelzugehörigkeiten.



Durch den Mengen-Durchschnitt wird die Zugehörigkeit eingeschränkt; deshalb ist die Minimumfunktion eine brauchbare Möglichkeit für die mathematische Beschreibung des Fuzzy-Mengen-Durchschnitts:
$\mu_D(x) = min\left(\mu_1(x), \mu_2(x)\right)$.



Die erwähnten Mengen-Operationen sind im klassischen Fall über die Logik-Operationen NICHT, ODER und UND definiert. Analog kann man auch bei Fuzzy-Mengen vorgehen. Damit ergeben sich die drei entsprechenden Fuzzy-Logik-Operatoren durch die oben dargestellten Definitionen der Zugehörigkeitsfunktionen der Mengen.
Für regelungstechnische Anwendungen fehlt uns allerdings noch die Logik-Operation der Implikation ("wenn ..., dann ..."). Sie wird etwas später an der Stelle eingeführt, an der sie gebraucht wird.

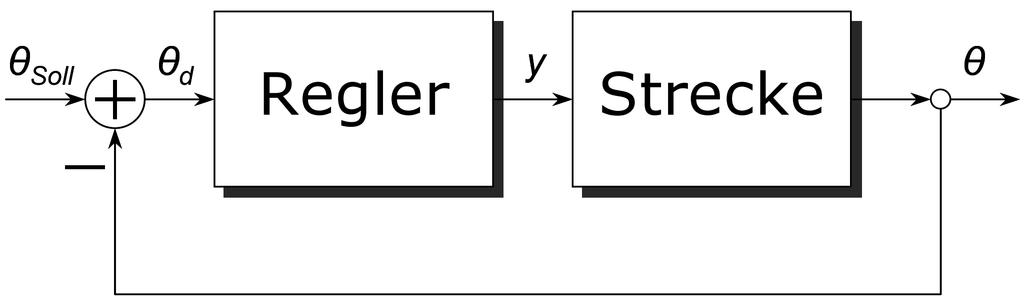
Fuzzy-Regelung

zum Anfang Kapitel zurück Kapitel weiter

Dieser Abschnitt soll eine Anwendung des Fuzzy-Konzeptes in der Regelungstechnik demonstrieren. Es werden nur die grundlegenden Prinzipien behandelt. Man darf sich deshalb keine Wunder bezüglich der Qualität der Reglung erwarten.

Der Regelkreis

Wir setzen den Standard-Regelkreis voraus, dessen Aufbau im nächsten Bild dargestellt ist. Als Regelstrecke denken wir uns einen Raum, dessen Temperatur (*Regelgröße* θ) auf einen gewünschten Sollwert (*Führungsgröße* θ_{Soll}) geregelt werden muss. Der Regler reagiert auf die *Regeldifferenz* θ_d ($\theta_d = \theta_{Soll} - \theta$) und gibt die *Stellgröße* y aus (in unserem Fall die Heizleistung).



Die Regelung soll nach Fuzzy-Ideen entwickelt werden; daher müssen Ein- und Ausgangssignal des Reglers zuerst einmal "fuzzyfiziert" werden:

Fuzzyfizierung von Regelgröße und Stellgröße

Dazu gehen wir denkbar einfach vor und definieren die Regeldifferenz ganz grob durch die drei linguistischen Terme "Negativ", "Null" und "Positiv" und legen dafür Zugehörigkeitsfunktionen fest:

$Negativ(x) := trapez\_inf\_links(x, -1, 0)$

$Null(x) := trapez(x, -1, 0, 0, 2)$

$Positiv(x) := trapez\_inf\_rechts(x, 0, 2)$

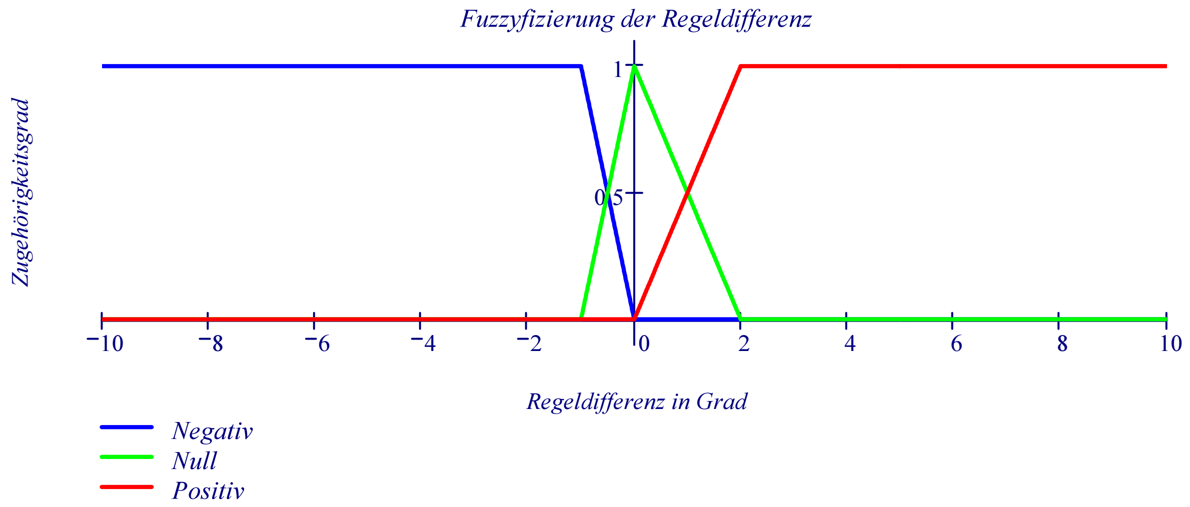
Entsprechendes geschieht bei der Stellgröße (Heizleistung): "Klein", "Mittel", "Groß"

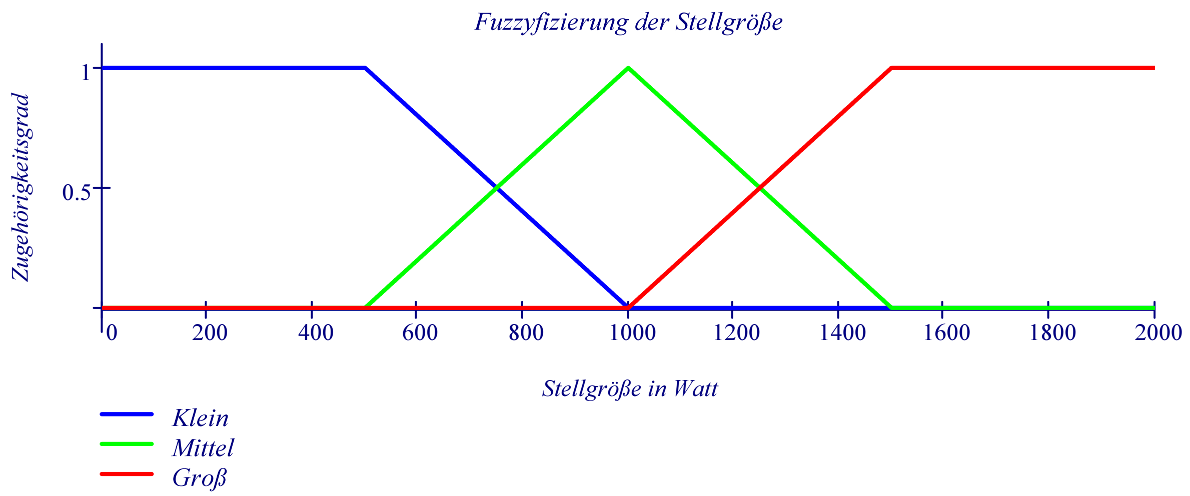
$Klein(x) := trapez(x, -1000, -500, 500, 1000)$

$Mittel(x) := trapez(x, 500, 1000, 1000, 1500)$

$Groß(x) := trapez(x, 1000, 1500, 2500, 3000)$

$\theta_d := -10, -9.99 .. 10$ $\theta_D := -10, -9.75 .. 10$ $y := 0, 1 .. 2000$ $Y := 0, 20 .. 2000$





Warum die Heizleistung über den dargestellten Bereich hinaus definiert wurde, wird später erklärt.

Der nächste Schritt ist das Aufstellen der

Regelbasis

In ihr steckt die "Intelligenz" des Reglers. Hier wird festgelegt, was der Regler in welcher Situation zu tun hat. Auch die Regelbasis wird fuzzymäßig formuliert. Dabei haben wir uns an die vorher in der Fuzzyfizierungsphase definierten linguistischen Terme zu halten.
D. h. die Regeldifferenz kann nur "Negativ", "Null" oder "Positiv" sein; ebenso gibt es für die Heizleistung nur die drei Möglichkeiten "Klein", "Mittel" und "Groß".
Nun, machen wir etwas daraus!

Was bedeutet Regeldifferenz = "Negativ"? Aufgrund der Definition der Regeldifferenz liegt in diesem Fall die Regelgröße über der Führungsgröße (also: Raumtemperatur über Solltemperatur). Von den drei möglichen Heizleistungen kommt damit wohl nur "Klein" in Frage.
Bei einer Regeldifferenz von "Null" können wir mit der "Mittleren" Heizleistung diesen Zustand aufrechterhalten (so muss das Ganze dimensioniert sein!), und bei "Positiver" Regeldifferenz ist die Temperatur zu niedrig --> "Große" Heizleistung (mit der wir im Dauerbetrieb auf viel zu hohe Temperaturwerte kommen würden).
Eine einfache Regelbasis, bestehend aus lediglich drei Regeln, deren ODER-Verknüpfung alle Möglichkeiten abdecken sollte, lautet somit (die Linienfarben in der Grafik weiter unten wurden so gewählt, dass sie entsprechend der Regelbasis zusammenpassen!):

Regel 1: Wenn θ_d = "Negativ", dann y = "Klein"
Regel 2: Wenn θ_d = "Null", dann y = "Mittel"
Regel 3: Wenn θ_d = "Positiv", dann y = "Groß"

Regel 1 $\vee$ Regel 2 $\vee$ Regel 3

Wir kommen an dieser Stelle auf die bereits oben angesprochene Implikation zurück. Denken wir uns dazu eine Regeldifferenz von $\theta_d = 1.5\ °$!

Dem Bild mit den Zugehörigkeitsfunktionen der Regelgröße ist zu entnehmen, dass diese Regeldifferenz "ein bisschen" als "Positiv", aber noch viel mehr als "Null" (darf man nicht zu klassisch eng sehen!) betrachtet wird; die jeweiligen Zugehörigkeitsgrade kann man leicht aus dem Diagramm herauslesen!

Unsere Regelbasis betreffend, bedeutet dies folgendes:
Regel 1 können wir getrost vergessen, da die Voraussetzung θ_d = "Negativ" zu 0% erfüllt ist.
Die Voraussetzungen für die Regeln 2 und 3 sind aber auch nur "mehr oder weniger" erfüllt: Bei Regel 2 haben wir es mit 25% Erfüllungsgrad zu tun, bei Regel 3 mit 75%.

Man argumentiert nun so:
Ist die Voraussetzung einer Implikation nur zu einem gewissen Prozentsatz erfüllt, dann kann die Folgerung daraus höchstens zum gleichen Prozentsatz erfüllt sein.

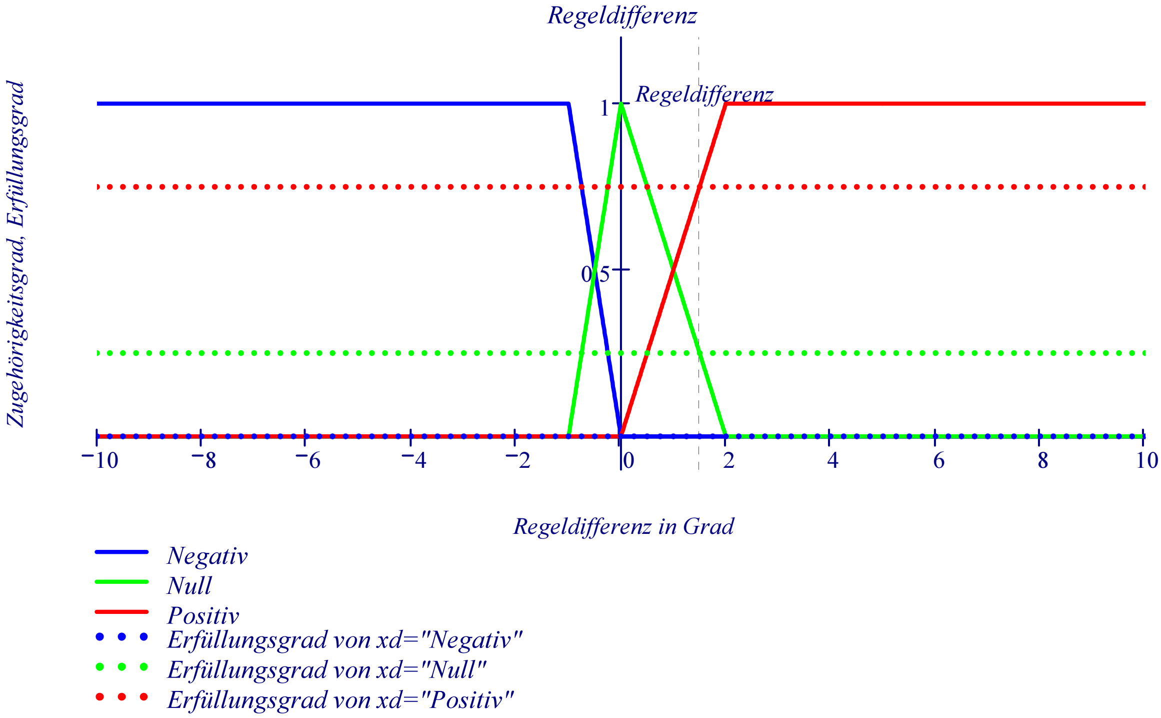
Das bedeutet: Aus der nur zu 25% erfüllten Bedingung "wenn θ_d = "Null"" folgt ein "dann y = "Mittel"", das auch nur zu 25% anzuwenden ist! Entsprechendes gilt für die Regel 3.
Dies kann nun dadurch berücksichtigt werden, dass man die Folgerungs-Zugehörigkeitsfunktionen (Heizleistung) in der betreffenden Höhe abschneidet (wieder nur eine von mehreren Möglichkeiten!).
Ein Schnitt weiter oben entspricht damit einer Regel mit höherem Erfüllungsgrad der Voraussetzung, also einer "wichtigeren" Regel.

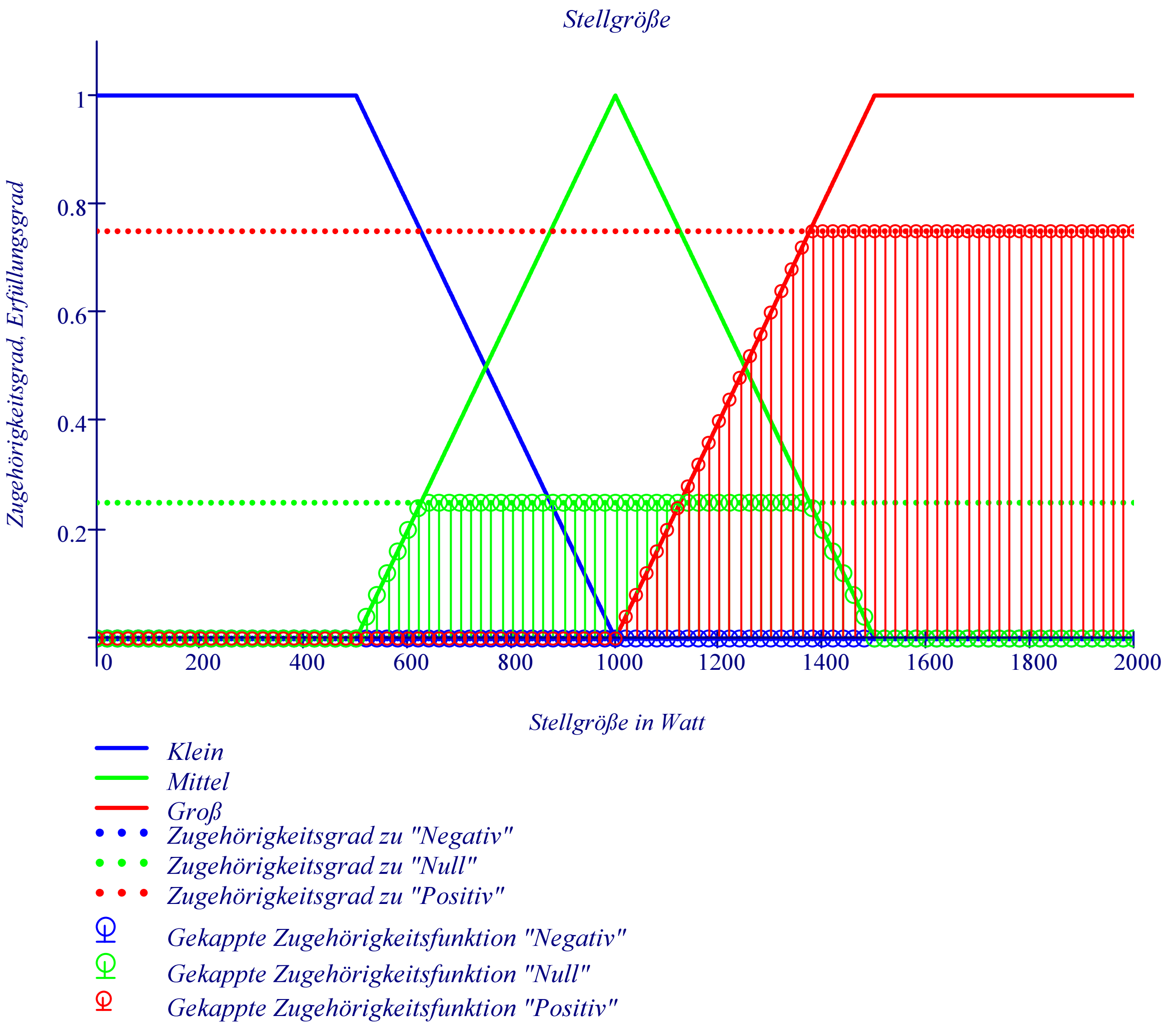
Ein konkreter Fall soll zur Veranschaulichung dienen:

"Scharfer" Wert der Regeldifferenz: $Regeldifferenz := 1.5$ $\theta_{d0} := Regeldifferenz$

Damit werden jetzt die Zugehörigkeitsgrade zu den Termen "Negativ", "Null" und "Positiv" berechnet:

$y1 := Negativ(\theta_{d0})$ $y2 := Null(\theta_{d0})$ $y3 := Positiv(\theta_{d0})$


Regeldifferenz
Regeldifferenz
Zugehörigkeitsgrad, Erfüllungsgrad
1
0.5
−10
−8
−6
−4
−2
0
2
4
6
8
10
Regeldifferenz in Grad
Negativ
Null
Positiv
Erfüllungsgrad von xd="Negativ"
Erfüllungsgrad von xd="Null"
Erfüllungsgrad von xd="Positiv"

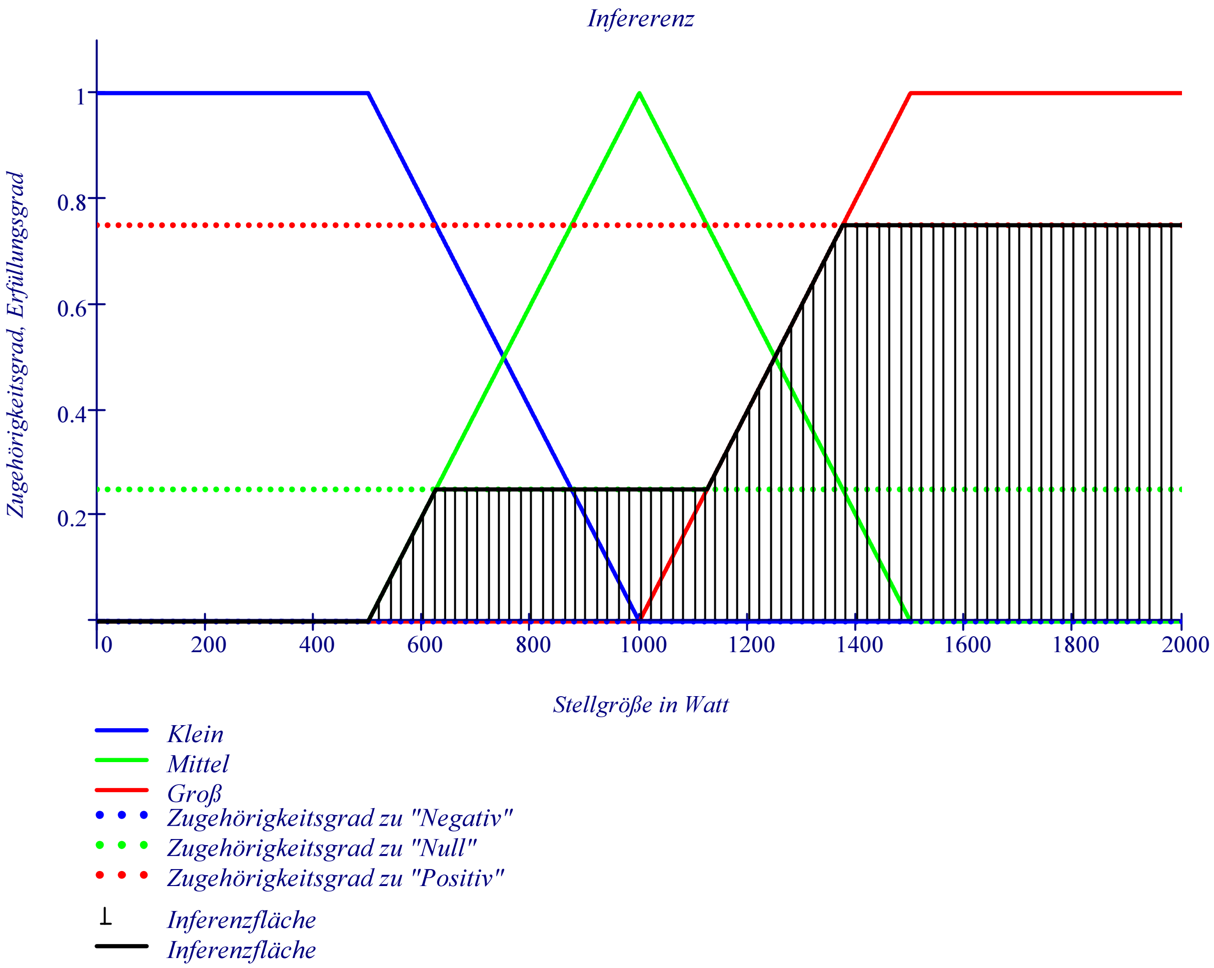

Stellgröße
Zugehörigkeitsgrad, Erfüllungsgrad
1
0.8
0.6
0.4
0.2
0
200
400
600
800
1000
1200
1400
1600
1800
2000
Stellgröße in Watt
Klein
Mittel
Groß
Zugehörigkeitsgrad zu "Negativ"
Zugehörigkeitsgrad zu "Null"
Zugehörigkeitsgrad zu "Positiv"
Gekappte Zugehörigkeitsfunktion "Negativ"
Gekappte Zugehörigkeitsfunktion "Null"
Gekappte Zugehörigkeitsfunktion "Positiv"

Rekapitulieren wir:
Zwei der drei Regel-Voraussetzungen sind zum Teil erfüllt. Bei Regel 3 trifft das mehr zu, bei Regel 2 weniger. Zu beiden Regeln gehören nun in der richtigen Höhe gekappte Zugehörigkeitsfunktionen der Heizleistung, also ein entsprechendes Trapez für "Groß" und eines für "Mittel".
Wegen der logischen ODER-Verknüpfung der Regeln haben wir es bei den zugehörigen Mengen mit der Vereinigung zu tun, also mit dem weiter oben bereits verwendeten Maximum-Operator bei den Zugehörigkeitsfunktionen.
So ergibt sich insgesamt ein etwas eigenartiger Verlauf der resultierenden Zugehörigkeitsfunktion. Die Bestimmung dieser "Figur" wird als *Inferenz* bezeichnet.

Inferenz nach der max-min-Methode

Aus dem oben Dargelegten ergibt sich nun die max-min-Methode zur Inferenzberechnung von selbst:
Zuerst werden mit dem Minimum-Operator die einzelnen Stellgrößen-Zugehörigkeitsfunktionen in der jeweiligen Höhe gekappt. Anschließend wird - wegen der ODER-Verknüpfung der drei Regeln - durch Anwendung des Maximum-Operators die Mengenvereinigung gebildet.

$$inferenz(x, \theta_d) := \left| \begin{array}{l} m1 \leftarrow min(Negativ(\theta_d), Klein(x)) \\ m2 \leftarrow min(Null(\theta_d), Mittel(x)) \\ m3 \leftarrow min(Positiv(\theta_d), Groß(x)) \\ max(m1, m2, m3) \end{array} \right.$$



In unserem Beispiel sollte nun die tatsächliche Heizleistung zwischen "Mittel" und "Groß" liegen, aber wegen der viel bedeutsameren Regel 3 eher bei "Groß".
Die höhere Wichtigkeit der Regel 3 kann nun bei der Berechnung der scharfen Stellgröße dadurch zum Ausdruck gebracht werden, dass man den Schwerpunkt der Inferenzfläche berechnet. Genaugenommen braucht man nur die waagrechte Koordinate des Schwerpunktes, also die senkrechte Schwerlinie! Ihre Position entspricht der resultierenden "scharfen" Stellgröße. Man spricht bei diesem Vorgang von der *Defuzzyfizierung.*

Bemerkung:
Die Schwerpunktmethode hat den Nachteil, dass der Stellgrößenbereich nicht voll ausgenutzt werden kann. Da der Schwerpunkt immer deutlich innerhalb der Fläche liegt, kann die Heizleistung nie in der Nähe von 0 oder in die Nähe der Maximalleistung von 2000 W liegen (obwohl die Temperatur viel zu groß oder zu klein ist!).
Deswegen setzt man die äußeren Zugehörigkeitsfunktionen symmetrisch über ihren physikalischen Bereich hinaus fort (siehe Bemerkung weiter oben und Grafik unten!). Mit dieser sogenannten randerweiterten Schwerpunktmethode kann der volle physikalische Stellbereich auch tatsächlich ausgenutzt werden.

Defuzzyfizierung nach der randerweiterten Schwerpunktmethode

Berechnung der waagrechten Schwerpunktkoordinate der resultierenden Inferenz-Figur:

$$y\_defuzzy(\theta_d) := \frac{\int_{-1000}^{3000} y \cdot inferenz(y, \theta_d)\, dy}{\int_{-1000}^{3000} inferenz(y, \theta_d)\, dy}$$

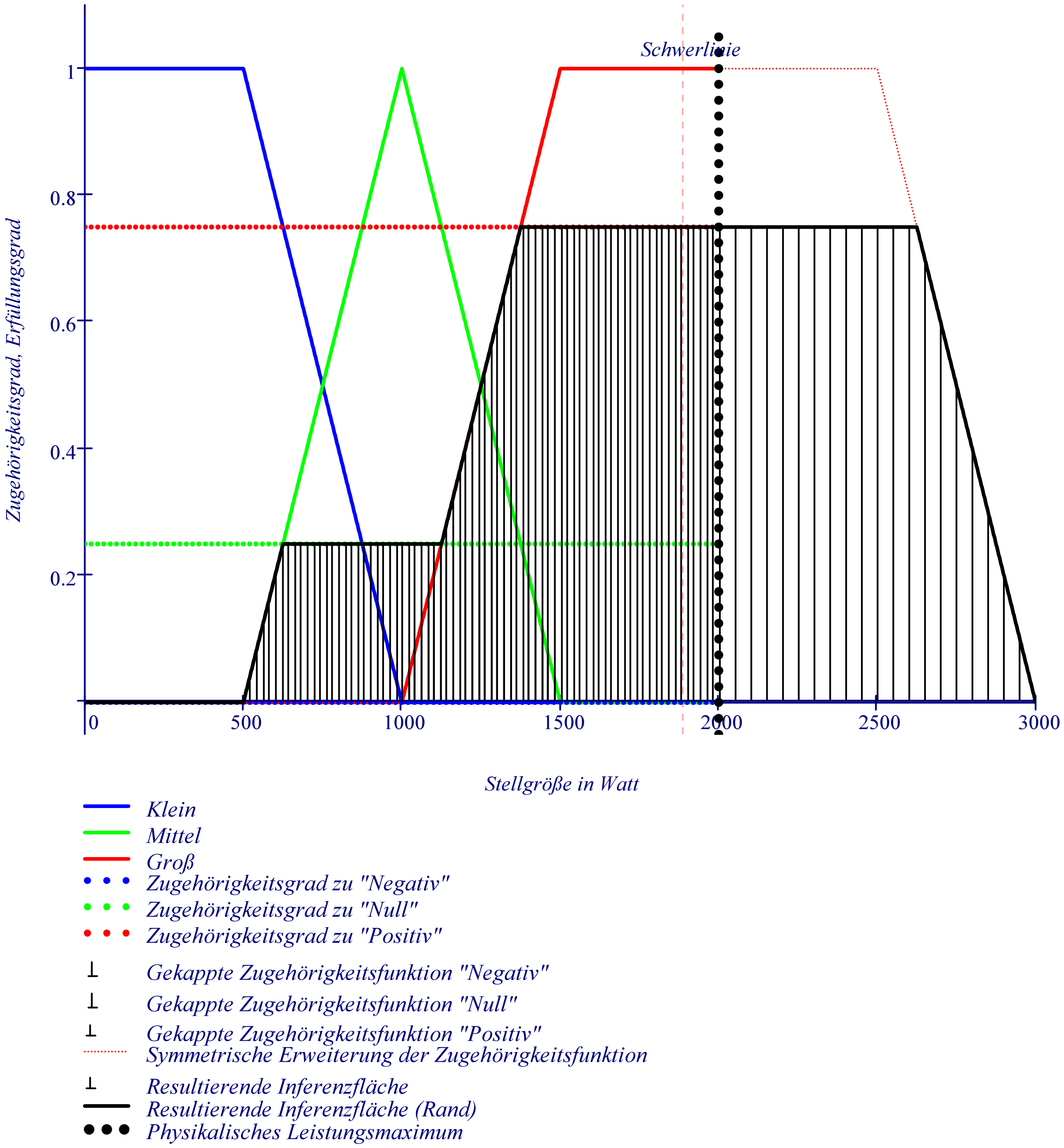
Dabei wird der symmetrischen Fortsetzung der beiden Zugehörigkeitsfunktionen "Klein" (bis -1000 W) und "Groß" (bis 3000 W) Rechnung getragen.

$y_{s0} := \left| y\_defuzzy(\theta_{d0}) \right|$ $y_{s0} = 1890$ $Stellgröße := y_{s0}$ $Schwerlinie := y_{s0}$

In der folgenden Grafik wird die diskutierte Vorgangsweise veranschaulicht:
Die schwarz schraffierte Fläche ist wieder die Inferenzfläche (die symmetrische Fortsetzung der Zugehörigkeitsfunktion "Groß" ist dünner schraffiert eingezeichnet. Die Lage der Schwerlinie entspricht dem "scharfen" Wert der Stellgröße.

Zum "scharfen" Wert der Regeldifferenz $\theta_{d0} = 1.5$ ° gehört die "scharfe" Stellgröße $y_{s0} = 1890$ Watt .

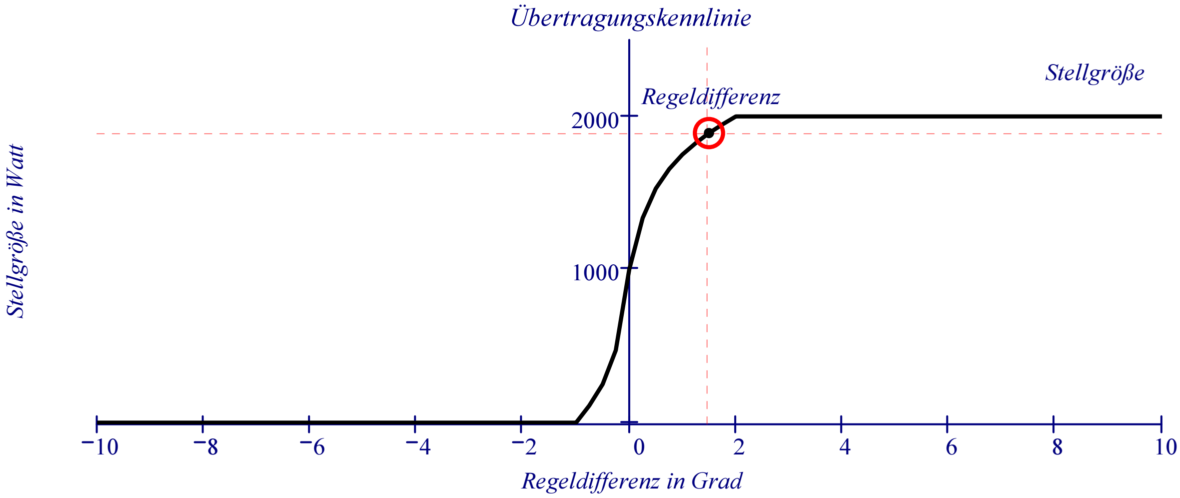
$yy := 2000..3000$ $\quad YY := 2000, 2050..3000$ $\quad xx := -0.05, -0.025..1.05$ $\quad yy1 := -1000..3000$



Berechnet man die Stellgröße als Funktion der Regeldifferenz, so erhält man die Übertragungskennlinie des Reglers. Daraus lässt sich zu jeder Regeldifferenz die entsprechende Stellgröße eindeutig ablesen.
In unserem (besonders einfachen) Fall handelt es sich um einen sog. Kennlinienregler, also einen rein statischen Regler ohne Gedächtnis (er beinhaltet z. B. kein integrierendes Verhalten).

Übertragungskennlinie

$\theta_d := -10, -9.75 .. 10$



Simulation des Regelkreises zum Anfang Kapitel zurück

Nun soll sich in einer Simulation zeigen, wie unser Fuzzy-Regelkonzept funktioniert!
Die Funktion *Fuzzy_sim* berechnet rekursiv - von $t = 0$ bis $t = Zeit$ - die zeitliche Entwicklung der Raumtemperatur θ .
Der Anfangswert der Temperatur wird durch den Parameter θ_{Start} vorgegeben, der Sollwert mit θ_{Soll} .

Als Regelstrecke wird ein PT_2-System mit der Laplace-Übertragungsfunktion $H(s) = \dfrac{c}{(1 + s \cdot T)^2}$ angenommen. Die daraus resultierende Differenzialgleichung 2. Ordnung wird schrittweise nach dem Eulerverfahren numerisch gelöst.
Der Faktor c wird gebraucht, um den Leistungumfang unserer Heizung an den gewünschten Temperaturbereich anzupassen. Im Klartext: bei einer konstanten (mittleren) Heizleistung von 1000 W soll die Raumtemperatur langfristig den Wert $22\ ^\circ$ anstreben.
N ist die Zahl der Rechenschritte, T die Zeitkonstante in der Übertragungsfunktion.

Zum Vergleich wird berechnet, wie ein reiner Schaltregler, der 2000 Watt Leistung ein- oder ausschalten kann, regelt. (Der Index F deutet auf Fuzzy hin, der Index S auf Schaltregler.)

Am Schluss werden die Teilergebnisse (jeweils Vektoren der Länge $N + 1$) mittels *erweitern* zu einer Gesamtmatrix zusammengefasst, die zur grafischen Darstellung wieder zerpflückt werden muss.

$$Fuzzy\_sim(\theta_{Start}, \theta_{Soll}, Zeit, N, T) := \left| \begin{array}{l} \Delta t \leftarrow \dfrac{Zeit}{N} \\ \theta_{F_0} \leftarrow \theta_{Start} \\ \theta_{F_1} \leftarrow \theta_{Start} \\ \theta_{S_0} \leftarrow \theta_{Start} \\ \theta_{S_1} \leftarrow \theta_{Start} \\ c \leftarrow 0.022 \\ k \leftarrow \dfrac{T}{\Delta t} \\ k_0 \leftarrow k^2 \\ k_1 \leftarrow 2 \cdot k \cdot (1 + k) \\ k_2 \leftarrow (1 + k)^2 \\ \text{for } n \in 2..N \\ \quad \left| \begin{array}{l} \theta_{dF_n} \leftarrow \theta_{Soll} - \theta_{F_{n-1}} \\ \theta_{dS_n} \leftarrow \theta_{Soll} - \theta_{S_{n-1}} \\ y_{F_n} \leftarrow y\_defuzzy(\theta_{dF_n}) \cdot c \\ y_{S_n} \leftarrow wenn(\theta_{dS_n} < 0, 0, 2000 \cdot c) \\ \theta_{F_n} \leftarrow \dfrac{y_{F_n} - k_0 \cdot \theta_{F_{n-2}} + k_1 \cdot \theta_{F_{n-1}}}{k_2} \\ \theta_{S_n} \leftarrow \dfrac{y_{S_n} - k_0 \cdot \theta_{S_{n-2}} + k_1 \cdot \theta_{S_{n-1}}}{k_2} \end{array} \right. \\ erweitern\left(\theta_F, \theta_S, y_F \cdot \dfrac{1}{c}, y_S \cdot \dfrac{1}{c}\right) \end{array} \right.$$

Eingabe der Simulationsparameter

$\theta_{Start} := 16$ $\theta_{Soll} := 20$ $Zeit := 30$ $N := 500$ $T := 5$

$\Delta t := \dfrac{Zeit}{N}$ $\Delta t = 0.06$

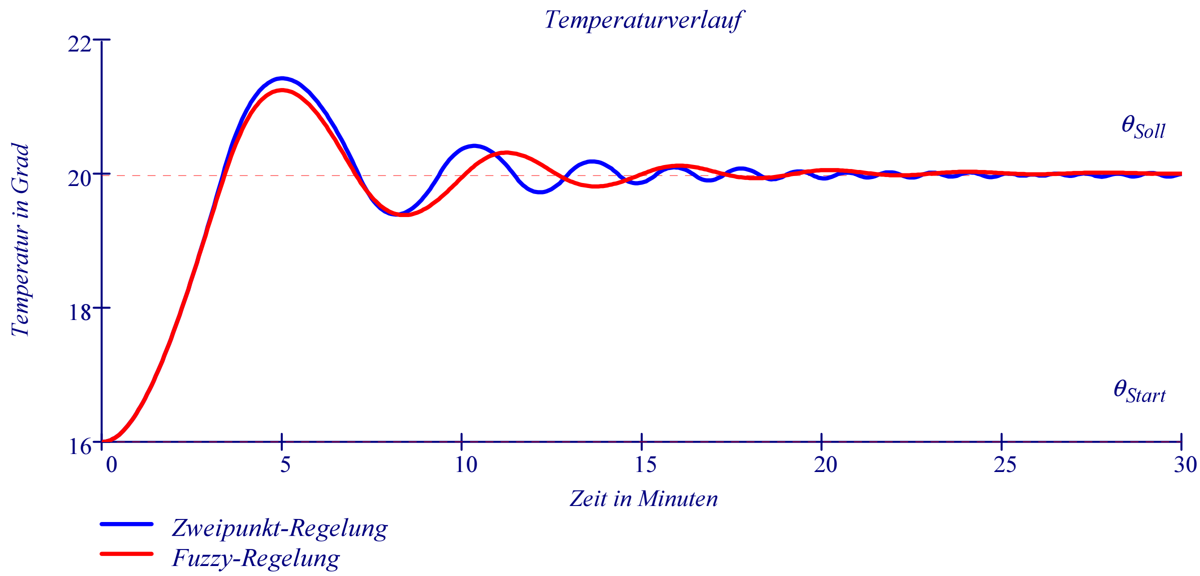
$Ergebnis := Fuzzy\_sim(\theta_{Start}, \theta_{Soll}, Zeit, N, T)$

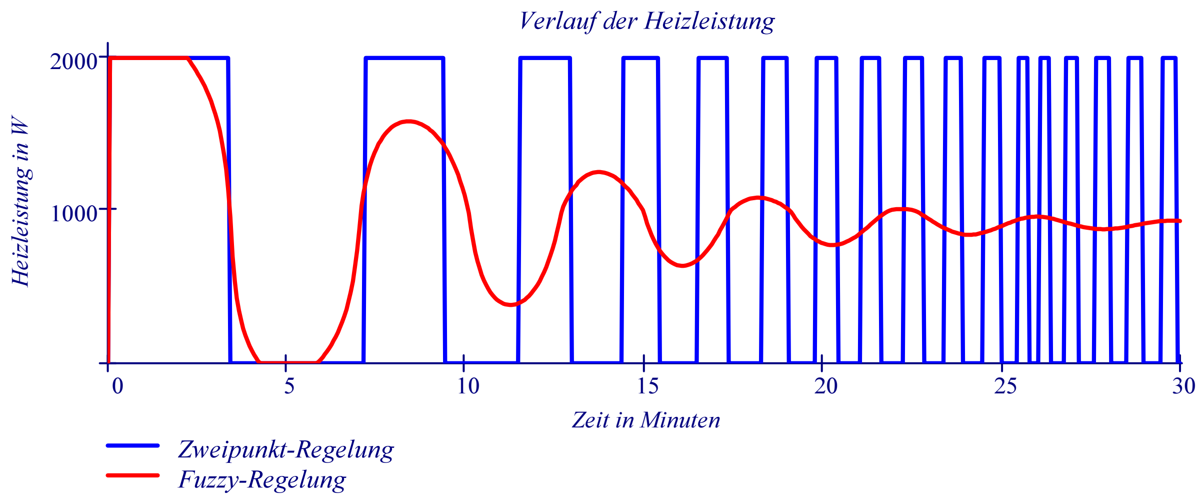
Extrahieren der Teilergebnisse:

Raumtemperatur: $\theta_F := Ergebnis^{\langle 0 \rangle}$ $\theta_S := Ergebnis^{\langle 1 \rangle}$

Heizleistung: $y_F := Ergebnis^{\langle 2 \rangle}$ $y_S := Ergebnis^{\langle 3 \rangle}$

$n := 0 .. N$





Die beiden Regelungsvarianten sollen hier nicht ausführlich diskutiert werden, da insbesondere im Fall des Fuzzy-Reglers viele Parameter anders eingestellt werden können als hier gezeigt (Anzahl der linguistischen Terme, Form und Überlappungsgrad der Zugehörigkeitsfunktionen, Inferenz- und Defuzzifizierungsmethode).
Beim Schaltregler kann man dagegen nur über die geschaltete Leistung und über den Zeitpunkt des Schaltens verfügen (etwa: wird genau beim Erreichen der Solltemperatur ausgeschaltet (was ein stärkeres Überschwingen zur Folge hat) oder schon bei niedrigerer Temperatur, um eben dieses Überschwingen zu verringern?).
Der Schaltregler ist zweifellos ein sehr einfacher Reglertyp, der nur zwei Zustände der Leistungszufuhr kennt, während beim Fuzzy-Regler die Möglichkeit bestehen muss, die Heizleistung kontinuierlich und ohne Zeitverzögerung (Kennlinienregler!) zu verändern.

Ziel der Arbeit war in erster Linie, die Grundideen der Fuzzy-Logik, garniert mit einer einfachen technischen Anwendung, in einer Weise etwas zu beleuchten, die auch interessierte Schüler leicht bewältigen können. Das Anwendungsbeispiel wurde besonders einfach gewählt, um nicht die Regelungstechnik zu sehr in den Vordergrund zu rücken.
Aber: auch das Spielen mit einfachen Beispielen kann Spaß machen!

Und: auch wenn man sich nicht immer ganz präzise (sondern eben "fuzzy") ausdrückt, können durchaus Ergebnisse erzielt werden.

zum Anfang **Kapitel zurück**