

# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Einführung</b>	<b>1</b>
1.1	Literatur	5
<b>2</b>	<b>Systeme und deren Beschreibung</b>	<b>7</b>
2.1	Grundlagen der Systembeschreibung	8
2.1.1	Zeitdiskrete Systembeschreibung	13
2.2	Zusammenschalten von Systemen	16
2.3	Auswahl der relevanten Methoden	19
2.3.1	Ein- und Mehrgrößensysteme	20
2.3.2	Lineare vs. nicht lineare Systeme	23
2.3.3	Stabile vs. instabile Systeme	26
2.3.4	Beschreibung im Zeit- vs. Frequenzbereich	27
2.4	Literatur	28
<b>3</b>	<b>Ziele jeder Regelung: Robustheit und Performanz</b>	<b>29</b>
3.1	Robustheit	30
3.2	Performanz	31
<b>4</b>	<b>Funktionale Sicherheit und Regelung</b>	<b>33</b>
<b>5</b>	<b>Was ist Robustheit und wie wird sie quantifiziert?</b>	<b>37</b>
5.1	Stabilität des Regelkreises	38
5.2	Methodenwahl bei sicherheitskritischen Anwendungen	43
5.3	Perturbation der Regelstrecke	44
5.3.1	Perturbation bei Mehrgrößenregelstrecken	46
5.4	Bereich der robusten Stabilität	49
5.4.1	Robuste Stabilität bei Mehrgrößensystemen	56
5.5	Vorgehensweise zur Prüfung der robusten Stabilität eines Regelkreises	57
5.6	Literatur	58

<b>6</b>	<b>Zusammenspiel von Robustheit und Performanz</b>	<b>59</b>
6.1	Quantifizierung der Reglerperformanz	60
6.2	Grenzen der Performanz	62
6.3	Zusammenspiel von Performanz und Robustheit	65
6.3.1	Robustheit und Wahl des Streckenmodells	67
6.4	Weitere Charakteristiken der Reglerleistung	68
6.5	Robuste Performanz	71
6.5.1	Robuste Performanz von Mehrgrößenregelstrecken	75
6.6	Vorgehensweise zur Prüfung der robusten Performanz eines Regelkreises	78
6.7	Literatur	78
<b>7</b>	<b>Robustheit und Performanz bei funktionaler Sicherheit</b>	<b>79</b>
7.1	Mögliche Vorgehensweise bei der Reglerspezifikation für funktionale Sicherheit nach ASIL	84
<b>8</b>	<b>Prüfung der Robustheit direkt aus empirischen Frequenzgängen</b>	<b>85</b>
8.1	Frequenzgang aus Fourier-Transformation der Messdaten	87
8.2	Anregungssignale für Frequenzgangaufnahme	90
8.2.1	Anregung durch einen Impuls	91
8.2.2	Anregung durch eine Sprungfunktion	92
8.2.3	Anregung durch Pseudo Random Binary Sequence (PRBS)	94
8.2.4	Anregung durch eine Sinussequenz	96
8.2.5	Einfluss des linearen Trends auf den empirischen Frequenzgang	98
8.2.6	Vergleich von Anregungssignalen	99
8.2.7	Nichtnegative Anregungen	102
8.3	Vorgehensweise bei der Bestimmung eines empirischen Frequenzgangs	106
<b>9</b>	<b>Systemidentifikation aus dem Frequenzgang</b>	<b>109</b>
9.1	Kurzer Überblick der Identifikationsmethoden	110
9.1.1	Methoden für Mehrgrößensysteme	113
9.2	Modellidentifikation im Frequenzbereich	113
9.2.1	Spezialfall: Modell ohne Nullstellen	117
9.3	Identifikation eines strukturierten Modells	120
9.4	Vorteile der Modellidentifikation im Frequenzbereich	124
9.5	Vorgehensweise für die Modellidentifikation	127
9.6	Literatur	129

<b>10</b>	<b>Robuste Spezifikationen für Subsysteme</b>	131
10.1	Beispiel eines Gesamtsystems mit einer robustheits-kritischen Komponente	135
10.2	Vorgehensweise bei der Robustheits- und Performanzprüfung eines Gesamtsystems mit Komponenten	139
10.3	Literatur	142
<b>11</b>	<b>Spezifikationen im Zeitbereich</b>	143
11.1	Konzeptuelles Gerüst: die Signal- und Systemnormen	144
11.1.1	Signalnormen	145
11.1.2	Systemnormen	147
11.1.3	Berechnung der Signalnorm über einem endlichen Zeitintervall	152
11.2	Spezifikation durch eine Norm auf Sensitivität des Regelkreises	152
11.3	Spezifikation als Norm der Abweichung vom Referenzmodell	159
11.4	Zusammenfassung der Besonderheiten der Spezifikation im Zeitbereich	165
11.5	Vorgehensweise bei der Spezifikation im Zeitbereich	167
11.6	Literatur	168
<b>12</b>	<b>Prüfung der Robustheit eines PID-Reglers</b>	169
12.1	Struktur des PID-Reglers	170
12.2	Robustheit und Performanz von einparametrischen Reglern (P, I und D)	172
12.2.1	Robustheit und Performanz des P-Reglers	173
12.2.2	Robustheit und Performanz des I-Reglers	174
12.2.3	Robustheit und Performanz des D-Reglers	176
12.3	Numerische Optimierung des PID-Reglers	177
12.4	PID-Regler mit Pol-Kompensation	182
12.5	Vorgehensweise für den robusten Entwurf eines PID-Reglers	190
<b>13</b>	<b>Reglersynthese: einfache und komplexe Methoden</b>	193
13.1	Der robuste Entwurf durch Q-Parametrierung	195
13.1.1	Q-Parametrierung für stabile Regelstrecken	196
13.1.2	Spezialfall: stabile Eingrößensysteme	197
13.1.3	Besonderheiten der Mehrgrößensysteme	201
13.1.4	Q-Parametrierung für instabile Regelstrecken	202
13.1.5	Vorgehensweise beim robusten Reglerentwurf durch Q-Parametrierung	203
13.2	Der robuste Reglerentwurf mit der $H_\infty$ -Methode	204
13.2.1	Verallgemeinerte Regelstrecke	205
13.2.2	Gewichte der verallgemeinerten Regelstrecke	209
13.2.3	Konstruktion der verallgemeinerten Regelstrecke	213

13.2.4	$H_\infty$ -Lösungsansatz . . . . .	214
13.2.5	Bedingungen für die Lösbarkeit der $H_\infty$ -Optimierung . . . . .	217
13.2.6	Optimierungsbeispiel . . . . .	219
13.2.7	Besonderheiten bei zeitdiskreten Systemen . . . . .	220
13.2.8	Besonderheiten bei MIMO-Systemen . . . . .	222
13.2.9	Vorgehensweise beim $H_\infty$ -Reglerentwurf . . . . .	223
13.3	Literatur . . . . .	224
<b>14</b>	<b>Redesign bei Instabilität . . . . .</b>	<b>225</b>
14.1	Wahl und Bearbeitung des zu analysierenden Messabschnitts . . . . .	227
14.2	Analyse der Oszillation . . . . .	230
14.3	Redesign des Reglers . . . . .	237
14.3.1	Redesign durch Erhöhung der Robustheitsspezifikation . . . . .	238
14.3.2	Redesign durch Anpassung des Streckenmodells . . . . .	239
14.4	Vorgehensweise beim Regler-Redesign nach auftretenden Instabilitäten . . . . .	242