

# Inhaltsverzeichnis

<b>Vorwort . . . . .</b>	<b>5</b>
<b>1 Einführung . . . . .</b>	<b>13</b>
1.1 Steuern – Regeln . . . . .	13
1.1.1 Steuern . . . . .	13
1.1.2 Regeln . . . . .	14
1.2 Aufgaben des Regelungstechnikers . . . . .	15
1.3 Blockschaltbilder . . . . .	16
1.4 Einteilung der Regler . . . . .	18
1.4.1 Analoge Regler . . . . .	18
1.4.1.1 Stetige Regler . . . . .	18
1.4.1.2 Unstetige Regler . . . . .	18
1.4.2 Digitale Regler . . . . .	19
1.5 Grundschaltungen von Operationsverstärkern . . . . .	19
1.5.1 Invertierender Verstärker . . . . .	20
1.5.2 Nichtinvertierender Verstärker . . . . .	22
1.5.2.1 Impedanzwandler . . . . .	23
1.5.3 Subtrahierer . . . . .	23
1.5.4 Integrierer . . . . .	24
1.5.5 Differenzierer . . . . .	27
1.5.6 Addierer . . . . .	29
<b>2 Analyse von Übertragungsgliedern . . . . .</b>	<b>31</b>
2.1 Zeitverhalten . . . . .	31
2.1.1 Sprungantwort . . . . .	31
2.1.2 Anstiegsantwort . . . . .	33
2.2 Frequenzverhalten . . . . .	34
<b>3 Zeitverhalten von Übertragungsgliedern . . . . .</b>	<b>35</b>
3.1 Proportionalglieder . . . . .	35
3.1.1 P-Regler . . . . .	36
3.1.2 P-Strecken . . . . .	38
3.2 Integralglieder . . . . .	39
3.2.1 I-Regler . . . . .	41
3.2.1.1 PI-Regler . . . . .	42
3.2.2 I-Strecken . . . . .	43
3.3 Differentialglieder . . . . .	45
3.3.1 D-Regler . . . . .	47
3.3.1.1 PD-Regler . . . . .	48
3.3.1.2 PID-Regler . . . . .	49
3.3.2 D-Strecken . . . . .	50
3.4 Verzögerungsglieder . . . . .	51
3.4.1 Verzögerungsglieder erster Ordnung . . . . .	51

3.4.2 Verzögerungsglieder zweiter Ordnung . . . . .	53
3.4.3 Verzögerungsglieder höherer Ordnung . . . . .	56
3.4.4 Verzögerungsglieder mit Totzeit . . . . .	56
<b>3.5 Zusammenfassung . . . . .</b>	<b>57</b>
<b>4 Rechnen in der komplexen Ebene . . . . .</b>	<b>59</b>
<b>4.1 Imaginäre Zahlen . . . . .</b>	<b>59</b>
<b>4.1.1 Rechnen mit imaginären Zahlen . . . . .</b>	<b>59</b>
<b>4.2 Komplexe Zahlen . . . . .</b>	<b>61</b>
<b>4.2.1 Rechnen mit komplexen Zahlen . . . . .</b>	<b>61</b>
<b>4.3 Darstellung von imaginären und komplexen Zahlen in der Gaußschen Zahlenebene . . . . .</b>	<b>63</b>
<b>4.4 Komplexe Rechnung in der Elektrotechnik . . . . .</b>	<b>67</b>
<b>4.4.1 Komplexe Widerstände . . . . .</b>	<b>67</b>
<b>4.4.2 Ortskurven . . . . .</b>	<b>71</b>
<b>4.4.3 Komplexe Leitwerte . . . . .</b>	<b>73</b>
<b>4.4.4 Inversion von Ortskurven . . . . .</b>	<b>76</b>
<b>4.5 Komplexe Rechnung in der Regelungstechnik . . . . .</b>	<b>77</b>
<b>4.5.1 Übertragungsfunktionen . . . . .</b>	<b>78</b>
<b>4.5.1.1 P-Glied . . . . .</b>	<b>79</b>
<b>4.5.1.2 I-Glied . . . . .</b>	<b>80</b>
<b>4.5.1.3 D-Glied . . . . .</b>	<b>81</b>
<b>4.5.1.4 T<sub>1</sub>-Glied . . . . .</b>	<b>81</b>
<b>4.5.1.5 T<sub>2</sub>-Glied . . . . .</b>	<b>82</b>
<b>4.5.1.6 T<sub>n</sub>-Glieder höherer Ordnung und T<sub>r</sub>-Glieder . . . . .</b>	<b>83</b>
<b>4.5.2 Arbeiten mit Übertragungsfunktionen . . . . .</b>	<b>83</b>
<b>4.6 Ortskurven . . . . .</b>	<b>84</b>
<b>4.6.1 P-Glied . . . . .</b>	<b>85</b>
<b>4.6.2 I-Glied . . . . .</b>	<b>85</b>
<b>4.6.3 D-Glied . . . . .</b>	<b>85</b>
<b>4.6.4 T<sub>1</sub>-Glied . . . . .</b>	<b>86</b>
<b>4.6.4.1 Ortskurve des T<sub>1</sub>-Gliedes durch Inversion . . . . .</b>	<b>87</b>
<b>4.6.5 T<sub>2</sub>-Glied . . . . .</b>	<b>89</b>
<b>4.6.5.1 Resonanzfrequenz eines T<sub>2</sub>-Gliedes . . . . .</b>	<b>90</b>
<b>4.6.5.2 Dämpfung eines T<sub>2</sub>-Gliedes . . . . .</b>	<b>91</b>
<b>4.6.6 T<sub>n</sub>-Glied . . . . .</b>	<b>96</b>
<b>4.6.7 T<sub>r</sub>-Glied . . . . .</b>	<b>96</b>
<b>4.7 Bode-Diagramme . . . . .</b>	<b>99</b>
<b>4.7.1 P-Glied . . . . .</b>	<b>100</b>
<b>4.7.2 I-Glied . . . . .</b>	<b>101</b>
<b>4.7.3 D-Glied . . . . .</b>	<b>103</b>
<b>4.7.4 T<sub>1</sub>-Glied . . . . .</b>	<b>104</b>
<b>4.7.4.1 Amplitudengang . . . . .</b>	<b>105</b>
<b>4.7.4.2 Phasengang . . . . .</b>	<b>107</b>
<b>4.7.5 T<sub>2</sub>-Glied . . . . .</b>	<b>107</b>
<b>4.7.5.1 Amplitudengang . . . . .</b>	<b>108</b>
<b>4.7.5.2 Phasengang . . . . .</b>	<b>110</b>
<b>4.7.6 T<sub>r</sub>-Glied . . . . .</b>	<b>111</b>
<b>5 Verbindungs möglichkeiten von Regelkreisgliedern . . . . .</b>	<b>113</b>
<b>5.1 Reihenschaltung . . . . .</b>	<b>113</b>
<b>5.1.1 Zeitverhalten . . . . .</b>	<b>114</b>
<b>5.1.1.1 D-T<sub>1</sub>-Glied . . . . .</b>	<b>114</b>

5.1.1.2 I-T <sub>1</sub> -Glied . . . . .	115
5.1.1.3 P-T <sub>1</sub> -Glied . . . . .	116
5.1.1.4 P-T <sub>2</sub> -Glied . . . . .	117
5.1.2 Ortskurven . . . . .	118
5.1.2.1 D-T <sub>1</sub> -Glied . . . . .	118
5.1.2.2 I-T <sub>1</sub> -Glied . . . . .	119
5.1.2.3 P-T <sub>1</sub> -Glied . . . . .	121
5.1.2.4 P-T <sub>2</sub> -Glied . . . . .	121
5.1.3 Bode-Diagramme . . . . .	122
5.1.3.1 D-T <sub>1</sub> -Glied . . . . .	122
5.1.3.2 I-T <sub>1</sub> -Glied . . . . .	123
5.1.3.3 P-T <sub>1</sub> -Glied . . . . .	124
5.1.3.4 P-T <sub>2</sub> -Glied . . . . .	125
5.1.3.5 T <sub>1</sub> -T <sub>1</sub> -Glied . . . . .	125
5.2 Parallelschaltung . . . . .	127
5.2.1 Zeitverhalten . . . . .	127
5.2.1.1 PD-Glied . . . . .	127
5.2.1.2 PI-Glied . . . . .	130
5.2.1.3 PID-Glied . . . . .	130
5.2.2 Ortskurven . . . . .	132
5.2.2.1 PD-Glied . . . . .	133
5.2.2.2 PI-Glied . . . . .	133
5.2.2.3 PID-Glied . . . . .	134
5.2.3 Bode-Diagramme . . . . .	135
5.2.3.1 PD-Glied . . . . .	135
5.2.3.2 PI-Glied . . . . .	136
5.2.3.3 PID-Glied . . . . .	138
5.3 Gruppenschaltung . . . . .	140
5.3.1 PD-T <sub>1</sub> -Schaltung . . . . .	140
5.3.1.1 Zeitverhalten . . . . .	141
5.3.1.2 Übertragungsfunktion und Ortskurve . . . . .	142
5.3.1.3 Bode-Diagramm . . . . .	144
5.3.2 PID-T <sub>1</sub> -Schaltung . . . . .	147
5.3.2.1 Zeitverhalten . . . . .	147
5.3.2.2 Übertragungsfunktion und Ortskurve . . . . .	148
5.3.2.3 Bode-Diagramm . . . . .	149
5.3.3 PI(D-T <sub>1</sub> )-Schaltung . . . . .	150
5.3.4 Zusammenstellung der Bode-Diagramme . . . . .	150
6 Der Regelkreis . . . . .	155
6.1 Aufgaben von Reglern . . . . .	156
6.1.1 Anfahrverhalten . . . . .	156
6.1.2 Führungsverhalten . . . . .	157
6.1.3 Störverhalten . . . . .	157
6.2 Berechnung eines Regelkreises . . . . .	157
6.2.1 Führungsverhalten . . . . .	158
6.2.2 Störverhalten . . . . .	158
6.2.3 Bleibende Regeldifferenz . . . . .	159
6.3 Schwingungen im Regelkreis . . . . .	160
6.4 Stabilität . . . . .	161
6.4.1 Stabilitätskriterium mit Ortskurve (Nyquist-Kriterium) . . . . .	162
6.4.1.1 Stabilitätsgüte mit Ortskurve . . . . .	163

6.4.2 Stabilitätskriterium mit Bode-Diagramm . . . . .	165
6.4.2.1 Stabilitätsgüte mit Bode-Diagramm . . . . .	166
6.5 Die optimale Reglereinstellung . . . . .	168
6.5.1 Regelgüte . . . . .	168
6.6 Strecken mit und ohne Ausgleich . . . . .	170
 7 Regelkreise mit stetigen Reglern . . . . .	171
7.1 Strecken mit Ausgleich . . . . .	171
7.1.1 Regelung einer P-Strecke . . . . .	171
7.1.1.1 P-Strecke mit P-Regler . . . . .	172
<i>Stabilität</i> . . . . .	173
7.1.1.2 P-Strecke mit I-Regler . . . . .	173
<i>Führungsverhalten</i> . . . . .	173
<i>Störverhalten</i> . . . . .	174
<i>Stabilität</i> . . . . .	175
7.1.1.3 P-Strecke mit PI-Regler . . . . .	176
<i>Führungsverhalten</i> . . . . .	176
<i>Störverhalten</i> . . . . .	176
<i>Stabilität</i> . . . . .	177
7.1.2 Regelung einer P-T <sub>1</sub> -Strecke . . . . .	178
7.1.2.1 P-T <sub>1</sub> -Strecke mit P-Regler . . . . .	179
<i>Führungsverhalten</i> . . . . .	179
<i>Störverhalten</i> . . . . .	180
<i>Stabilität</i> . . . . .	180
7.1.2.2 P-T <sub>1</sub> -Strecke mit I-Regler . . . . .	182
<i>Führungsverhalten</i> . . . . .	182
<i>Störverhalten</i> . . . . .	183
<i>Stabilität</i> . . . . .	184
7.1.2.3 P-T <sub>1</sub> -Strecke mit PI-Regler . . . . .	186
<i>Stabilität</i> . . . . .	186
7.1.3 Regelung einer P-T <sub>2</sub> -Strecke . . . . .	187
7.1.3.1 P-T <sub>2</sub> -Strecke mit P-Regler . . . . .	188
<i>Führungsverhalten</i> . . . . .	188
<i>Störverhalten</i> . . . . .	190
<i>Stabilität</i> . . . . .	190
7.1.3.2 P-T <sub>2</sub> -Strecke mit I-Regler . . . . .	190
7.1.3.3 P-T <sub>2</sub> -Strecke mit PI-Regler . . . . .	192
7.1.3.4 P-T <sub>2</sub> -Strecke mit PD-Regler . . . . .	192
7.1.3.5 P-T <sub>2</sub> -Strecke mit PID-Regler . . . . .	194
<i>Stabilität</i> . . . . .	194
7.1.4 Regelung von verzögerten Strecken höherer Ordnung . . . . .	194
7.1.4.1 Reglereinstellung bei verzögerten Strecken höherer Ordnung . . . . .	195
<i>Einstellung nach CHR</i> . . . . .	196
<i>Einstellung nach ZIEGLER und NICHOLS</i> . . . . .	197
7.1.4.2 Kontrolle der Optimierung . . . . .	197
7.2 Strecken ohne Ausgleich . . . . .	200
7.2.1 Regelung einer I-Strecke . . . . .	200
7.2.1.1 I-Strecke mit P-Regler . . . . .	200
<i>Führungsverhalten</i> . . . . .	200
<i>Störverhalten</i> . . . . .	201
<i>Stabilität</i> . . . . .	201
7.2.1.2 I-Strecke mit I-Regler . . . . .	201
<i>Führungsverhalten</i> . . . . .	201

7.2.1.3 I-Strecke mit PI-Regler . . . . .	202
<i>Führungsverhalten</i> . . . . .	202
<i>Störverhalten</i> . . . . .	202
<i>Stabilität</i> . . . . .	203
7.2.2 Regelung einer I-T <sub>1</sub> -Strecke . . . . .	203
7.2.2.1 I-T <sub>1</sub> -Strecke mit PD-Regler . . . . .	203
<i>Führungsverhalten</i> . . . . .	204
<i>Störverhalten</i> . . . . .	204
<i>Stabilität</i> . . . . .	205
7.2.3 Reglereinstellung bei verzögerten I-Strecken . . . . .	206
7.2.3.1 Reglereinstellung für I-T <sub>1</sub> -Strecke . . . . .	210
7.2.3.2 Reglereinstellung für I-T <sub>2</sub> -Strecke . . . . .	210
7.3 Strecken mit Totzeit . . . . .	212
7.3.1 Regelung einer Totzeit-Strecke . . . . .	212
7.3.1.1 Totzeit-Strecke mit P-Regler . . . . .	212
<i>Führungsverhalten</i> . . . . .	212
<i>Störverhalten</i> . . . . .	214
<i>Stabilität</i> . . . . .	215
7.3.1.2 Totzeit-Strecke mit I-Regler . . . . .	215
<i>Führungsverhalten</i> . . . . .	215
<i>Störverhalten</i> . . . . .	217
<i>Stabilität</i> . . . . .	217
 8 Unstetige Regler . . . . .	219
8.1 Zweipunktregler . . . . .	219
8.1.1 Regelung einer P-T <sub>1</sub> -Strecke mit Zweipunktregler . . . . .	220
8.1.1.1 Schaltfrequenz . . . . .	221
8.1.1.2 Leistungsüberschuß . . . . .	223
8.1.2 Regelung einer P-T <sub>n</sub> -Strecke mit Zweipunktregler . . . . .	223
8.1.2.1 Zweipunktregelung mit Grundlast . . . . .	226
8.1.3 Regelung einer I-Strecke mit Zweipunktregler . . . . .	228
8.1.4 Regelung einer verzögerten I-Strecke mit Zweipunktregler . . . . .	229
8.2 Dreipunktregler . . . . .	230
8.3 Unstetige Regler mit Rückführung . . . . .	232
8.3.1 Zweipunktregler mit verzögerter Rückführung . . . . .	233
8.3.2 Zweipunktregler mit verzögert-nachgebender Rückführung . . . . .	235
 9 Digitale Regelung . . . . .	237
9.1 Funktion eines digitalen Reglers . . . . .	237
9.1.1 Abtasten und Digitalisieren der Regelgröße . . . . .	237
9.1.2 Erzeugen der Stellgröße . . . . .	240
9.2 Regelalgorithmus . . . . .	241
9.2.1 P-Anteil . . . . .	241
9.2.1.1 Proportionalbereich . . . . .	242
9.2.2 I-Anteil . . . . .	242
9.2.2.1 Integrieren bei Analogreglern . . . . .	242
9.2.2.2 Näherungsverfahren bei Digitalreglern . . . . .	243
9.2.3 D-Anteil . . . . .	245
9.2.4 PID-Algorithmus . . . . .	247
9.3 Adaptive Regler . . . . .	248

<b>10 Fuzzy-Logik . . . . .</b>	<b>251</b>
10.1 Was ist Fuzzy-Logik? . . . . .	251
10.2 Vorteile von Fuzzy-Regelung . . . . .	252
10.2.1 Zeitkritisch . . . . .	252
10.2.2 Zeitvariant . . . . .	252
10.2.3 Nichtlinear . . . . .	252
10.3 Grundlagen der Fuzzy-Logik . . . . .	253
10.3.1 Regelungstechnik . . . . .	253
10.3.2 Steuerungstechnik . . . . .	254
10.3.3 Fuzzy-Logik . . . . .	254
10.3.4 Zugehörigkeitsfunktionen . . . . .	255
10.3.5 Verknüpfungen von Zugehörigkeitsfunktionen . . . . .	261
10.3.6 Fuzzy-Regeln . . . . .	261
10.3.7 Defuzzifizierung . . . . .	263
10.3.8 Einsatz der Fuzzy-Logik in der Regelungstechnik . . . . .	265
10.4 Berechnung von Flächenschwerpunkten . . . . .	268
<b>Anhang . . . . .</b>	<b>270</b>
<b>Lösungen der Übungsaufgaben . . . . .</b>	<b>270</b>
<b>Literaturverzeichnis . . . . .</b>	<b>288</b>
<b>Stichwortverzeichnis . . . . .</b>	<b>289</b>