

**AUTOMATISIERUNGSTECHNIK
REGELUNGSTECHNIK
FORMELSAMMLUNG**

INGO MARKSTEINER

EDI97A

6. Juni 2001

Diese Formelsammlung wurde mit L^AT_EX2e und xfig unter Linux erstellt. Sie basiert auf den Unterrichtsunterlagen von H. Tholen-Grigull.

©Ingo Marksteiner

ingo@fishing-penguins.de

Diese Formelsammlung ist erhältlich unter:
<http://www.fishing-penguins.de>

Ausdruck vom 6. Juni 2001

Inhaltsverzeichnis

I	Automatisierungstechnik	7
1	Allgemeines	9
1.1	Allgemeiner Ablauf	10
1.1.1	Strukturierte Programmierung	10
1.1.2	Bausteinaufrufe	11
1.1.3	Bausteinende	12
2	Module	15
2.1	Gemischte UND/ODER-Funktionen	16
2.1.1	Ohne Klammern	16
2.1.2	Verwendung von Klammern	16
2.2	Merker	19
2.2.1	RS-Flip-Flop	20
2.2.2	SR-Flip-Flop	21
2.3	Zeitglieder	22
2.3.1	Allgemeines	22
2.3.2	Impuls SI	24
2.3.3	Verlängerter Impuls SV	26
2.3.4	Einschaltverzögerung SE	28
2.3.5	Speichernde Einschaltverzögerung SS	30
2.3.6	Ausschaltverzögerung SA	32
2.4	Zähler	34
2.4.1	Allgemeines	34
2.4.2	Erläuterungen zu den Zählereingängen	35
2.5	Vergleicher	39
2.5.1	Allgemeines	39
2.5.2	Vergleichsmöglichkeiten	39
3	Ablaufsteuerung	41
3.1	Aufbau	42
3.1.1	Allgemeines	42

II	Regelungstechnik	47
4	Formeln	49
4.1	Regler	50
4.1.1	Verwendete Formelzeichen	50
4.1.2	P-Glied	51
4.1.3	I-Glied	52
4.1.4	D-Glied	54
4.1.5	PI-Glied	55
4.1.6	PD-Glied	57
4.1.7	2-Punkt-Regler	61
4.1.8	Geschlossener Regelkreis (Regelstrecke 1. Ordnung + P-Regler)	61
5	Regler	63
5.1	Integralglieder	64
5.1.1	I-Regler	65
5.1.2	Stetige Regler	66
5.1.3	Der P-Regler	68
5.2	Differenzglieder	70
5.3	Regler mit kombiniertem Verhalten	72
5.3.1	PI-Regler	72
5.3.2	PD-Regler	73
5.3.3	PID-Regler	74
5.4	Ortskurven	78
5.5	Übertragungsfunktionen	78
5.5.1	Anwendung von Ortskurven und Übertragungsfunktionen	79
5.5.2	Übertragungsmaß der Gesamtschaltung	80
5.5.3	T_1 -Glied	82
5.5.4	T_2 -Glied	84
5.5.5	Bestimmung der Ortskurve	84
5.5.6	Ortskurven von Regelkreisgliedern	86
5.5.7	Einfluß der Dämpfung	86
5.5.8	Sprungantwort der gedämpften Schwingung	88
5.5.9	Berechnungsgrundlagen	89
5.5.10	Komplexe Rechnung	90
6	Begriffe aus der Regelungstechnik	93
6.1	Begriffserklärung	94
6.1.1	Größen im Regelungssystem	94
6.1.2	Elemente im Regelungssystem	96
6.2	Zeitverhalten von Regelstrecken	97
6.2.1	Regelkreisglieder	97
6.2.2	P-Strecken (Strecken mit Ausgleich)	98
6.2.3	I-Strecken (Strecken ohne Ausgleich)	99
6.3	Bemerkungen	101

Abbildungsverzeichnis

1.1	Absoluter Bausteinanruf	11
1.2	Bedingter Bausteinanruf	12
1.3	Bausteinende eines Bausteins	12
1.4	Absolutes Ende eines Bausteins	13
1.5	Bedingtes Ende eines Bausteins	13
2.1	Klammerregelung	18
2.2	RS-Flip-Flop	20
2.3	SR-Flip-Flop	21
2.4	Zeitvorgabe	22
2.5	Aufbau eines Zeitwortes	22
2.6	SI-Zeitglied Signal-Zeit-Diagramm	24
2.7	SI-Zeitglied Funktionsplan	24
2.8	SI-Zeitglied Anschluß an die SPS	25
2.9	SV-Zeitglied Signal-Zeit-Diagramm	26
2.10	SV-Zeitglied Funktionsplan	26
2.11	SV-Zeitglied Anschluß an die SPS	27
2.12	SE-Zeitglied Signal-Zeit-Diagramm	28
2.13	SE-Zeitglied Funktionsplan	28
2.14	SE-Zeitglied Anschluß an die SPS	29
2.15	SS-Zeitglied Signal-Zeit-Diagramm	30
2.16	SS-Zeitglied Funktionsplan	30
2.17	SS-Zeitglied Anschluß an die SPS	31
2.18	SA-Zeitglied Signal-Zeit-Diagramm	32
2.19	SA-Zeitglied Funktionsplan	32
2.20	SA-Zeitglied Anschluß an die SPS	33
2.21	Aufbau einer Zählerstufe	35
2.22	Zählerstufe Reihenfolge der Anweisungen	37
2.23	Funktionsdiagramm eines Zählers	38
3.1	Schrittsymbol der Ablaufsteuerung	42
3.2	Befehlssymbolsymbol der Ablaufsteuerung	43
3.3	Eingänge in der Ablaufsteuerung	44
3.4	Ausgänge in der Ablaufsteuerung	44
3.5	Schritte in der Ablaufsteuerung	44

3.6	Befehle in der Ablaufsteuerung	45
4.1	Aufbau und Sprungantwort eines P-Gliedes	51
4.2	Aufbau und Sprungantwort eines I-Gliedes	52
4.3	Aufbau und Anstiegsantwort eines D-Gliedes	54
4.4	Aufbau und Anstiegsantwort eines PI-Gliedes	55
4.5	Aufbau und Anstiegsantwort eines PD-Gliedes	57
4.6	Aufbau und Anstiegsantwort eines PID-Gliedes	59
5.1	Ein- und Ausgangskennlinie eines Integriergliedes	65
5.2	Ein- und Ausgangskennlinie eines I-Reglers	65
5.3	Stetiger und unstetiger Regler	66
5.4	Vereinfachter Regelkreis	67
5.5	OP als Regler	67
5.6	Funktionsweise eines P-Reglers	68
5.7	Sprungantwort und Symbol eines P-Reglers	68
5.8	Kennlinie eines P-Reglers	69
5.9	Sprungantwort des D-Glieds	70
5.10	D-Glied mit konstanter Eingangsgrößenänderung	71
5.11	Sprungantwort eines PI-Glieds	72
5.12	Sprungsignal eines PD-Reglers	73
5.13	Anstiegssignal eines PD-Reglers	73
5.14	Sprungsignal eines PID-Reglers	74
5.15	Aufbau eines PID-Reglers mit OP's	75
5.16	Schaltungsaufbau eines P-Glieds	79
5.17	Ortskurve eines P-Glieds	80
5.18	Schaltungsaufbau eines I-Glieds	81
5.19	Ortskurve eines I-Glieds	81
5.20	Beispiel eines T_1 -Glieds	82
5.21	Beispiel eines T_2 -Glieds	84
5.22	Ortskurve eines Regelkreisglieds	86
5.23	Beispiel eines T_2 -Glieds	86
5.24	Ortskurve eines T_2 -Glieds	87
5.25	Sprungantwort der gedämpften Schwingung eines T_2 -Glieds . . .	88
5.26	Konjunktion einer komplexen Zahl	90

Teil I

Automatisierungstechnik

Kapitel 1

Allgemeines

1.1 Allgemeiner Ablauf

1.1.1 Strukturierte Programmierung

1.1.1.1 Mehrere Bausteine

Bei der strukturierten Programmierung wird das Programm in mehrere Unterprogramme (Programmbausteine) aufgeteilt. Die Verwaltung dieser Programme geschieht durch den Organisationsbaustein OB1. Er ist der erste Baustein, der von der Steuerung angesprungen wird. Ist dieser nicht vorhanden, muß der Programmbaustein PB1 vorhanden sein, der als nächstes von der Steuerung angesprungen wird. Ist keiner dieser beiden Bausteine vorhanden, so ist das Programm nicht lauffähig. Vom Objektbaustein OB1 werden dann die einzelnen Programmbausteine (PB), Schrittbausteine (SB), oder Funktionsbausteine (FB) aufgerufen. In ihnen befinden sich die eigentlichen Programme.

1.1.1.2 Organisationsbaustein OB

Im Organisationsbaustein OB1 wird festgelegt, in welcher Reihenfolge die einzelnen Bausteine abgearbeitet werden. Er wird vom AG als erster Baustein bearbeitet. Der OB1 wird ständig vom AG abgearbeitet, solange sich das AG im RUN-Betrieb befindet.

1.1.1.3 Programmbaustein PB

In den Programmbausteinen PB können die Grundbefehle der S5-Programmierung verwendet werden. PB's lassen sich als AWL, FUP, und KOP erstellen. PB's können absolut (SPA PB) oder bedingt (SPB PB) aufgerufen werden. Sie lassen sich aus Organisationsbausteinen (OB), Programmbausteinen (PB), Schrittbausteinen (SB) und Funktionsbausteinen (FB) aufrufen.

1.1.1.4 Schrittbaustein SB

Schrittbausteine können mit dem Grundbefehlssatz der S5-Programmierung programmiert werden. SB's lassen sich in den Darstellungsarten AWL, FUP und KOP erstellen.

SB's können absolut (SPA SB) oder bedingt (SPB SB) aufgerufen werden. Sie lassen sich aus Organisationsbausteinen (OB), Programmbausteinen (PB), Schrittbausteinen (SB) und Funktionsbausteinen (FB) aufrufen.

In Schrittbausteinen wird oftmals der Ablauf einer Anlage (Schritt-kette bzw. Ablaufsteuerung) programmiert. Aussagen die für PB's zutreffen, gelten analog auch für SB's.

1.1.1.5 Funktionsbaustein FB

Im Funktionsbaustein kann der gesamte Befehlssatz der S5-Programmierung verwendet werden, d.h. es können auch ergänzende Funktionen¹ und Systemfunktionen² in das Programm eingebunden werden.

FB's können absolut (SPA FB) oder bedingt (SPB FB) aufgerufen werden. Sie lassen sich aus Organisationsbausteinen (OB), Programmbausteinen (PB) und übergeordneten Funktionsbausteinen (FB) aufrufen.

Funktionsbausteine lassen sich bei jedem Aufruf mit aktuellen Parametern ausführen. So müssen sich ständig wiederholende Programmroutinen nur einmal programmiert werden und lassen sich beliebig oft mit unterschiedlichen Parametern (Zeiten, Zählwerte) ausführen.

1.1.1.6 Datenbaustein DB

Im Datenbaustein lassen sich Daten ablegen, auf die dann innerhalb eines SPS-Programmes zugegriffen werden kann. Innerhalb von Datenbausteinen stehen keine Befehle. In Datenbausteine kann auch nicht verzweigt werden. Datenbausteine müssen aktiviert werden, um auf ihre Daten zugreifen zu können.

1.1.2 Bausteinaufrufe

1.1.2.1 Absoluter Bausteinaufruf SPA

Durch die Anweisung SPA kann ein PB, FB oder SB aufgerufen werden. Der Sprungbefehl SPA ist **nicht** VKE-abhängig.

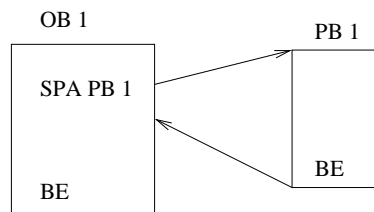


Abbildung 1.1: Absoluter Bausteinaufruf

¹Diese Funktionen sind nur in AWL darstellbar und nur in FB's programmierbar. Dabei handelt es sich z.B. um Schiebefunktionen, Sprungfunktionen und Umwandlungsfunktionen.

²Mit Systemfunktionen kann direkt in den Speicher des AG's geschrieben und somit der Ablauf des Systemprogramms beeinflusst werden.

1.1.2.2 Bedingter Bausteinanruf SPB

Durch die Anweisung SPB kann ein PB, FB oder SB aufgerufen werden. Der Sprungbefehl SPB ist VKE-abhängig.

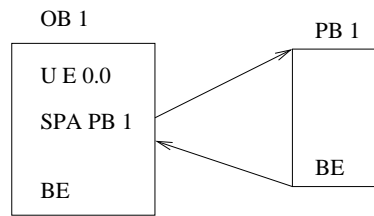


Abbildung 1.2: Bedingter Bausteinanruf

1.1.3 Bausteinende

1.1.3.1 Bausteinende BE

Ausser Datenbausteine muß jeder Baustein mit BE beendet werden. Nach BE wird in das Programmteil zurückgesprungen, von wo aus der Baustein aufgerufen wurde. BE ist **nicht** VKE-abhängig.

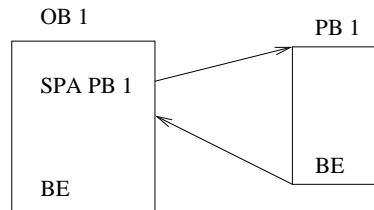


Abbildung 1.3: Bausteinende eines Bausteins

1.1.3.2 Bausteinende absolut BEA

Wird in einem Baustein BEA ausgeführt, so wird in den Programmteil zurückgesprungen, von dem aus der Baustein aufgerufen wurde. Mit SPB und Sprungmarken kann BEA überprungen werden. BEA ist **nicht** VKE-abhängig.

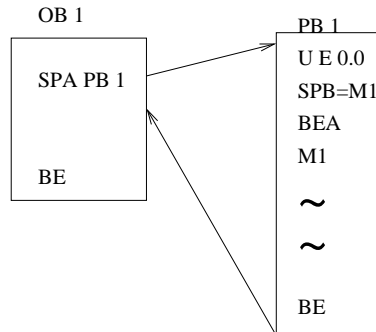


Abbildung 1.4: Absolutes Ende eines Bausteins

1.1.3.3 Bausteinende bedingt BEB

Wird BEB in einem Baustein ausgeführt, so wird in den Programmteil zurückgesprungen, von dem aus der Baustein aufgerufen wurde. BEB ist VKE-abhängig.

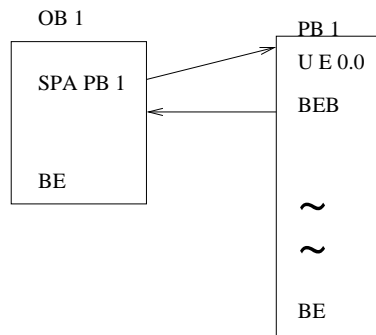


Abbildung 1.5: Bedingtes Ende eines Bausteins

Kapitel 2

Module

2.1 Gemischte UND/ODER-Funktionen

2.1.1 Ohne Klammern

2.1.1.1 Regeln

Werden in der AWL keine Klammern verwendet, so werden zuerst die UND-Verknüpfung und danach die ODER-Verknüpfung abgearbeitet.

2.1.1.2 Anweisungsliste

Anfang Block 1
 U E 0.1
 U E 0.2
Ende Block 1
Anfang Block 2
 O E 0.3
Ende Block 2
Anfang Block 3
 U E 0.4
 U E 0.5
Ende Block 3
Anfang Block 4
 O E 0.6
Ende Block 4
 = A 2.0
 BE

2.1.1.3 Reihenfolge

Die obige AWL wird demnach in folgender Weise abgearbeitet:

A 2.0 = [(Block 1 ODER Block 2) UND Block 3] ODER Block 4

2.1.2 Verwendung von Klammern

2.1.2.1 Regeln

Soll in der Abarbeitung der Steuerung die UND-vor-ODER-Regelung durch die ODER-vor-UND-Regelung ersetzt werden, so muss man entsprechende Blöcke in Klammern setzen. Dabei sind folgende Regeln zu beachten:

- Die Anzahl der öffnenden Klammern muß genauso groß sein, wie die Anzahl der schließenden Klammern.
- Eine Klammerung ist nur innerhalb eines Netzwerkes möglich und darf nicht Netzwerkübergreifend sein.

- Sprungmarken sollten nicht innerhalb einer Klammer verwendet werden, da das Ergebnis sonst nicht nachzuvollziehen ist.
- Ein verschachteln von Klammern ist möglich. Die maximale Anzahl der Verschachtelungen richtet sich nach dem jeweiligen AG und muß aus dem Handbuch ermittelt werden.
- Mit einem Klammer-Auf-Befehl fängt immer eine neue Verknüpfung an. Ein Klammer-Auf-Befehl ist somit **immer** VKE-begrenzend.
- Ein Klammer-Zu-Befehl wird als Zwischenspeicher verwendet und ist somit **nicht** VKE-begrenzend.

Zur Verwendung von Klammern stehen folgende Befehle zur Auswahl:

- U(⇒ UND-Klammer aufmachen
- O(⇒ ODER-Klammer aufmachen
-) ⇒ Klammer schließen

Folgende Schaltung zeigt, wie man eine gemischte Schaltung mit UND-vor-ODER und ODER-vor-UND gleichzeitig aufbauen kann.

2.1.2.2 Anweisungsliste

Anweisungsliste	
<i>Operation</i>	<i>Operand</i>
U	(
U	E 0 .6
U	E 0 .3
O	
U	(
O	E 0 .5
O	E 0 .4
)	
U	E 0 .2
)	
O	
U	(
O	E 0 .6
O	E 0 .5
)	
U	E 0 .1
=	A 2 .0
BE	

2.1.2.3 Funktionsplan

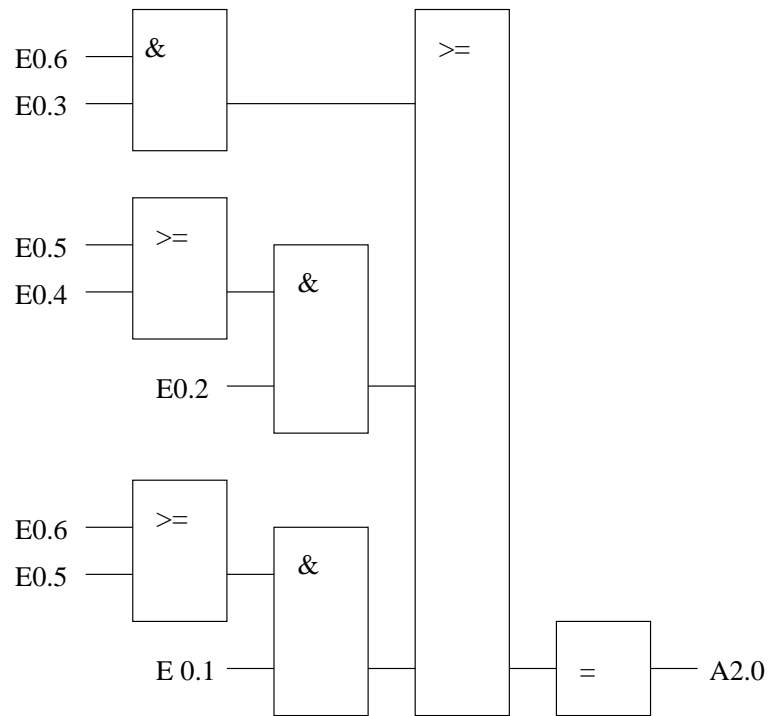


Abbildung 2.1: Klammerregelung

2.2 Merker

Merker dienen dazu, um Zwischenergebnisse zu speichern. Sie dienen nur zur programminternen Verarbeitung und sind von der Funktion her mit Flip-Flops vergleichbar. Dabei unterscheidet man zwischen RS- und SR-Flip-Flops. Merker sind zustandgesteuert, d.h. sie benötigen zum Setzen oder Rücksetzen keine Flanke an den Setz- oder Rücksetzeingängen. Damit die AWL in KOP und FUP übersetzbar ist, müssen alle nicht belegten Ein- bzw. Ausgänge in der AWL mit einem NOP0 Befehl belegt werden.

2.2.1 RS-Flip-Flop

Das RS-Flip-Flop ist **setzdominant**. In der AWL wird zuerst der Rücksetzeingang beschaltet und danach der Setzeingang. Dadurch hat der Setzeingang Vorrang vor dem Rücksetzeingang, da er nach dem Rücksetzeingang abgearbeitet wird.

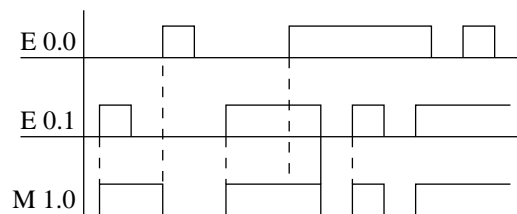
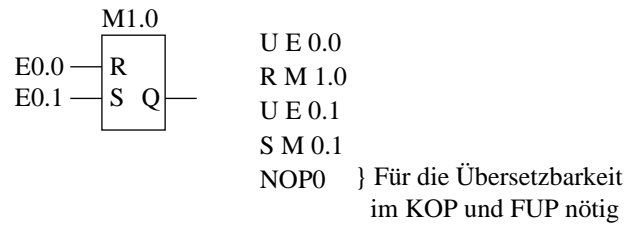


Abbildung 2.2: RS-Flip-Flop

2.2.1.1 Wahrheitstabelle

R	S	Q
0	0	0
0	1	1
1	0	0
1	1	1

2.2.2 SR-Flip-Flop

Das SR-Flip-Flop ist **rücksetzdominant**. In der AWL wird zuerst der Setzeingang beschaltet und danach der Rücksetzeingang. Dadurch hat der Rücksetzeingang Vorrang vor dem Setzeingang, da er nach dem Setzeingang abgearbeitet wird.

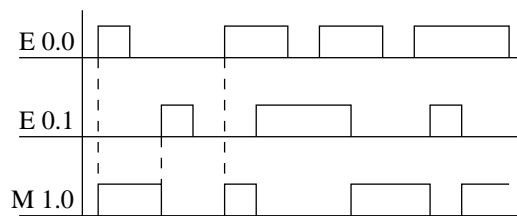
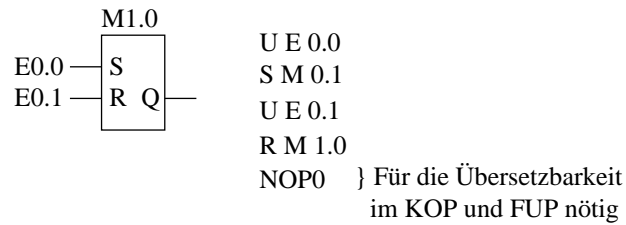


Abbildung 2.3: SR-Flip-Flop

2.2.2.1 Wahrheitstabelle

S	R	Q
0	0	0
0	1	0
1	0	1
1	1	0

2.3 Zeitglieder

2.3.1 Allgemeines

Das Automatisierungsgerät Simatic S5 - 100 U hat 16 Zeitglieder (Zähler). Diese Zeitglieder können für unterschiedliche Funktionen eingesetzt werden. Die Laufzeit wird durch das Programm vorgegeben, sie kann sich zwischen 0,01 Sekunde und 9990 Sekunden bewegen. Es stehen folgende Zeittypen zur Verfügung:

- SI ⇒ Impuls
- SV ⇒ Verlängerter Impuls
- SE ⇒ Einschaltverzögerung
- SS ⇒ Speichernde Verzögerung
- SA ⇒ Ausschaltverzögerung

2.3.1.1 Zeitwert in Zeitfunktion laden

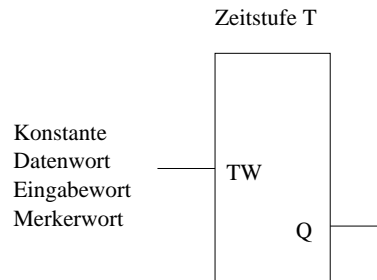


Abbildung 2.4: Zeitvorgabe

Ein Zeitwort hat - links beginnend - zwei Zustands-Bits, die der Prozessor zur Bearbeitung der Zeitfunktionen benötigt, sie sind für die Vorgabe der Zeitdauer jedoch ohne Bedeutung. Daran anschließend folgen zwei Bits für die Zeitbasis und je vier Bits für den BCD-codierten Zeitwert.

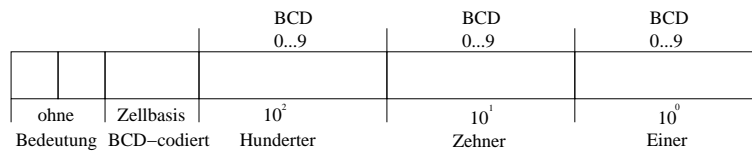


Abbildung 2.5: Aufbau eines Zeitwortes

Um eine Zeitfunktion mit einem Anfangs-Zeitwert zu laden, muß sich dieser Zeitwert vorher im AKKU1 befinden. Dann stehen folgende Möglichkeiten zur

Verfügung:

Operation	Beschreibung
L KT ...	Laden eines konstanten Zeitwertes.
L DW ...	Laden eines Datenwortes. Der Zeitwert muß BCD-codiert vorliegen.
L EW ...	Laden eines Eingangswortes. Der Zeitwert muß BCD-codiert vorliegen.
L AW ...	Laden eines Ausgangswortes. Der Zeitwert muß BCD-codiert vorliegen.
L MW ...	Laden eines Merkerwortes. Der Zeitwert muß BCD-codiert vorliegen.

Ein konstanter Zeitwert hat folgenden Aufbau:

L KT xxx.y

- xxx \Rightarrow Zeitwert
- y \Rightarrow Zeitbasis

Für den Zeitwert kann ein Wert von 000 bis 999 eingesetzt werden. Die Zeitbasis entspricht einem Faktor und ist wie folgt codiert:

Zeitbasis	Zeitfaktor
0	0.01s (10ms)
1	0.1s (100ms)
2	1s
3	10s

2.3.1.2 Starten und Rücksetzen einer Zeit

Durch wechseln des VKE-Zustands am Starteingang des Zeitgliedes kann eine Zeit gestartet werden. Bei den SI-, SV-, SE- und SS-Zeitgliedern wird dazu eine positive Flanke benötigt. Das SA-Zeitglied jedoch benötigt als einziges eine negative Flanke. Beim Starten wird der Zeitwert aus dem AKKU1 übernommen !!! und im Zeitraster bis auf Null gezählt.

Liegt am Rücksetzeingang des Zählers "1" an, so wird der Zeitwert auf Null gesetzt. Es ist kein Flankenwechsel nötig. Solange "1" am Rücksetzeingang anliegt, ist der binäre Zustand des Zeitgliedes "0" \Rightarrow **Rücksetzdominant**. Durch das Rücksetzen ändert sich der binäre Zustand der Zeitglieder **sofort** auf "0".

2.3.2 Impuls SI

Mit dem SI-Zeitglied kann ein Impuls aufbereitet werden. Die Länge des aufbereiteten Impulses wird durch den Zeitwert vorgegeben. In dem Zeitraum, in dem die Zeit im Zeitglied abläuft, ist der Zustand des Zeitgliedes binär "1". Nach Ablauf der Zeit ist der Zustand des Zeitgliedes binär "0". Wechselt das VKE am Starteingang vor Ablauf der Zeit von "1" auf "0", so wechselt auch der binäre Zustand des Zeitgliedes von "1" auf "0". Der binäre Zustand des Zeitgliedes wechselt auch von "1" auf "0", wenn nach Ablauf der Zeit am Starteingang weiterhin "1" anliegt. Die Zeit kann erst durch einen erneuten positiven Flankenwechsel gestartet werden.

S5-Normbeschriftung: 1 _ - _

Mit dem Eingang E 0.0 wird das Zeitglied T0 gestartet. Die Zeit läuft 3 s lang, d.h., der Ausgang A 2.0 ist 3 s lang eingeschaltet. Bei vorzeitigem Öffnen von E 0.0 wird der Ausgang A 2.0 ausgeschaltet. Siehe: *SI-Zeitglied Signal-Zeit-Diagramm*. Mit dem Taster S2 (E 1.0) ist die Zeitstufe jederzeit rücksetzbar.

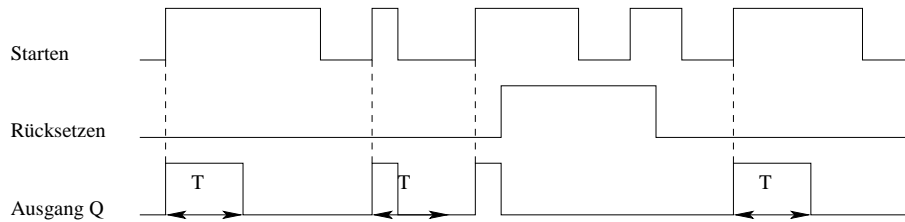


Abbildung 2.6: SI-Zeitglied Signal-Zeit-Diagramm

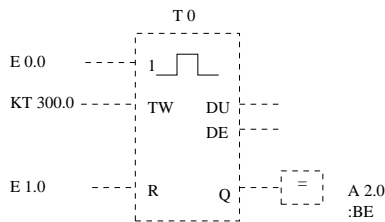


Abbildung 2.7: SI-Zeitglied Funktionsplan

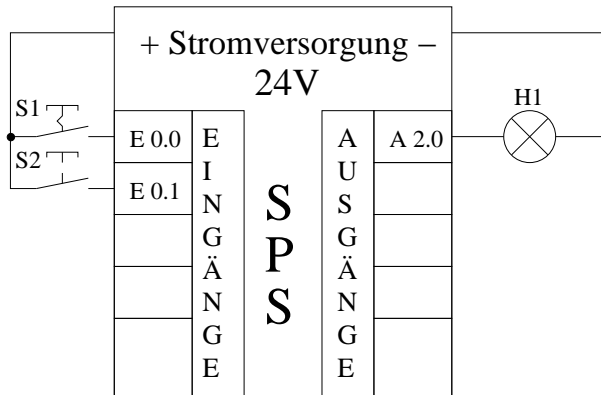


Abbildung 2.8: SI-Zeitglied Anschluß an die SPS

2.3.2.1 Anweisungsliste

Anweisungsliste		
Adresse	Operation	Operand
000	U	E 0 .0
002	L	KT 300 .0
006	SI	T 0
008	U	E 1 .0
00A	R	T 0
00C	NOPO	
00E	NOPO	
010	U	T 0
012	=	A 2 .0
014	BE	

2.3.2.2 Zuordnungsliste

Zuordnungsliste		
Symbol	absolut	Kommentar
S1	E0.0	Zeitstufe Schalter Ein
S2	E1.0	Zeitstufe Taster Rücksetzen
H1	A2.0	Leuchtmelder

2.3.3 Verlängerter Impuls SV

Mit dem SV-Zeitglied kann ein Impuls aufbereitet werden. Liegt am Starteingang "1" an, so wird die vorher aus dem AKKU1 geladene Zeit gestartet. Während die Zeit abläuft, ist der binäre Zustand des Zeitgliedes "1". Im Gegensatz zum SI-Zeitglied läuft die Zeit auch ab, wenn das VKE am Starteingang von "1" auf "0" wechselt. Die Zeit ist nachtriggerbar, d.h. mit einem positiven Flankenwechsel am Starteingang wird die Zeit neu gestartet, auch wenn sie noch nicht ganz abgelaufen ist. Bleibt am Starteingang jedoch "1"-Signal anstehen, so läuft die Zeit ab und der binäre Zustand des Zeitgliedes wechselt von "1" auf "0".
 S5-Normbeschriftung: 1_-_V

Mit dem Eingang E0.1 wird das Zeitglied T1 gestartet. Die Zeit läuft 3s lang, d.h., der Ausgang A2.1 ist 3s lang eingeschaltet. Bei vorzeitigem Öffnen von E0.1 wird der Ausgang A2.1 nicht abgeschaltet. Siehe: *SV-Zeitglied Signal-Zeit-Diagramm*. Mit dem Taster S4 (E1.1) ist die Zeitstufe jederzeit rücksetzbar.

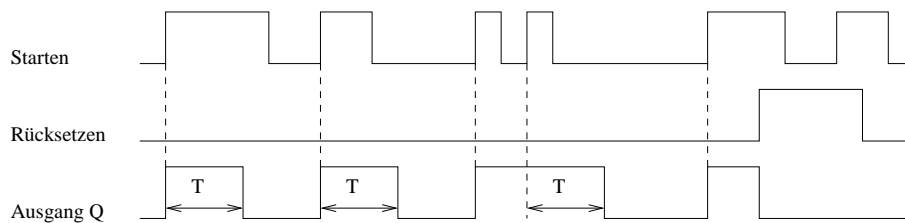


Abbildung 2.9: SV-Zeitglied Signal-Zeit-Diagramm

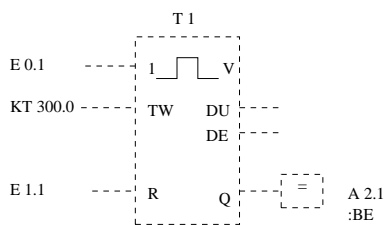


Abbildung 2.10: SV-Zeitglied Funktionsplan

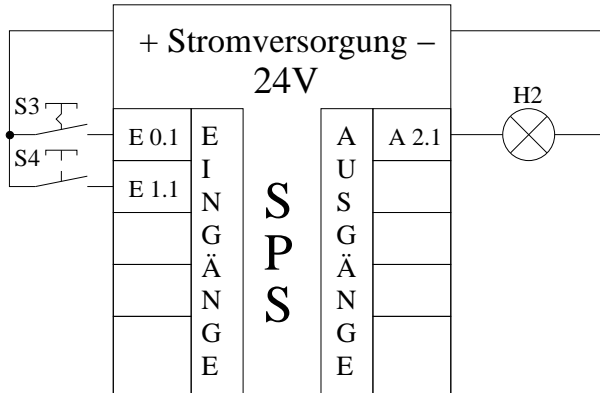


Abbildung 2.11: SV-Zeitglied Anschluß an die SPS

2.3.3.1 Anweisungsliste

Anweisungsliste		
Adresse	Operation	Operand
000	U	E 0 .1
002	L	KT 300 .0
006	SV	T 1
008	U	E 1 .1
00A	R	T 1
00C	NOPO	
00E	NOPO	
010	U	T 1
012	=	A 2 .1
014	BE	

2.3.3.2 Zuordnungsliste

Zuordnungsliste		
Symbol	absolut	Kommentar
S3	E0.1	Zeitstufe Schalter Ein
S4	E1.1	Zeitstufe Taster Rücksetzen
H2	A2.1	Leuchtmelder

2.3.4 Einschaltverzögerung SE

Mit dem SE-Zeitglied wird ein verzögertes Einschalten realisiert. Bei einem positiven Flankenwechsel am Starteingang wird die vorher aus dem AKKU1 geladene Zeit gestartet. Während die Zeit abläuft, ist der binäre Zustand des Zeitgliedes "0". Erst Nach Ablauf der Zeit wechselt der binäre Zustand des Zeitgliedes auf "1". Die Zeit läuft jedoch nur ab, solange das VKE am Starteingang "1" ist und wechselt wieder von "1" auf "0", wenn das VKE am Starteingang von "1" auf "0" wechselt.

S5-Normbeschriftung: T!-!0

Das Zeitglied T2 wird gestartet, wenn der Eingang E0.2 1-Signal wird (positive Flanke). Der Ausgang A2.2 wird aber erst eingeschaltet, wenn die Laufzeit T abgelaufen ist und wenn außerdem das Zeitglied noch gestartet ist, der Eingang E0.2 also immer noch den Zustand 1 hat.

Mit dem Verknüpfungsergebnis 0 am E0.2 wird das Zeitglied gelöscht. Die Zeitstufe ist mit E1.2 jederzeit rücksetzbar.

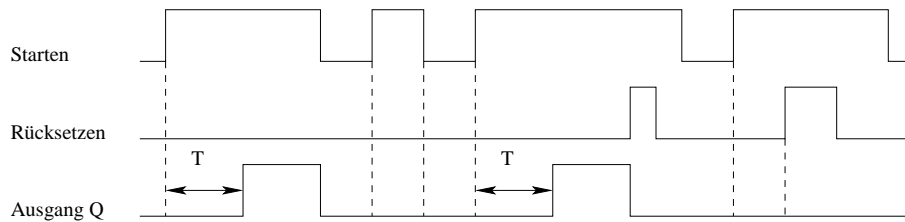


Abbildung 2.12: SE-Zeitglied Signal-Zeit-Diagramm

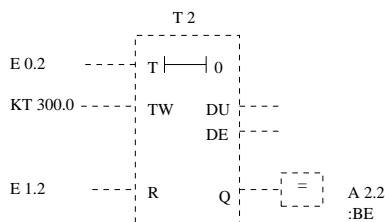


Abbildung 2.13: SE-Zeitglied Funktionsplan

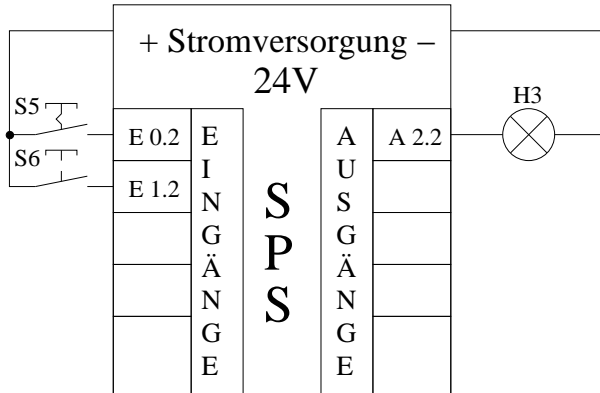


Abbildung 2.14: SE-Zeitglied Anschluß an die SPS

2.3.4.1 Anweisungsliste

Anweisungsliste		
Adresse	Operation	Operand
000	U	E 0 .2
002	L	KT 300 .0
006	SE	T 2
008	U	E 1 .2
00A	R	T 2
00C	NOPO	
00E	NOPO	
010	U	T 2
012	=	A 2 .2
014	BE	

2.3.4.2 Zuordnungsliste

Zuordnungsliste		
Symbol	absolut	Kommentar
S5	E0.2	Zeitstufe Schalter Ein
S6	E1.2	Zeitstufe Taster Rücksetzen
H3	A2.2	Leuchtmelder

2.3.5 Speichernde Einschaltverzögerung SS

Mit dem SS-Zeitglied wird ein verzögertes Einschalten realisiert. Die vorher aus dem AKKU1 geladene Zeit läuft ab, sobald am Starteingang des Zeitgliedes ein positiver Flankenwechsel stattfindet. Im Gegensatz zum SE-Zeitglied läuft die Zeit auch ab, wenn das VKE am Starteingang von "1" auf "0" wechselt. Solange die Zeit abläuft, ist der binäre Zustand des Zeitgliedes "0" und wechselt erst nach Ablauf der Zeit von "0" auf "1". Ein weiterer Unterschied gegenüber dem SE-Zeitglied besteht darin, daß der binäre "1"-Zustand des SS-Zeitgliedes solange erhalten bleibt, bis es explizit über den Rücksetzeingang zurückgesetzt wird. S5-Normbeschriftung: T!-!S

Das Zeitglied T3 wird mit einem Signalwechsel von 0 nach 1 (positive Flanke) gestartet, wobei die Laufzeit der Zeitstufe unabhängig von der Länge des Startimpulses ist. Siehe *SS-Zeitglied Signal-Zeit-Diagramm*. Während des Ablaufes wird der Ausgang A2.3 gesetzt, und zwar so lange, bis über den Eingang E1.3 rückgesetzt wird.

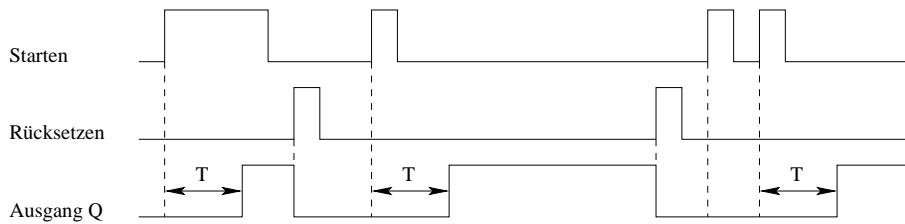


Abbildung 2.15: SS-Zeitglied Signal-Zeit-Diagramm

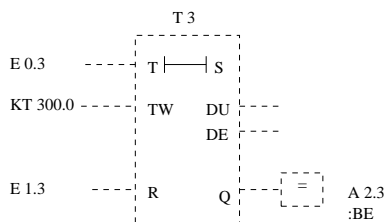


Abbildung 2.16: SS-Zeitglied Funktionsplan

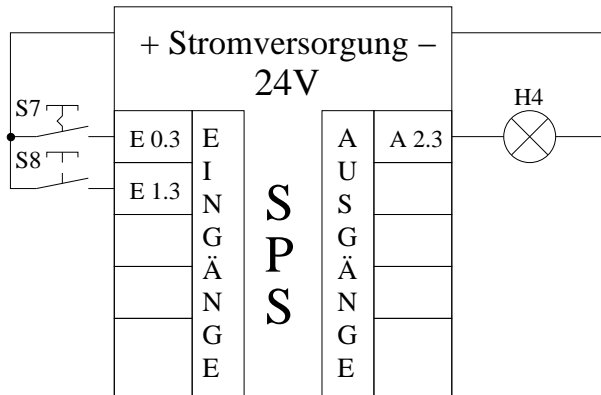


Abbildung 2.17: SS-Zeitglied Anschluß an die SPS

2.3.5.1 Anweisungsliste

Anweisungsliste		
Adresse	Operation	Operand
000	U	E 0 .3
002	L	KT 300 .0
006	SS	T 3
008	U	E 1 .3
00A	R	T 3
00C	NOPO	
00E	NOPO	
010	U	T 3
012	=	A 2 .3
014	BE	

2.3.5.2 Zuordnungsliste

Zuordnungsliste		
Symbol	absolut	Kommentar
S7	E0.3	Zeitstufe Schalter Ein
S8	E1.3	Zeitstufe Taster Rücksetzen
H4	A2.3	Leuchtmelder

2.3.6 Ausschaltverzögerung SA

Mit dem SA-Zeitglied wird eine Ausschaltverzögerung realisiert. Mit einem positiven Flankenwechsel am Starteingang wird auch der binäre Zustand des Zeitgliedes "1". Wechselt das VKE am Starteingang von "1" auf "0", so läuft die vorher aus dem AKKU1 geladene Zeit ab. Der binäre Zustand des Zeitgliedes wechselt erst nach Ablauf der Zeit von "1" auf "0". Mit einem wiederholten positiven Flankenwechsel am Starteingang wird die Zeit neu gestartet. Das SA-Zeitglied ist also nachtriggerbar.

S5-Normbeschriftung: 0!-!T

Erfolgt am Eingang ein Signalwechsel von 0 nach 1 (positiver Flankenwechsel), dann schaltet der Ausgang A2.4 direkt ein. Wechselt der Schaltzustand von Eingang E0.4 (negative Flanke), wird das Zeitglied gestartet und hält den Ausgang A2.4 solange eingeschaltet, bis die Zeit abgelaufen ist. Mit dem Taster S10 (E1.4) ist die Zeitstufe jederzeit rücksetzbar.

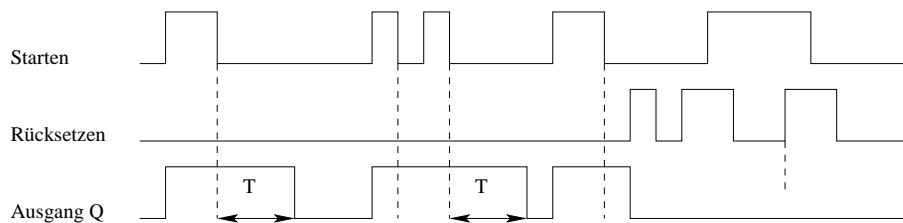


Abbildung 2.18: SA-Zeitglied Signal-Zeit-Diagramm

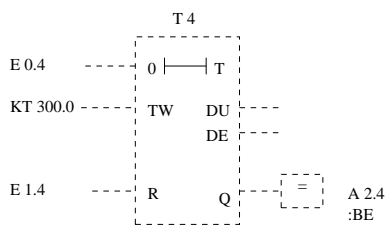


Abbildung 2.19: SA-Zeitglied Funktionsplan

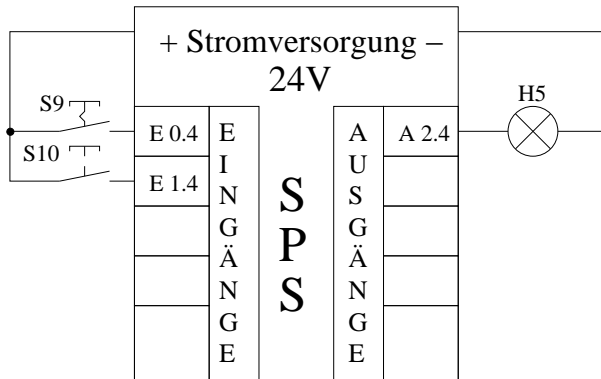


Abbildung 2.20: SA-Zeitglied Anschluß an die SPS

2.3.6.1 Anweisungsliste

Anweisungsliste		
Adresse	Operation	Operand
000	U	E 0 .4
002	L	KT 300 .0
006	SA	T 4
008	U	E 1 .4
00A	R	T 4
00C	NOPO	
00E	NOPO	
010	U	T 4
012	=	A 2 .4
014	BE	

2.3.6.2 Zuordnungsliste

Zuordnungsliste		
Symbol	absolut	Kommentar
S9	E0.4	Zeitstufe Schalter Ein
S10	E1.4	Zeitstufe Taster Rücksetzen
H5	A2.4	Leuchtmelder

2.4 Zähler

2.4.1 Allgemeines

Für Zählvorgänge zum Erfassen von Stückzahlen beliebiger Teile werden Zähler benötigt.

Die SPS-Steuerung S5-100U mit der CPU 100 enthält 16 Zähler (Zeiten), die unabhängig von einander gesetzt werden können. Dabei ist zu beachten, daß **nur die ansteigende Flanke eines Impulses gezählt wird**, also der Signalwechsel von "0" nach "1". Der Zähler kann sowohl als Vorwärts- als auch als Rückwärtszähler verwendet werden. Die Zählrichtung wird durch die Programmierung vorgegeben.

2.4.1.1 Zählwert in Zähler laden

Bei einer positiven Flanke am Setzeingang übernimmt der Zähler den Zählwert, der sich im AKKU1 befindet. Um einen Zähler mit einem Zählwert vorbelegen zu können, stehen folgende Möglichkeiten zur Verfügung:

Operation	Beschreibung
L KZ ...	Laden eines konstanten Zählwertes.
L DW ...	Laden eines Datenwortes. Der Zählwert muß BCD-codiert vorliegen.
L EW ...	Laden eines Eingangswortes. Der Zählwert muß BCD-codiert vorliegen.
L AW ...	Laden eines Ausgangswortes. Der Zählwert muß BCD-codiert vorliegen.
L MW ...	Laden eines Merkerwortes. Der Zählwert muß BCD-codiert vorliegen.

2.4.1.2 Aufbau einer Zählerstufe

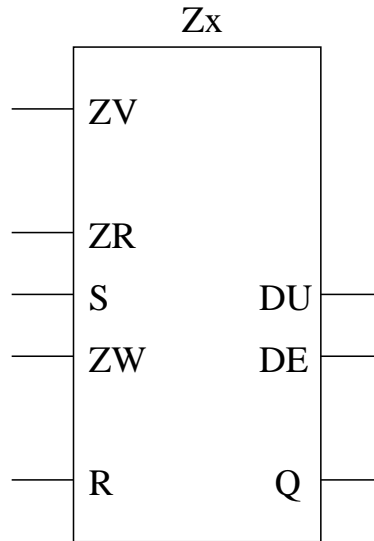


Abbildung 2.21: Aufbau einer Zählerstufe

2.4.2 Erläuterungen zu den Zählereingängen

2.4.2.1 Vorwärtszählen ZV

Der Wert des adressierten Zählers wird um 1 erhöht. Die Funktion wird nur bei einem positiven Flankenwechsel (von 0 nach 1) der vor ZV programmierten Verknüpfung wirksam. Erreicht der Zählerwert die obere Grenze 999, wird er nicht mehr erhöht. Ein Übertrag wird nicht gebildet.

2.4.2.2 Rückwertszählen ZR

Der Wert des adressierten Zählers wird um 1 verringert. Die Funktion wird nur bei einem positiven Flankenwechsel (von 0 nach 1) der vor ZR programmierten Verknüpfung wirksam. Erreicht der Zählerwert die untere Grenze 0, wird er nicht mehr verringert (nur positive Zählerwerte).

2.4.2.3 Zähler setzen S

Bei einem Verknüpfungsergebnis 1 wird der Zähler bei einem positiven Flankenwechsel (von 0 nach 1) mit dem an ZW definierten Wert gesetzt. Der Zählerwert wird **nach** der Verknüpfungsdefinition und **vor** dem Setzbefehl des Zählers eingegeben.

2.4.2.4 Zählerwert ZW

Der Zählwert wird als 16-Bit-Wort (BCD) vorgegeben.

2.4.2.5 Zähler rücksetzen R

Bei Verknüpfungsergebnis 1 wird der Zähler auf 0 gesetzt (rücksetzen). Bei Verknüpfungsergebnis 0 bleibt der Zähler unbeeinflusst. Das Rücksetzen eines Zählers wirkt statisch. Bei erfüllter Rücksetzbedingung kann weder gesetzt noch gezählt werden.

2.4.2.6 Zählerwert abfragen (digital)

Der im Zähler stehende Digital-Istwert kann als Dualzahl (DU) oder als Dezimalzahl (DE) in dem Akkumulator geladen und von dort in andere Operandenbereiche transferiert werden. Zu unterscheiden ist (insbesondere in der AWL-Programmierung) zwischen LZ ... für die Abfrage von DU und LCZ ... (lade codiert) für die Abfrage von DE.

2.4.2.7 Signalzustand des Zählers abfragen (binär)

Der Zähler kann auf seinen Signalzustand abgefragt werden. Hierbei bedeuten:

- Signalzustand 0 = Zähler steht auf dem Wert 0
- Signalzustand 1 = Zähler arbeitet, d.h. ist zählbereit

Die Signalzustände können wie gewohnt mit UZ, UNZ, OZ bzw. ONZ abgefragt und für weitere Verknüpfungen verwandt werden.

2.4.2.8 Reihenfolge der Anweisungen

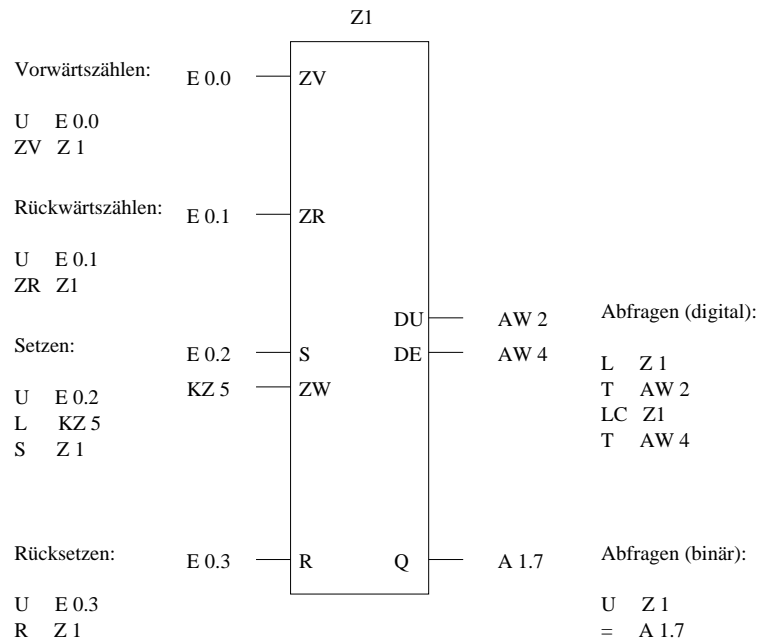


Abbildung 2.22: Zählerstufe Reihenfolge der Anweisungen

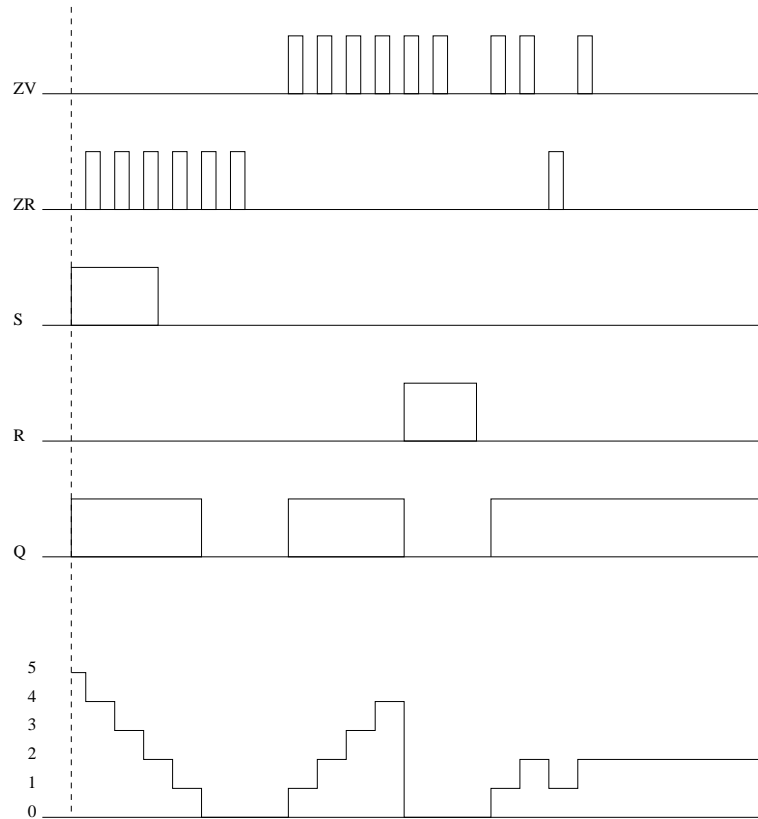


Abbildung 2.23: Funktionsdiagramm eines Zählers

2.4.2.9 Programmierreihenfolge

Die Reihenfolge von ZV und ZR ist bei der Programmierung vertauschbar. Es ist aber zu beachten, daß der erste Eingang **nicht** mit einem **NOPO** belegt werden darf. Will man den ZV-Eingang nicht setzen, so beginnt man die Programmierung mit dem ZR-Eingang und setzt unmittelbar danach ein **NOPO** für den ZV-Eingang. **Dies gilt sowohl für die AWL als auch für den FUP.**

2.5 Vergleicher

2.5.1 Allgemeines

Mit den Vergleichsfunktionen werden zwei digitale Werte, die in den Akkumulatoren 1 und 2 stehen, direkt miteinander verglichen. Die zu vergleichenden Werte müssen aber zuerst in den Akkumulatoren mit Ladeanweisungen hinterlegt werden. Die Länge der Operanden (Byte, Wort) wird in Verbindung mit den Operanden angegeben, z.B.:

- EB \Rightarrow Eingabebyte
- EW \Rightarrow Eingabewort
- AB \Rightarrow Ausgabebyte
- MB \Rightarrow Merkerbyte
- MW \Rightarrow Merkerwort
- KZ... \Rightarrow Konstante

Das Ergebnis des Vergleichs ist binär. Signalzustand 1 bedeutet, **der Vergleich ist erfüllt**. Signalzustand 0 steht für einen **nicht erfüllten Vergleich**. Das binäre Ergebnis steht als VKE zur Verfügung und kann weiterverarbeitet werden, z.B. durch digitale Verknüpfungen oder Sprungweitenanweisungen. Bei der Ausführung der Vergleichsfunktionen werden die Inhalte der Akkumulatoren nicht verändert.

Die Ausführung der Vergleichsfunktion ist unabhängig vom Verknüpfungsergebnis (VKE). Der Ausgang Q mit dem Ergebnis des Zahlenvergleichs kann direkt auf die Operationen \Rightarrow Zuweisung, S (Setzen) bzw. R (Rücksetzen) oder mit binären Operationen verknüpft werden.

2.5.2 Vergleichsmöglichkeiten

Ist der Wert der Zahl Z1

- $! = \Rightarrow$ gleich
- $> < \Rightarrow$ ungleich
- $> = \Rightarrow$ größer oder gleich
- $> \Rightarrow$ größer
- $< = \Rightarrow$ größer oder gleich
- $< \Rightarrow$ kleiner

dem Wert der Zahl Z2?

2.5.2.1 Anweisungsliste

Anweisungsliste		
<i>Adresse</i>	<i>Operation</i>	<i>Operand</i>
0000	:L	EW 5
0001	:L	KF +305
0003	:!=F	
0004	:=	A 2 .0
0005	:	
0006	:BE	

2.5.2.2 Erklärung

- 0000 ⇒ Das Eingangswort 5 (EW5), welches bereits anstehen muß, wird in den AKKU1 geladen.
- 0001 ⇒ Die Festpunktzahl 305 wird in den AKKU1 geladen. Dadurch wird das bereits vorher geladene EW5 in den AKKU2 geschoben.
- 0003 ⇒ Es wird verglichen, ob der Inhalt des **AKKU2** gleich dem Inhalt des **AKKU1** ist. Sind beide Inhalte gleich, so ist das Ergebnis "1" und
- 0004 ⇒ das Ergebnis wird dem Ausgang zugewiesen, d.h. er wird gesetzt, wenn der Vergleich als Ergebnis "1" liefert.

Anstelle der Festpunktzahl kann auch ein weiteres Eingangswort geladen werden. Es ist immer zu beachten, daß sich der zuerst geladene Wert beim Vergleich im AKKU2 befindet.

Kapitel 3

Ablaufsteuerung

3.1 Aufbau

3.1.1 Allgemeines

Wird eine feste bzw. eine sich ständig wiederkehrende Ablaufstruktur benötigt, so kann man eine Ablaufsteuerung (Schrittfolge) verwenden. Jedem einzelnen Schritt wird ein Speicherglied (Merker) zugeordnet. Eine Ablaufkette zeichnet sich durch folgende Eigenschaften aus:

- Alle Schritte werden zeitlich nacheinander durchlaufen.
- Immer nur ein Schritt der Ablaufkette ist gesetzt.
- Ein nachfolgender Schritt kann nur gesetzt werden, wenn der vorhergehende Schritt gesetzt ist.
- Der nachfolgende Schritt setzt den vorhergehenden Schritt zurück.
- Das Fortschalten erfolgt über die Weichschaltbedingungen.
- Jeder Schritt löst Aktionen aus.
- Der Ausgang des Schrittes hat den Wert "1", solange er gesetzt ist.

3.1.1.1 Schrittsymbol (FUP)

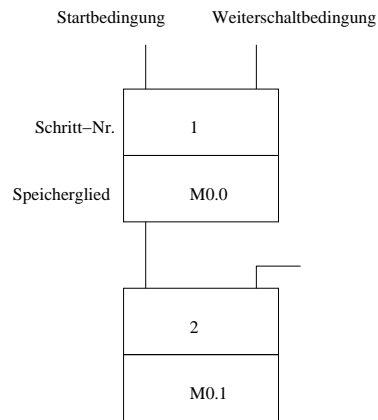


Abbildung 3.1: Schrittsymbol der Ablaufsteuerung

3.1.1.2 Befehlssymbol (FUP)

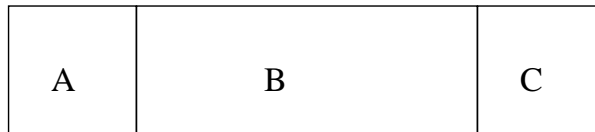


Abbildung 3.2: Befehlssymbolsymbol der Ablaufsteuerung

Dabei bedeuten:

- A \Rightarrow Art des Befehls
- B \Rightarrow Wirkung des Befehls
- C \Rightarrow Ausgänge

3.1.1.3 Befehlsarten

Zeichen	Bedeutung
S	Gespeichert.
NS	Nicht gespeichert.
D	Verzögert.
SD	Gespeichert und verzögert.
NSD	Nicht gespeichert und verzögert.
T	Zeitlich begrenzt.
ST	Gespeichert und zeitlich begrenzt.
SH	Gespeichert. Auch bei Energieausfall.
F	Freigabe.
R	Löscheingang.
RC	Rückmeldung.

3.1.1.4 Funktionspläne

- **Eingänge** in Funktionssymbolen erfolgen vorzugsweise von oben oder von links (1). Ist dies nicht der Fall, so sind die Eingänge durch Pfeile zu kennzeichnen (2). Bei Anordnung mehrerer Eingänge darf eine Eingangsseite über eine der beiden Ecken hinaus verlängert werden (3).

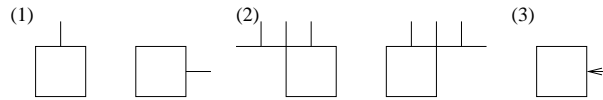


Abbildung 3.3: Eingänge in der Ablaufsteuerung

- **Ausgänge** in Funktionssymbolen erfolgen grundsätzlich gegenüber den Eingängen. Ansonsten gelten die gleichen Regeln wie bei den Eingängen.

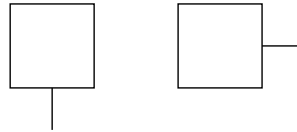


Abbildung 3.4: Ausgänge in der Ablaufsteuerung

- Bei einem **Schritt** steht im oberen Feld die Schrittnummer. Im unteren Feld kann ein Text stehen, der Auskunft über die folgende Funktion liefert (Motor ein, Hubtisch auf, etc.). Ein Schritt wird dann gesetzt, wenn alle VKE's an den Eingängen den Wert "1" haben. Der Schritt wird durch das Setzen des nachfolgenden Schrittes gelöscht, wenn keine weiteren Angaben gemacht werden. Ein Schritt kann auch durch Befehle gesetzt und gelöscht werden.

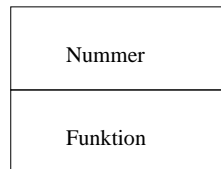


Abbildung 3.5: Schritte in der Ablaufsteuerung

- Ein **Befehl** wirkt mit Hilfe von Stellgliedern auf den Prozeß ein oder löst Funktionen und Schritte innerhalb der Steuerung aus. Der Befehl wird nur solange ausgeführt, wie am Befehlseingang "1" anliegt.

- Von einem Schritt dürfen nicht mehrere Befehle ausgegeben werden, die sich auf das selbe Stellglied beziehen. Für ein Stellglied gilt immer der Befehl, der als letzter gesetzt wurde.
- Ein- und Ausgänge dürfen an beliebigen Stellen des Befehlssymbols angeordnet werden.
- Feld B soll mindestens die doppelte Breite von Feld A bzw. C haben.
- Näheres \Rightarrow *Befehlssymbol (FUP)*

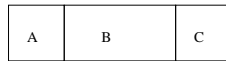


Abbildung 3.6: Befehle in der Ablaufsteuerung

3.1.1.5 Ablaufschritte (AWL)

1. Abfrage des vorhergehenden Schrittes, bzw. Startbedingung
2. Weiterschaltbedingungen verknüpfen
3. Setzen des Schrittmerkers
4. Rücksetzen des vorherigen Schrittes
5. Ausgaben speichernd oder nichtspeichernd zuweisen

Teil II

Regelungstechnik

Kapitel 4

Formeln

4.1 Regler

4.1.1 Verwendete Formelzeichen

Im folgenden Kapitel werden einige Regler und die geläufigsten Formeln zu ihrer Berechnung vorgestellt. Bei den Formeln habe ich mich dazu entschlossen, die nach DIN 19221 gültigen Formelzeichen zu verwenden. Die teilweise noch verwendeten alten Formelzeichen sind aber in der Tabelle im Abschnitt 4.1.8.7 in einer Extraspalte mit aufgeführt.

4.1.2 P-Glied

Die Regeldifferenz bewirkt beim P-Regler eine proportionale Stellgröße.

4.1.2.1 Aufbau und Sprungantwort

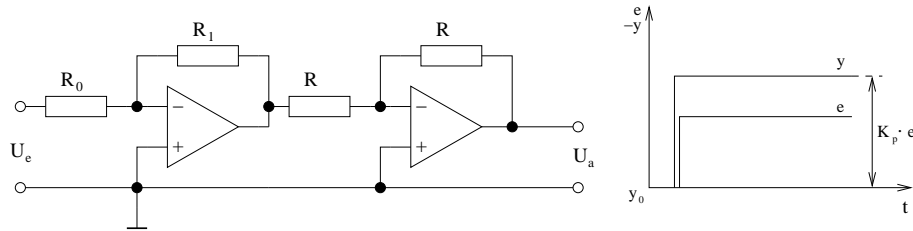


Abbildung 4.1: Aufbau und Sprungantwort eines P-Gliedes

4.1.2.2 Proportionalitätsfaktor

$$K_P = \frac{x_a}{x_e} = \frac{u_a}{u_e} = \frac{\Delta y}{\Delta x} = \frac{y_h}{x_p} = \frac{R_1}{R_0}$$

Für einen P-Regler aus einem Operationsverstärker gilt folgende Formel:

$$-\Delta U_a = \Delta U_e \cdot K_P$$

Das in der Abbildung 4.1 dargestellte P-Glied enthält einen zweiten Operationsverstärker mit gleichgroßen Widerständen im Eingangs- und Gegenkopplungsweig. Dieser dient als Invertierer, so dass das Ausgangssignal die gleiche Phasenlage wie das Eingangssignal hat. In diesem Fall gilt die folgende Formel:

$$\Delta U_a = \Delta U_e \cdot K_P$$

4.1.2.3 Übertragungsfunktion

$$\underline{E}_P = K_P$$

\underline{E}_P ist unabhängig von der Frequenz und rein reell.

4.1.3 I-Glied

Die Regeldifferenz bewirkt beim I-Regler eine bestimmte Änderungsgeschwindigkeit der Stellgröße.

4.1.3.1 Aufbau und Sprungantwort

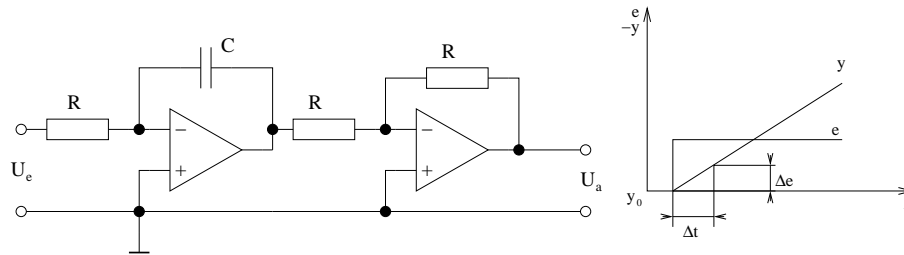


Abbildung 4.2: Aufbau und Sprungantwort eines I-Gliedes

4.1.3.2 Integrationsbeiwert

$$K_I = \frac{1}{T_I} = \frac{v_Y}{x_W} = \frac{\Delta y}{x_W \cdot \Delta t} = \frac{y_h}{x_h \cdot T_Y} = \frac{1}{R \cdot C}$$

$$x_W \hat{=} \Delta x; V_Y \hat{=} \frac{\Delta y}{\Delta t}$$

Für einen I-Regler aus einem Operationsverstärker gilt folgende Formel:

$$-\Delta U_a = \frac{\hat{u}_e \cdot \Delta t}{R \cdot C} = K_I \cdot \hat{u}_e \cdot \Delta t$$

Das in der Abbildung 4.2 dargestellte I-Glied enthält einen zweiten Operationsverstärker mit gleichgroßen Widerständen im Eingangs- und Gegenkopplungs-zweig. Dieser dient als Invertierer, so dass das Ausgangssignal die gleiche Phasenlage wie das Eingangssignal hat. In diesem Fall gilt die folgende Formel:

$$\Delta U_a = \frac{\hat{u}_e \cdot \Delta t}{R \cdot C} = K_I \cdot \hat{u}_e \cdot \Delta t$$

4.1.3.3 Übertragungsfunktion

$$\underline{F}_I = -\frac{j}{\omega \cdot T_I} = -j \frac{K_I}{\omega}$$

\underline{F}_I ist negativ imaginär und umgekehrt proportional zur Frequenz.

4.1.4 D-Glied

Die Änderungsgeschwindigkeit der Regelgröße bewirkt beim D-Regler einen bestimmten Wert der Stellgröße.

4.1.4.1 Aufbau und Anstiegsantwort

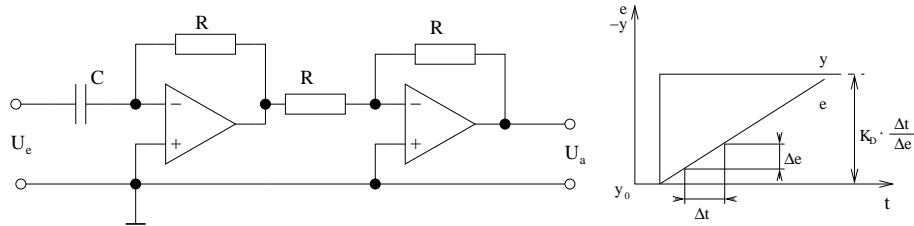


Abbildung 4.3: Aufbau und Anstiegsantwort eines D-Gliedes

4.1.4.2 Differentialbeiwert

$$K_D = \frac{\Delta y}{v_{xw}} = \frac{\Delta y \cdot \Delta t}{\Delta x_w} = \frac{y_h \cdot T_D}{x_h} = R \cdot C$$

$$v_{xw} \hat{=} v_{\Delta x}$$

Für einen D-Regler aus einem Operationsverstärker gilt folgende Formel:

$$-u_a = R \cdot C \cdot \frac{\Delta U_e}{\Delta t}$$

Das in der Abbildung 4.3 dargestellte D-Glied enthält einen zweiten Operationsverstärker mit gleichgroßen Widerständen im Eingangs- und Gegenkopplungszweig. Dieser dient als Invertierer, so dass das Ausgangssignal die gleiche Phasenlage wie das Eingangssignal hat. In diesem Fall gilt die folgende Formel:

$$u_a = R \cdot C \cdot \frac{\Delta U_e}{\Delta t}$$

4.1.4.3 Übertragungsfunktion

$$F_D = \frac{x_a}{x_e} = \frac{u_a}{u_e} = \frac{Z_R}{Z_C} = j\omega RC = j\omega K_D$$

F_D ist positiv imaginär und proportional zur Frequenz.

4.1.5 PI-Glied

Die Regeldifferenz bewirkt beim PI-Regler eine Stellgrößenänderung mit P-Anteil und I-Anteil.

4.1.5.1 Aufbau und Anstiegsantwort

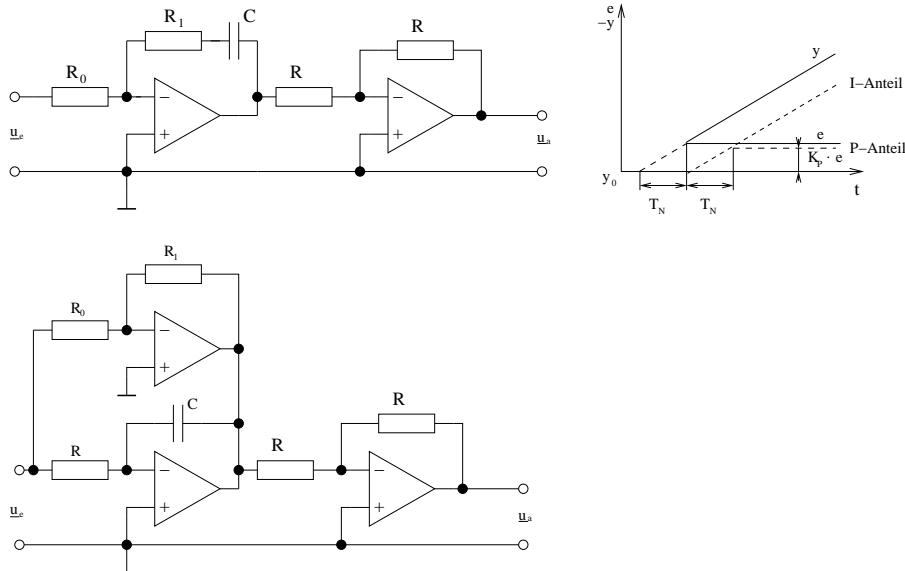


Abbildung 4.4: Aufbau und Anstiegsantwort eines PI-Gliedes

4.1.5.2 Stellgröße

$$y_{PI} = y_P + y_I$$

4.1.5.3 Nachstellzeit

$$T_N = \frac{K_P}{K_I} = R_1 \cdot C$$

4.1.5.4 Integrationszeit

$$T_I = R_0 \cdot C = \frac{T_N}{K_P}$$

4.1.5.5 Stellgröße des P-Reglers

$$y_P = K_P \cdot e$$

4.1.5.6 Stellgröße des I-Reglers

$$y_I = K_I \cdot e \cdot \Delta t$$

Für einen PI-Regler aus Operationsverstärkern (obere Zeichnung in 4.4) gilt folgende Formel:

$$-\Delta U_a = \Delta U_{eP} \cdot \frac{R_1}{R_0} + \hat{u}_{eI} \cdot \frac{\Delta t}{R_0 \cdot C}$$

$$U_{eP} \hat{=} \Delta U_e, U_{eI} \hat{=} U_e$$

Durch einen nachgeschalteten Invertierer werden Eingangs- und Ausgangsspannung wieder in die gleiche Phasenlage gebracht. Dadurch gilt die folgende Formel:

$$\Delta U_a = \Delta U_{eP} \cdot \frac{R_1}{R_0} + \hat{u}_{eI} \cdot \frac{\Delta t}{R_0 \cdot C}$$

4.1.5.7 Übertragungsfunktion

$$\underline{F}_{PI} = \underline{F}_P + \underline{F}_I = K_P - j \frac{K_I}{\omega} = K_P \cdot \left(1 - j \frac{1}{T_n \cdot \omega} \right)$$

4.1.6 PD-Glied

Die Regeldifferenz bewirkt beim PD-Regler eine Stellgrößenänderung mit P-Anteil und D-Anteil.

4.1.6.1 Aufbau und Anstiegsantwort

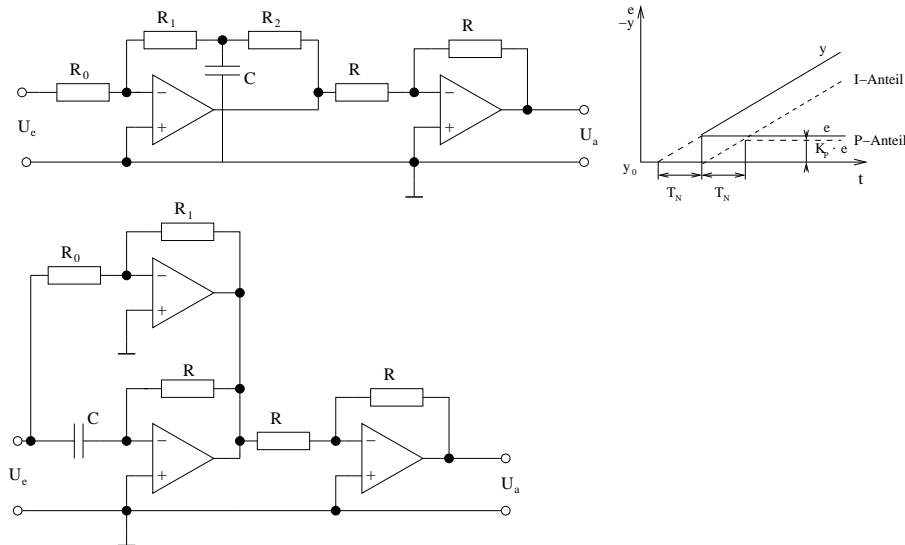


Abbildung 4.5: Aufbau und Anstiegsantwort eines PD-Gliedes

4.1.6.2 Stellgröße

$$y_{PD} = y_P + y_D$$

4.1.6.3 Stellgeschwindigkeit

$$v_P = \frac{R_1 + R_2}{R_0}$$

4.1.6.4 Vorhaltezeit

$$T_v = \frac{R_1 \cdot R_2}{R_1 + R_2} \cdot C$$

Durch einen nachgeschalteten Invertierer werden Eingangs- und Ausgangsspannung wieder in die gleiche Phasenlage gebracht.

4.1.6.5 Übertragungsfunktion

$$\underline{E}_{PD} = \underline{E}_P + \underline{E}_D = K_P + j\omega \cdot K_D = K_P \cdot (1 + j\omega T_V)$$

4.1.6.6 PID-Glied

Die Regeldifferenz bewirkt beim PID-Regler eine Stellgrößenänderung mit P-, I- und D-Anteil (idealer Regler). Ein realer Regler besitzt die Zeitkonstante T_I , die mit zusätzlichem R (in Reihe zu C_2) gezielt eingestellt werden kann. PI(D- T_I)-Verhalten.

4.1.6.7 Aufbau und Anstiegsantwort

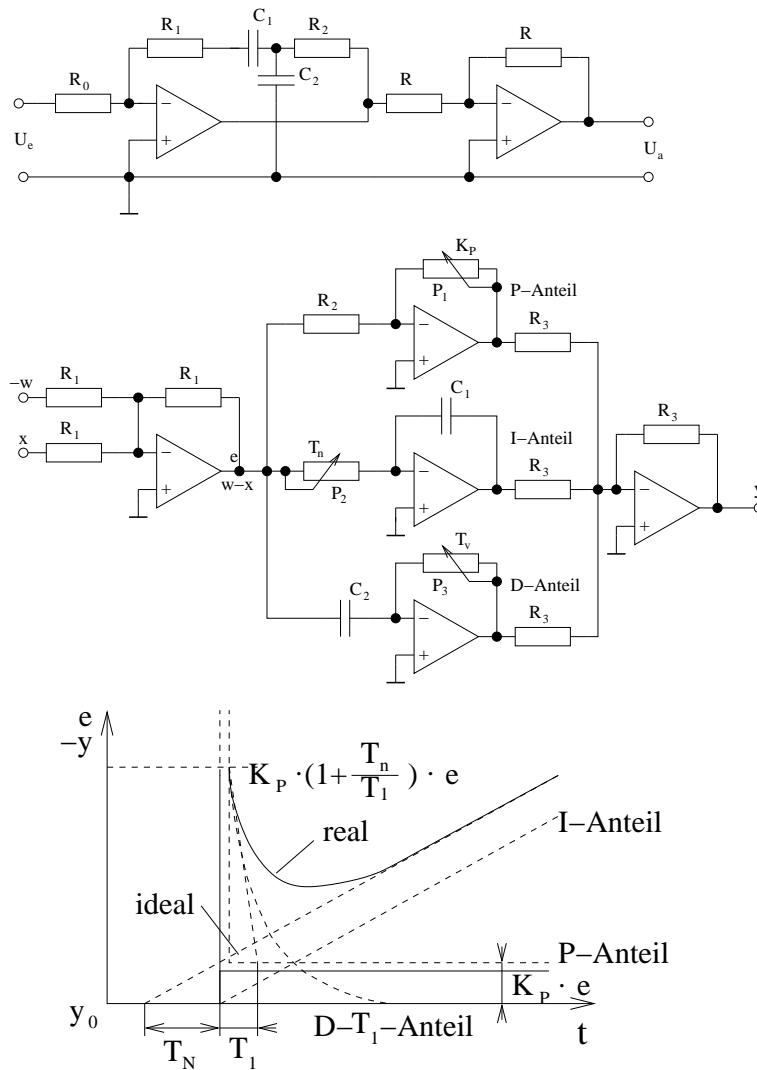


Abbildung 4.6: Aufbau und Anstiegsantwort eines PID-Gliedes

4.1.6.8 Stellgröße

$$y_{PID} = y_P + y_I + y_D$$

4.1.6.9 Stellgeschwindigkeit

$$v_P = \frac{R_1 + R_2}{R_0}$$

4.1.6.10 Vorhaltezeit

$$T_v = \frac{R_1 \cdot R_2}{R_1 + R_2} \cdot C_2$$

4.1.6.11 Nachstellzeit

$$T_n = (R_1 + R_2) \cdot C_1$$

4.1.6.12 Integrationszeit

$$T_I = R_0 \cdot C_1$$

4.1.6.13 Übertragungsfunktion

$$\underline{E}_{PID} = \underline{E}_P + \underline{E}_I + \underline{E}_D = K_P \cdot \left(1 + j \left(\omega T_v - \frac{1}{\omega \cdot T_n} \right) \right)$$

4.1.7 2-Punkt-Regler

4.1.7.1 Schwingungsdauer

$$T_{sch} = 2 \cdot \frac{e}{x_s} \cdot T_s$$

4.1.7.2 Schaltfrequenz

$$f_{sch} = \frac{x_s}{2 \cdot e \cdot T_s}$$

4.1.7.3 Schwankungsbreite mit Schaltdifferenz

$$\Delta x_{ges} = e + 2 \cdot x_s \cdot \frac{T_t}{T_s}$$

4.1.7.4 Schwankungsbreite ohne Schaltdifferenz

$$\Delta x = 2 \cdot x_s \cdot \frac{T_t}{T_s}$$

4.1.8 Geschlossener Regelkreis (Regelstrecke 1. Ordnung + P-Regler)

4.1.8.1 Gleichung des Regelkreises

$$x = \frac{K_S \cdot (K_P \cdot w + Z_{ges})}{1 + K_S \cdot K_P}$$

4.1.8.2 Regelfaktor

$$R = \frac{1}{1 + K_S \cdot K_P} = \frac{1}{1 + V_0}$$

4.1.8.3 Kreisverstärkung

$$V_0 = K_S \cdot K_P$$

4.1.8.4 Bei $\Delta Z = 0$

$$\Delta x = \frac{K_S \cdot K_P \cdot \Delta w}{1 + K_S \cdot K_P}$$

4.1.8.5 Bei $\Delta w = 0$

$$\Delta x = \frac{K_S \cdot Z}{1 + K_S \cdot K_P}$$

4.1.8.6 Bleibende Regelabweichung

$$\Delta x_{bl} \hat{=} e = \Delta w - \Delta x = \Delta w \cdot \frac{1}{1 + V_0} = \Delta w \cdot R$$

für $z = 0$ und $w \neq 0$

4.1.8.7 Formelzeichen

ZEICHEN		BEDEUTUNG
NEU	ALT	
T_V		Vorhaltezeit
T_N		Nachstellzeit
T_y		Stellzeit
T_d		Differenzierzeit
T_i		Integrationszeit (-konstante)
T_s		(Ersatz-)Zeitkonstante 2-Punkt-Regler oder: Ausgleichszeit T_g
T_t		Ersatztotzeit oder: Verzugszeit T_u
V_p		Proportionalverstärkung
V_y		Stellgeschwindigkeit
x_h		Laufbereich
Y_b		Laufbereich
Y_h		Stellbereich
$Y_{(PI;PD;PID)}$		Gesamtverstellung
Δt		Laufzeit
e	x_d	Regeldifferenz (<i>Störsprung</i>)
x_p		Proportionalbereich
x_w		Regelabweichung
Δx		Regeldifferenz
K_P	K_{pr}	Proportionalbeiwert (-faktor)
K_D	K_{dr}	Differentialbeiwert
K_I	K_{ir}	Integralbeiwert

Kapitel 5

Regler

5.1 Integralglieder

Die unerwünschte bleibende Regeldifferenz beim P-Regler hat ihre Ursache in dem starren Zusammenhang zwischen Regeldifferenz als Eingangsgröße und Stellgröße als Ausgangsgröße des Reglers. Wird nicht die Ausgangsgröße selbst, sondern die Geschwindigkeit, mit der sie sich ändert, von der Eingangsgröße abhängig gemacht, so ergibt sich ein integral wirkendes Regelkreisglied, ein I-Glied.

Beim I-Glied ist die Geschwindigkeit der Ausgangsgrößenänderung proportional der Eingangsgröße. Die Reaktion der Ausgangsgröße erfolgt ohne zeitliche Verzögerung.

Ist die Eingangsgröße konstant ungleich Null, dann steigt die Ausgangsgröße des I-Gliedes linear, also mit konstanter Änderungsgeschwindigkeit, an. Sie ist abhängig von der *Integrationszeit* T_I sowie von der Eingangsgröße:

$$\frac{\Delta x_a}{\Delta t} = \frac{\hat{x}_e}{T_I}$$

Da x_a bei konstanter Eingangsgröße linear verläuft, ist die Änderungsgeschwindigkeit $\frac{\Delta x_a}{\Delta t}$ konstant, und es kann geschrieben werden:

$$\frac{x_a}{t} = \frac{\hat{x}_e}{T_I} \implies x_a = \frac{\hat{x}_e}{T_I} \cdot t$$

Die Sprungantwort zeigt die Bedeutung der Integrationszeit; bei T_I ist die Ausgangsgröße x_a gerade auf den Wert der Eingangsgröße \hat{x}_e angestiegen. Anstelle der Integrationszeit wird oft mit dem *Integrierbeiwert* K_I gearbeitet: $K_I = \frac{1}{T_I}$. Damit wird $x_a = K_I \cdot \hat{x}_e \cdot t$.

Diese einfachen Beziehungen für x_a gelten nur bei konstanter Eingangsgröße! Ist das nicht der Fall, kann die Ausgangsgröße nur mit Hilfe der Integralrechnung ermittelt werden, die hier aber weder behandelt noch vorausgesetzt wird.

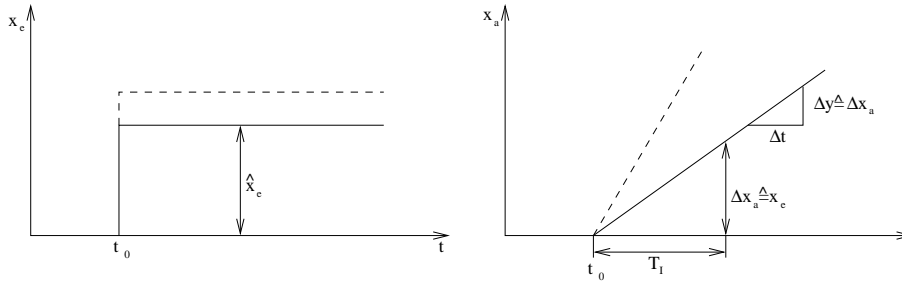


Abbildung 5.1: Ein- und Ausgangskennlinie eines Integriergliedes

$$v_y \hat{=} v_a; v_y = \frac{\Delta y}{\Delta t} \hat{=} \frac{dy}{dt}; K_{IR} = \frac{v_y}{\Delta x} = \frac{y_n}{x_n \cdot T_y}$$

ZEICHEN	BEDEUTUNG
T_y	Stellzeit; die Zeit, die zum Durchlaufen des Stellbereichs benötigt wird
y_n	Stellbereich
x_h	Laufbereich

5.1.1 I-Regler

Auch ein elektronischer Regler mit I-Verhalten kann mit einem Operationsverstärker aufgebaut werden, der als Integrierer beschaltet wird. Vergleicht man die Formel zur Berechnung der Ausgangsspannung dieser Schaltung mit der Gleichung eines I-Gliedes, kann durch Koeffizientenvergleich die Integrationszeit bestimmt werden:

$$-\Delta u_a = \frac{\hat{u}_e}{R \cdot C} \cdot \Delta t; x_a = \frac{\hat{x}_e}{T_I} \cdot t; T_I = R \cdot C$$

Diese Formel bezieht sich auf OP-Schaltung!

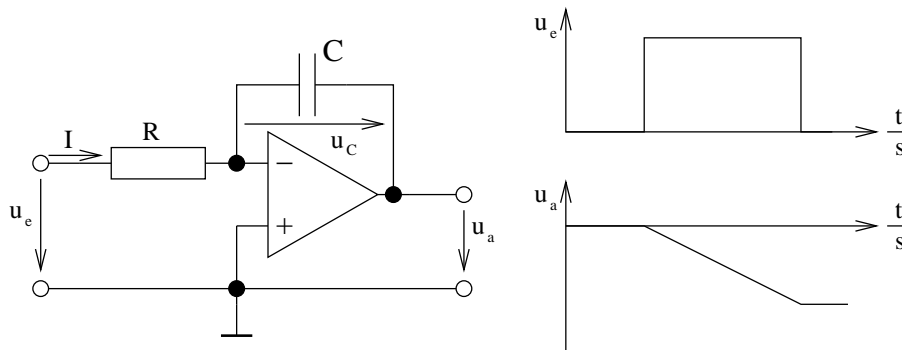


Abbildung 5.2: Ein- und Ausgangskennlinie eines I-Reglers

Es gilt $x_a \hat{=} u_a$ und $x_e \hat{=} u_e$. Damit kann T_I bestimmt werden: $T_I = R \cdot C$. Durch Verändern von R und/oder C kann die Integration beeinflusst werden und damit die Änderungsgeschwindigkeit der Ausgangsgröße bei konstanter Eingangsgröße.

Die Ausgangsspannung steigt wegen der invertierenden Wirkung des OPs auf eine negative Spannung. Sie steigt so lange weiter an, bis entweder der OP in die Spannungsbegrenzung gerät (bei $-U_B$ bzw. bei negativer Eingangsspannung bei $+U_B$) oder bis die Eingangsspannung wieder zu Null wird. **Wird u_e zu Null, behält die Ausgangsspannung den zuletzt erreichten Wert bei.**

Das Ausgangssignal eines I-Reglers wird also so lange ansteigen, bis die Regeldifferenz als seine Eingangsgröße zu Null geworden ist - er integriert Regeldifferenzen weg.

Ein I-Regler ist in der Lage, Störungen ohne bleibende Regeldifferenz auszuregulieren. Sein Nachteil besteht in der langsamen Reaktion auf Änderungen des Eingangssignals oder auf Störungen.

Natürlich kann der I-Regler durch die Wahl einer kleinen Integrationszeit T_I schneller auf Störungen reagieren. Dies erhöht aber wiederum die Schwingneigung des Regelkreises.

Der Nachteil der langsamen Regelung lässt sich vermeiden, indem der I-Regler mit einem schnellen P-Regler zu einem PI-Regler kombiniert wird.

5.1.2 Stetige Regler

Im regeltechnischen Sinne greift ein stetiger Regler mit seiner Stellfunktion ununterbrochen in den Regelprozess ein.

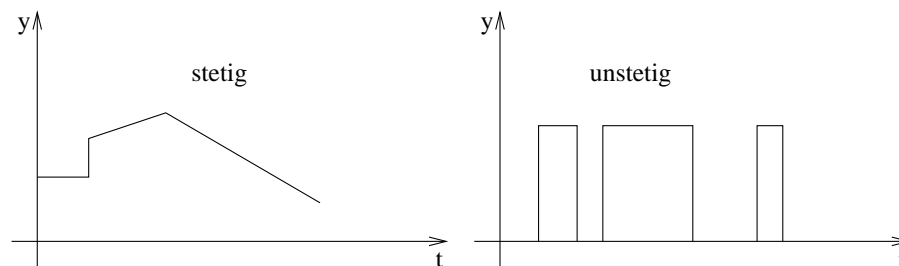


Abbildung 5.3: Stetiger und unstetiger Regler

Unstetige Regler üben die Stellfunktion in einer Folge von Energieimpulsen bei festliegender Energiehöhe, jedoch begrenzter Einwirkdauer aus (Schaltregler, Zweipunktregler).

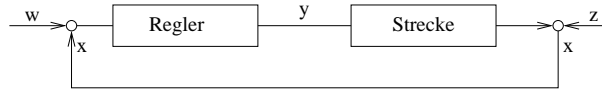


Abbildung 5.4: Vereinfachter Regelkreis

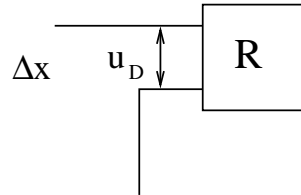


Abbildung 5.5: OP als Regler

Der OP eignet sich als Regeleinrichtung, da er als Differenzverstärker Soll- und Istwert vergleichen und diese Differenz als Stellsignal ausgeben kann.

5.1.3 Der P-Regler

Jeder Regeldifferenz folgt eine proportionale Verstellung der Stellgröße.

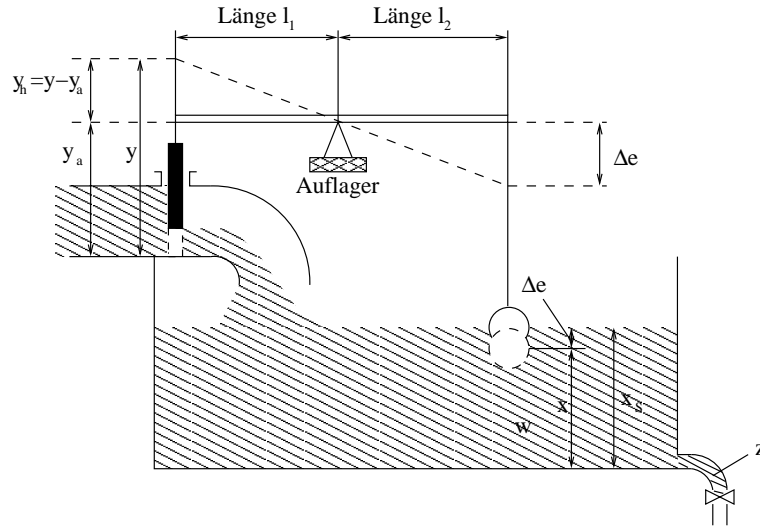


Abbildung 5.6: Funktionsweise eines P-Reglers

$$y - y_a = K_P \cdot e \quad K_P \implies \text{Proportionalbeiwert}$$

Nachteil: Bleibende Regeldifferenz

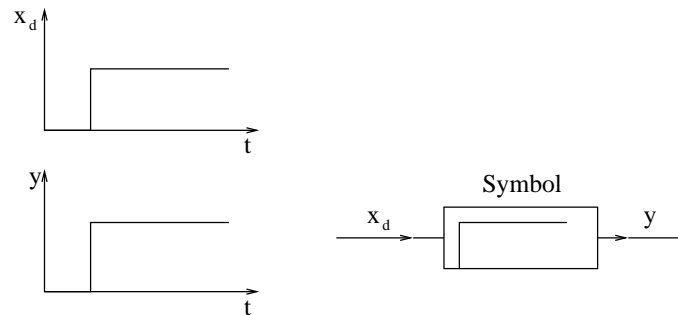


Abbildung 5.7: Sprungantwort und Symbol eines P-Reglers

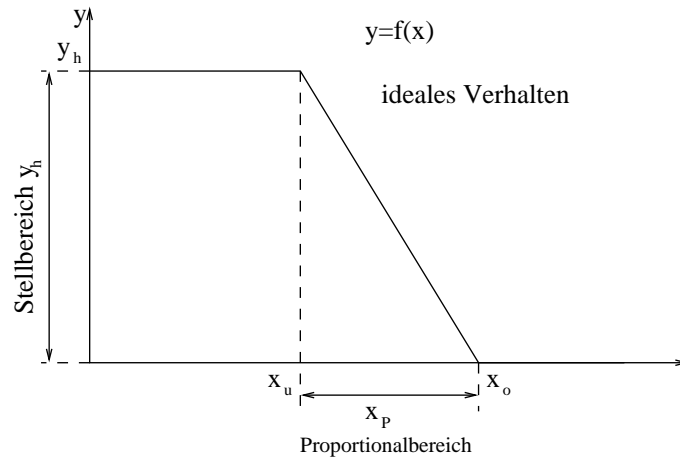


Abbildung 5.8: Kennlinie eines P-Reglers

5.1.3.1 Die Kennlinie des P-Reglers

5.1.3.2 Proportionalbeiwert des P-Reglers

$$K_{PR} = \frac{\Delta y}{\Delta x} = \frac{y_h}{x_p}$$

Durch den starren Zusammenhang zwischen der Regeldifferenz als Eingangsgröße und der Stellgröße als Ausgangsgröße kommt beim P-Regler die bleibende Regelabweichung zustande.

5.1.3.3 DIN 19221 (1981)

- e : bleibende Regelabweichung, häufig auch mit x_d bezeichnet
- x_W : Regelabweichung

Zusammenhang:

$$e = x_d = w - x = -x_W$$

Ist beim P-Regler keine bleibende Regelabweichung vorhanden, dann kann der P-Regler auch nicht arbeiten.

5.2 Differenzglieder

Bei Regelvorgängen können plötzlich auftretende Störgrößen große Abweichungen des Istwertes vom Sollwert bewirken. Seitenböe auf Autobahnbrücken, der Mensch versucht ruckartig, die Stellgröße zu verändern, damit keine unzulässigen Abweichungen entstehen und die Regeldifferenz möglichst bald wieder Null wird. Hier ist der Mensch der Regler, dessen Ausgangsgröße proportional der Änderungsgeschwindigkeit seiner Eingangsgröße ist.

Die Stellgröße als Ausgangsgröße des Reglers wird dann umso größer, je stärker sich die Regeldifferenz ändert.

Solch ein Übertragungsverhalten zeigen die sogenannten D-Glieder.

Bei einem D-Glied ist die Ausgangsgröße proportional der Änderung der Eingangsgröße.

$$X_{aD} \sim \frac{\Delta X_e}{\Delta t}$$

Als Parameter ist der Differentialbeiwert K_D eingeführt.

$$X_{aD} = K_D \cdot \frac{\Delta x_e}{\Delta t}$$

Als Sprungantwort des idealen D-Gliedes erhält man einen Nadelimpuls. Sprungantworten lassen sich bei reinen D-Gliedern schlecht auswerten.

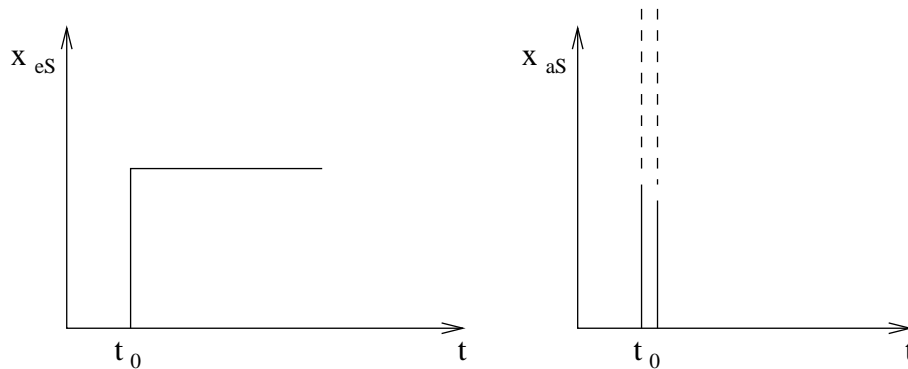


Abbildung 5.9: Sprungantwort des D-Glieds

Sowohl mechanische als auch elektrische Reglerbauteile besitzen eine gewisse Trägheit. Außerdem können Ausgangsgrößen nicht über gewisse Werte hinauswachsen (*Volleinschlag Lenkrad*) - Nadelfunktionen sind praktisch nicht möglich. Realisieren lassen sich D-Glieder nur mit zeitlicher Verzögerung. Reine D-Glieder und D-Strecken kommen in der Praxis nicht vor. In Kombination mit anderen

Grundtypen bewirkt der D-Anteil eine schnellere Ausregelung von starken Störungen!

Eine Anregung durch eine konstante Anstiegsfunktion erzeugt am Ausgang eine konstante Ausgangsgröße.

Bei konstanter Eingangsgröße gibt es kein Ausgangssignal. D.h. eine konstant am Eingang anliegende Regeldifferenz wird von einem D-Regler nicht ausgeregelt. Daher sind D-Regler nur in Kombination mit anderen Reglern zur Ausregelung von Störungen zu gebrauchen.

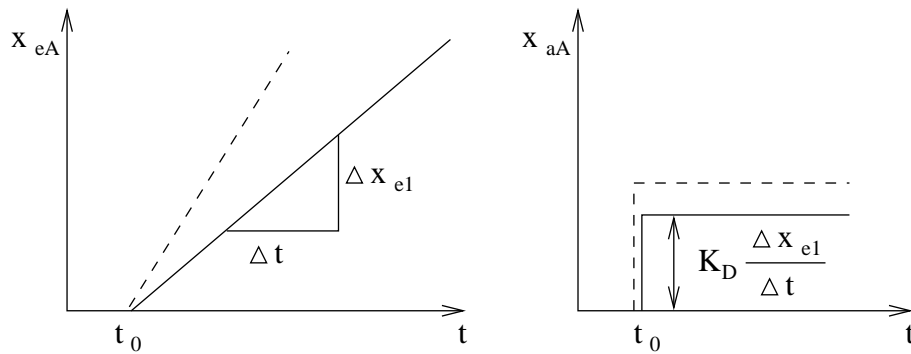


Abbildung 5.10: D-Glied mit konstanter Eingangsgrößenänderung

5.3 Regler mit kombiniertem Verhalten

Hierunter versteht man die Zusammenschaltung der Grundreglertypen mit dem Ziel, einem bestimmten Verhalten der Regelstrecke begegnen zu können.

5.3.1 PI-Regler

Wird dem P-Regler ein zusätzliches I-Verhalten gegeben, dann wird der Nachteil der in der bleibenden Regelabweichung liegt, beseitigt.

Gibt man einem I-Regler ein zusätzliches P-Verhalten, dann wird der langsame I-Regler schneller.

Infolge des P-Anteils reagiert der PI-Regler auf den Sprung der Eingangsgröße mit einem Sprung der Ausgangsgröße. Danach ändert sich die Ausgangsgröße in Folge des I-Verhaltens mit konstanter Änderungsgeschwindigkeit.

Der PI-Regler ist um die **Nachstellzeit** T_N schneller, als der reine I-Regler.

Die **Integrationszeit** T_I ist die Zeit, die vergeht, bis der I-Anteil des PI-Reglers den Wert der Eingangsgröße \hat{x}_e erreicht hat.

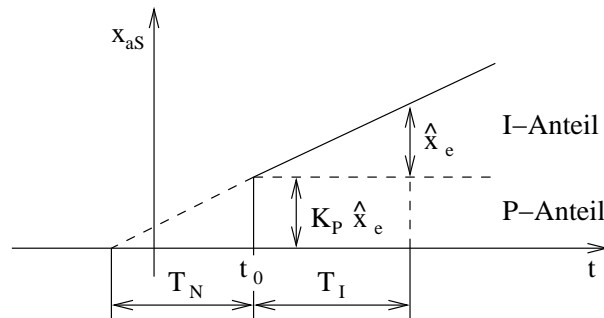


Abbildung 5.11: Sprungantwort eines PI-Glieds

$$K_I = \frac{1}{T_I}; T_N = K_P \cdot T_I = \frac{K_P}{K_I}$$

$$x_{aPI} = K_P \cdot \left(\hat{x}_e + \frac{1}{T_N} \cdot \hat{x}_e \cdot t \right)$$

Für eine Schaltung mit OP's hat folgende Formel Gültigkeit:

$$-\Delta u_a = \Delta u_e \cdot \frac{R_I}{R} + \hat{u}_e \cdot \frac{\Delta t}{RC} \quad (\text{siehe: Regler} \rightarrow \text{PI-Glied})$$

5.3.2 PD-Regler

Das Gesamtverhalten des PD-Reglers zeigt sich durch Aufschaltung von Sprung- und Anstiegssignal.

5.3.2.1 Sprungsignal

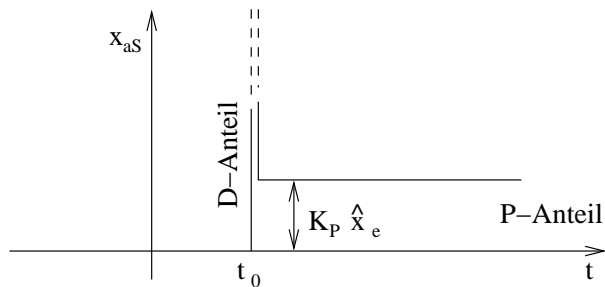


Abbildung 5.12: Sprungsignal eines PD-Reglers

Auf den Eingangssprung antwortet der Regler mit einem Impuls infolge des D-Anteils. Nach Abklingen über die Zeitkonstante τ auf den P-Anteil zeigt sich nur noch ein P-Verhalten.

5.3.2.2 Anstiegssignal

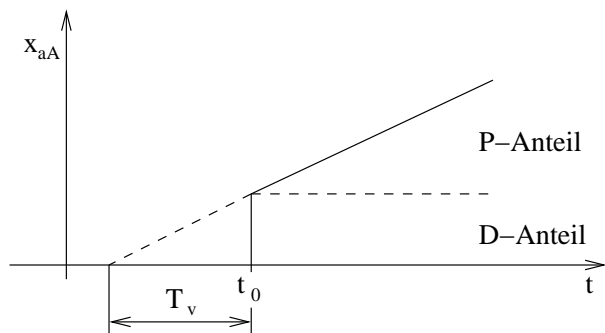


Abbildung 5.13: Anstiegssignal eines PD-Reglers

Der PD-Regler ist um die Vorhaltezeit T_v schneller als der reine P-Regler. PD-Regler haben keine große Genauigkeit. Der P-Anteil kann bei unterschiedlichen Belastungen in der Regelstrecke die Regeldifferenz nicht ganz ausgleichen.

Vorteil des D-Anteils ist die sehr schnelle und kräftige Nachregelung bei starkem Störgrößeneinfluß. Damit bleibt die Regeldifferenz kleiner als beim reinen P-Regler.

$$T_V = \frac{K_D}{K_P}$$

5.3.2.3 Sprungantwort

$$x_{aSPD} = K_P \cdot \left(\hat{x}_e + T_V \cdot \frac{\Delta x_e}{\Delta t} \right)$$

5.3.2.4 Anstiegsantwort

$$x_{aAPD} = K_P \cdot \left(\frac{\Delta x_e}{\Delta t} \cdot t + T_V \cdot \frac{\Delta x_e}{\Delta t} \right)$$

5.3.3 PID-Regler

PID-Regler sind die aufwendigsten Reglertypen. Sie werden nur bei hohen Anforderungen an Regelgeschwindigkeit und Regelgenauigkeit eingesetzt. Die Einstellung der Regelparameter aufeinander ist komplizierter als bei einfacheren Typen. Das Übertragungsverhalten zeigt die Sprungantwort. Daraus erkennt man den Einfluß der einzelnen Grundreglertypen.

5.3.3.1 Sprungsignal

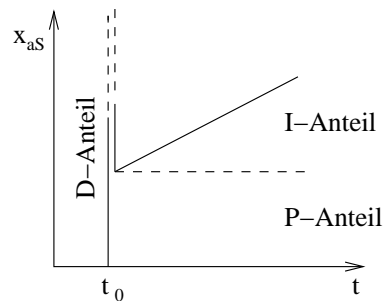


Abbildung 5.14: Sprungsignal eines PID-Reglers

Tritt am Eingang ein Signalsprung auf, dann erkennt man am Ausgang sofort die Reaktion von P- und D-Anteil. Der D-Anteil geht sofort wieder auf Null

zurück. Der I-Anteil wächst nur langsam und wird mit der Zeit immer größer, er verhindert eine bleibende Regelabweichung.

5.3.3.2 Prinzipieller Aufbau mit OP's

Der erste OP bildet die Regeldifferenz $e = w - x$. Die parallelgeschalteten OP's wirken als Invertierer, Integrierer und als Differenzierer. Der letzte OP wirkt als reiner Invertierer mit der Verstärkung -1. Er beseitigt die Vorzeichenumkehrung.

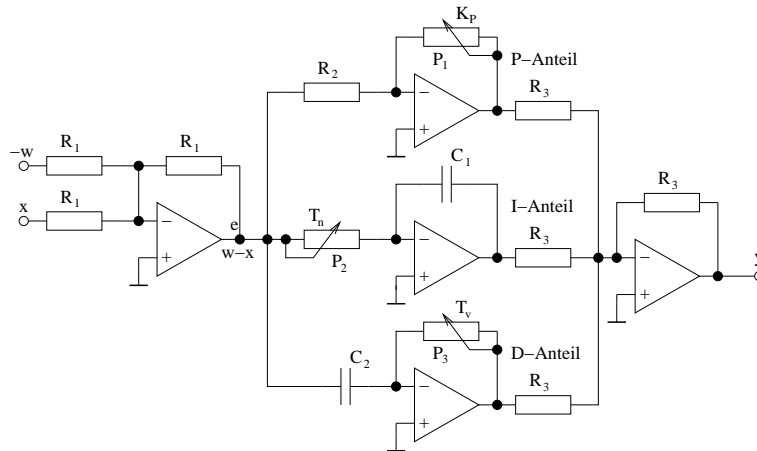


Abbildung 5.15: Aufbau eines PID-Reglers mit OP's

5.3.3.3 Einstellung

Mit den Potentiometern stellt man die Parameter der Schaltung ein. Es gelten die Zusammenhänge:

$$\boxed{K_P = \frac{P_1}{R_2}} \quad \boxed{T_I = P_2 \cdot C_1} \quad \text{mit:} \quad \boxed{T_N = K_P \cdot T_I} \quad \Rightarrow \quad \boxed{T_N = \frac{P_1 \cdot P_2}{R_2} \cdot C_1}$$

$$\boxed{K_D = P_3 \cdot C_2} \quad \text{mit:} \quad \boxed{T_V = \frac{K_D}{K_P}} \quad \Rightarrow \quad \boxed{T_V = \frac{P_3 \cdot R_2}{P_1} \cdot C_2}$$

5.3.3.4 Sprungantwort allgemein

$$x_{aPID} = x_{aP} + x_{aI} + x_{aD}$$

$$x_{aPID} = k_P \cdot \hat{x}_e + \frac{1}{T_I} \cdot \hat{x}_e \cdot t + k_D \frac{\Delta x_e}{\Delta t}$$

bzw.

$$x_{aPID} = k_P \cdot \left(\hat{x}_e + \frac{1}{T_N} \cdot \hat{x}_e \cdot t + T_V \frac{\Delta x_e}{\Delta t} \right)$$

Liegt ein Eingangsanstieg vor, dann ist der I-Anteil des PID-Reglers vernachlässigbar¹. Da aber auch der P-Anteil dem Eingangsanstieg folgt, muß \hat{x}_e dort durch $\frac{\Delta x_e}{\Delta t} \cdot t$ ersetzt werden.

5.3.3.5 Anstiegsantwort über die PD-Komponente ermittelt

$$x_{aAPD} = K_P \cdot \frac{\Delta x_e}{\Delta t} \cdot t + K_D \cdot \frac{\Delta x_e}{\Delta t}$$

bzw.

$$x_{aAPD} = K_P \cdot \left(\frac{\Delta x_e}{\Delta t} \cdot t + T_v \cdot \frac{\Delta x_e}{\Delta t} \right)$$

¹Strecken ohne große Verzögerungen

ZEICHEN	BEDEUTUNG
T_V	Vorhaltezeit
T_N	Nachstellzeit
T_y	Stellzeit
T_D	Differenzierzeit
T_I	Integrationszeit (-konstante)
T_s	Zeitkonstante 2-Punkt-Regler Ersatzzeitkonstante oder Ausgleichszeit T_g
T_t	Ersatztotzeit oder Verzugszeit T_u
V_P	Proportionalverstärkung
V_y	Stellgeschwindigkeit
x_h	Laufbereich
Y_b	Laufbereich
Y_h	Stellbereich
$Y_{(PI,PD,PID)}$	Gesamtverstellung
Δt	Laufzeit
e	Regeldifferenz (<i>Störsprung</i>)
x_p	Proportionalbereich
x_w	Regelabweichung
Δx	Regeldifferenz
K_P	Proportionalbeiwert (-faktor)
K_D	Differentialbeiwert
K_I	Integralbeiwert

5.4 Ortskurven

Ortskurven werden gezeichnet, um das Verhalten von Schaltungen bei variablen Frequenzen aufzuzeigen. Impedanzen sind komplexe Widerstände, komplexe Leitwerte bezeichnet man als Admittanzen.

Bei sinusförmigen Eingangsgrößen wird auch in der Regeltechnik mit komplexen Zeigern gerechnet. Frequenzen werden variabel und Amplituden als Konstante betrachtet. Das Ausgangssignal hat die gleiche Frequenz wie das Eingangssignal. Amplitude und Phasenlage der Ausgangssignale hängen von der Frequenz ab. Diese frequenzabhängige Amplitudenänderung der Ausgangsgröße und die Phasenverschiebung zwischen x_e und x_a lassen Rückschlüsse auf das dynamische Verhalten der Regelglieder zu.

Praxis: Auswertung von Spannungen mit einem Oszilloskop im Zweikanalbetrieb.

5.5 Übertragungsfunktionen

Übertragungsfunktionen sind mathematische Beschreibungen von Regelkreisgliedern. Gleichartige Glieder zeigen gleiches Verhalten, egal ob sie elektrisch, pneumatisch, hydraulisch oder mechanisch funktionieren.

$$\underline{F} = f(f) = \frac{x_a}{x_e}$$

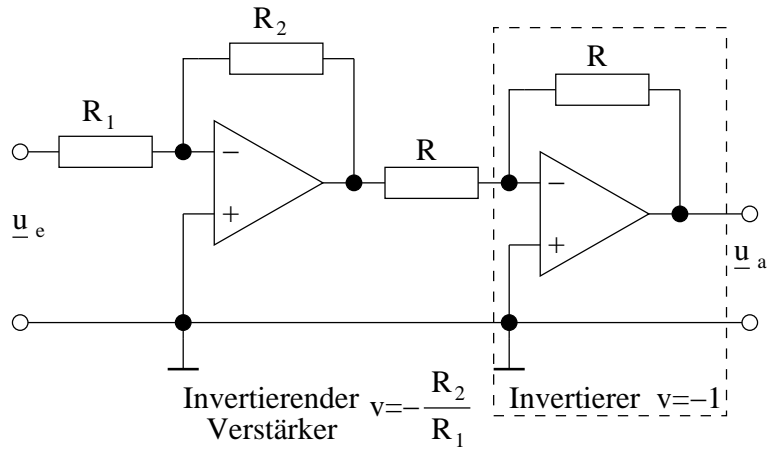
Mit Hilfe der Übertragungsfunktionen können die Zeiger für die verschiedenen Frequenzen in der Gaußschen Ebene dargestellt werden. Die Verbindungen aller Zeigerpunkte ergeben die Ortskurve.

An den Ortskurven können z.B. die Regelbarkeit einer Strecke oder die Stabilität eines Regelkreises abgelesen werden.

Da Ausgangs- und Eingangsgröße meist dieselbe physikalische Dimension haben, ist die Übertragungsfunktion meist dimensionslos.

5.5.1 Anwendung von Ortskurven und Übertragungsfunktionen

5.5.1.1 P-Glied



Dient zur Phasenumkehr,
um Ein- und Ausgangsspannung
phasengleich zu machen.

Abbildung 5.16: Schaltungsaufbau eines P-Glieds

5.5.2 Übertragungsmaß der Gesamtschaltung

5.5.2.1 Rein reell

$$\underline{F} = \frac{x_a}{x_e} = \frac{u_a}{u_e} = \frac{R_2}{R_1}$$

5.5.2.2 Frequenzunabhängig

$$\underline{F} = K_P$$

Der Realanteil ist über alle Frequenzen gleich groß und der Imaginäranteil ist gleich Null.

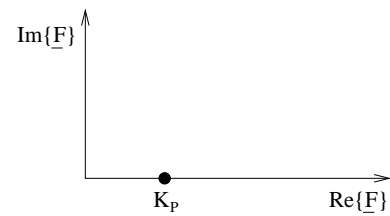


Abbildung 5.17: Ortskurve eines P-Glieds

Die Ortskurve des P-Gliedes ist ein Punkt auf der reellen Achse.

5.5.2.3 I-Glied

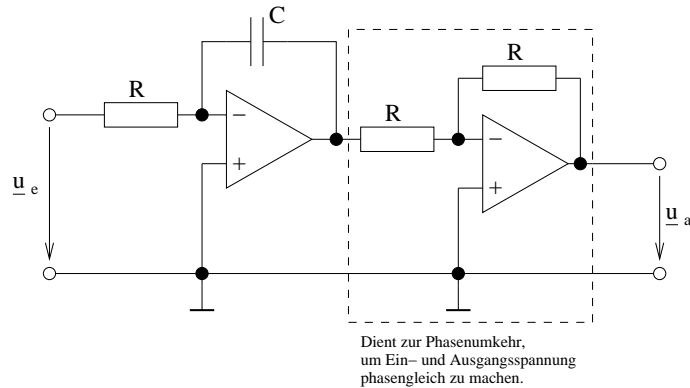


Abbildung 5.18: Schaltungsaufbau eines I-Glieds

$$\underline{F} = \frac{x_a}{x_e} = \frac{u_a}{u_e} = \frac{Z_C}{Z_R} = \frac{1}{j\omega C} = \frac{1}{j\omega RC}$$

mit $T_I = R \cdot C \implies \underline{F} = \frac{1}{j\omega T_I}$ und $K_I = \frac{1}{T_I} \implies \underline{F} = \frac{K_I}{j\omega} \implies \underline{F} = -j \frac{K_I}{\omega}$

Das Übertragungsmaß \underline{F} ist negativ imaginär und umgekehrt proportional zur Frequenz. Der Realanteil ist Null.

5.5.2.4 Untersuchung

$$\omega = 0 \implies \underline{F}(0) = -\frac{j}{0} = -j\infty \implies \text{Im}\{\underline{F}(0)\} = -j\infty$$

$$\omega \rightarrow \infty \implies \underline{F}(\infty) = -\frac{j}{\infty} = j \cdot 0 \implies \text{Im}\{\underline{F}(\infty)\} = 0$$

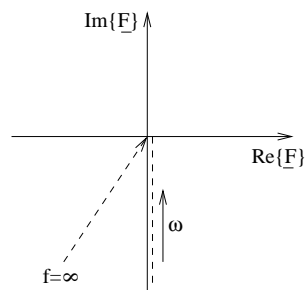


Abbildung 5.19: Ortskurve eines I-Glieds

Die negative Achse des Imaginäranteils stellt die Ortskurve des I-Gliedes dar.

5.5.3 T_1 -Glied

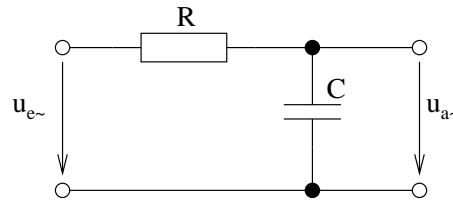


Abbildung 5.20: Beispiel eines T_1 -Gliedes

Beispielhaft für ein T_1 -Glied (nur ein Speicher, z.B. Kapazität, Spule, Feder, Masse etc.)

$$\underline{F}(w) = \frac{u_a}{u_e} = \frac{x_a}{x_e} = \frac{\frac{1}{j\omega C}}{R + \frac{1}{j\omega C}}$$

$$\underline{F}(w) = \frac{1}{j\omega RC + 1} = \frac{1 - j\omega RC}{1 + (\omega RC)^2}$$

Konjugiert komplex erweitert

$$\underline{F}(w) = \frac{1}{1 + (\omega RC)^2} - j \cdot \frac{\omega RC}{1 + (\omega RC)^2} \quad \text{Mit: } T_1 = \tau = RC$$

$$\Rightarrow \underline{F}(w) = \frac{1}{1 + (\omega T_1)^2} - j \frac{\omega T_1}{1 + (\omega T_1)^2}$$

5.5.3.1 Übertragungsfunktion des T_1 -Gliedes

Damit kann die Ortskurve gezeichnet werden. Wenn z.B. T_1 gegeben ist, dann kann die Funktion in den Taschenrechner eingegeben werden.

$$\underline{F}(w) = \frac{1}{1 + (\omega T_1)^2} - j \frac{\omega T_1}{1 + (\omega T_1)^2}$$

5.5.3.2 Untersuchung für die Ortskurve

1. $\omega = 0 \Rightarrow \underline{F}(0) = 1 - j0 \Rightarrow \underline{F}(0) = 1$ rein reell

2. $\omega \rightarrow \infty \Rightarrow \underline{F}(\infty) = 0 - j0 \Rightarrow \underline{F}(\infty) = 0$

Bei unendlich großer Frequenz strebt die Ortskurve der T_1 -Übertragungsfunktion gegen Null.

3. $\omega = \frac{1}{T_1} = \omega_E$ sogenannte Eckfrequenz

$$\text{Wenn: } \underline{F}(\omega_E) = \frac{1}{1 + \left(\frac{T_1}{T_1}\right)^2} - j \frac{\frac{T_1}{T_1}}{1 + \left(\frac{T_1}{T_1}\right)^2}$$

$$\Rightarrow \underline{F}(\omega_E) = 0,5 - j0,5$$

D.h.: Bei Eckfrequenzen sind die Beträge von Real- und Imaginäranteil gleich groß.

$$\omega_E = \frac{1}{T_1} \quad \text{Eckfrequenz } T_1\text{-Glied}$$

5.5.3.3 Zeitkonstanten

$$T_1 = \frac{\sqrt{\frac{1}{Re} - 1}}{\omega} \quad \Rightarrow \quad \omega = \frac{\sqrt{\frac{1}{Re} - 1}}{T_1}$$

$$\omega_{1/2} = \frac{1}{2 \cdot T_1 \cdot Im} \pm \sqrt{\left(\frac{1}{2 \cdot T_1 \cdot Im}\right)^2 - \frac{1}{T_1^2}} \quad \Rightarrow \quad T_{1/2} = \frac{1}{2 \cdot \omega \cdot Im} \pm \sqrt{\left(\frac{1}{2 \cdot \omega \cdot Im}\right)^2 - \frac{1}{\omega^2}}$$

5.5.4 T_2 -Glied

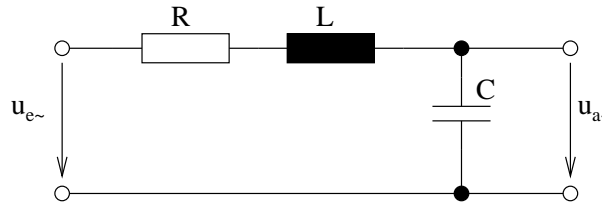


Abbildung 5.21: Beispiel eines T_2 -Gliedes

Ein T_2 -Glied hat zwei Speicher. Man kann sich ein T_2 -Glied auch aus zwei hintereinandergeschalteten T_1 -Gliedern vorstellen.

$$\underline{F}(\omega) = \frac{\underline{u}_a}{\underline{u}_e} = \frac{\underline{Z}_C}{R + \underline{Z}_L + \underline{Z}_C} = \frac{\frac{1}{j\omega C}}{R + j\omega L + \frac{1}{j\omega C}} = \frac{1}{1 - \omega^2 LC + j\omega RC}$$

Mit den charakteristischen Zeitkonstanten

$T_1 = R \cdot C$ und $T_2 = \sqrt{LC}$ ergibt dies:

$$\underline{F}(\omega) = \frac{1}{1 - (\omega T_2)^2 + j\omega T_1}$$

und nach konjugiert komplexer Erweiterung:

$$\underline{F}(\omega) = \underbrace{\frac{1 - (\omega T_2)^2}{(1 - (\omega T_2)^2)^2 + (\omega T_1)^2}}_{\text{Realanteil}} - j \underbrace{\frac{\omega T_1}{(1 - (\omega T_2)^2)^2 + (\omega T_1)^2}}_{\text{Imaginäranteil}}$$

5.5.5 Bestimmung der Ortskurve

5.5.5.1 Übertragungsfunktion des T_2 -Gliedes

$$\underline{F}(\omega) = \frac{1 - (\omega T_2)^2}{(1 - (\omega T_2)^2)^2 + (\omega T_1)^2} - j \frac{\omega T_1}{(1 - (\omega T_2)^2)^2 + (\omega T_1)^2}$$

5.5.5.2 Untersuchung

- $\omega = 0 \implies \underline{F}(0) = \frac{1}{1} - j \frac{0}{1} \implies \underline{F}_0 = 1$ rein reell

$$2. \omega \rightarrow \infty \implies \underline{F}(\infty) = \frac{-\infty^2}{\infty^4 + \infty^2} - j \frac{\infty}{\infty^4 + \infty^2}$$

- Mit steigender Frequenz wachsen die Nenner sehr viel schneller als die Zähler von Real- und Imaginäranteil
- $\underline{F}(\infty) = -0 - j0 \implies \underline{F}(\infty) = 0$

3. Bei Eckfrequenz ω_E

Definition der Eckfrequenz: $\omega_E = \frac{1}{T_2} \implies \omega_E \cdot T_2 = 1$

$$\omega = \omega_E \implies \underline{F}(\omega_E) = \frac{1-1^2}{(1-1^2)^2 + \left(\frac{T_1}{T_2}\right)^2} - j \frac{\frac{T_1}{T_2}}{(1-1^2)^2 + \left(\frac{T_1}{T_2}\right)^2}$$

$$\underline{F}(\omega_E) = \frac{0}{\left(\frac{T_1}{T_2}\right)^2} - j \frac{\frac{T_1}{T_2}}{\left(\frac{T_1}{T_2}\right)^2}$$

$$\underline{F}(\omega_E) = -j \frac{T_2}{T_1} \text{ rein imaginär}$$

5.5.6 Ortskurven von Regelkreisgliedern

Je größer die Anzahl der Speicher ist, desto weiter blähen sich die entsprechenden Ortskurven auf. Charakteristisch für Regelkreisglieder ist aber, dass die Übertragungsfunktionen bei $\omega = 0$ den Wert $\underline{F}(0) = 1$ und bei $\omega \rightarrow \infty$ den Wert $\underline{F}(\infty) = 0$ annehmen.

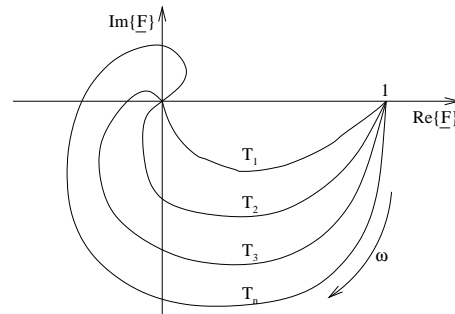


Abbildung 5.22: Ortskurve eines Regelkreisgliedes

Die mathematische Beschreibung von Regelkreisgliedern höherer Ordnung ist aufwendig. Bei Regelkreisgliedern höherer Ordnung wird in der Praxis gemessen und mit Näherungen gerechnet. Selbst bei der Berechnung von T_2 -Gliedern ist der mathematische Aufwand nicht unerheblich. Deshalb werden hier nur die wichtigsten Formeln für T_2 -Glieder genannt.

5.5.7 Einfluß der Dämpfung

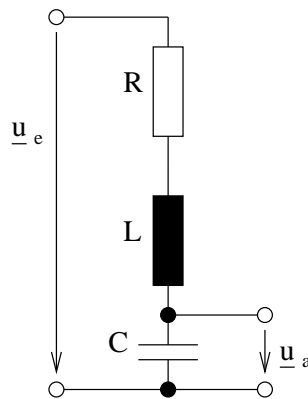


Abbildung 5.23: Beispiel eines T_2 -Gliedes

Ein großer Widerstand bewirkt große Verluste.
 \Rightarrow Die Schwingung von Eingangssprüngen wird stärker gedämpft, wenn der Widerstand größer wird. Bei sinusförmiger Anregung wird bei größerer Dämpfung die Ausgangsspannung kleiner. Die Länge des Zeigers der Ortskurve entspricht dem Betrag der Ausgangsspannung in Abhängigkeit von der Dämpfung. Der Dämpfungsgrad D gibt Auskunft über das Schwingverhalten des T_2 -Gliedes:

5.5.7.1 Dämpfungsgrad Definition

$$D = \frac{T_1}{2T_2}$$

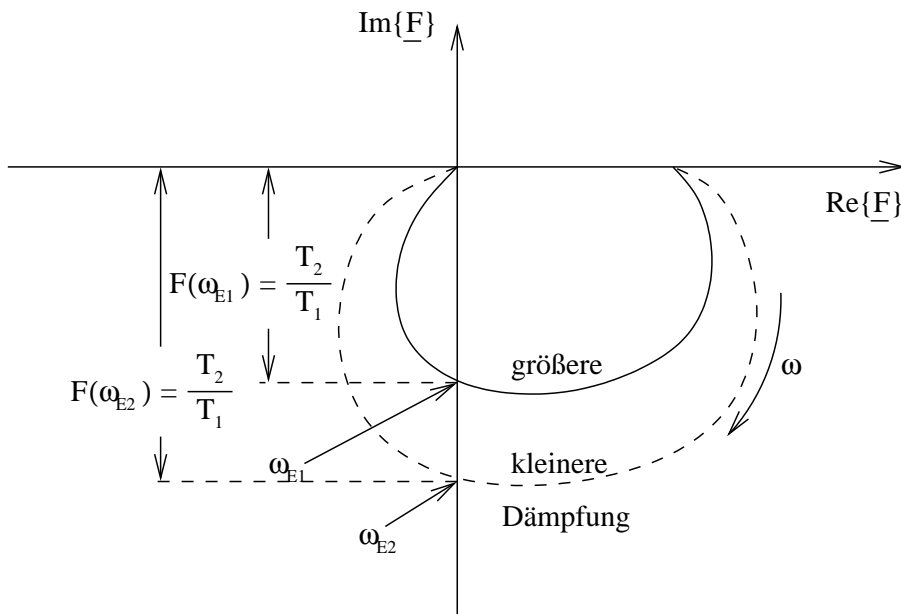


Abbildung 5.24: Ortskurve eines T_2 -Gliedes

5.5.7.2 Betrag der Übertragung bei Eckfrequenz

$$F(\omega_E) = \frac{T_2}{T_1} = \frac{1}{2D}$$

5.5.8 Sprungantwort der gedämpften Schwingung

Bedingung: $0 < D < 1$

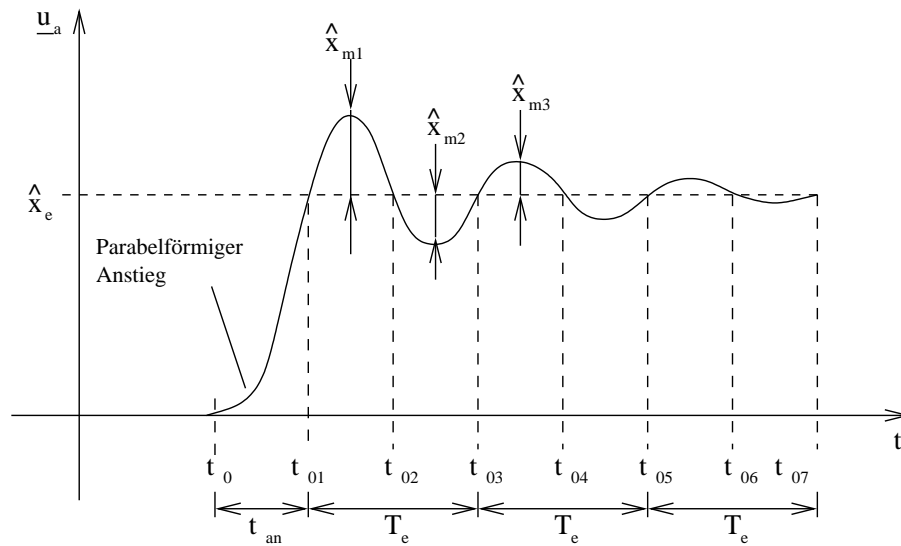


Abbildung 5.25: Sprungantwort der gedämpften Schwingung eines T_2 -Gliedes

5.5.8.1 Begriffserklärung

ZEICHEN	ERKLÄRUNG
t_{an}	Anregelzeit
t_{0k}	Zeiten zu denen die \hat{x}_e -Linie geschnitten wird ($t_{01}, t_{02}, t_{03}, \dots$)
T_e	Periodendauer der Eigenfrequenz
ω_e	Eigenfrequenz der gedämpften Schwingung
ω_E	Eckfrequenz

Bedingung: $\omega_E > \omega_e$

ZEICHEN	ERKLÄRUNG
\hat{x}_m	Maximale Überschwingweiten (werden in die Halbwellen mittig eingetragen)

5.5.9 Berechnungsgrundlagen

$$\omega_E = \frac{1}{T_2}$$

Wenn: $\omega_E > \omega_e$ gilt: $\omega_e = \omega_E \cdot \sqrt{1 - D^2}$ und $T_e = \frac{2 \cdot \pi}{\omega_e}$

mit: $D = \frac{T_1}{2 \cdot T_2}$ und $F(\omega_E) = \frac{T_2}{T_1} = \frac{1}{2 \cdot D}$

Die erste maximale Überschwingweite läßt sich mit folgender Beziehung berechnen:

$$\hat{x}_{m1} = \hat{x}_e \cdot e^A$$

Die folgenden Überschwingweiten lassen sich dann mit der Formel

$$\hat{x}_{m(n)} = \hat{x}_{m(n-1)} \cdot e^A$$

berechnen.

Für A gilt: $A = -\frac{\pi \cdot D}{\sqrt{1 - D^2}}$ bzw. $A = -\frac{\pi \cdot D \cdot \omega_E}{\omega_e} \Rightarrow D = \frac{1}{\sqrt{1 + \frac{\pi^2}{\lambda^2}}}$

Amplitudenfaktor

Das Verhältnis von zwei benachbarten Halbwellen ist konstant.

$$e^A = \frac{\hat{x}_{m_{i+1}}}{\hat{x}_{m_i}} \quad \text{mit: } i=1, 2, 3, \dots$$

Die Ausgangsgröße strebt gegen die \hat{x}_e -Linie. Die Schnittpunkte mit der \hat{x}_e -Linie werden wie folgt berechnet:

$$t_{0k} = \frac{k \cdot \pi - \delta}{\omega_e} \quad \text{wobei: } k=1, 2, 3, \dots$$

$$\text{mit: } \boxed{\cos \delta = D} \implies \boxed{\delta = (\arccos D) \cdot \frac{\pi}{180}}$$

δ wird im Bogenmaß angegeben!

5.5.10 Komplexe Rechnung

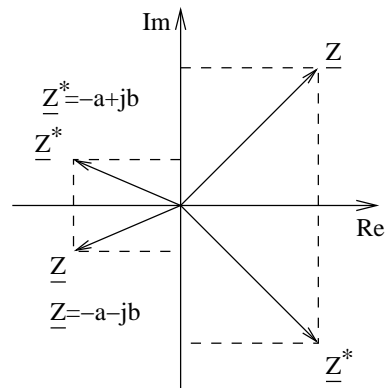


Abbildung 5.26: Konjugation einer komplexen Zahl

Grundsätzlich gilt:

$$\underline{Z} = a + jb \implies \underline{Z}^* = a - jb$$

$$j = \sqrt{-1}; \frac{1}{j} = -j$$

3. Binom:

$$(a + b) \cdot (a - b) = a^2 - b^2$$

Nenner rational machen:

$$\frac{5}{3-\sqrt{2}} \cdot \frac{3+\sqrt{2}}{3+\sqrt{2}} = \frac{5 \cdot (3+\sqrt{2})}{9-2} = \frac{5 \cdot (3+\sqrt{2})}{7}$$

Konjugiert komplex erweitern:

$$\frac{5}{-3-j7} \cdot \frac{-3+j7}{-3+j7} = \frac{5 \cdot (-3+j7)}{9-j^2 49} = \frac{5 \cdot (-3+j7)}{9-j^2 49}$$

Definition der komplexen Einheit:

$$j^2 = -1 \implies \frac{5 \cdot (-3 + j7)}{9 + 49} = \frac{-15 + j35}{58} = -\frac{15}{58} + j\frac{35}{58}$$

$$-\frac{15}{58} \implies \text{Realanteil} + j\frac{35}{58} \implies \text{Imaginäranteil}$$

Kapitel 6

Begriffe aus der Regelungstechnik

6.1 Begriffserklärung

6.1.1 Größen im Regelungssystem

6.1.1.1 Regelgröße x

Zu regelnde physikalische Größe.
Größe der Regelstrecke, die zum Regeln erfasst und der Meßeinrichtung der Regeleinrichtung zugeführt wird.

6.1.1.2 Aufgabengröße x_a

Größe, die zu beeinflussende Aufgabe der Regelung ist. Sie muß mit der Regelgröße verknüpft sein, aber nicht unbedingt dem Regelkreis angehören.

6.1.1.3 Stellgröße y

Ausgangsgröße der Regeleinrichtung, zugleich Eingangsgröße der Strecke. Sie überträgt die steuernde Wirkung der Einrichtung auf die Strecke.

6.1.1.4 Störgröße z

Von aussen wirkende Größe, die die beabsichtigte Beeinflussung in der Regelung beeinträchtigt.

6.1.1.5 Führungsgröße w

Sollwert. Von der Regelung nicht beeinflusste Größe, der die Regelung folgen soll. Sie wird dem Regelkreis von außen zugeführt.

6.1.1.6 Rückführgröße r

Aus der Messung der Regelgröße hervorgegangene Größe, die zum Vergleichsglied zurückgeführt wird.

6.1.1.7 Regelabweichung

Abweichung der Regelgröße von der Führungsgröße. Sie beeinflusst über Verstärker das Stellglied und somit die Regelgröße.

6.1.1.8 Regeldifferenz e

$$e = w - r$$

Differenz zwischen der Führungsgröße w und der Rückführgröße r . Negative Regelabweichung.

6.1.1.9 Stellgröße y

Sie bewirkt in der Regelstrecke die Entstehung der Regelgröße. Die Stellgröße wird durch das Stellglied so beeinflusst, dass die Regelgröße den Sollwert annimmt.

6.1.1.10 Führungsbereich W_h , Regelbereich X_h , Aufgabenbereich X_{Ah} , Stellbereich Y_h und Störbereich Z_h

Bereiche, innerhalb deren Grenzen die Führungs-, Regel-, Aufgaben-, Stell- und Störgröße liegen dürfen, ohne dass die vereinbarte größte Sollwertabweichung der Regelung überschritten wird.

6.1.2 Elemente im Regelungssystem

6.1.2.1 Regelstrecke

Teil des Systems oder des Wirkungsplans, der aufgabengemäß beeinflusst werden soll.

6.1.2.2 Regler

Aus Vergleichsglied und Regelglied bestehende Funktionseinheit.

6.1.2.3 Steller

Funktionseinheit, in der aus der Reglerausgangsgröße die zur Aussteuerung des Stellglieds erforderliche Stellgröße gebildet wird.

6.1.2.4 Stellglied

Funktionseinheit am Eingang der Strecke, die in den Massenstrom oder Energiefluß eingreift und zur Strecke gehört.

6.1.2.5 Regeleinrichtung

Teil des Wirkungsweges, der die aufgabengemäße Beeinflussung der Strecke über das Stellglied bewirkt.

6.1.2.6 Störgrößenaufschaltung

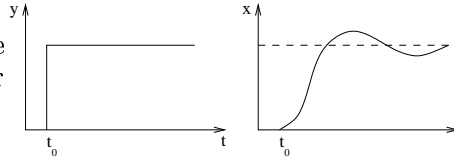
Störgröße wird direkt gemessen und der Regeleinrichtung als zusätzliche Eingangsgröße zugeführt.

6.2 Zeitverhalten von Regelstrecken

6.2.1 Regelkreisglieder

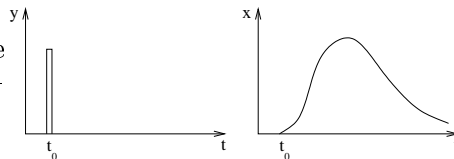
6.2.1.1 Sprungantwort

Zeitlicher Verlauf der Ausgangsgröße nach einer sprungartigen Änderung der Eingangsgröße.



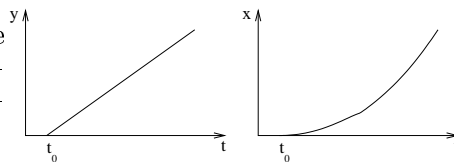
6.2.1.2 Impulsantwort

Zeitlicher Verlauf der Ausgangsgröße bei einem Nadelimpuls der Eingangsgröße.



6.2.1.3 Anstiegsantwort

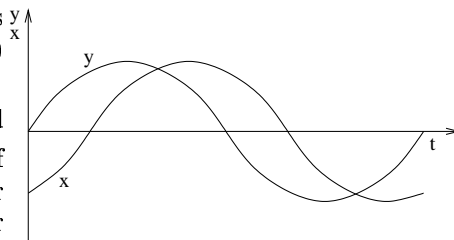
Zeitlicher Verlauf der Ausgangsgröße bei einer Anstiegsfunktion mit definierter Änderungsgeschwindigkeit als Eingangsgröße.



6.2.1.4 Sinusantwort

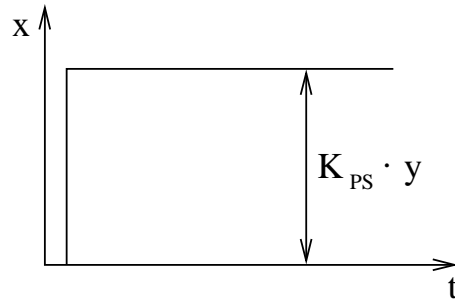
Zeitlicher Verlauf der Ausgangsgröße bei sinusförmigem Verlauf und Durchfahren der Frequenzen $\omega = 0$ bis $\omega = \infty$, ($\omega = 2 \cdot \pi \cdot f$, Kreisfrequenz) der Eingangsgröße.

Der Frequenzgang ($|G(\omega)| = |\frac{x}{y}|$) und der Phasengang (Phasenwinkelverlauf $\varphi = f(\omega)$) werden im Nyquist- oder Bode-Diagramm zur Beurteilung der Stabilität des Regelkreises dargestellt.
Eckfrequenz: $\frac{\omega}{\omega_1} = 1$



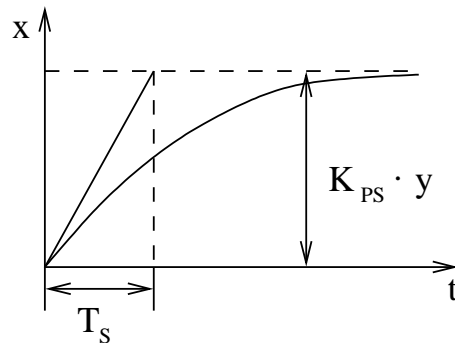
6.2.2 P-Strecken (Strecken mit Ausgleich)

6.2.2.1 P_0 -Strecke



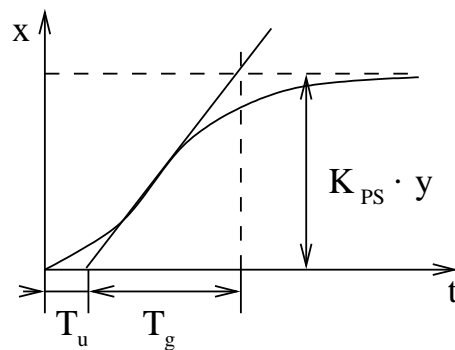
Proportionalbeiwert $K_{PS} = \frac{x}{y}$
 x folgt proportional unverzögert der Eingangsgröße y .

6.2.2.2 PT_1 -Strecke

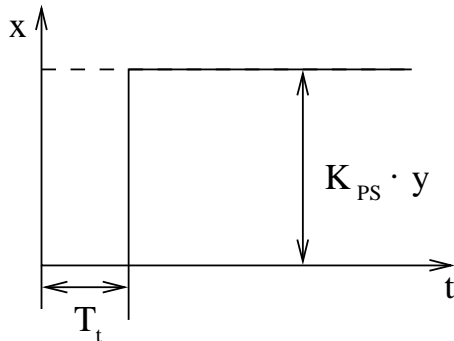


Proportionalbeiwert $K_{PS} = \frac{x_\infty}{y}$
 Zeitkonstante T_S
 x folgt proportional, nach einer e-Funktion verzögert, der Eingangsgröße y .

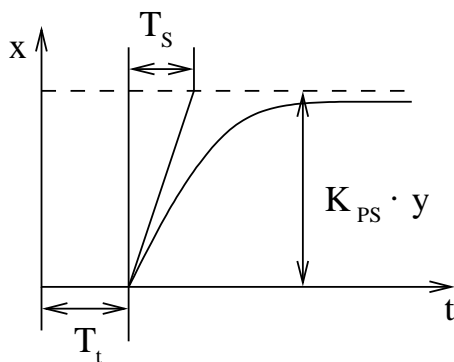
6.2.2.3 PT_2 -Strecke



Proportionalbeiwert $K_{PS} = \frac{x_\infty}{y}$
 Verzugszeit T_u
 Ausgleichzeit T_g
 x folgt proportional, mit zwei Zeitkonstanten verzögert der Eingangsgröße y .

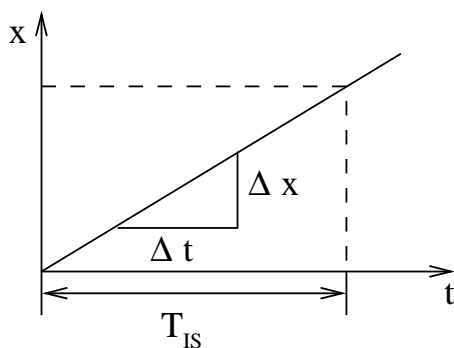
6.2.2.4 PT_t -Strecke

Proportionalbeiwert $K_{PS} = \frac{x}{y}$
 Totzeit T_t
 x folgt proportional, jedoch um die Zeit T_t verzögert der Eingangsgröße y .

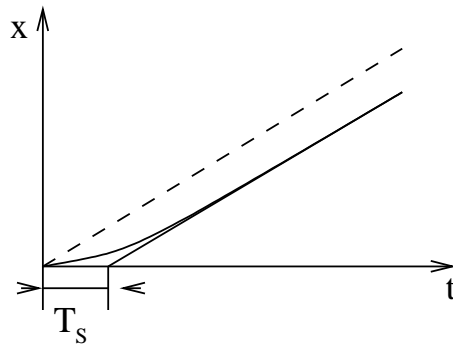
6.2.2.5 $PT_t - T_1$ -Strecke

Proportionalbeiwert $K_{PS} = \frac{x_\infty}{y}$
 Totzeit T_t
 Zeitkonstante T_S
 x folgt proportional, mit einer e-Funktion und einer Totzeit verzögert, der Eingangsgröße y .

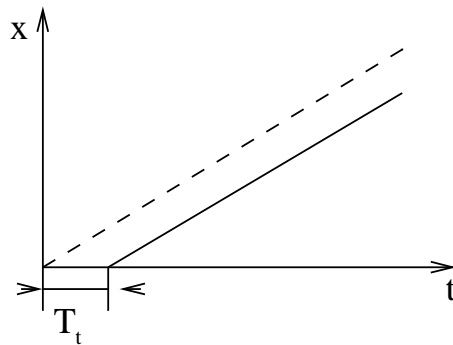
6.2.3 I-Strecken (Strecken ohne Ausgleich)

6.2.3.1 I_0 -Strecke

Integrierbeiwert $K_{IS} = v_x \cdot \frac{1}{y}$; $v_x = \frac{\Delta x}{\Delta t}$
 Integrierzeit T_{IS}
 x ist das Zeitintegral der Eingangsgröße y .

6.2.3.2 IT_1 -Strecke

Integrierzeit T_{IS}
 Verzögerungszeitkonstante T_S
 x ist das Zeitintegral der Eingangsgröße y , verzögert mit einer Zeitkonstanten.

6.2.3.3 IT_t -Strecke

Integrierzeit T_{IS}
 Totzeit T_t
 x ist das Zeitintegral der Eingangsgröße y , verzögert mit der Totzeit T_t .

6.3 Bemerkungen

- Bei der Regelung wird der Istwert einer Regelgröße ständig mit dem vorgegebenen Sollwert verglichen. Abweichungen werden ausgeregelt.
- Regelungen haben einen geschlossenen Wirkungsablauf. Sie enthalten immer eine Rückkoppelung.
- Die Gesamtheit aller am Regelvorgang beteiligten Glieder bilden den Regelkreis.
- Der Regelkreis besteht aus der Regelstrecke und der Regeleinrichtung. Die Regelstrecke erzeugt die Regelgröße, die Regeleinrichtung regelt die Regelgröße.
- Eine Regeleinrichtung besteht aus Sollwertesteller, Meßeinrichtung, Vergleichler und Stellglied.
- Regeleinrichtungen haben eine Wirkungsumkehr zur Folge.
- Zur Verdeutlichung wird in der Regeltechnik der Signalflußplan verwendet. Er enthält als Blöcke die Regelstrecke und die Regeleinrichtung.
- Kann die Stellgröße einer Regelung nur bestimmte feste Werte annehmen, so ist die Regelung unstetig.
Kann die Stellgröße innerhalb eines Stellbereiches jeden Wert annehmen, so erfolgt die Regelung stetig.
- Bei einer Zweipunktregelung kann die Stellgröße zwei Werte annehmen, bei der Dreipunktregelung drei.
- Zwei- oder Dreipunktregelung ist nur dann möglich, wenn das Nachstellen der Regelgröße über die Regelstrecke mit einer Zeitverzögerung verbunden ist.
- Unstetige Regeleinrichtungen haben meist eine Schalthysterese. Je größer die Hysterese ist, desto kleiner ist die Schalthäufigkeit des Stellgliedes, und desto größer sind die Schwankungen der Regelgröße.
- Ein Nachteil der unstetigen Regelung ist, dass die Regelgröße immer zwischen zwei oder mehreren Werten schwankt.
- Zur Prüfung einer stetigen Regeleinrichtung verwendet man eine sprungartige Änderung der Regeldifferenz x_d . Die Art der stetigen Regeleinrichtung erkennt man an der Sprungantwort der Stellgröße y .
- Bei der P-Regelung ist die Verstellung der Stellgröße proportional zur Regeldifferenz.
- Eine P-Regeleinrichtung kann die Regelgröße nicht auf den Sollwert halten, solange eine Störgröße einwirkt. Für den Regelvorgang ist eine bleibende Regeldifferenz erforderlich.

- Je größer der Übertragungsbeiwert einer Regeleinrichtung ist, desto genauer erfolgt die Ausregelung.
- P-Regeleinrichtungen bewirken eine schnelle Ausregelung.
- Mit der I-Regeleinrichtung wird die Regelgröße auf den Sollwert gebracht, es gibt keine bleibende Regeldifferenz.
- Die Änderungsgeschwindigkeit der Stellgröße ist proportional zur Regeldifferenz.
- Die PI-Regeleinrichtung regelt die Regeldifferenz schneller aus als die I-Regeleinrichtung. Es gibt keine bleibende Regeldifferenz.
- Eine D-Regeleinrichtung reagiert nur auf Änderungen der Regeldifferenz. Je größer die Änderungsgeschwindigkeit der Regeldifferenz ist, desto größer ist die Änderung der Stellgröße.
- Die PD-Regeleinrichtung regelt schneller als eine P-Regeleinrichtung, sie bildet aber auch eine bleibende Regeldifferenz.
- PID-Regeleinrichtungen regeln die Regeldifferenzen schnell aus. Sie verursachen keine bleibende Regeldifferenz.