

## 11. Berechnungen aus der Regelungstechnik

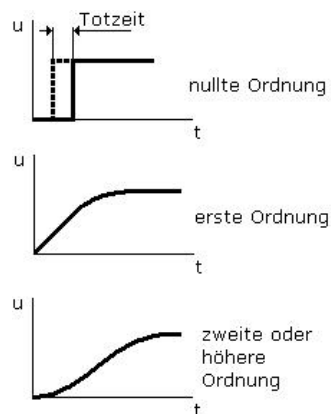
### 11.1 P-Regler nullter, erster, zweiter oder höherer Ordnung

Die Sprungantwort eines P-Reglers kann unterschiedlich ausfallen. Je nach Verlauf (Bild 11-1) spricht man von nullter, erster, zweiter oder höherer Ordnung.

Ein P-Regler nullter Ordnung ist zum Beispiel ein Zuflussregler für Gasverbraucher, der einen konstanten Gasdruck erzeugen soll. Die Totzeit kommt durch den Druckaufbau oder Druckabbau zustande.

Ein P-Regler erster Ordnung ist zum Beispiel ein Drehzahlregler für eine Dampfturbine. Die Anpassung der Drehzahl über mehr oder weniger Dampf ergibt ein Drehzahlverhalten erster Ordnung.

Ein P-Regler zweiter Ordnung ist durch einen Heizkörper in einem Raum gegeben. Der Heißwasserregler der Heizung erzeugt eine Kennlinie zweiter Ordnung.



**Bild 11-1**  
Regelabweichung

Die Differentialgleichung eines P-Reglers erster Ordnung lautet:

$$T_s \cdot \frac{du}{dt} + u = K_p \cdot e. \quad (11.1)$$

Bei P-Reglern zweiter und höherer Ordnung lautet der Ansatz (hier 3. Ordnung):

$$a_3 \cdot \frac{d^3 u}{dt^3} + a_2 \cdot \frac{d^2 u}{dt^2} + a_1 \cdot \frac{du}{dt} + u = K_p \cdot e. \quad (11.2)$$

Betrachten wir zur Übung eine P-Strecke erster Ordnung. Die Differentialgleichung erster Ordnung (11.1) ersetzen wir durch die Näherungsgleichung

$$T_s \cdot \frac{\Delta u}{\Delta t} + u = K_p \cdot e.$$

Daraus folgt für eine inkrementale Veränderung

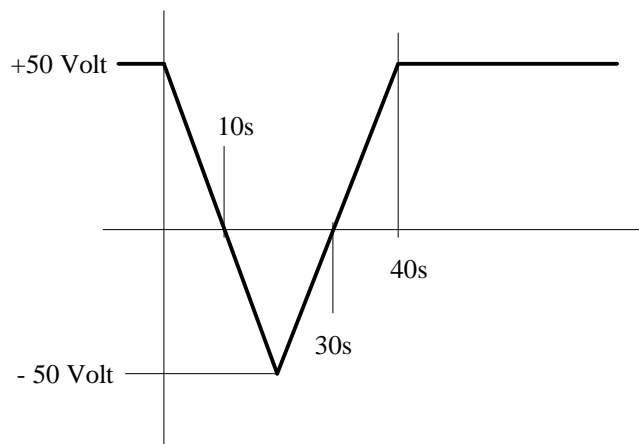
$$T_s \cdot \frac{\Delta u}{\Delta t} + (u + \Delta u) = K_p \cdot (e + \Delta e),$$

umgestellt

$$\Delta u \cdot \left( \frac{T_s}{\Delta t} + 1 \right) = K_p \cdot (e + \Delta e) - u,$$

$$\Delta u = \frac{K_p \cdot (e + \Delta e) - u}{\left( \frac{T_s}{\Delta t} + 1 \right)}.$$

Als Beispiel betrachten wir einen P-Regler erster Ordnung mit  $K_p=10$ ,  $T=25s$  und einen in Bild 11.2 dargestelltem Signalverlauf bei einer Schrittweite von  $\Delta t=1s$ .



**Bild 11-2**  
Regelabweichung

#### Codeliste 11.1 Signalverlauf des P-Regler-Beispiels

```
Option Explicit

Private Sub PRegler1()
    Dim Kp, Ts, t, e, de, u, du As Double
    Dim i As Integer

    Kp = 10
    Ts = 25
```

```

e = 50
de = 0
u = Kp * e
i = 0
For t = 0 To 80

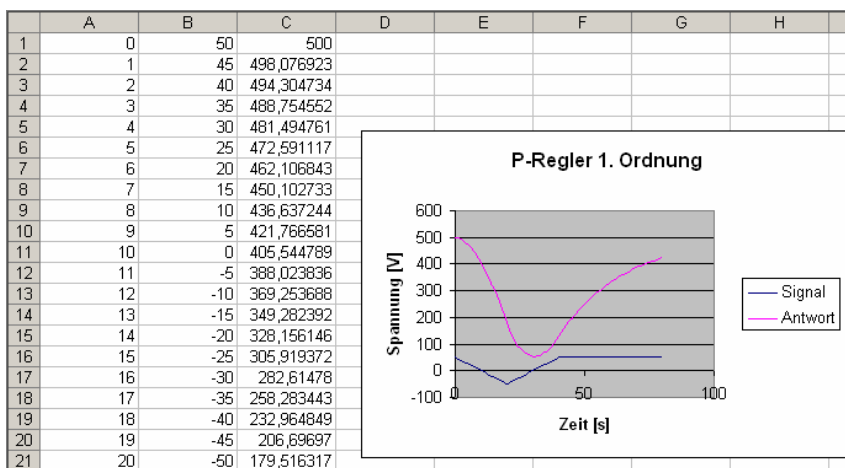
  'Signal
  If t <= 20 Then
    e = -5 * t + 50
  Else
    If t <= 40 Then
      e = 5 * t - 150
    Else
      e = 50
    End If
  End If

  'Antwort
  du = (Kp * e - u) / (Ts + 1)
  u = u + du

  'Ausgabe
  i = i + 1
  Cells(i, 1) = t
  Cells(i, 2) = e
  Cells(i, 3) = u

Next t
End Sub

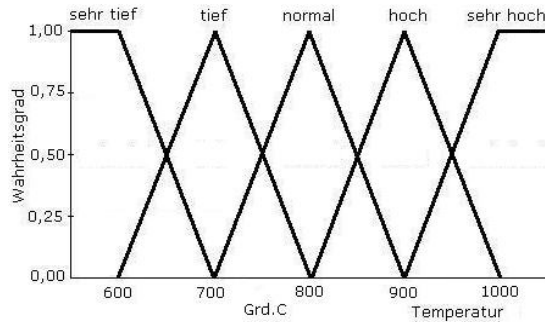
```



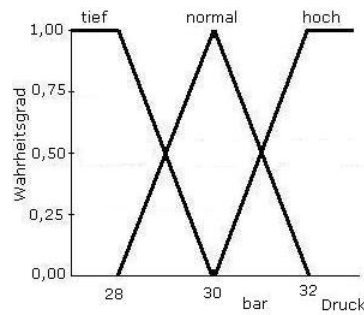
**Bild 11-3**  
Signalverlauf

## 11.2 Die Fuzzy-Regelung eines Industrieofens

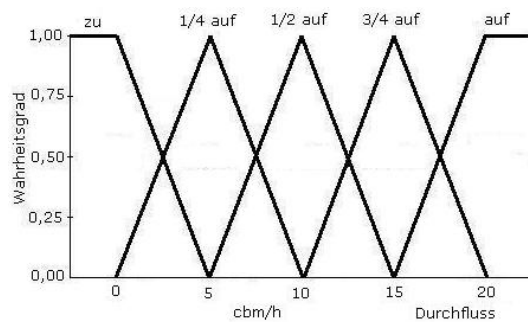
Gesucht ist das Regelfeld für die Brennkammer eines Industrieofens. Zu regeln sind die Temperatur im Brennraum und der Druck, mit dem das Brenngas zugeleitet wird. Die notwendigen Daten ergeben sich aus den nachfolgenden Bildern.



**Bild 11-4**  
Fuzzy-Set Temperatur



**Bild 11-5**  
Fuzzy-Set Druck



**Bild 11-6**  
Ventilstellungen

Für diese Wahrscheinlichkeiten definieren wir jetzt die Regeln in Form einer Inferenzen-Matrix.

**Tabelle 11.2** Inferenzen-Matrix zur Ventileinstellung

Druck\Temp.	sehr tief	tief	normal	hoch	sehr hoch
tief	auf	auf	¾ auf	½ auf	¼ auf
normal	auf	¾ auf	½ auf	½ auf	zu
hoch	¾ auf	½ auf	¼ auf	zu	zu

**Tabelle 11.3** Struktogramm zur Berechnung des Fuzzy-Reglers

Für alle Temperaturen T von 600 bis 1000 Grad Celsius jeweils um 50 Grad verändert	
Für alle Drücke von tief bis hoch jeweils um ¼ -Anteil verändert	
Fuzzyfizierung der Temperatur $wT(i)=f(\text{Temperatur-Set}), i=0,\dots,4$	
Fuzzyfizierung des Drucks $wD(i)=f(\text{Drücke-Set}), i=0,\dots,2$	
Eintragung der Wahrheitswerte in eine Matrix $M(0,i+1)=wT(i), i=0,\dots,4$ $M(i+1,0)=wD(i), i=0,\dots,4$	
Auswertung der Matrix, Inferenzen $M(i,j)=\text{Minimum}(M(i,0),M(0,j)), i=1,\dots,3, j=1,\dots,5$	
Normierung der Summen gleicher Ventilstellungen auf 1	
	$v(i)=\sum M_v(j,k), i=0,\dots,4, j=1,\dots,3, k=1,\dots,5$
	$s=\sum v(i), i=0,\dots,4$
	$v_n(i)=v(i)/s$
Bestimmung des Gesamtschwerpunktes und damit der Stellgröße $u = \frac{\sum_i v(i)^2 \cdot s_i}{\sum_i v(i)^2}$	
Ausgabe der Temperatur, des Drucks und der errechneten Ventilstellung	
Grafische Anzeige des Kennfeldes	

**Codeliste 11.2** Die Auswertungsprozeduren

```
Option Explicit
Option Explicit
Dim wT(4), wD(3) As Double

Sub Auswertung()
    Dim T, M(3, 5), v(4) As Double
    Dim i, il, i2, z As Integer
    Dim u, u1, u2, sv As Double
    Dim MyDoc As Object
    Dim Shp As Shape
    Set MyDoc = ThisWorkbook.Worksheets("Fuzzy")
    MyDoc.Activate
    MyDoc.Cells.Clear
    '
    'alle Charts löschen
    For Each Shp In MyDoc.Shapes
        Shp.Delete
    Next
    '
    'Auswertungsstart
    z = 0
    '
    'Über alle Temperaturen
    For T = 600 To 1000 Step 50
        '
        'Fuzzyfizierung
        Call FuzzyTemperatur(T)
        For i = 0 To 2
            M(0, i + 1) = wT(i)
        Next i
        z = z + 1
        Cells(1, z) = T
        '
        'Über alle Drücke
        For i = 1 To 9
            Call FuzzyDrücke(i)
            For il = 0 To 2
                M(il + 1, 0) = wD(il)
            Next il
        '
        'Inferenzen
        For il = 1 To 3
```

```
For i2 = 1 To 5
    M(i1, i2) = Minimum(M(i1, 0), M(0, i2))
Next i2
Next i1
'
'Defuzzifizierung
v(4) = M(1, 1) + M(1, 2) + M(2, 1)
v(3) = M(1, 3) + M(2, 2) + M(3, 1)
v(2) = M(1, 4) + M(2, 3) + M(2, 4) + M(3, 2)
v(1) = M(1, 5) + M(3, 3)
v(0) = M(2, 5) + M(3, 4) + M(3, 5)
sv = v(0) + v(1) + v(2) + v(3) + v(4)
For i1 = 0 To 4
    If Not sv = 0 Then
        v(i1) = v(i1) / sv
    End If
Next i1
u1 = v(1) ^ 2 * 0.25 + v(2) ^ 2 * 0.5 + v(3) ^ 2 * 0.75 + v(4) ^ 2 * 1
u2 = v(0) ^ 2 + v(1) ^ 2 + v(2) ^ 2 + v(3) ^ 2 + v(4) ^ 2
If Not u2 = 0 Then
    u = u1 / u2
Else
    u = 0
End If
Cells(1 + i, z) = u
Next i
Next T
End Sub

Function Minimum(a, b) As Double
    If a <= b Then
        Minimum = a
    Else
        Minimum = b
    End If
End Function

Sub FuzzyTemperatur(T)
    Dim i As Integer
    If T < 600 Then
        wT(0) = 1
    Else
        If T <= 700 Then
            wT(0) = (700 - T) / 100
        End If
    End If
End Sub
```

```
Else
    wT(0) = 0
End If
End If
For i = 1 To 4
    If T < 700 + (i - 1) * 100 Then
        wT(i) = 0
    Else
        If T <= 700 + i * 100 Then
            wT(i) = (T - (700 + (i - 1) * 100)) / 100
        Else
            If T <= 700 + (i + 1) * 100 Then
                wT(i) = (700 + (i + 1) * 100 - T) / 100
            Else
                wT(i) = 0
            End If
        End If
    End If
End If
Next i
If T < 900 Then
    wT(4) = 0
Else
    If T <= 1000 Then
        wT(4) = (T - 900) / 100
    Else
        wT(4) = 1
    End If
End If
End Sub

Sub FuzzyDrücke(i)
    Select Case i
    Case 1
        wD(0) = 1: wD(1) = 0: wD(2) = 0
    Case 2
        wD(0) = 0.75: wD(1) = 0.25: wD(2) = 0
    Case 3
        wD(0) = 0.5: wD(1) = 0.5: wD(2) = 0
    Case 4
        wD(0) = 0.25: wD(1) = 0.75: wD(2) = 0
    Case 5
        wD(0) = 0: wD(1) = 1: wD(2) = 0
    Case 6
        wD(0) = 0: wD(1) = 0.75: wD(2) = 0.25
    End Select
End Sub
```

```

Case 7
    wD(0) = 0: wD(1) = 0.5: wD(2) = 0.5
Case 8
    wD(0) = 0: wD(1) = 0.25: wD(2) = 0.75
Case 9
    wD(0) = 0: wD(1) = 0: wD(2) = 1
End Select
End Sub
    
```

**Bild 11-7** Berechnetes Kennfeld

