

# Ein Beitrag zum Einsatz selbsteinstellender PI-Regler mit Fuzzy-Logik am Beispiel einer Bauteilprüfmaschine

Michael Berger

Forschungsbereich Nr. 22/95

Meß-, Steuer- und Regelungstechnik

**Übersicht:** In diesem Bericht werden Ein- und Nachstellverfahren zur automatischen Anpassung der Regelparameter eines PI-Reglers mit Fuzzy-Logik für eine Bauteilprüfmaschine vorgestellt und am Versuchsträger dokumentiert. Die Ein- und Nachstellverfahren dienen zur Erstinbetriebnahme der Anlage mit dem PI-Regler und der Nachstellung der Regelparameter beim Wechsel der Betriebspunkte und zählen zu den selbsteinstellenden Verfahren im geschlossenen Regelkreis.

Gerhard-Mercator-Universität - GH Duisburg  
Meß-, Steuer- und Regelungstechnik  
Prof. Dr.-Ing. H. Schwarz

# Inhaltsverzeichnis

Nomenklatur	II
<b>1 Einleitende Übersicht</b>	<b>1</b>
<b>2 Beschreibung des Versuchsträgers</b>	<b>3</b>
2.1 Konventionelle Reglereinstellverfahren . . . . .	5
2.2 Reglereinstellverfahren mit der Fuzzy-Logik . . . . .	6
<b>3 Einstellverfahren klassischer PI-Regler mit der Fuzzy-Logik</b>	<b>7</b>
3.1 Einstellverfahren nach dem Muster des Wendetangenten-Verfahrens . . . . .	7
3.2 Einstellverfahren über zwei Merkmale . . . . .	16
3.3 Modifikation des Adaption Algorithmus . . . . .	20
<b>4 Zusammenfassung und Ausblick</b>	<b>28</b>
<b>5 Literaturverzeichnis</b>	<b>29</b>
<b>Anhang</b>	<b>31</b>
<b>A Meßergebnisse</b>	<b>31</b>

## Nomenklatur

$A_k$	:	Fläche unter der $k$ -ten Fuzzy-Referenzmenge des Ausgangs
$c$	:	Federrate
$c_I$	:	Relativer $I$ -Anteil
$cir_{Tuning}$	:	Ausgangsvariable der Fuzzy-Einstellebene
$c_{1,2}$	:	Begrenzung des Einflußbereiches der Fuzzy-Referenzmengen
$e$	:	Regelabweichung
$e_{blb}, e_\infty$	:	bleibende Regelabweichung
$e_{max}$	:	maximale Überschwingweite
$F_{ist}$	:	Ist-Kraft
$F_{soll}$	:	Soll-Kraft
$\int e(t)dt$	:	Integral der Regelabweichung
$k$	:	diskretes Zeitargument
$k_C$	:	Verstärkung
$\tilde{k}_C$	:	Verstärkung nach der Berechnung des Fuzzy-Algorithmus
$k_C^{[alt]}$	:	„alte“ Verstärkung ( $(I - 1)$ -te Iteration)
$k_C^{[neu]}$	:	„neue“ Verstärkung ( $(I)$ -te Iteration)
$k_i$	:	Skalierungsfaktor
$k_I$	:	integrale Verstärkung (PI-Regler)
$k_p$	:	proportionale Verstärkung (PI-Regler)
$kr_{Tuning}$	:	Ausgangsvariable der Fuzzy-Einstellebene
$m_i$	:	Modalwert der $i$ -ten Fuzzy-Referenzmenge
$m_u$	:	Anzahl der Fuzzy-Referenzmengen des Ausgangs
$o_v$	:	Überschwingweite
$t$	:	Zeit
$t_{an}$	:	Anregelzeit
$\tilde{t}_{an}$	:	Anschwingzeit
$t_{ein}$	:	Einschwingzeit
$t_i$	:	Nachstellzeit
$\tilde{t}_i$	:	Nachstellzeit nach der Berechnung des Fuzzy-Algorithmus
$t_i^{[alt]}$	:	„alte“ Nachstellzeit ( $(I - 1)$ -te Iteration)
$t_i^{[neu]}$	:	„neue“ Nachstellzeit ( $(I)$ -te Iteration)
$T_u$	:	Verzugszeit
$T_s$	:	Anstiegszeit
$u$	:	Stellgröße
$w$	:	Führungsgröße
$W$	:	Wendepunkt der Wendetangente
$y$	:	Systemantwort
$y_\infty$	:	Beharrungswert der Systemantwort

**Mengen:**

$A$	:	Fuzzy-Menge
$\mathbb{A}$	:	Menge der Fuzzy-Referenzmengen
$\mathbb{D}$	:	Definitionsbereich
$\mathbb{D}_N$	:	Definitionsbereich normierter Größen ( $\mathbb{D}_N = [-1; 1]$ )
$\mathbb{D}_N^+$	:	Definitionsbereich normierter positiver Größen ( $\mathbb{D}_N^+ = [-1; 1]$ )
$X_{i(E_{blb})}^{E_{blb}}$	:	$i(E_{blb})$ -te Fuzzy-Referenzmenge bzgl. $E_{blb}$
$X_{i(T_{an})}^{T_{an}}$	:	$i(T_{an})$ -te Fuzzy-Referenzmenge bzgl. $T_{an}$
$X_{i(E_{max})}^{E_{max}}$	:	$i(E_{max})$ -te Fuzzy-Referenzmenge bzgl. $E_{max}$
$A_{i(O_v)}^{O_v}$	:	$i(O_v)$ -te Fuzzy-Referenzmenge bzgl. $O_v$
$A_{i(\Gamma)}^{\Gamma}$	:	$i(\Gamma)$ -te Fuzzy-Referenzmenge bzgl. $\Gamma$
$Y_{i(T_i)}^{T_i}$	:	$i(T_i)$ -te Fuzzy-Referenzmenge bzgl. $T_i$
$Y_{i(K_C)}^{K_C}$	:	$i(K_C)$ -te Fuzzy-Referenzmenge bzgl. $K_C$
$Z_{i(Cir_{Tuning})}^{Cir_{Tuning}}$	:	$i(Cir_{Tuning})$ -te Fuzzy-Referenzmenge bzgl. $Cir_{Tuning}$
$Z_{i(Kr_{Tuning})}^{Kr_{Tuning}}$	:	$i(Kr_{Tuning})$ -te Fuzzy-Referenzmenge bzgl. $Kr_{Tuning}$

**Unschärfe Größen:**

$E_{blb}$	:	fuzzifizierte Größe $e_{blb}$
$E_{max}$	:	fuzzifizierte Größe $e_{max}$
$K_C$	:	fuzzifizierte Größe $k_C$
$O_v$	:	fuzzifizierte Größe $o_v$
$T_{an}$	:	fuzzifizierte Größe $t_{an}$
$T_i$	:	fuzzifizierte Größe $t_i$
$\Gamma$	:	fuzzifizierte Größe $\gamma$

**Vektoren und Matrizen:**

$\mathbf{p}, \mathbf{p}^*$	:	Reglerparametervektor
$\mathbf{x}$	:	Vektor der Eingangsgrößen des Fuzzy-Algorithmus

**Griechische Buchstaben:**

$\alpha$	:	Erfülltheitsgrad
$\alpha_A$	:	linke Spannweite der Fuzzy-Referenzmenge
$\beta_A$	:	rechte Spannweite der Fuzzy-Referenzmenge

$\gamma$	:	Einregelverhalten
$\varepsilon$	:	Toleranzband

**Funktionen:**

$\mu_A$	:	Zugehörigkeitsfunktion zur Fuzzy-Menge $A$
$\mu_{\tilde{U},k}$	:	Zugehörigkeitsfunktion der Fuzzy-Menge $\tilde{U}_k$ , die Ergebnis aller Regeln mit der Fuzzy-Referenzmenge $U_k$ ist
$\tilde{\mu}_{\tilde{U},k}$	:	Zugehörigkeitsfunktion der Fuzzy-Menge $\tilde{\tilde{U}}_k$ , welcher Ausgang des Fuzzy-Systems ist

**Operatoren:**

$\max(\cdot)$	:	Maximum-Operator
$\min(\cdot)$	:	Minimum-Operator
$\in$	:	Element von
$\notin$	:	kein Element von
$(\cdot)^T$	:	transponierte Größe
$\Sigma$	:	Summation
$\bigvee_{i=1}^a$	:	Maximum-Operator über $a$ -Größen
$D$	:	Differenzierer
$\forall$	:	Allquantor

# 1 Einleitende Übersicht

Ziel des regelungstechnischen Entwurfes ist die gezielte Beeinflussung realer dynamischer Systeme. Dazu wird einerseits eine Regelstruktur und andererseits ein Bewertungskriterium z. B. über ein Gütefunktional (Schwarz 1981) für die Güte der entworfenen Struktur benötigt. Die ideale Lösung wäre ein Optimalregler, d. h. eine durch nichts zu verbessernde Struktur. In den meisten Fällen wird man auf die Strukturoptimalität verzichten müssen, da die wichtigsten Grundvoraussetzungen zur Aufstellung des dynamischen Optimierungsproblems, nämlich die exakte Modellierbarkeit des zu steuernden/regelnden Systems in einer Zustandsraumdarstellung nicht erfüllt werden kann. In der Praxis hilft man sich an dieser Stelle mit vorhandenen und bewährten parametrischen Reglerstrukturen, wobei die Parametereinstellung entweder auf dem der Parameteroptimierung oder auf der Basis heuristischer Faustformeln und Tuningvorschriften (Kuhn 1995a) mit dem Ziel einer hinreichenden Güte, welches hier behandelt wird, erfolgt.

Zur Überprüfung der Dauerfestigkeit von Bauteilen läßt sich in einer Prüfmaschine mit Hilfe eines hydraulischen Zylinders ein gewünschtes Belastungsprofil erzeugen. Die dynamischen und statischen Eigenschaften der Regelstrecke werden maßgeblich durch die zu untersuchenden Proben bestimmt und sind daher in der Regel nicht exakt bekannt, so daß die Parameter der Kraftregelung an das veränderliche Streckenverhalten angepaßt werden müssen. Der zeitliche Verlauf der Belastungskraft wird mit einem konventionellen PI-Regler geregelt. Die Anpassung erfolgt zur Zeit von Hand, z. B. nach heuristischen Faustformeln oder Tuningvorschriften und soll automatisiert werden. Der Einsatz der automatischen Inbetriebnahmehilfe dient daher zur Verkürzung der Inbetriebnahmezeit und damit zur Senkung der Inbetriebnahmekosten. Als Voraussetzungen für die Akzeptanz eines solchen Inbetriebnahmeverfahrens seitens der Anwender sind folgende Punkte zu beachten:

- einfache Handhabung,
- möglichst einfaches und verständliches Konzept,
- wenig oder keine Bedienparameter und
- keine oder geringe Anforderungen an das Streckenverhalten .

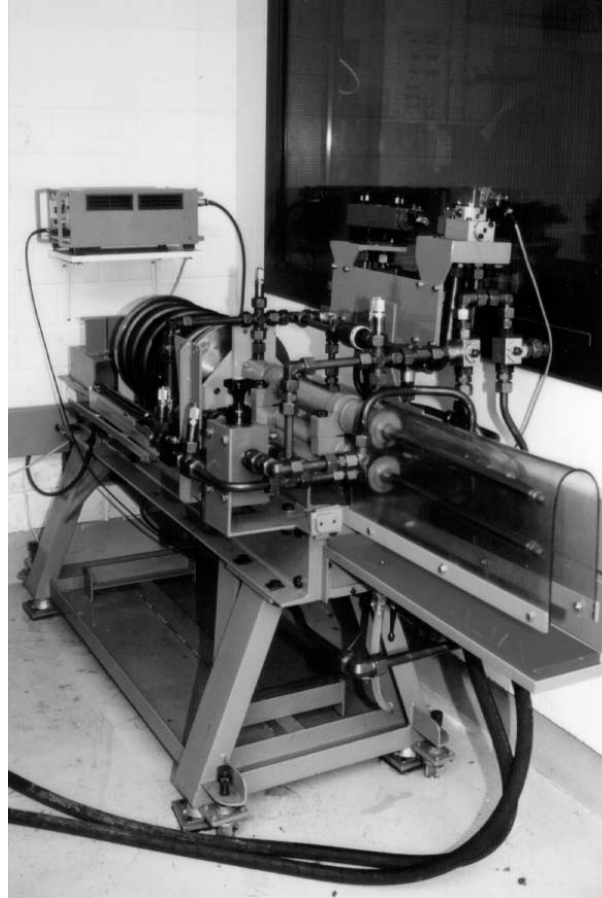
Das selbsteinstellende Verfahren dient während der Inbetriebnahmephase der Anlage oder auf gesonderten Wunsch des Anwenders eine geeignete Reglereinstellung zu gewinnen. Hierbei wird die Reaktion des Prozesses auf ein Testsignal (Führungssprung) ausgewertet. Die Auswertung beschränkt sich dabei auf wenige Merkmale. Anhand dieser werden die Regelparameter sukzessiv eingestellt. In diesem Bericht werden zwei verschiedene Ein- und Nachstellverfahren zur automatischen Anpassung der Regelparameter eines PI-Reglers mit Fuzzy-Logik (Zadeh 1965) für eine Bauteilprüfmaschine vorgestellt und am Versuchsträger dokumentiert. Die Ein- und Nachstellverfahren dienen zur Erstinbetriebnahme der

Anlage mit dem PI-Regler und der Nachstellung der Regelparameter beim Wechsel der Betriebspunkte und zählen zu den selbsteinstellenden Verfahren im geschlossenen Regelkreis. Die Ein- und Nachstellverfahren verlangen nur, daß die Regelstrecke stabil ist und zeichnen sich durch ein einfaches und verständliches Konzept aus. Somit ist der universelle Einsatz des Ein- und Nachstellverfahrens für verschiedene Bauteilprüfmaschinen gegeben, wobei entsprechend der Regelstrecke und den Anforderungen Gütekriterien wie Überschwingweite, statische Regelabweichung und Anregelzeit festgelegt werden können. Die Parameter des PI-Reglers werden dabei sukzessiv im geschlossenen Regelkreis eingestellt. Im Gegensatz dazu können die meisten konventionellen Ein- und Nachstellverfahren nur angewandt werden, wenn die Regelstrecke eine oder mehrere große Zeitkonstanten besitzt und/oder die Sprungantwort einen s-förmigen Verlauf aufweist, womit die Einsatzfähigkeit der meisten konventionellen Ein- und Nachstellverfahren auf bestimmte Regelstrecken begrenzt ist.

Im Abschnitt 2 wird der Versuchsträger der Bauteilprüfmaschine mit seinen Meßeinrichtungen vorgestellt. Danach werden kurz einige aus der Literatur bekannte konventionelle Einstellverfahren für PID-Regler bzw. PI-Regler vorgestellt (Ziegler und Nichols 1942, Chien, Hrones und Reswick 1952, Klein, Hartmut und Pandit 1992, Latzel 1993 und Kuhn 1995b) und auf ihre Anwendbarkeit bezüglich der Bauteilprüfmaschine untersucht. Der Abschnitt 3 befaßt sich mit den von Tlili (1993) und von Jörissen (1995) optimierten, entwickelten Fuzzy-Einstellverfahren konventioneller PI-Regler nach dem Muster des Wendetangenten-Verfahrens und dem von Chatziioannidis (1995) angepaßten von Pfeiffer (1994) entwickelten Fuzzy-Einstellverfahren. Beide Verfahren wurden bereits in der Simulation mit dem Simulationsprogramm Hyvos 4.0 der Firma Mannesmann-Rexroth erfolgreich getestet. Die Verfahren zeichnen sich dadurch aus, daß sie mit sehr wenigen Merkmalen (zwei bis drei) und Iterationsschritten (Anpassungsschritten) (fünf bis zehn) zur Einstellung der Regelparameter auskommen. Im Vergleich zum erstellten Fuzzy-Einstellverfahren von Zarneckow (1993), welches mehr als sechs Merkmale und mehr als 19 Iterationsschritte benötigt. In diesem Bericht wird die Leistungsfähigkeit der beiden Fuzzy-Einstellverfahren am realen Prozeß einer Bauteilprüfmaschine dokumentiert. Der Bericht schließt mit einer Zusammenfassung und einem Ausblick in Abschnitt 4.

## 2 Beschreibung des Versuchsträgers

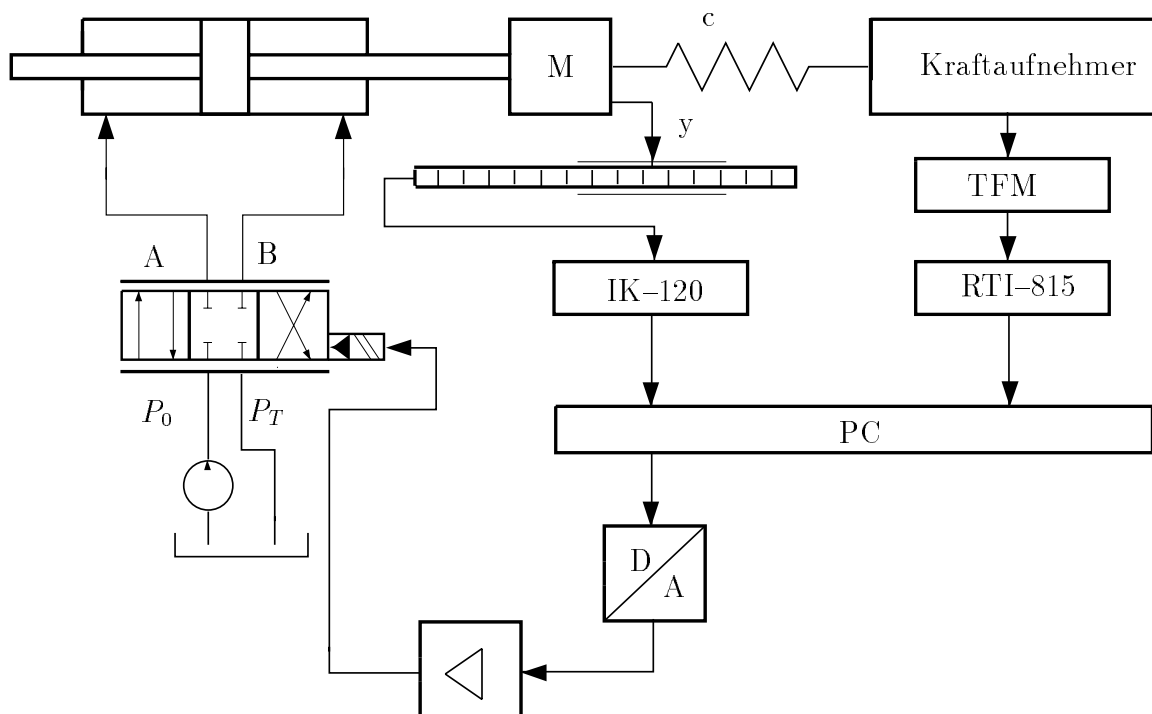
Bei dem Versuchsträger (Bild 2.1) handelt es sich um einen Doppelzylinderprüfstand mit einem Servo-Wegeventil in 4-Wege-Ausführung, einem Servoverstärker, einer Feder und den Meßeinrichtungen: inkrementales Längenmeßsystem und einem Kraftaufnehmer. Das Bild 2.2 illustriert den meßtechnischen Aufbau des Versuchsträgers.



**Bild 2.1:** Versuchsträger

Der Kraftaufnehmer enthält Dehnungsmeßstreifen, die ihren Widerstand proportional zur aufbrachten Kraft verändern. Im Trägerfrequenzmeßverstärker (TFM), wird die Widerstandsänderung mit Hilfe einer Wheatstonschen Meßbrücke in eine Spannungsänderung umgeformt. Der TFM ist so eingestellt, daß am Ausgang eine Spannung im Bereich zwischen 0 und 10 Volt vorliegt. Der Prüfstands-PC ist mit einer IK-120 Zählerkarte von der Fa. Heidenhain und einer RTI-815 Karte Multifunktionskarte von der Fa. Analog Devices ausgestattet. Die ermittelten Werte liegen anschließend in vorgegebenen Adreßbereichen für den Abruf des Programmes bereit (Spielmann 1993). Gefahren wird der Prozeß mit einer Einstellung des Druckbegrenzungsventils von 80 bar bis 100 bar und einer Pumpendrehzahl von  $300 \text{ min}^{-1}$ .





**Bild 2.2:** Schematischer Aufbau des Versuchsträgers

## 2.1 Konventionelle Reglereinstellverfahren

Bei der Inbetriebnahme von Regelungen sind häufig über die Regelstrecke nur geringe Kenntnisse vorhanden. Auch ist nicht immer und überall ein Datenerfassungssystem implementiert, um die Regelstrecke zu identifizieren und einen Regler anzugeben. Daher muß man sich mit der Streckenübergangsfunktion begnügen, um mit deren Hilfe geeignete Regelparameter zu ermitteln (Latzel 1993). Die bekanntesten konventionellen Einstellverfahren beruhen darauf, daß man die Streckenübergangsfunktion durch die Kenngrößen Proportionalbeiwert  $K_s$ , Anstiegszeit  $T_s$  und der Verzugszeit  $T_u$  beschreibt. Die empirisch aus einer Vielzahl von Regelkreisuntersuchungen gefundenen Einstellregeln von Ziegler und Nichols (1942) haben sich zum Teil in der Praxis bewährt. Jedoch können diese Einstellverfahren nicht an jeder Strecke zur Anwendung kommen. Zum einen können einige Prozesse aus technischen Gründen (Sicherheit, Verschleiß) nicht bis an ihre Stabilitätsgrenze gefahren werden und zum anderen besitzt nicht jede Strecke große Zeitkonstanten, so daß eine Approximation des Systemverhaltens durch ein System erster Ordnung mit Totzeit nicht zu rechtfertigen ist. So kann z. B. das Verfahren von Sowa (1989) zur Selbsteinstellung von PI-Reglern, welches vom Grundgedanken her eine Automatisierung des Wendetangentenverfahrens nach Ziegler und Nichols ist, nicht verwendet werden. Das Verfahren eignet sich besonders für Prozesse mit den folgenden dynamischen Eigenschaften:

- stabile offene Strecke,
- reelle Pole in der linken  $s$ -Halbebene (ohne imaginären Anteil) und
- große Zeitkonstanten.

Grundsätzlich wird auch hier eine signifikante Ersatztotzeitkonstante  $T_u$  zur Bestimmung der Regelparameter benötigt. Da die Bauteilprüfmaschine ein System ohne Ausgleich ist (offene Strecke), sehr kleine Zeitkonstanten besitzt und ein schwingungsfähiges Verhalten aufweisen kann, eignet sich das Verfahren von Sowa (1989) zur automatischen Selbsteinstellung von PI-Reglern für diesen Prozeß nicht. Auch die *Chien-Hornes-Reswick*-Regeln (Wendetangentenverfahren) (Chien, Hornes und Reswick 1952) erfordern eine nicht zu vernachlässigbare Ersatztotzeit der Strecke. Neuere Verfahren, wie das von Latzel (1993), liefert zwar sehr gute Ergebnisse, erfordert jedoch ein Nachschlagen in Tabellen. Man kann nicht durch rasches Betrachten der Sprungantwort auf die Regelparameter schließen. Die Einstellregeln für PID-Regler nach der T-Summen-Regel von Kuhn (1995b) ergeben vergleichbare Ergebnisse hinsichtlich der zu erzielenden Regelgüte wie das Verfahren von Latzel (1993) (Kuhn 1995b) und haben sich in der Praxis an verschiedenen Strecken bewährt. Es wird jedoch zur Auswertung der Einstellregeln die sogenannte  $s$ -förmige Sprungantwort benötigt und ist somit für den Prozeß der Bauteilprüfmaschine nicht geeignet.



### 3 Einstellverfahren klassischer PI-Regler mit der Fuzzy-Logik

Die folgenden vorgestellten Einstellverfahren werden zur off-line Adaption der PI-Reglerparameter (selbsteinstellende Verfahren im geschlossenen Regelkreis) für den Versuchsträger einer Bauteilprüfmaschine eingesetzt. Hierbei werden die Parameter eines idealen PI-Reglers

$$u(t) = k_P e(t) + k_I \int_0^t e(t) dt \quad (3.1)$$

bzw. in Standardform

$$u(t) = k_C \left( e(t) + \frac{1}{t_i} \int_0^t e(t) dt \right) \quad (3.2)$$

mit den Verstärkungen  $k_C$ , der Nachstellzeit  $t_i$  mit Hilfe der Fuzzy-Logik nachgestellt. Der Vorteil dieser Ansätze liegt in der einfachen Erweiterbarkeit bestehender konventioneller PI-Regler um die Einstellkomponenten (Kroll 1993).

#### 3.1 Einstellverfahren nach dem Muster des Wendetangenten-Verfahrens

Bei der Beurteilung der Güte einer Regelung erweist es sich als zweckmäßig, den zeitlichen Verlauf der Regelgröße  $y(t)$  zu betrachten. Eine typische Antwort eines schwingungsfähigen Regelungskreises auf eine sprungförmige Erregung der Führungsgröße ist im Bild 3.1 dargestellt. Zur näheren Beschreibung dieser Führungsübergangsfunktion werden die folgenden Begriffe eingeführt:

- Die *maximale Überschwingweite*  $e_{max}$  gibt den Betrag der maximalen Regelabweichung an, die nach erstmaligem Erreichen des Sollwertes (100 %) auftritt.
- Die *Anstiegszeit*  $T_s$  ergibt sich aus dem Schnittpunkt der Tangente im Wendepunkt  $W$  von  $y(t)$  mit der 0%- und 100%-Linie.
- Die *Verzugszeit*  $T_u$  ergibt sich aus dem Schnittpunkt der Wendetangente mit der  $t$ -Achse.
- Die *Anregelzeit*  $t_{an}$  ist der Zeitpunkt, bei dem erstmalig der Sollwert (100 %) erreicht wird. Es gilt näherungsweise

$$t_{an} \approx T_u + T_s .$$

- Die *bleibende Regelabweichung*  $e_{blb} = e_\infty$ .

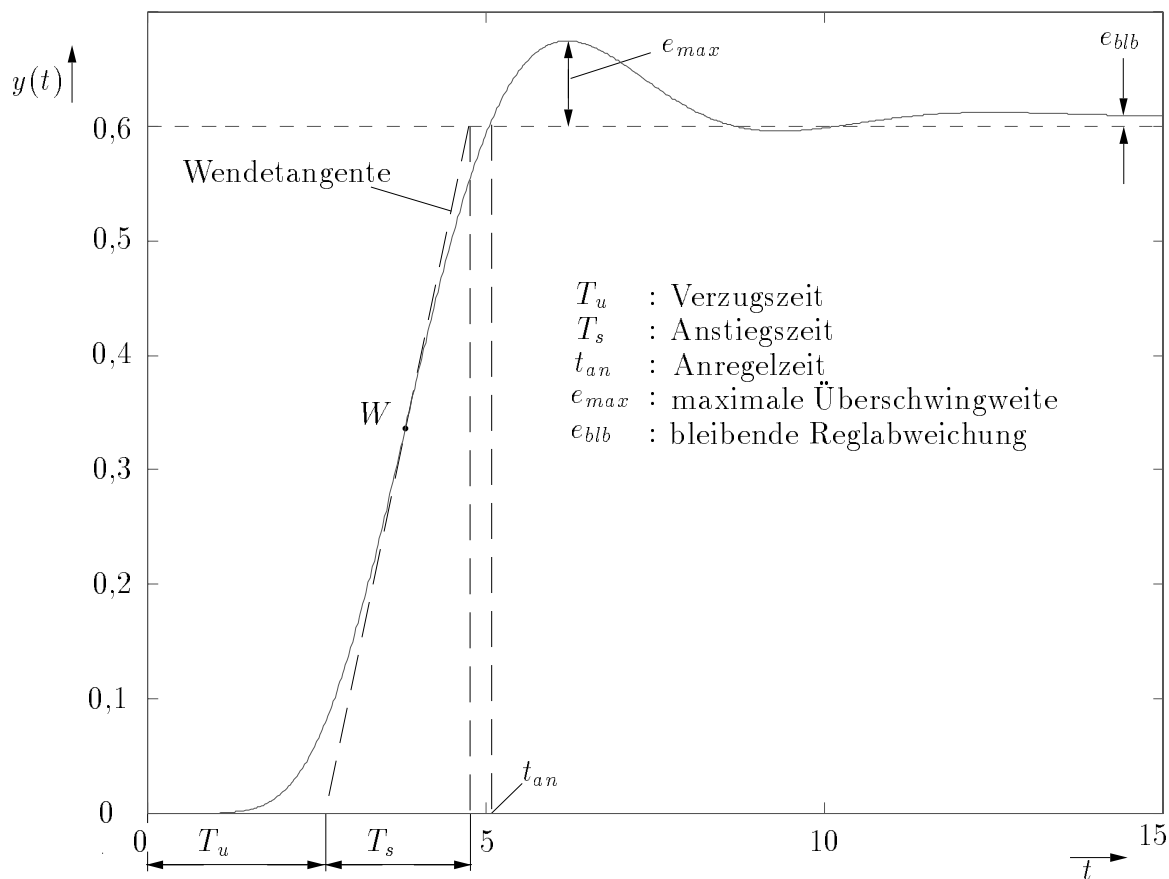


Bild 3.1: Merkmale der Sprungantwort

Von den hier eingeführten Größen kennzeichnet  $e_{max}$  die Dämpfung des Systems und  $t_{an}$  bzw.  $T_u$  und  $T_s$  die Dynamik des Regelkreisverhaltens, während die bleibende Regelabweichung  $e_{blb}$  das statische Verhalten charakterisiert. Zur Ein- und Nachstellung der Regelparameter  $\mathbf{p} = [k_p; k_I]$  bzw.  $\mathbf{p}^* = [k_C; t_i]$  des PI-Reglers wird die maximale Überschwingweite  $e_{max}$ , die Anregelzeit  $t_{an} \approx T_u + T_s$  und die bleibende Regelabweichung  $e_{blb}$  verwendet. Diese drei Merkmale werden anhand der Sprungantwort des Systems bestimmt und dem Fuzzy-Algorithmus als Eingangsgrößen zugeführt. Über diese drei Merkmale der Sprungantwort berechnet der Fuzzy-Algorithmus die Verstärkung  $\tilde{k}_C$  und die Nachstellzeit  $\tilde{t}_i$ . Die Regelparameter des PI-Reglers werden dann über

$$k_C = k_C^{[neu]} = \tilde{k}_C k_C^{[alt]} \quad (3.3)$$

bzw.

$$t_i = t_i^{[neu]} = \tilde{t}_i t_i^{[alt]} \quad (3.4)$$

berechnet.

**Fuzzifizierung:**

Nachdem aus dem Verlauf der Sprungantwort die drei Merkmale der Regelgröße bestimmt wurden, werden sie durch entsprechende Skalierungsfaktoren  $k_{e_{blb}}$ ,  $k_{t_{an}}$  und  $k_{e_{max}}$  multiplikativ auf einen normierten Definitionsbereich  $\mathbb{D}_N$  bzw.  $\mathbb{D}_N^+$  gebracht und anschließend über Fuzzy-Einermengen fuzzifiziert (Wang 1994).

**Definition 1** (Bertram u. a. 1994)

Eine Fuzzy-Einermenge  $A$  ist eine Fuzzy-Menge, deren Zugehörigkeitsfunktion  $\mu_A$  nur an einer Stelle  $x_0$  von Null verschieden ist, das heißt, es gilt  $x \in \mathbb{D}$

$$\mu_A(x) = 1 \quad \text{für} \quad x = x_0$$

und

$$\mu_A(x) = 0 \quad \text{für alle} \quad x \neq x_0. \quad \square$$

Durch die Fuzzifizierung über Fuzzy-Einermengen erhält man die unscharfen Merkmale  $E_{blb}$ ,  $T_{an}$  und  $E_{max}$  (fuzzifizierte Größen). Die fuzzifizierten Größen wurden zunächst von Tlili (1993) über je fünf Fuzzy-Referenzmengen  $X_{i(E_{blb})}^{E_{blb}}$ ,  $X_{i(T_{an})}^{T_{an}}$  und  $X_{i(E_{max})}^{E_{max}}$  (mit  $i(E_{blb}) = i(T_{an}) = i(E_{max}) = 1, \dots, 5$ ) partitioniert und in einer anschließenden Arbeit von Jörisen (1995) auf drei Fuzzy-Referenzmengen optimiert (mit  $i(E_{blb}) = i(T_{an}) = i(E_{max}) = 1, \dots, 3$ ). So konnte die Regelbasis des Fuzzy-Algorithmus von 25 relationalen Regeln auf 9 relationale Regeln reduziert werden, welches eine Minimierung der Rechenzeit zur Auswertung des Fuzzy-Algorithmus bedeutet. Die Fuzzy-Referenzmengen werden über stückweise lineare Zugehörigkeitfunktionen beschrieben:

Fuzzy-Referenzmenge als Dreieck:

$$\mu_{\mathbb{A}}(\mathbf{x}) = \begin{cases} 0 & \text{für } \mathbf{x} \notin ]c_1, c_2[ \\ \frac{\mathbf{x} - c_1}{m - c_1} & \text{für } \mathbf{x} \in [c_1, m[ \\ 1 & \text{für } \mathbf{x} = m \\ \frac{c_2 - \mathbf{x}}{c_2 - m} & \text{für } \mathbf{x} \in ]m, c_2] \end{cases} \quad (3.5)$$

mit  $c_1 \in \{-1; 0\}$ ;  $c_2 \in \{0, 5; 1\}$ ;  $m = \{0; 0, 5\}$ ,  $\mathbb{A} \in \{X_2^{E_{blb}}, X_3^{E_{blb}}, X_2^{T_{an}}, X_2^{E_{max}}\}$  und  $\mathbf{x} = (E_{blb}, T_{an}, E_{max})$ .

Fuzzy-Referenzmenge als halbes Dreieck<sup>R</sup>:

$$\mu_{\mathbb{A}_1}(\mathbf{x}) = \begin{cases} 0 & \text{für } \mathbf{x} \notin ]m, c_2[ \\ 1 & \text{für } \mathbf{x} = m \\ \frac{c_2 - \mathbf{x}}{c_2 - m} & \text{für } \mathbf{x} \in ]m, c_2] \end{cases} \quad (3.6)$$

mit  $c_2 = 0,5$ ;  $m = 0$ ;  $\mathbb{A} \in \{X_1^{T_{an}}; X_1^{E_{max}}\}$  und  $\mathbf{x} = (T_{an}, E_{max})$ .

Fuzzy-Referenzmenge als halbes Trapez<sup>L</sup>:

$$\mu_{\mathbb{A}}(\mathbf{x}) = \begin{cases} 0 & \text{für } \mathbf{x} < c_1 \\ \frac{\mathbf{x} - c_1}{m - c_1} & \text{für } \mathbf{x} \in [c_1, m[ \\ 1 & \text{für } \mathbf{x} \geq m \end{cases} \quad (3.7)$$

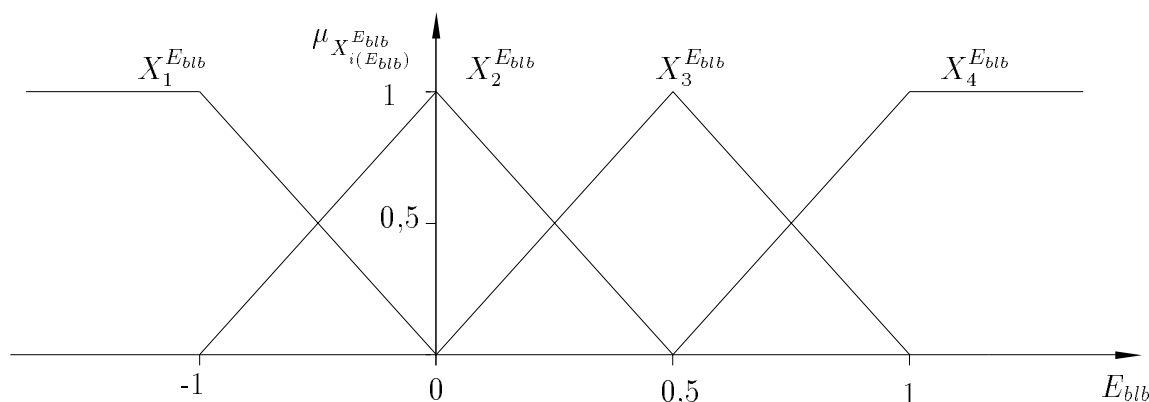
mit  $c_1 = 0,5$ ;  $m = 1$ ;  $\mathbb{A} \in \{X_4^{E_{blb}}, X_3^{T_{an}}, X_3^{E_{max}}\}$  und  $\mathbf{x} = (E_{blb}, T_{an}, E_{max})$ .

Fuzzy-Referenzmenge als halbes Trapez<sup>R</sup>:

$$\mu_{\mathbb{A}}(\mathbf{x}) = \begin{cases} 0 & \text{für } \mathbf{x} > c_2 \\ \frac{c_2 - \mathbf{x}}{c_2 - m} & \text{für } \mathbf{x} \in [c_2, m[ \\ 1 & \text{für } \mathbf{x} \leq m \end{cases} \quad (3.8)$$

mit  $c_2 = 0$ ;  $m = -1$ ;  $\mathbb{A} = X_1^{E_{blb}}$  und  $\mathbf{x} = E_{blb}$ .

In den Bildern 3.2 bis 3.4 sind die Fuzzy-Referenzmengen der verschiedenen fuzzifizierten Eingangsgrößen dargestellt. Da der Fuzzy-Algorithmus so geschrieben ist, daß er zwischen „Unter- und Überschwingen“ unterscheidet (Tlili 1993) (positive als auch negative  $e_{blb}$ -Werte), wird die fuzzifizierte Eingangsgröße  $E_{blb}$  über fünf Fuzzy-Referenzmengen partitioniert.



**Bild 3.2:** Partitionierung der Fuzzy-Referenzmengen  $X_i^{E_{blb}}$ , mit  $i(E_{blb}) = 1, \dots, 4$  über den Definitionsbereich  $\mathbb{D}_N^+$

### Regelbasis und Inferenz:

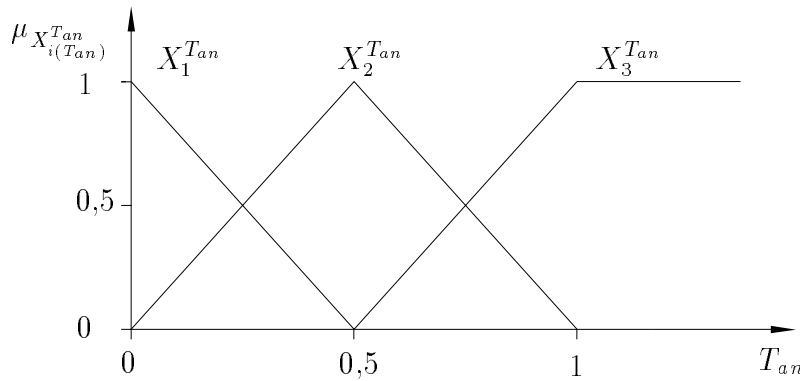
Die Regelbasis besteht aus jeweils 9 bzw. 12 relationalen Regeln der Form

$$\text{WENN } (E_{blb} \text{ IST } X_i^{E_{blb}}) \text{ UND } (T_{an} \text{ IST } X_i^{T_{an}}) \text{ DANN } (\tilde{T}_i \text{ IST } Y_i^{\tilde{T}_i}), \quad (3.9)$$

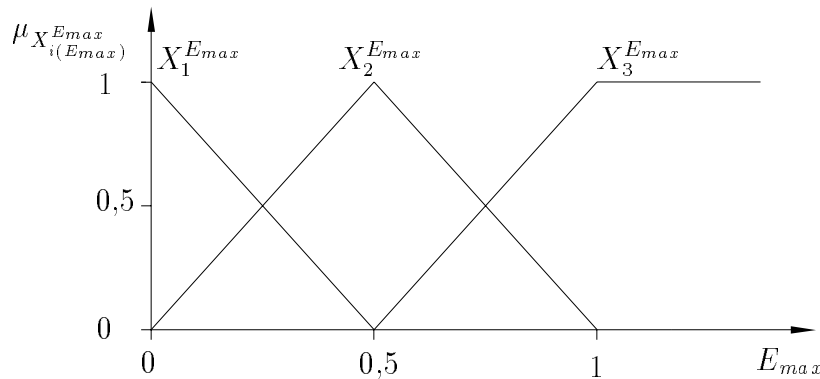
bzw.

$$\text{WENN } (E_{max} \text{ IST } X_i^{E_{max}}) \text{ UND } (T_{an} \text{ IST } X_i^{T_{an}}) \text{ DANN } (\tilde{K}_C \text{ IST } Y_i^{\tilde{K}_C}). \quad (3.10)$$

In den Tabellen 3.1 bis 3.3 sind die Karnaugh-Tafeln der beiden Regelbasen zur Berechnung der Verstärkungen  $\tilde{k}_C$  und der Nachstellzeit  $\tilde{t}_i$  dargestellt.



**Bild 3.3:** Partitionierung der Fuzzy-Referenzmengen  $X_{i(T_{an})}^{T_{an}}$ , mit  $i(T_{an}) = 1, \dots, 3$  über den Definitionsbereich  $\mathbb{D}_N$



**Bild 3.4:** Partitionierung der Fuzzy-Referenzmengen  $X_{i(E_{max})}^{E_{max}}$ , mit  $i(E_{max}) = 1, \dots, 3$  über den Definitionsbereich  $\mathbb{D}_N$

		$T_{an}$		
		$X_1^{T_{an}}$	$X_2^{T_{an}}$	$X_3^{T_{an}}$
$E_{blb}$	$X_1^{E_{blb}}$	$Y_3^{\tilde{T}_i}$	$Y_3^{\tilde{T}_i}$	$Y_3^{\tilde{T}_i}$
	$X_2^{E_{blb}}$	$Y_2^{\tilde{T}_i}$	$Y_2^{\tilde{T}_i}$	$Y_2^{\tilde{T}_i}$
	$X_3^{E_{blb}}$	$Y_2^{\tilde{T}_i}$	$Y_1^{\tilde{T}_i}$	$Y_1^{\tilde{T}_i}$
	$X_4^{E_{blb}}$	$Y_1^{\tilde{T}_i}$	$Y_1^{\tilde{T}_i}$	$Y_1^{\tilde{T}_i}$

**Tabelle 3.1:** Karnaugh-Tafel des Fuzzy-Algorithmus zur Berechnung der Nachstellzeit  $\tilde{t}_i$  bei „überschwingen“ und „unterschwingen“.

		$T_{an}$		
		$X_1^{T_{an}}$	$X_2^{T_{an}}$	$X_3^{T_{an}}$
$E_{max}$	$X_2^{E_{max}}$	$Y_2^{\tilde{K}_C}$	$Y_2^{\tilde{K}_C}$	$Y_3^{\tilde{K}_C}$
	$X_2^{E_{max}}$	$Y_1^{\tilde{K}_C}$	$Y_2^{\tilde{K}_C}$	$Y_3^{\tilde{K}_C}$
	$X_3^{E_{max}}$	$Y_1^{\tilde{K}_C}$	$Y_1^{\tilde{K}_C}$	$Y_3^{\tilde{K}_C}$

**Tabelle 3.2:** Karnaugh-Tafel des Fuzzy-Algorithmus zur Berechnung der Verstärkung  $\tilde{k}_C$  bei „überschwingen“.



		$T_{an}$		
		$X_1^{T_{an}}$	$X_2^{T_{an}}$	$X_3^{T_{an}}$
$E_{blb}$	$X_1^{E_{blb}}$	$Y_1^{\tilde{K}_C}$	$Y_1^{\tilde{K}_C}$	$Y_2^{\tilde{K}_C}$
	$X_2^{E_{blb}}$	$Y_1^{\tilde{K}_C}$	$Y_2^{\tilde{K}_C}$	$Y_3^{\tilde{K}_C}$
	$X_3^{E_{blb}}$	$Y_2^{\tilde{K}_C}$	$Y_3^{\tilde{K}_C}$	$Y_3^{\tilde{K}_C}$

**Tabelle 3.3:** Karnaugh-Tafel des Fuzzy-Algorithmus zur Berechnung der Verstärkung  $\tilde{k}_C$  bei „unterschwingen“.

Der Erfülltheitsgrad  $\alpha$  einer jeden Regel

$$\alpha(E_{blb}, T_{an}) = \min\left(\mu_{X_{i(E_{blb})}^{E_{blb}}}, \mu_{X_{i(T_{an})}^{T_{an}}}\right) \quad (3.11)$$

bzw.

$$\alpha(E_{max}, T_{an}) = \min\left(\mu_{X_{i(E_{max})}^{E_{max}}}, \mu_{X_{i(T_{an})}^{T_{an}}}\right) \quad (3.12)$$

wird über den Minimum-Operator berechnet.

### Defuzzifizierung:

Die scharfen Ausgangsgrößen werden nach der Summenmethode (Center-of-Sums, Drankov, Hellendoorn und Reinfrank 1993)

$$u(kT) = \frac{\sum_{k=1}^{m_U} \int_{\mathbb{D}} \tilde{\mu}_{\tilde{U},k}(u) \tilde{u} du}{\sum_{k=1}^{m_U} \int_{\mathbb{D}} \tilde{\mu}_{\tilde{U},k}(u) du} \quad (3.13)$$

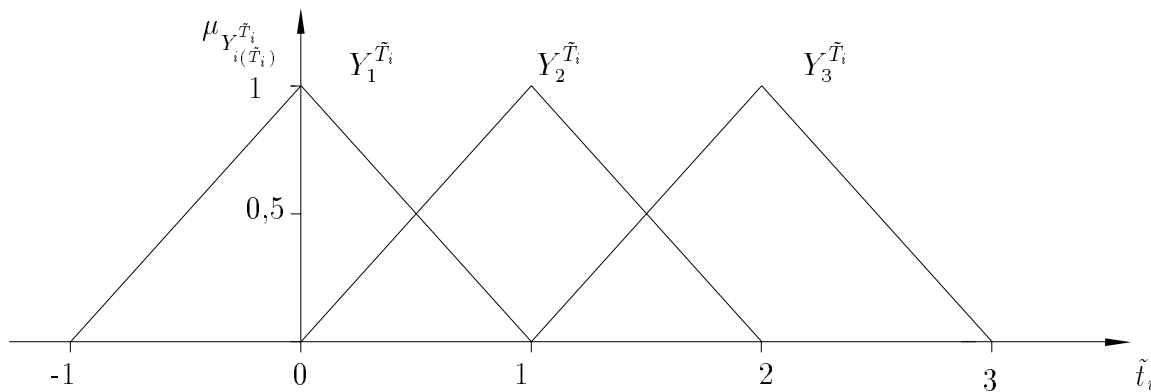
berechnet. Mit der MAX-MIN-Kompensation berechnet sich dann die Verstärkung  $\tilde{k}_C$  und die Nachstellzeit  $\tilde{t}_i$  zu

$$\begin{aligned} \tilde{k}_C &= \frac{\sum_{k=1}^3 \int_{\mathbb{D}} \mu_{\tilde{U},k}(u) \bigvee_{z=1}^{12} \alpha_{k,z}(E_{max}, T_{an}) \tilde{u} du}{\sum_{k=1}^3 \int_{\mathbb{D}} \mu_{\tilde{U},k}(u) \bigvee_{z=1}^{12} \alpha_{k,z}(E_{max}, T_{an}) du} \\ &= \frac{\sum_{k=1}^3 \left( \bigvee_{z=1}^{12} \alpha_{k,z}(E_{max}, T_{an}) \right) A_k m_k}{\sum_{k=1}^3 \left( \bigvee_{z=1}^{12} \alpha_{k,z}(E_{max}, T_{an}) \right) A_k} \end{aligned} \quad (3.14)$$

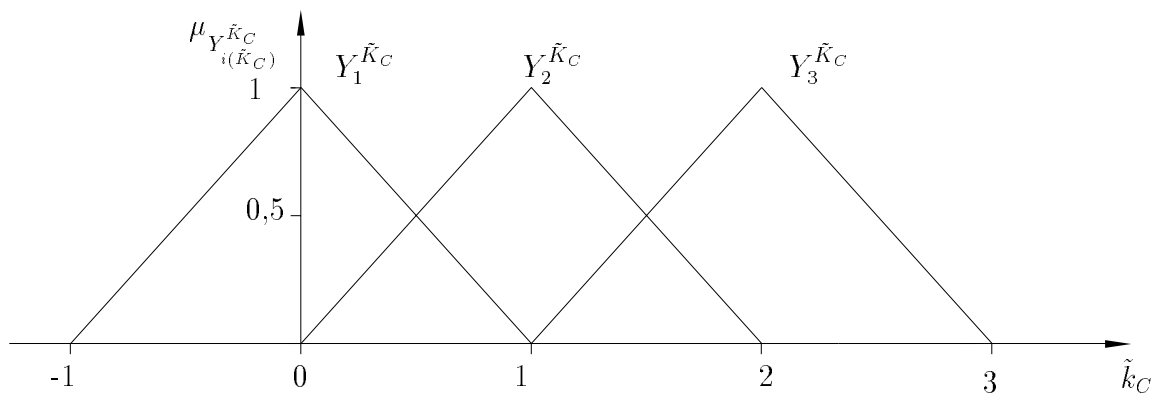
und

$$\tilde{t}_i = \frac{\sum_{k=1}^3 \left( \bigvee_{z=1}^9 \alpha_{k,z}(E_{blb}, T_{an}) \right) A_k m_k}{\sum_{k=1}^3 \left( \bigvee_{z=1}^9 \alpha_{k,z}(E_{blb}, T_{an}) \right) A_k} \quad (3.15)$$

Durch die Verwendung der MAX-MIN-Komposition ist die vertikale Partialaggregation über den Max-Operator und die Aktivierung sowie die Prämissenauswertung über den Min-Operator belegt. Die Ausgangsgrößen werden durch drei Fuzzy-Referenzmengen abgebildet (Bild 3.5 und 3.6).

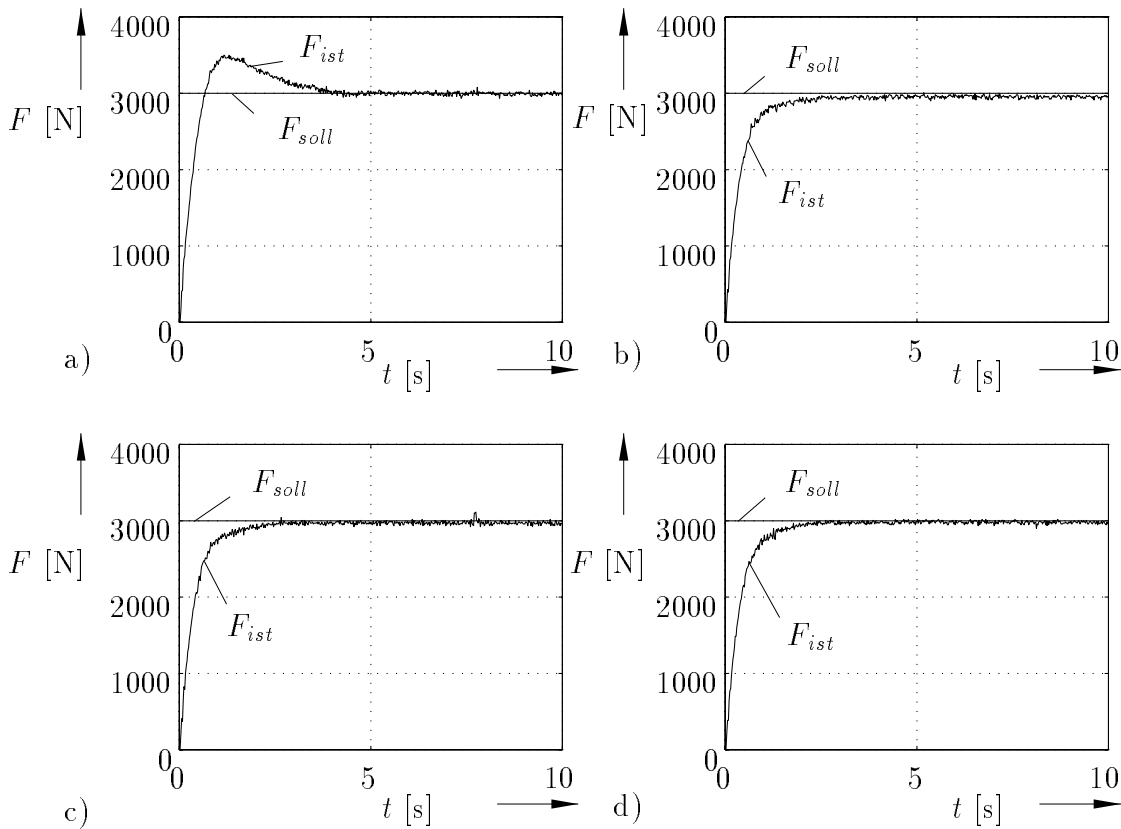


**Bild 3.5:** Partitionierung der Fuzzy-Referenzmengen  $Y_{i(\tilde{T}_i)}^{\tilde{T}_i}$ , mit  $i(\tilde{T}_i) = 1, \dots, 3$  über den Definitionsbereich  $\mathbb{D}$

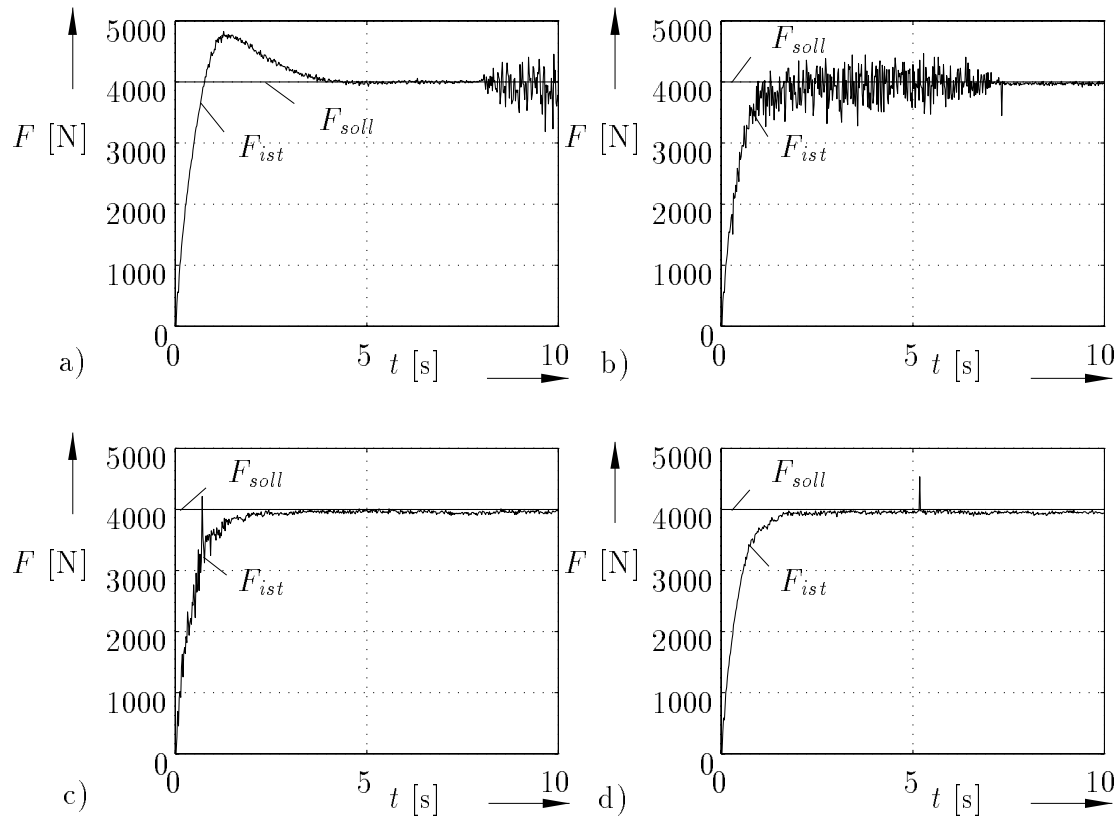


**Bild 3.6:** Partitionierung der Fuzzy-Referenzmengen  $Y_{i(\tilde{K}_C)}^{\tilde{K}_C}$ , mit  $i(\tilde{K}_C) = 1, \dots, 3$  über den Definitionsbereich  $\mathbb{D}$

In Bild 3.7 ist der Verlauf der Einstellung des PI-Reglers anhand von Meßdaten der Bauteilprüfmaschine dargestellt. Ausgehend von einer Parametereinstellung des PI-Reglers von  $k_C = 5$  und  $t_i = 1$  s (Bild 3.7 a)) (mit deutlichen Überschwingen) werden die Regelparameter in 5 Iterationsschritten so eingestellt, daß die Führungsgröße  $F_{soll} = 3000$  N ohne Überschwingen mit einer geringen Anstiegszeit und ohne statische Regelabweichung erreicht wird. Bei einer Parametereinstellung des PI-Reglers, welche zu einem sehr trägen Systemverhalten führt z. B. für  $k_C = 1$  und  $t_i = 200$  s ist der Fuzzy-Algorithmus nicht in der Lage den PI-Regler automatisch einzustellen. Somit bleibt das Verfahren auf bestimmte Arten von Systemantworten begrenzt und wird aus diesem Grund nicht für den Prozeß der Bauteilprüfmaschine eingesetzt.



**Bild 3.7:** Ablauf der Einstellung des PI-Reglers anhand von Meßergebnissen der Systemantwort der Bauteilprüfmaschine für einen Sollwertsprung von  $F_{soll} = 3000$  N. Bild a): Systemantwort bei der Anfangseinstellung der Parameter des PI-Reglers. Bild b) und c): Systemantwort nach 2 bzw. 3 Iterationsschritte. Bild d): Systemantwort nach 5 Iterationsschritte



**Bild 3.8:** Ablauf der Einstellung des PI-Reglers anhand von Meßergebnissen der Systemantwort der Bauteilprüfmaschine für einen Sollwertsprung von  $F_{soll} = 4000$  N. Bild a): Systemantwort bei der Anfangseinstellung der Parameter des PI-Reglers. Bild b) und c): Systemantwort nach 2 bzw. 3 Iterationsschritte. Bild d): Systemantwort nach 5 Iterationsschritte

## 3.2 Einstellverfahren über zwei Merkmale

Bei diesem Einstellverfahren wird genauso wie beim Einstellverfahren nach dem Muster des Wendetangenten-Verfahrens nur verlangt, daß die Regelstrecke stabil ist. Es werden keine weiteren A-priori-Kenntnisse über Ordnung, Totzeit oder Eigendynamik vorausgesetzt. Das Ziel ist hierbei, ausgehend von sehr kleinen Reglerverstärkungen die Parameter so nachzustellen, daß sich „optimale“ feste Regelparameter ergeben. Pfeiffer (1994) beschränkt sich mit seinem Verfahren auf PI-Regler. Der Grundgedanke besteht darin, die Regelgröße einem Soll-Verlauf folgen zu lassen und anhand von Gütekriterien und deren Auswertung mittels Fuzzy-Logik die Regelparameter nachzustellen, bis eine hinreichende Güte erreicht ist. Als Bewertungskriterien der Regelgüte werden zwei Merkmale ausgewertet, welche Eingangsgrößen des Fuzzy-Algorithmus sind.

- *Überschwingweite  $o_v$* :  
Nach der DIN 19226, Teil 2, ist dies die größte Abweichung der Sprungantwort vom Beharrungswert  $y_\infty$  nach dem erstmaligen Erreichen der Einschwingtoleranz  $y_\infty \pm \varepsilon$ . Da der Überschwinger nur in der ersten Hälfte der Sprungantwort gesucht wird, können auch negative Werte erreicht werden, falls das Toleranzband gar nicht erreicht wird. Zur Normierung wird der Signalwert auf die Höhe des Führungssprunges bezogen.
- *Einregelverhältnis  $\gamma = \tilde{t}_{an}/t_{ein}$* :  
beschreibt die Anschlagzeit  $\tilde{t}_{an}$ , bezogen auf die Einschwingzeit  $t_{ein}$ . Nach Verstreichen der Einschwingzeit bleiben die Abweichungen des Signals vom Beharrungszustand innerhalb des Toleranzbandes  $\pm\varepsilon$ . Bei der Anschlagzeit  $\tilde{t}_{an}$  erreicht die Sprungantwort erstmals die Einschwingtoleranz (Bild 3.9).

Die scharfen Werte der beiden Merkmale Überschwingweite  $o_v$  und Einregelverhältnis  $\gamma$  werden für jede sprungartige Änderung der Führungsgröße ermittelt, fuzzifiziert (über Fuzzy-Einermengen) und daraus die Korrekturen der Regelparameter für den nächsten Sprung errechnet. Ausgangsvariablen der Fuzzy-Einstellebene sind die Faktoren  $kr_{Tuning}$  und  $cir_{Tuning}$  zur Anpassung der Regelparameter gemäß

$$k_c = k_c \, kr_{Tuning} \quad (3.16)$$

und

$$c_I = c_I \, cir_{Tuning} \quad (3.17)$$

mit  $c_I = \frac{q_0 + q_1}{k}$ ,  $k_c = p_0$  und den Ausgangsvariablen der Fuzzy-Einstellebenen  $kr_{Tuning}$  und  $cir_{Tuning}$ , welche durch Auswertung von  $o_v$  und  $\gamma$  mit der Fuzzy-Logik ermittelt werden.  $c_I$  ist der relative I-Anteil und  $k_c$  die Verstärkung der  $z$ -Übertragungsfunktion des PI-Reglers

$$G_R(z) = k_c \left( 1 + c_I \frac{z^{-1}}{1 - z^{-1}} \right), \quad (3.18)$$

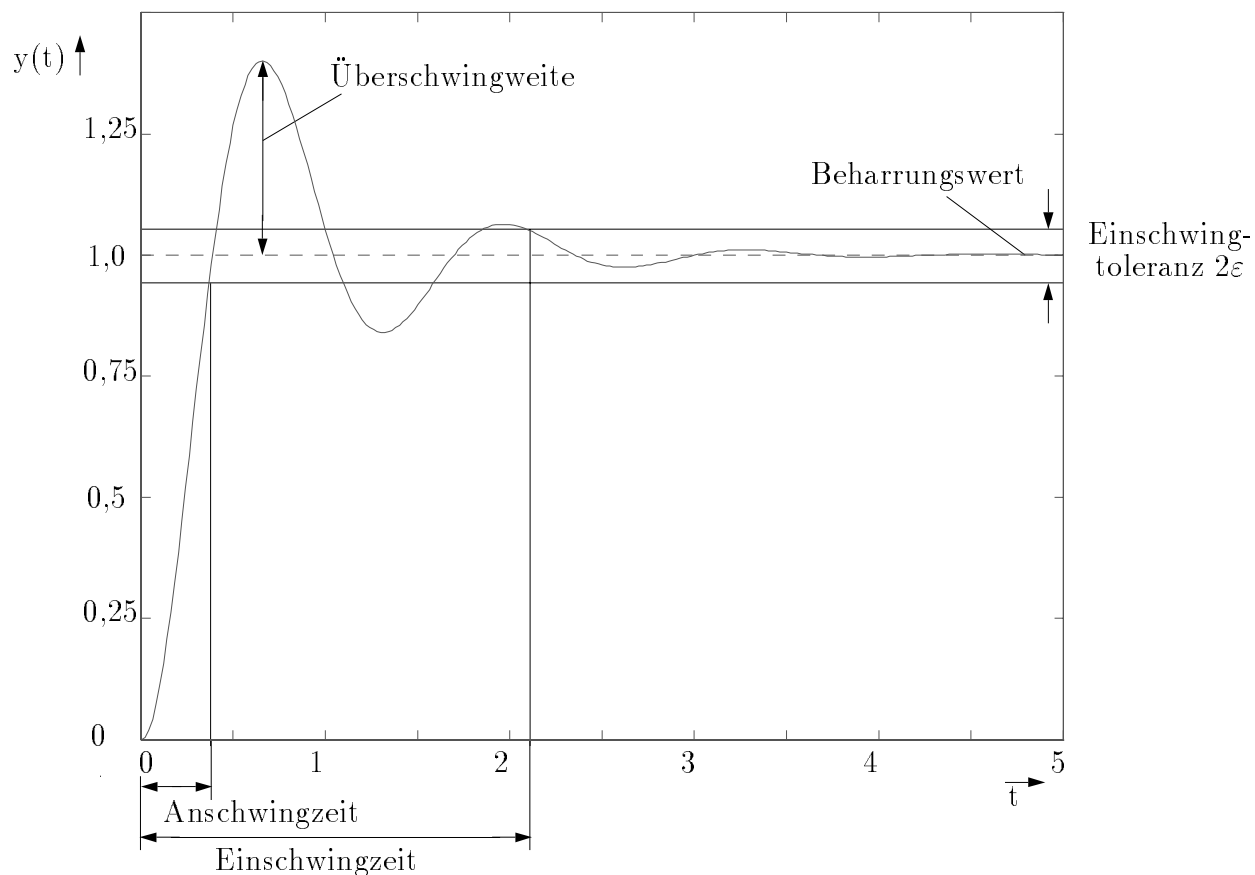


Bild 3.9: Merkmal der Sprungantwort

welche die  $z$ -Transformierte des Regelalgorithmus

$$u(k) = u(k-1) + q_0 e(k) + q_1 e(k-1) \quad (3.19)$$

mit  $q_0 = k_C$  und  $q_1 = -k_C(1 - T/t_i)$  ist.

### Fuzzifizierung:

Aus dem Verlauf der Sprungantwort werden die zwei Merkmale bestimmt und auf einen Definitionsbereich  $\mathbb{D}$  abgebildet und anschließend über Fuzzy-Einermengen fuzzifiziert. Durch die Fuzzifizierung über Fuzzy-Einermengen erhält man die unscharfen Merkmale  $O_v$  (fuzzifizierte Größe  $o_v$ ) und  $\Gamma$  (fuzzifizierte Größe  $\gamma$ ). Die Fuzzy-Referenzmengen für das Überspringen  $o_v$  werden mit den linguistischen Variablen „negativ“ ( $A_1^{O_v}$ ), „zu klein“ ( $A_2^{O_v}$ ), „in Ordnung“ ( $A_3^{O_v}$ ) und „zu groß“ ( $A_4^{O_v}$ ) sowie für das Einregelverhältnis  $\gamma$  mit „zu klein“ ( $A_1^\Gamma$ ), „in Ordnung“ ( $A_2^\Gamma$ ) und „zu groß“ ( $A_3^\Gamma$ ) belegt. Die Fuzzy-Referenzmengen werden wie bei dem anderen Fuzzy-Algorithmus über stückweise lineare Zugehörigkeitsfunktionen beschrieben (hier halbe Trapeze<sup>L</sup>, halbe Trapeze<sup>R</sup> und ganze Trapeze):

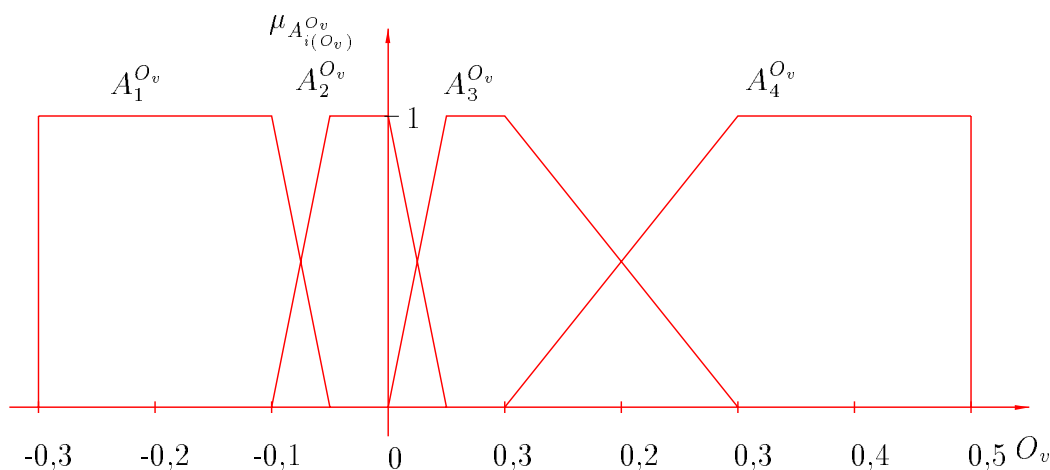
Fuzzy-Referenzmenge als Trapez:

$$\mu_{\mathbb{A}}(\mathbf{x}) = \begin{cases} 0 & \text{für } \mathbf{x} \notin ]c_1, c_2[ \\ \frac{\mathbf{x} - c_1}{m_1 - c_1} & \text{für } \mathbf{x} \in [c_1, m_1[ \\ 1 & \text{für } \mathbf{x} \in [m_1, m_2] \\ \frac{c_2 - \mathbf{x}}{c_2 - m_2} & \text{für } \mathbf{x} \in ]m_2, c_2] \end{cases} \quad (3.20)$$

In der Tabelle 3.4 sind die Werte der Modalwerte  $m$  und die Begrenzungen der Einflußbereiche der Fuzzy-Referenzmengen (Kruse, Gebhardt und Klawonn 1994) sowie in den Bildern 3.10 und 3.11 die Fuzzy-Referenzmengen über  $\mathbb{D}_N$  bzw.  $\mathbb{D}_N^+$  dargestellt.

Fuzzy-Referenzmengen	Kurzschreibweise
$A_1^{O_v}$	$m = -0,1; c_2 = -0,05$
$A_2^{O_v}$	$c_1 = -0,1; m_1 = -0,05; m_2 = 0; c_2 = 0,05$
$A_3^{O_v}$	$c_1 = 0; m_1 = 0,05; m_2 = 0,1; c_2 = 0,3$
$A_4^{O_v}$	$c_1 = 0,1; m = 0,3; c_2 = 1$
$A_1^{\Gamma}$	$c_1 = 0; m = 0,1; c_2 = 0,25$
$A_2^{\Gamma}$	$c_1 = 0,1; m_1 = 0,25; m_2 = 0,6; c_2 = 0,8$
$A_3^{\Gamma}$	$c_1 = 0,6; m = 0,8; c_2 = 1$

**Tabelle 3.4:** Fuzzy-Referenzmengen in Kurzschreibweise

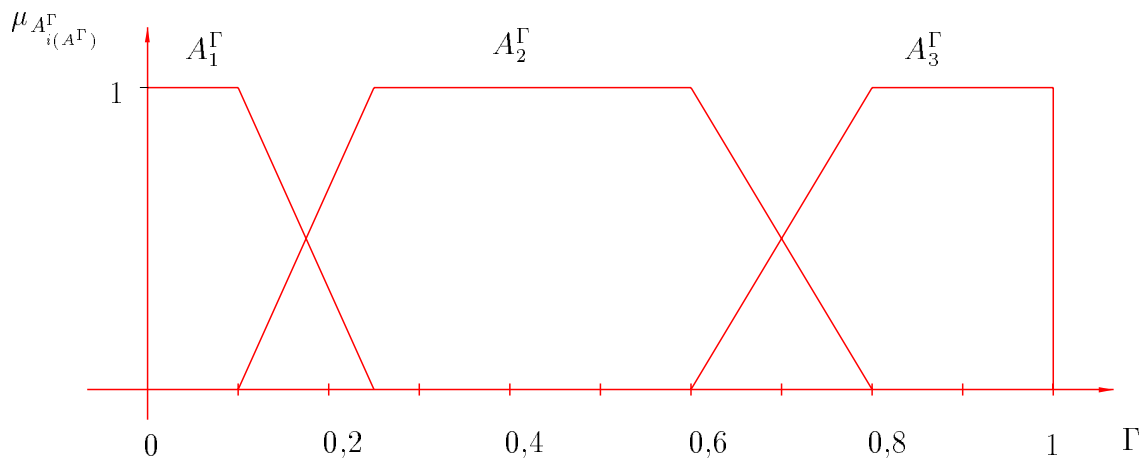


**Bild 3.10:** Partitionierung der Fuzzy-Referenzmengen  $A_{i(O_v)}^{O_v}$  mit  $i(O_v) = 1, \dots, 4$  über den Definitionsbereich  $\mathbb{D}_N$

### Regelbasis und Inferenz:

Insgesamt werden jeweils 12 relationale Fuzzy-Regeln der Form

$$\text{WENN } (O_v \text{ IST } A_{i(O_v)}^{O_v}) \text{ UND } (\Gamma \text{ IST } A_{i(\Gamma)}^{\Gamma}) \text{ DANN } (Kr_{Tuning} \text{ IST } Z_{i(Kr_{Tuning})}^{Kr_{Tuning}}), \quad (3.21)$$



**Bild 3.11:** Partitionierung der Fuzzy-Referenzmengen  $A_{i(\Gamma)}^\Gamma$  mit  $i(\Gamma) = 1, \dots, 3$  über den Definitionsbereich  $\mathbb{D}_N$

bzw.

$$\text{WENN } (O_v \text{ IST } A_{i(O_v)}^{O_v}) \text{ UND } (\Gamma \text{ IST } A_{i(\Gamma)}^\Gamma) \text{ DANN } (Cir_{Tuning} \text{ IST } Z_{i(Cir_{Tuning})}^{Cir_{Tuning}}) \quad (3.22)$$

mit  $i(O_v) = 1, \dots, 4$ ,  $i(\Gamma) = 1, \dots, 3$ ,  $i(Kr_{Tuning}) = 1, \dots, 10$  und  $i(Cir_{Tuning}) = 1, \dots, 11$  ausgewertet. In den Tabellen 3.5 und 3.6 sind die Karnaugh-Tafeln der beiden Regelbasen dargestellt. Da in den Konklusionen der relationalen Regeln nur Fuzzy-Einermengen angesprochen werden, sind in den Karnaugh-Tafeln die entsprechenden Modalwerte  $m$  der Fuzzy-Einermengen (scharfe Werte) eingetragen.

		$\Gamma$		
		$A_1^\Gamma$	$A_2^\Gamma$	$A_3^\Gamma$
$O_v$	$A_1^{O_v}$	2,0	2,1	2,5
	$A_2^{O_v}$	1,1	1,3	1,5
	$A_3^{O_v}$	1,0	1,0	1,0
	$A_4^{O_v}$	0,4	0,5	0,6

**Tabelle 3.5:** Karnaugh-Tafel des Fuzzy-Algorithmus zur Berechnung des Faktors  $kr_{Tuning}$

		$\Gamma$		
		$A_1^\Gamma$	$A_2^\Gamma$	$A_3^\Gamma$
$O_v$	$A_1^{O_v}$	2,5	1,3	1,2
	$A_2^{O_v}$	2,2	1,1	1,0
	$A_3^{O_v}$	2,0	1,0	0,9
	$A_4^{O_v}$	2,3	0,8	0,7

**Tabelle 3.6:** Karnaugh-Tafel des Fuzzy-Algorithmus zur Berechnung des Faktors  $cir_{Tuning}$



Der Erfülltheitsgrad einer jeden Regel

$$\alpha_z(O_v, \Gamma) = \mu_{A_{i(O_v)}^{O_v}} \mu_{A_i^\Gamma} \quad (3.23)$$

berechnet sich über das algebraische Produkt. Die Komposition wird über den SUM-PROD-Operator vorgenommen. Dies bedeutet, daß die Implikation bzw. Aktivierung nach Larsen erfolgt und die vertikale Partialaggregation durch die Summenbildung belegt ist.

### Defuzzifizierung:

Die Defuzzifizierung erfolgt nach der Schwerpunktmethod für Fuzzy-Einermengen (Kahlerlert und Frank 1993, Bertram u. a. 1994) zur Berechnung der Ausgangsvariablen des Fuzzy-Algorithmus

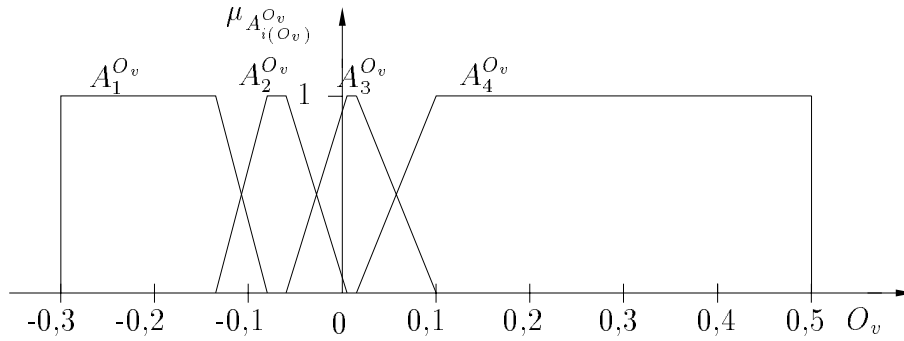
$$kr_{Tuning} = \frac{\sum_{z=1}^{10} \alpha_z(O_v, \Gamma) m_z}{\sum_{z=1}^{10} \alpha_z(O_v, \Gamma)} \quad (3.24)$$

bzw.

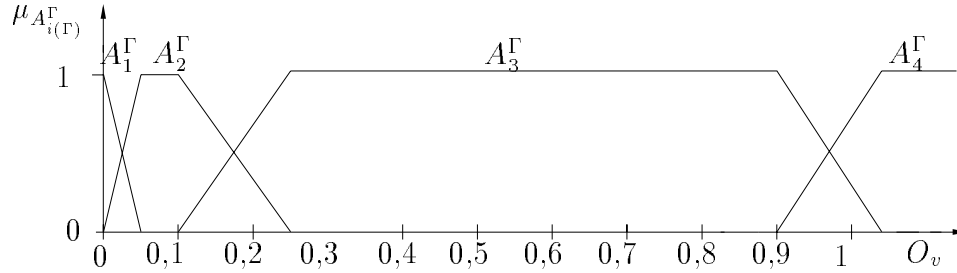
$$cir_{Tuning} = \frac{\sum_{z=1}^{11} \alpha_z(O_v, \Gamma) m_z}{\sum_{z=1}^{11} \alpha_z(O_v, \Gamma)} . \quad (3.25)$$

## 3.3 Modifikation des Adaptions Algorithmus

Nach Pfeiffer (1994) muß die Sprunglänge groß genug gewählt werden, so daß der Prozeß einen stationären Endwert erreichen kann. Somit können die Merkmale  $\tilde{t}_{an}$  und  $t_{ein}$  bestimmt werden. Über die Größe des Toleranzbandes macht Pfeiffer keine Aussagen. Liegt z. B. die Sprungantwort unterhalb der fest vorgegebenen Schranke, kann die Einregelzeit nicht bestimmt werden. Um dies zu vermeiden, wurde ein variables Toleranzband  $\pm \varepsilon \neq const.$  gewählt, daß sich nach dem letzten Wert der Sprungantwort richtet. In einem ersten Ansatz wurden die Fuzzy-Referenzmengen der Überschwingweite  $O_v$  nach links verschoben und die Modalwerte  $m$  sowie die Begrenzungen der Einflußbereiche  $c$  der Fuzzy-Referenzmengen  $A_{i(O_v)}^{O_v}$  nach heuristischen Gesichtspunkten modifiziert (Bild 3.12). Damit wurde eine Überschwingweite von 1%-2% realisiert. Das Überspringen kann nicht ganz eliminiert werden, da daß Verfahren ein schwingungsfähiges System voraussetzt. Bei der hier vorliegenden Regelstrecke läßt sich ein Überspringer durch eine Vergrößerung der Nachstellzeit kompensieren. Dabei soll die Verstärkung geringfügig verkleinert werden. Dazu wurde eine zusätzliche vierte Fuzzy-Referenzmenge für die Eingangsgröße  $\Gamma$  definiert (Bild 3.13).



**Bild 3.12:** Modifizierte Partitionierung der Fuzzy-Referenzmengen  $A_{i(O_v)}^{O_v}$  mit  $i(O_v) = 1, \dots, 4$  über den Definitionsbereich  $\mathbb{D}$



**Bild 3.13:** Modifizierte Partitionierung der Fuzzy-Referenzmengen  $A_{i(\Gamma)}^{\Gamma}$  mit  $i(\Gamma) = 1, \dots, 4$  über den Definitionsbereich  $\mathbb{D}$

Die Konklusionen wurden in der Simulation für die modifizierten Mengen angepaßt und erweitert. In der Tabelle 3.7 sind die Modalwerte  $m$  und die Begrenzungen der Einflußbereiche  $c$  der Fuzzy-Referenzmengen  $A_{i(O_v)}^{O_v}$  und  $A_{i(\Gamma)}^{\Gamma}$  zusammengefaßt.

Fuzzy-Referenzmengen	Kurzschreibweise
$A_1^{O_v}$	$m = -0,13; c_2 = -0,08$
$A_2^{O_v}$	$c_1 = -0,13; m_1 = -0,08; m_2 = -0,06; c_2 = 0,01$
$A_3^{O_v}$	$c_1 = -0,06; m_1 = 0,01; m_2 = 0,02; c_2 = 0,1$
$A_4^{O_v}$	$c_1 = 0,01; m = 0,1$
$A_1^{\Gamma}$	$m = 0; c_2 = 0,05$
$A_2^{\Gamma}$	$c_1 = 0; m_1 = 0,05; m_2 = 0,1; c_2 = 0,25$
$A_3^{\Gamma}$	$c_1 = 0,1; m_1 = 0,25; m_2 = 0,9; c_2 = 1,1$
$A_4^{\Gamma}$	$c_1 = 0,9; m = 1,1$

**Tabelle 3.7:** Fuzzy-Referenzmengen in Kurzschreibweise

Aufgrund der zusätzlich eingeführten Fuzzy-Referenzmenge  $A_1^{\Gamma}$  werden nun 16 relationale Fuzzy-Regeln der Form (3.19) und (3.20) mit  $i(O_v) = 1, \dots, 4$ ,  $i(\Gamma) = 1, \dots, 4$ ,  $i(Kr_{Tuning}) = 1, \dots, 13$  und  $i(Cir_{Tuning}) = 1, \dots, 14$  ausgewertet. In den Tabellen 3.8

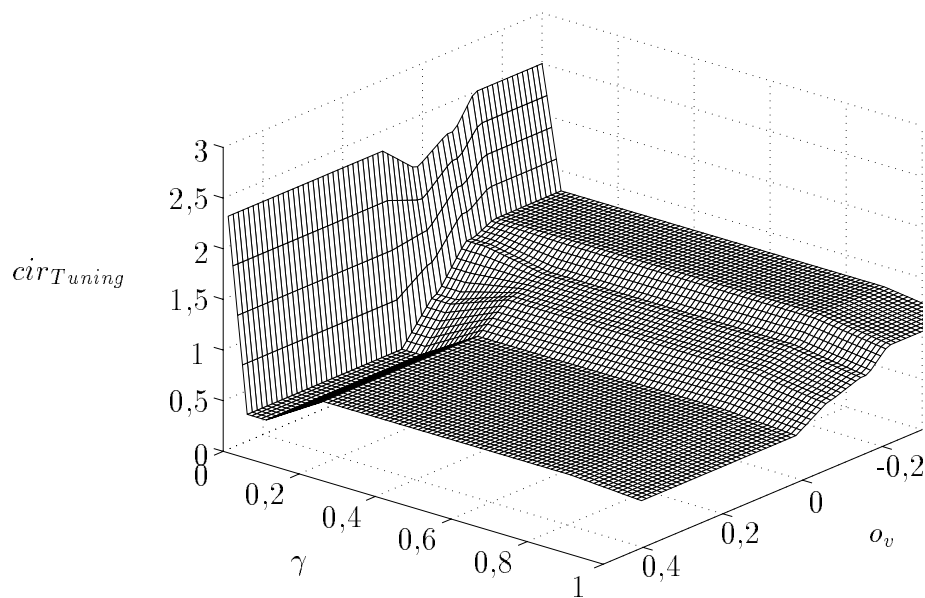
und 3.9 sind die modifizierten Karnaugh-Tafeln der beiden Regelbasen dargestellt.

		$\Gamma$			
		$A_1^\Gamma$	$A_2^\Gamma$	$A_3^\Gamma$	$A_4^\Gamma$
$O_v$	$A_1^{O_v}$	2,0	2,1	2,2	2,5
	$A_2^{O_v}$	1,1	1,2	1,5	1,8
	$A_3^{O_v}$	1,0	1,0	1,0	1,0
	$A_4^{O_v}$	0,4	0,9	0,65	0,7

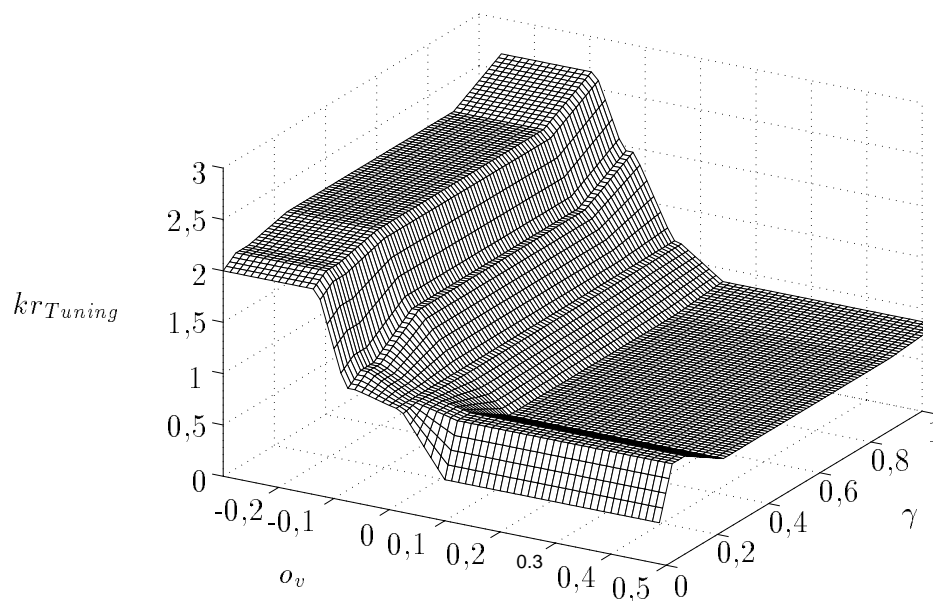
**Tabelle 3.8:** Modifizierte Karnaugh-Tafel des Fuzzy-Algorithmus zur Berechnung des Faktors  $kr_{Tuning}$

		$\Gamma$			
		$A_1^\Gamma$	$A_2^\Gamma$	$A_3^\Gamma$	$A_4^\Gamma$
$O_v$	$A_1^{O_v}$	2,5	1,3	1,3	1,2
	$A_2^{O_v}$	2,2	1,2	1,1	1,0
	$A_3^{O_v}$	2,0	0,8	1,0	0,9
	$A_4^{O_v}$	2,3	0,4	0,75	0,7

**Tabelle 3.9:** Modifizierte Karnaugh-Tafel des Fuzzy-Algorithmus zur Berechnung des Faktors  $cir_{Tuning}$

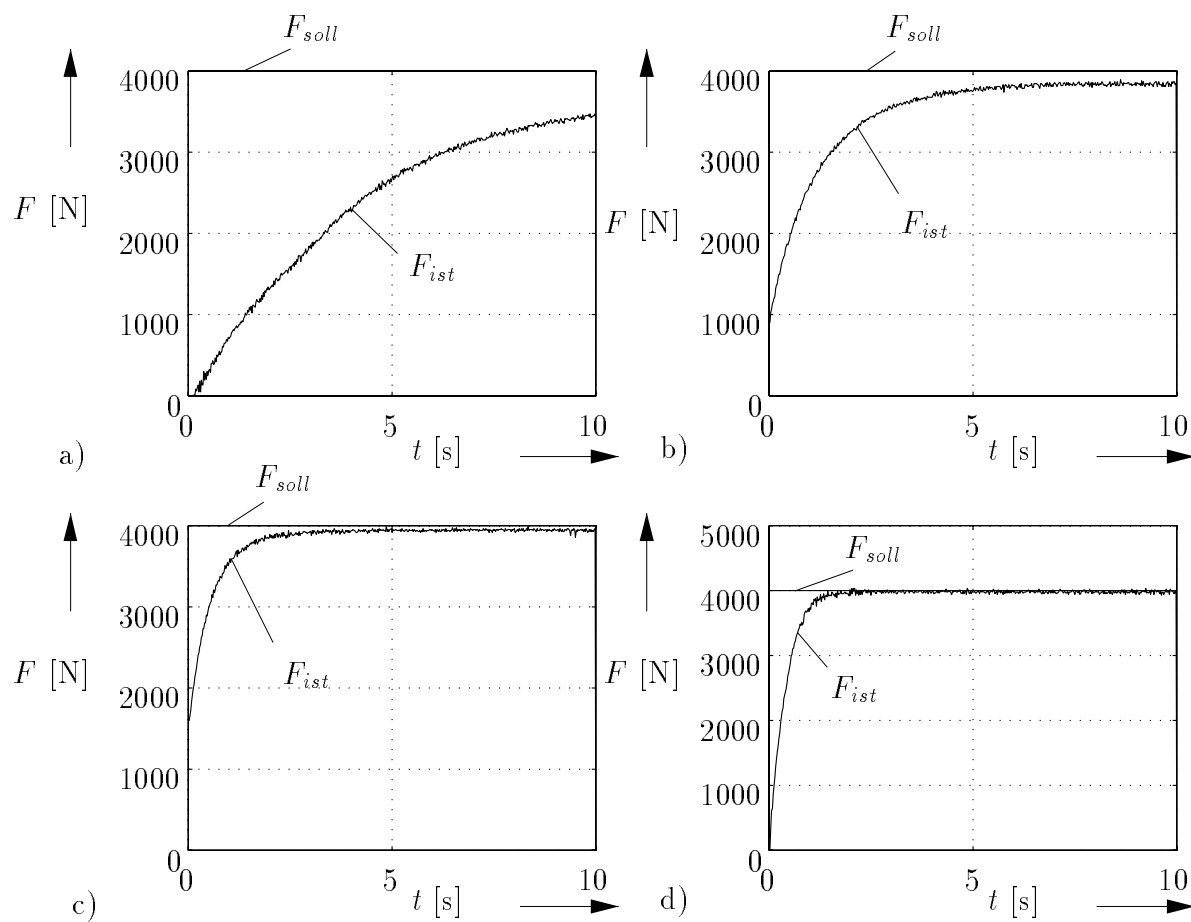


**Bild 3.14:** Kennfeld des Faktors  $cir_{Tuning}$

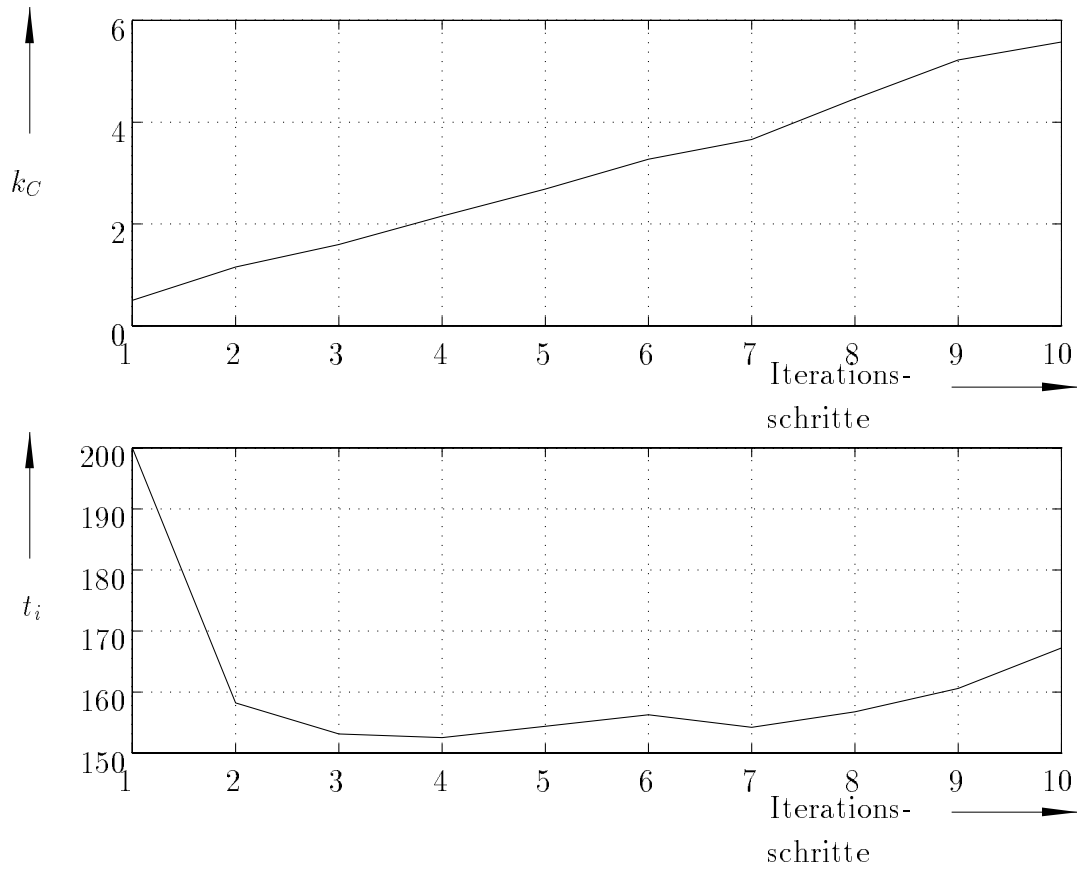


**Bild 3.15:** Kennfeld des Faktors  $k_{RTuning}$

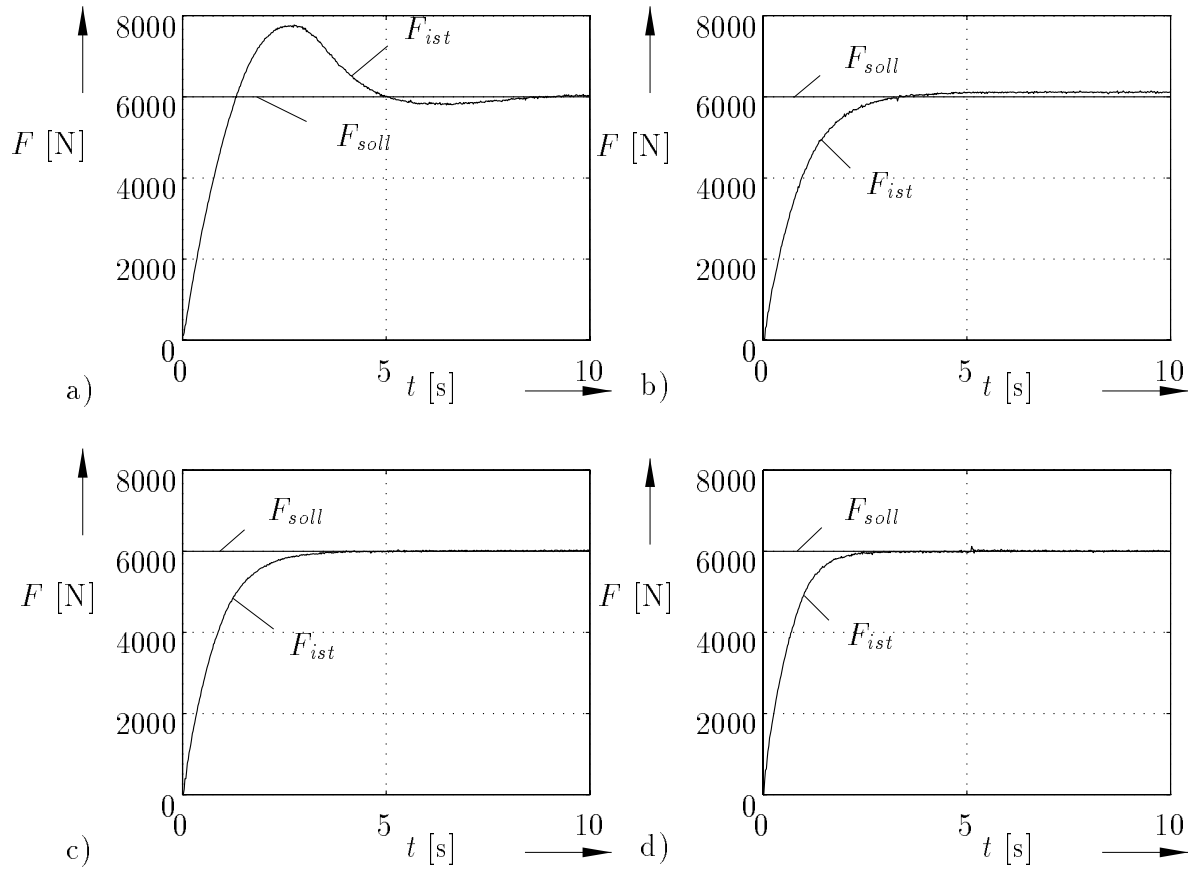
Die Kennfelder der Ausgangsgrößen des Fuzzy-Algorithmus sind in den Bildern 3.14 und 3.15 aufgetragen. In dem Bild 3.16 ist der Verlauf der Einstellung des PI-Reglers anhand von Meßdaten der Bauteilprüfmaschine dargestellt. Ausgehend von einer Parametereinstellung des PI-Reglers von  $k_C = 1$  und  $t_i = 100$  s (Bild 3.16 a)) (sehr träges Systemverhalten) werden die Regelparameter in 10 Iterationsschritten so eingestellt, daß die Führungsgröße  $F_{soll} = 3000$  N ohne Überschwingen mit einer geringen Anstiegszeit und ohne statische Regelabweichung erreicht wird. Während des gesamten Einstellvorgangs konnten gefährliche Parameter-Einstellungen des PI-Reglers mit heftigen Oszillationen vermieden werden. Im Bild 3.17 sind die Parameter Verstärkung  $k_C$  und Nachstellzeit  $t_i$  des PI-Reglers über die Iterationsschritte aufgetragen. Auch bei einer Ausgangseinstellung der Parameter, welches zu einem Überschwingen der Systemantwort führt, stellt der Fuzzy-Algorithmus die Parameter wieder so ein, daß ein gutes Ergebnis hinsichtlich der Regelgüte erreicht wird (Bild 3.18). Sehr schön können in den Bilder 3.17 und 3.19 die unterschiedlichen Tendenzen in der Parametereinstellung der Verstärkung  $k_C$  und der Nachstellzeit  $t_i$  für die beiden unterschiedlichen Grundeinstellungen des PI-Reglers mit dem damit verbundenen Systemverhalten der Bauteilprüfmaschine erkannt werden. Weitere Meßergebnisse sind im Anhang dargestellt.



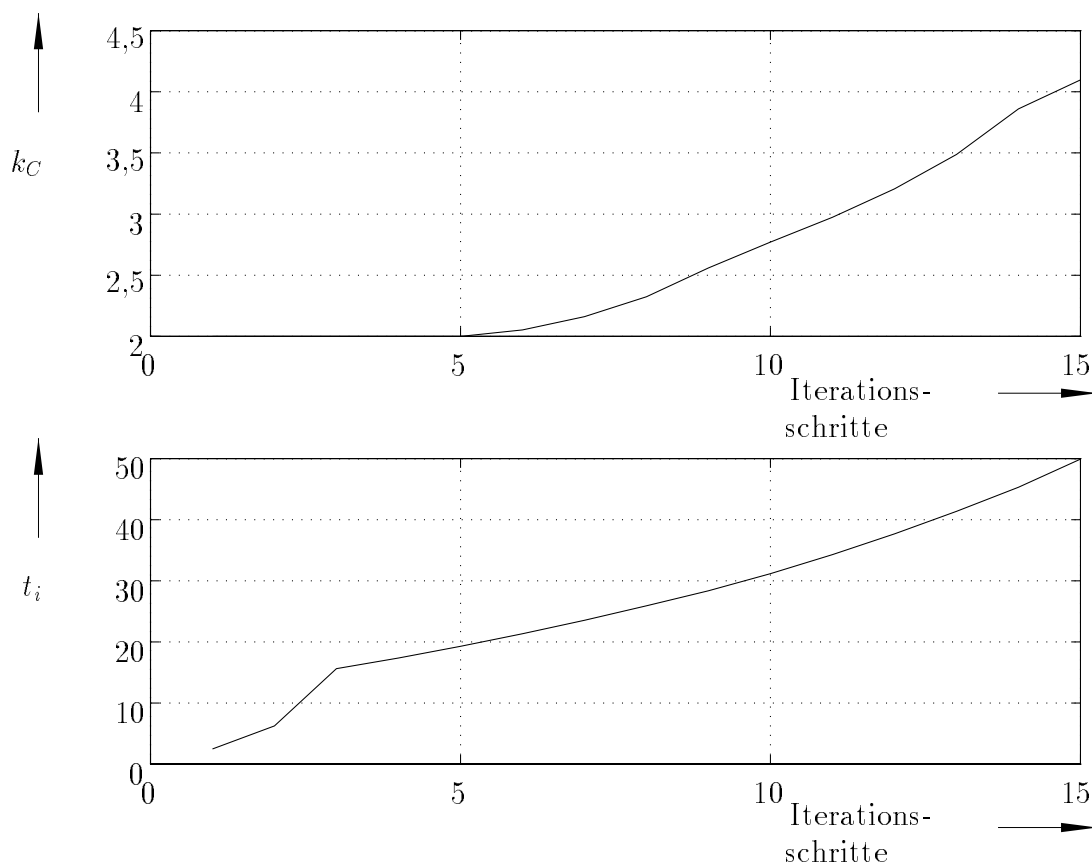
**Bild 3.16:** Ablauf der Einstellung des PI-Reglers anhand von Meßergebnissen der Systemantwort der Bauteilprüfmaschine für einen Sollwertsprung von  $F_{soll} = 4000$  N. Bild a): Systemantwort bei der Anfangseinstellung der Parameter des PI-Reglers. Bild b) und c): Systemantwort nach 3 bzw. 6 Iterationsschritten. Bild d): Systemantwort nach 10 Iterationsschritten



**Bild 3.17:** Änderungen der Parameter des PI-Reglers  $k_C$  und  $t_i$  über die Iterationsschritte für  $F_{soll} = 4000$  N ausgehend von einem sehr trägem Systemverhalten (mit einer Parametereinstellung (Anfangseinstellung) von  $k_C = 0,5$  und  $t_i = 200$  s)



**Bild 3.18:** Ablauf der Einstellung des PI-Reglers anhand von Meßergebnissen der Systemantwort der Bauteilprüfmaschine für einen Sollwertsprung von  $F_{soll} = 3000$  N. Bild a): Systemantwort bei der Anfangseinstellung der Parameter des PI-Reglers. Bild b) und c): Systemantwort nach 6 bzw. 9 Iterationsschritten. Bild d): Systemantwort nach 15 Iterationsschritten



**Bild 3.19:** Änderungen der Parameter des PI-Reglers  $k_C$  und  $t_i$  über die Iterationsschritte ausgehend von einem stark überschwingenen Systemverhalten (mit einer Parametereinstellung (Anfangseinstellung) von  $k_C = 2$  und  $t_i = 1$  s)



## 4 Zusammenfassung und Ausblick

Zur Überprüfung der Dauerfestigkeit von Bauteilen läßt sich in einer Prüfmaschine mit Hilfe eines hydraulischen Zylinders ein gewünschtes Belastungsprofil erzeugen. Die dynamischen und statischen Eigenschaften der Regelstecke werden maßgeblich durch die zu untersuchenden Proben bestimmt und sind daher in der Regel nicht exakt bekannt, so daß die Parameter der Kraftregelung an das veränderliche Streckenverhalten angepaßt werden müssen. Der zeitliche Verlauf der Belastungskraft wird mit einem konventionellen PI-Regler geregelt. Die Anpassung erfolgt zur Zeit von Hand z. B. nach heuristischen Faustformeln oder Tuningvorschriften.

In diesem Bericht werden zwei Fuzzy-Algorithmen zur voll automatisierten Regeleinstellung vorgestellt. Beide zeichnen sich durch

- eine einfache Handhabung,
- ein einfaches und verständliches Konzept,
- keine Bedienparameter
- sowie eine geringe Anforderung an das Streckenverhalten

aus. Das selbsteinstellende Verfahren dient dazu, während der Inbetriebnahmephase der Anlage oder auf gesonderten Wunsch des Anwenders eine geeignete Reglereinstellung zu gewinnen. Die Parameter der PI-Regler werden dabei sukzessiv im geschlossenen Regelkreis eingestellt. Die besten Ergebnisse konnten mit dem stark modifizierten selbsteinstellenden Verfahren von Pfeiffer erzielt werden (Chatziioannidis 1995). Das Verfahren zeigte in der Simulation mit dem Simulationsprogramm Hyvos 4.0 der Firma Mannesmann-Rexroth für unterschiedlichste Federsteifigkeiten und auch am Versuchsträger einer Bauteilprüfmaschine hervorragende Ergebnisse. Das Verfahren zeichnet sich durch die sehr wenige Merkmale (zwei) und Iterationsschritte (Anpassungsschritte) (zehn) zur Einstellung der Regelparameter aus. Weiter ist der Algorithmus sehr logisch aufgebaut und in seiner Berechnung der Parameter des PI-Reglers sehr gut nachvollziehbar und somit sehr transparent und seine Anwendbarkeit ist unabhängig von der Anfangseinstellung des PI-Reglers. Zur Anwendung des selbsteinstellenden Verfahrens ist kein mathematisches Prozeßmodell und keine weiteren A-priori Informationen hinsichtlich Ordnung oder Totzeit eines Prozesses nötig. Vorausgesetzt werden muß lediglich, daß der Prozeß stabil ist und das ein PI-Regler prinzipiell geeignet ist.

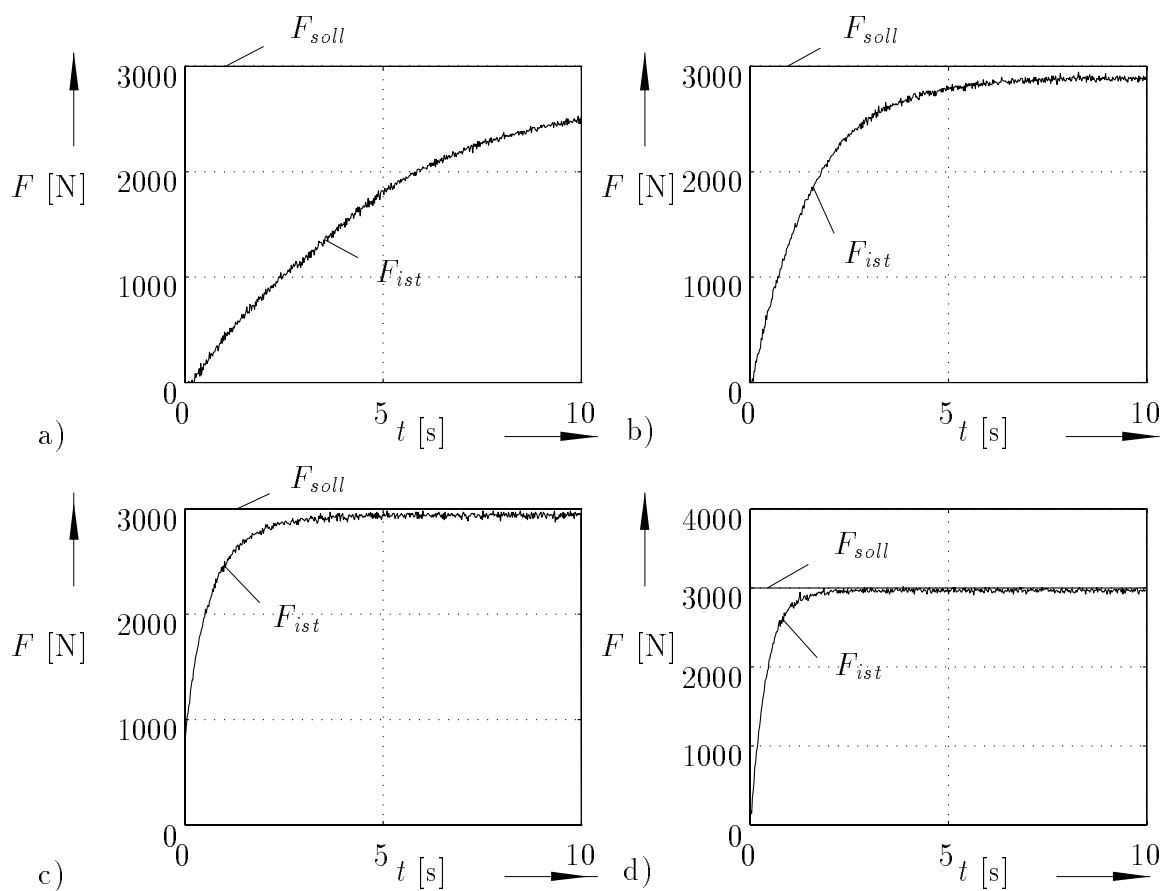
Nachdem eine automatische Inbetriebnahme der Bauteilprüfmaschine möglich ist, kann nun eine on-line Adaption der Regelparameter des PI-Reglers durchgeführt werden. Eine Möglichkeit besteht in der Adaption der Regelparameter des konventionellen PI-Reglers nach jedem Abtastschritt während des Betriebs nach Entscheidungstafeln (Tzafestas und Papanikolopoulos 1990, He, Tan und Hang 1993, He, Tan und Xu 1993).

## 5 Literaturverzeichnis

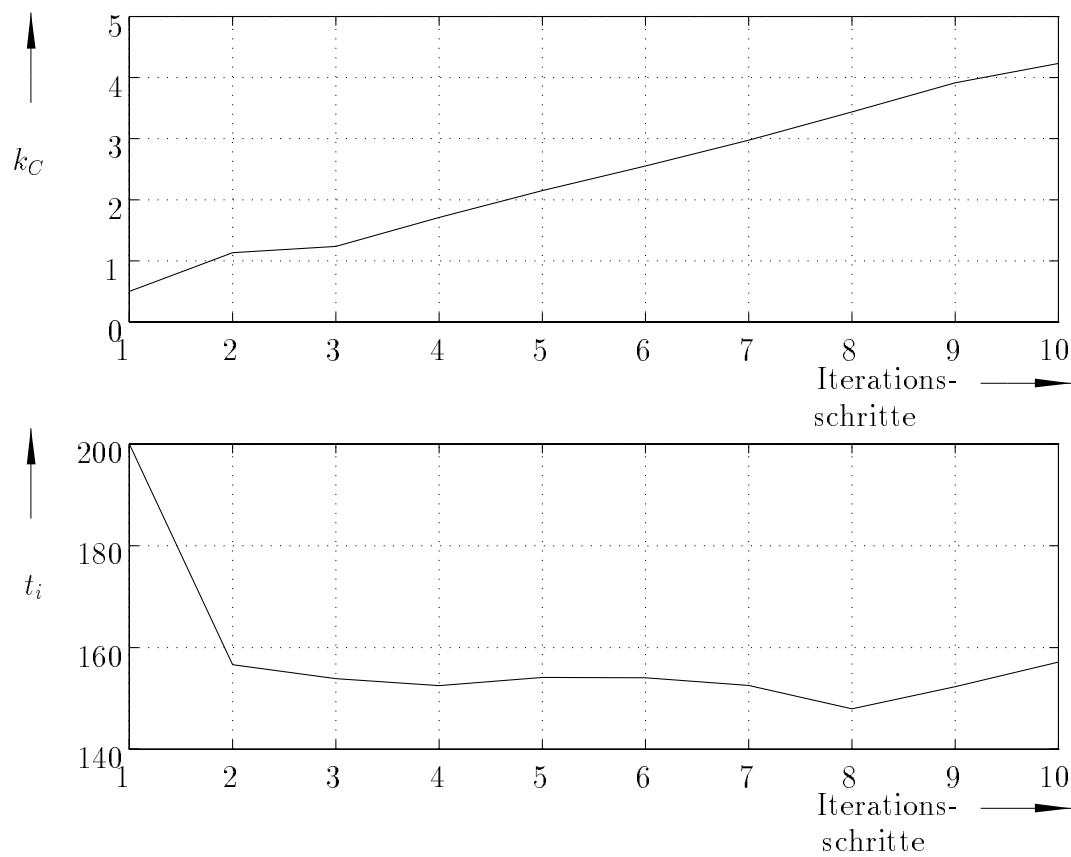
- Bertram, T., F. Svaricek, T. Bindel, R. Böhm, H. Kiendl, B. Pfeiffer, und M. Weber.** 1994. Fuzzy Control. Zusammenstellung und Beschreibung wichtiger Begriffe. *Automatisierungstechnik at 42*. 322–326.
- Böhme, G.** 1993. *Fuzzy-Logik: Einführung in die algebraischen und logischen Grundlagen*. Berlin: Springer.
- Chatziioannidis, T.** 1995. *Erprobung adaptiver Regelungen mit Hilfe der Fuzzy-Logik zur Prüfmaschinen-Kraftregelung*. Studienarbeit, MSRT. Universität Duisburg.
- Chien, K.L., J.A. Hrones und J.B. Reswick.** 1952. On the Automatic Control of Generalized Passiv Systems. *Trans. AMSE 74*, 175–185.
- Driankov, D., H. Hellendoorn und M. Reinfrank.** 1993. *An Introduction to Fuzzy-Control*. Berlin: Springer.
- He, S.Z., S. Tan und C.C. Hang.** 1993. Control of dynamical process using an online rule-adaptive fuzzy control system. *Fuzzy Sets and Systems 54*, 11–22.
- He, S.Z., S. Tan und F.L. Xu.** 1993. Fuzzy self-tuning of PID controllers. *Fuzzy Sets and Systems 56*, 37–46.
- Jörissen, D.** 1995. *Optimierung und Erprobung einer adaptiven Prüfmaschinen-Kraftregelung*. Studienarbeit, MSRT. Universität Duisburg.
- Kruse, R., J. Gebhardt und F. Klawonn.** 1994. *Foundations of Fuzzy Systems*. New York: John Wiley & Sons.
- Kroll, A.** 1993. *Verfahren für adaptive Regelungen mit der Fuzzy-Logik*. Forschungsbericht 10/93. MSRT. Universität Duisburg.
- Kuhn, T.** 1995a. Lösung von Adaptionsproblemen klassischer Regler mittel optimaler Fuzzy-Logik. *Symposium zu Neuro-Fuzzy Technologien, Lutherstadt-Wittenberg*. 53–61.
- Kuhn, U.** 1995b. Eine praxisnahe Einstellregel für PID-Regler: Die T-Summen Regel. *Automatisierungstechnik at 5*. 10–16.
- Latzel, W.** 1993. Einstellregeln für vorgegebene Überschwingweiten. *Automatisierungstechnik at 41*. 103–113.
- Pedrycz, W.** 1993. *Fuzzy Control and Fuzzy Systems*. New York: John Wiley & Sons.

- Pfeiffer, B.-M.** 1994. Selbsteinstellende klassische Regler mit Fuzzy-Logik. *Automatisierungstechnik at 2*, 69–73.
- Schwarz, H.** 1981. *Optimale Regelung und Filterung*. Braunschweig/Wiesbaden: Vieweg.
- Sowa, J.** 1989. Ein Beitrag zum industriellen Einsatz selbsteinstellender PID-Regler für verfahrenstechnische Regelstrecken. Fortschrittbericht VDI Reihe 8 Nr. 190. Düsseldorf: VDI-Verlag.
- Spielmann, M.** 1993. *Konstruktive Erweiterung und Inbetriebnahme eines Zylinderprüfstandes zur Lastsimulation für eine Bauteilprüfmaschine*. Studienarbeit, MSRT. Universität Duisburg.
- Tlili, K.** 1993. *Entwurf eines adaptiven PID-Reglers zur Regelung einer Bauteilprüfmaschine mit Hilfe der Fuzzy-Logik*. Studienarbeit, MSRT. Universität Duisburg.
- Tzafestas, S. und N.P. Papanikolopoulos.** 1990. Incremental Fuzzy Expert PID Control. *IEEE Transactions on industrial electronics 37*, 365–371.
- Wang, L.** 1994. *Adaptive Fuzzy Systems and Control: Design and Stability Analysis*. Englewood Cliffs New Jersey: Prentice Hall.
- Zadeh, L.A.** 1965. Fuzzy Sets. *Information and Control 8*, 338–353.
- Zarneckow, U.** 1993. *Adaption der Reglerparameter mittels der Fuzzy-Set-Logik bei der Kraftregelung einer elektrohydraulischen Achse*. Diplomarbeit. Fachhochschule Würzburg – Schweinfurt.
- Ziegler, J.G. und N.B. Nichols.** 1942. Optimum Setting for Automatic Controllers. *Trans. AMSE 64*, 759–769.

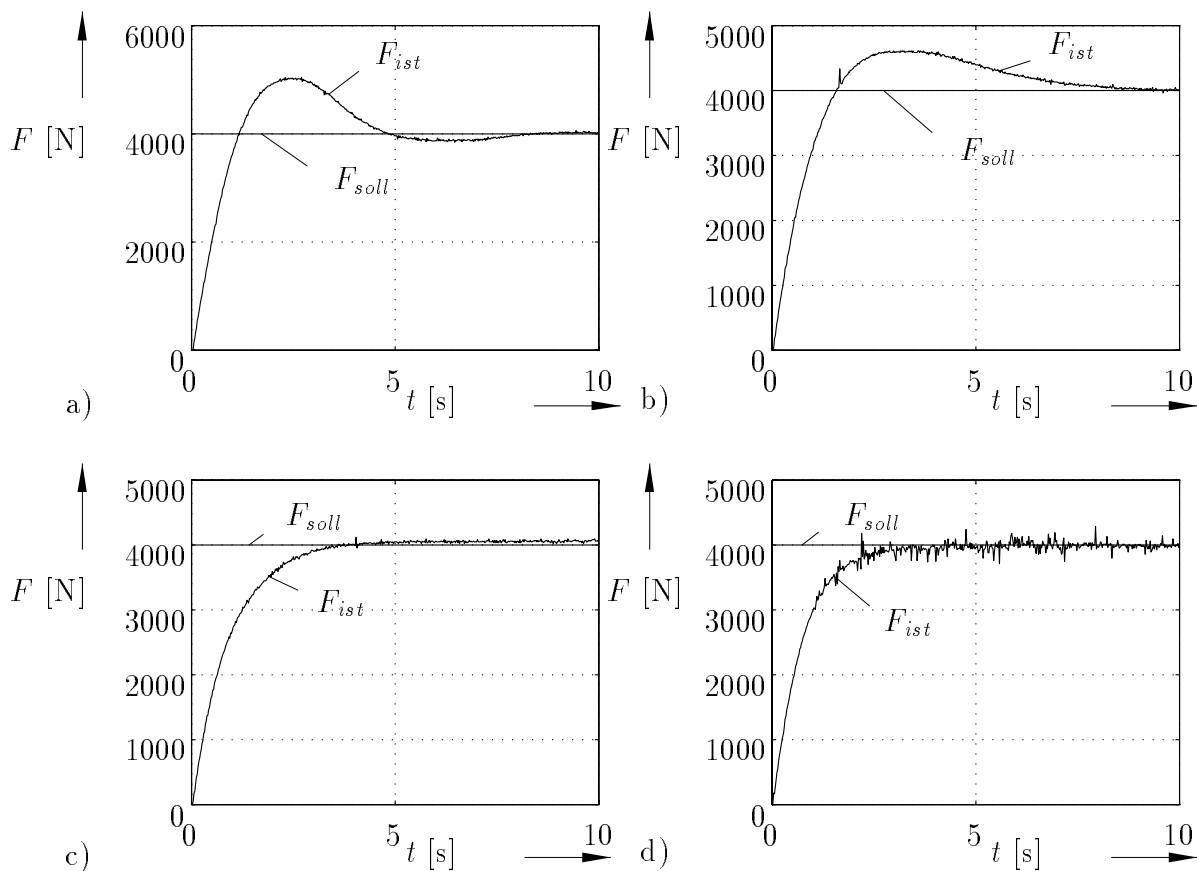
## A Meßergebnisse



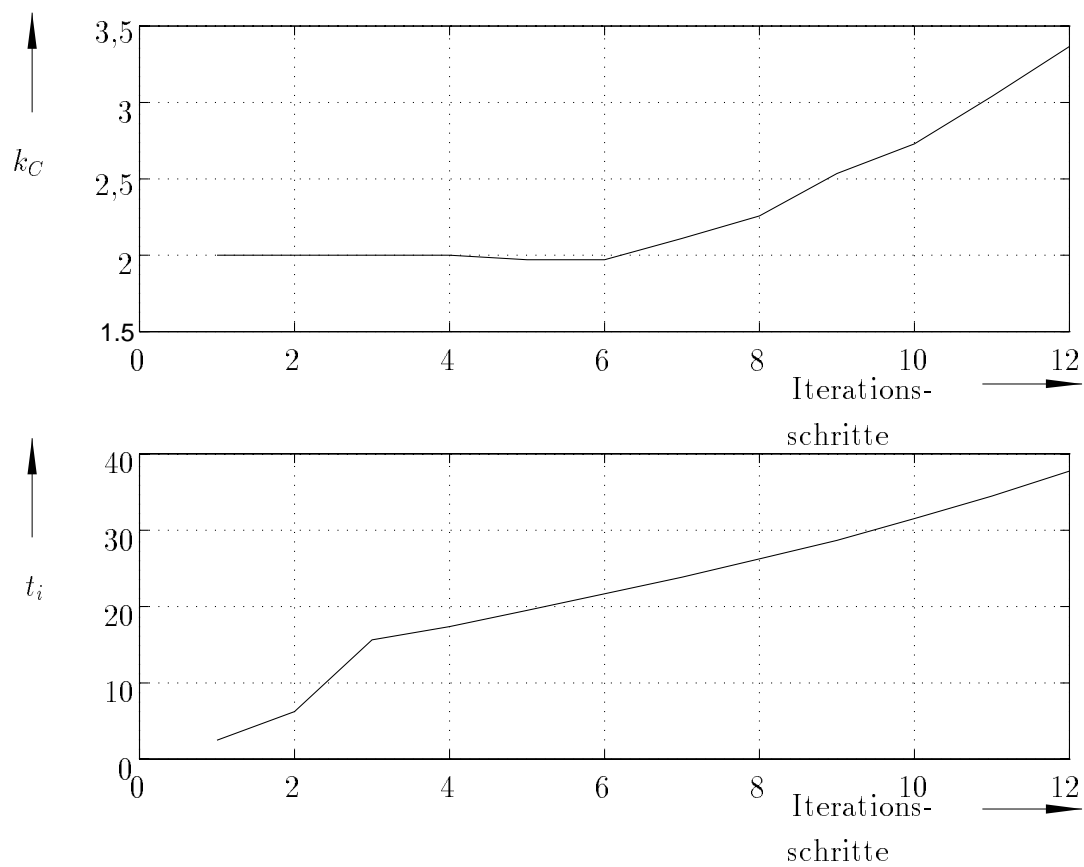
**Bild A.1:** Ablauf der Einstellung des PI-Reglers anhand von Meßergebnissen der Systemantwort der Bauteilprüfmaschine für einen Sollwertsprung von  $F_{soll} = 3000$  N. Bild a): Systemantwort bei der Anfangseinstellung der Parameter des PI-Reglers. Bild b) und c): Systemantwort nach 3 bzw. 6 Iterationsschritten. Bild d): Systemantwort nach 10 Iterationsschritten



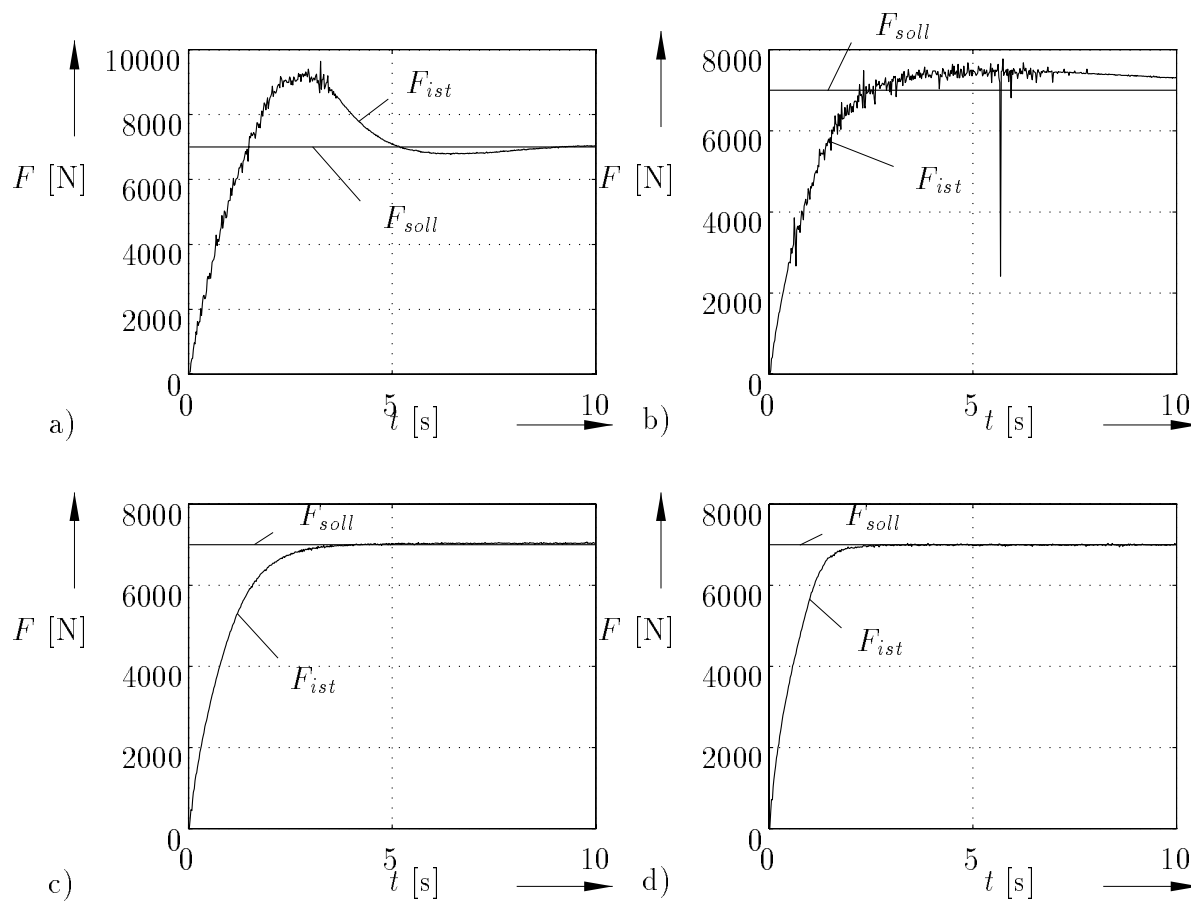
**Bild A.2:** Änderungen der Parameter des PI-Reglers  $k_C$  und  $t_i$  über die Iterationsschritte ausgehend von einem sehr trägem Systemverhalten (mit einer Parametereinstellung (Anfangseinstellung) von  $k_C = 0,5$  und  $t_i = 200$  s)



**Bild A.3:** Ablauf der Einstellung des PI-Reglers anhand von Meßergebnissen der Systemantwort der Bauteilprüfmaschine für einen Sollwertsprung von  $F_{soll} = 4000$  N. Bild a): Systemantwort bei der Anfangseinstellung der Parameter des PI-Reglers. Bild b) und c): Systemantwort nach 3 bzw. 6 Iterationsschritten. Bild d): Systemantwort nach 10 Iterationsschritten

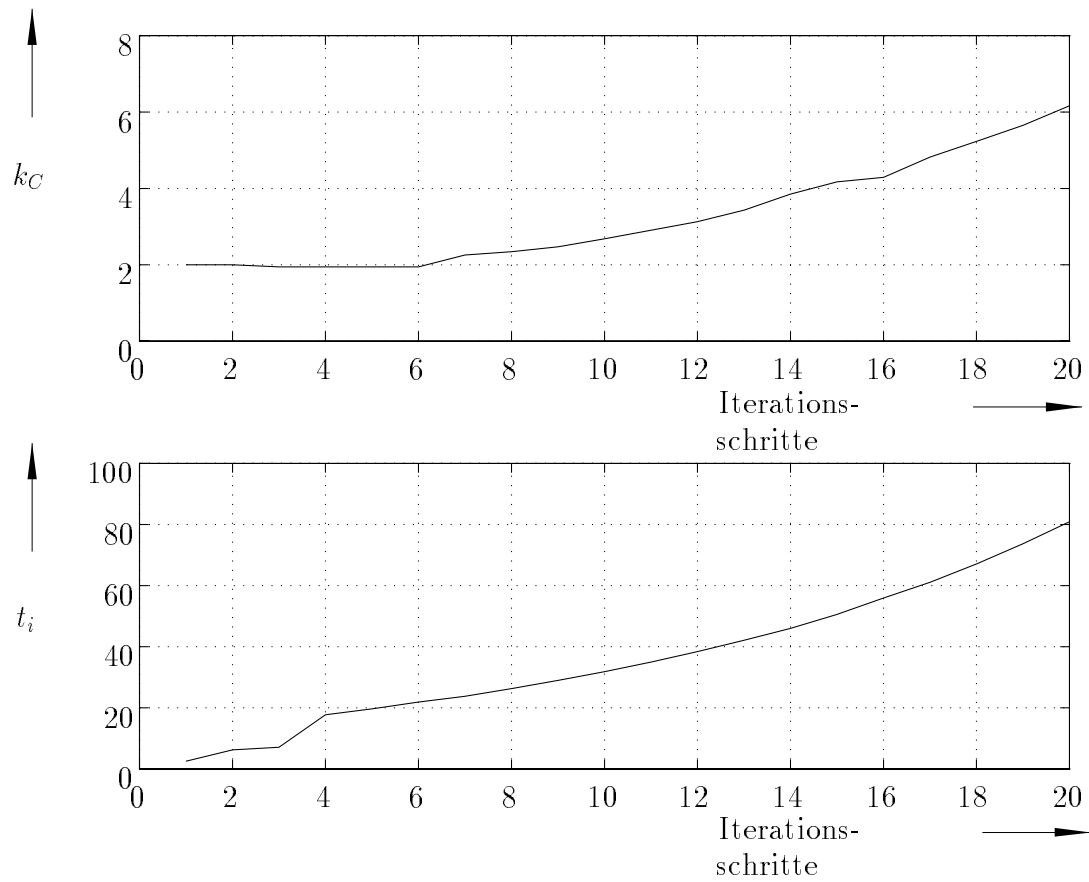


**Bild A.4:** Änderungen der Parameter des PI-Reglers  $k_C$  und  $t_i$  über die Iterationsschritte ausgehend von einem stark überschwingenen Systemverhalten (mit einer Parametereinstellung (Anfangseinstellung) von  $k_C = 2$  und  $t_i = 1$  s)



**Bild A.5:** Ablauf der Einstellung des PI-Reglers anhand von Meßergebnissen der Systemantwort der Bauteilprüfmaschine für einen Sollwertsprung von  $F_{soll} = 7000$  N. Bild a): Systemantwort bei der Anfangseinstellung der Parameter des PI-Reglers. Bild b) und c): Systemantwort nach 9 bzw. 15 Iterationsschritten. Bild d): Systemantwort nach 20 Iterationsschritten





**Bild A.6:** Änderungen der Parameter des PI-Reglers  $k_C$  und  $t_i$  über die Iterationsschritte ausgehend von einem stark überschwingenen Systemverhalten (mit einer Parametereinstellung (Anfangseinstellung) von  $k_C = 2$  und  $t_i = 1$  s)