

# Inhaltsverzeichnis

<b>Formelzeichen und Abkürzungen</b>	10
<b>1. Entwicklungsstand der Fehlertheorie</b>	12
<b>2. Begriffsbildungen auf dem Gebiet der Meßgenauigkeit</b>	14
2.1. Definition des Meßfehlers	14
2.2. Problematik zur Bezeichnung „Fehler“	17
2.3. Fehleranteile	19
2.4. Fehlerbeiträge	21
2.5. Fehler und Fehlergrenzen	27
2.6. Terminologische Zusammenfassung	30
<b>3. Ermittlung und Beschreibung statischer Fehleranteile</b>	39
3.1. Unsicherheiten der Maßverkörperungen	39
3.2. Grobe Fehleranteile	42
3.2.1. Begriff des groben Fehlers	42
3.2.2. Erkennen grober Fehler	43
3.2.3. Behandlung grober Fehler	47
3.3. Systematische Fehleranteile	48
3.3.1. Wesen systematischer Fehler	48
3.3.2. Ermittlung systematischer Fehler	51
3.3.3. Behandlung systematischer Fehler	54
3.3.4. Systematischer Restfehler	58
3.4. Zufällige Fehleranteile	61
3.4.1. Wesen zufälliger Fehler	61
3.4.2. Bestimmung zufälliger Fehler	63
3.4.2.1. Grundüberlegungen zur Wahl von Unsicherheitsmaßen	63
3.4.2.2. Meßwertverteilungen	66
3.4.2.3. Unsicherheitsmaße bei normalverteilten Meßwerten	72
3.4.2.4. Unsicherheitsmaße bei nichtnormalverteilten Meßwerten	81
3.4.2.5. Unsicherheitsmaße bei Einzelmessungen	86
3.4.2.6. Fehlermodelle auf informationstheoretischer Grundlage	88
3.4.3. Behandlung zufälliger Fehler	94
3.5. Driftfehler	95
3.5.1. Meßtechnische Bedeutung von Drifterscheinungen	95
3.5.2. Beschreibung und Analyse von Driftprozessen	96
<b>4. Fehler bei digitalen Messungen</b>	100
4.1. Einteilung der Fehler	100
4.2. Einzelkomponenten digitaler Meßfehler	101
4.2.1. Fehler bei Zählverfahren	101
4.2.2. Quantisierungsfehler	102
4.2.3. Steigungsfehler bei der Analog-Digital-Umsetzung	103
4.2.4. Mittelungsfehler bei der Analog-Digital-Umsetzung	104
4.2.5. Fehler bei erfülltem bzw. nichterfülltem Abtasttheorem	106

4.2.5.1. Zur Erklärung des Entstehens der Fehler . . . . .	106
4.2.5.2. Fehler bei idealer Tiefpaßfilterung vor der Abtastung . . . . .	109
4.2.5.3. Fehler infolge nichtidealer oder fehlender Tiefpaßfilterung vor der Abtastung (Aliasingfehler) . . . . .	109
4.2.5.4. Fehler beim reduzierten Abtasten . . . . .	112
4.2.5.5. Fehler beim Abtasten von Signalen endlicher Dauer . . . . .	112
4.2.6. Fehler infolge nichtidealer Vorarbeitungsprogramme bei Meßwert- verarbeitung im Rechner . . . . .	114
4.2.7. Fehler bei der Digital-Analog-Umsetzung . . . . .	117
4.2.8. Synchronisationsfehler (Jitter) . . . . .	118
4.3. Fehler bei der Übertragung digitaler Signale . . . . .	118
4.4. Informationstheoretischer Vergleich digitaler und analoger Meßverfahren . . . . .	119
<b>5. Ermittlung und Beschreibung dynamischer Fehler . . . . .</b>	<b>122</b>
5.1. Einleitende Bemerkungen und Problemstellung . . . . .	122
5.2. Kennfunktionen und Kennwerte zur Signalbeschreibung . . . . .	123
5.2.1. Beschreibung im Frequenzbereich . . . . .	123
5.2.2. Beschreibung im Zeitbereich . . . . .	125
5.2.3. Zusammenhänge zwischen den Kennfunktionen bzw. Kennwerten für Signale im Zeit- und im Frequenzbereich . . . . .	126
5.3. Kennfunktionen und Kennwerte zur Systembeschreibung . . . . .	127
5.3.1. Beschreibung im Frequenzbereich . . . . .	127
5.3.2. Beschreibung im Zeitbereich . . . . .	131
5.3.3. Beschreibung im Zustandsraum . . . . .	133
5.3.4. Zusammenhang zwischen den Kennfunktionen im Zeit- und im Fre- quenzbereich . . . . .	135
5.4. Dynamische Prüfung von Meßsystemen . . . . .	136
5.4.1. Allgemeine Bemerkungen . . . . .	136
5.4.2. Prüfung dynamischer Eigenschaften von Meßmitteln im Frequenz- bereich . . . . .	137
5.4.3. Prüfung dynamischer Eigenschaften von Meßmitteln im Zeitbereich . . . . .	139
5.5. Dynamische Meßfehler . . . . .	144
5.5.1. Exakte Behandlung . . . . .	144
5.5.2. Näherungsbetrachtungen . . . . .	148
5.5.3. Typische dynamische Meßfehler und deren Ursachen . . . . .	156
<b>6. Meßmittelfehler . . . . .</b>	<b>157</b>
6.1. Fehlerkenngrößen für Meßmittel . . . . .	157
6.1.1. Allgemeine Beschreibung von Meßmittelgenauigkeiten . . . . .	157
6.1.2. Fehlerklassen von Meßmitteln . . . . .	161
6.1.3. Andere Genauigkeitskenngrößen . . . . .	167
6.2. Möglichkeiten zur Verbesserung von Meßmittelgenauigkeiten . . . . .	169
6.3. Meßmittelprüfung . . . . .	174
6.3.1. Arten von Meßmittelprüfungen . . . . .	174
6.3.2. Prüfparameter der Meßmittelprüfung . . . . .	178
6.3.3. Durchführung von Meßmittelprüfungen . . . . .	179
6.3.4. Prüfhilfsmittel . . . . .	183
6.3.5. Prüfung von Normalen . . . . .	186
6.4. Selbstkalibrierende Meßmittel . . . . .	188
<b>7. Meßgenauigkeit indirekter Messungen . . . . .</b>	<b>193</b>
7.1. Definition und Problematik indirekter Messungen . . . . .	193
7.2. Fehlerfortpflanzung bei Resultaten aus normalverteilten Meßwerten . . . . .	194

7.3. Unsicherheiten in Ergebnissen verschiedener Arten indirekter Messungen . . .	199
7.3.1. Übersicht über die verschiedenen Problemstellungen . . . . .	199
7.3.2. Unsicherheiten in Konstanten gemessener funktioneller Zusammenhänge (Ausgleichsrechnung) . . . . .	200
7.3.3. Unsicherheiten beim Zusammenfassen von Werten unterschiedlicher Genauigkeit . . . . .	206
7.3.4. Unsicherheiten bei der Zusammenfassung von Größen aus nicht-normalverteilten Meßwerten . . . . .	208
7.3.5. Unsicherheiten in Ergebnissen indirekter Messungen bei Einbeziehung von Einzelmessungen . . . . .	211
7.3.6. Zusammenfassung systematischer Fehleranteile . . . . .	212
7.3.7. Zusammenfassung von Maximalfehlergrenzen . . . . .	214
7.3.8. Fehlerfortpflanzung in Meßketten . . . . .	216
7.4. Vollständiges Meßergebnis . . . . .	219
7.4.1. Allgemeine Problematik: Ergebnisse geringer Genauigkeit . . . . .	219
7.4.2. Vollständiges Meßergebnis bei normalen Genauigkeitsforderungen . . . . .	221
7.4.3. Berechnung der Meßunsicherheit . . . . .	222
<b>8. Fehlerkorrektur und ihre Grenzen . . . . .</b>	<b>225</b>
8.1. Prinzipien der Fehlerkorrektur . . . . .	225
8.2. Korrektur systematischer Fehler . . . . .	228
8.2.1. Korrektur statischer systematischer Fehler . . . . .	228
8.2.2. Korrektur dynamischer Fehler . . . . .	229
8.3. Verminderung der Auswirkungen zufälliger Fehler . . . . .	239
8.4. Grenzen der Korrekturmöglichkeiten . . . . .	241
<b>9. Fehler bei geometrischen Messungen als Beispiel für Fehleranalysen . . . . .</b>	<b>254</b>
9.1. Zweck und Gegenstand geometrischer Messungen . . . . .	254
9.2. Zur Fehlerrechnung bei geometrischen Messungen . . . . .	256
9.3. Maßdefinition und Fehlergeometrie . . . . .	257
9.4. Analyse und Elimination systematischer Fehler . . . . .	259
9.4.1. Der Meßkreis . . . . .	259
9.4.2. Fehlerordnungsmatrix . . . . .	261
9.4.3. Elimination systematischer Fehler . . . . .	262
9.5. Theorie ausgewählter systematischer Fehler . . . . .	265
9.5.1. Geometrisch-kinematische Fehler . . . . .	265
9.5.2. Thermische Fehler . . . . .	269
9.5.3. Fehler infolge elastischer Verformung . . . . .	273
9.6. Ausgewählte Kapitel der Theorie korrelierter zufälliger Fehler . . . . .	279
9.6.1. Einführung . . . . .	279
9.6.2. Varianz und Kovarianz; die Kovarianzmatrix . . . . .	280
9.6.3. Fehlerfortpflanzung bei einer Ergebnisgröße . . . . .	284
9.6.4. Fehlerfortpflanzung bei mehreren Ergebnisgrößen . . . . .	286
<b>Literaturverzeichnis . . . . .</b>	<b>291</b>
<b>Sachwörterverzeichnis . . . . .</b>	<b>314</b>