

Modellbasierte Lageregelung mechatronischer Aktuatoren im Luftpfad von Verbrennungsmotoren

Vom Fachbereich
Elektrotechnik und Informationstechnik
der Technischen Universität Darmstadt
zur Erlangung der Würde eines Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.)
genehmigte Dissertation

von

Dipl.-Ing. Stefan Kopf

geboren am 30. April 1982 in Darmstadt

Referent: Prof. Dr.-Ing. Ulrich Konigorski
Korreferent: Prof. Dr.-Ing. habil. Christoph Ament

Tag der Einreichung: 4. Februar 2013
Tag der mündlichen Prüfung: 6. Mai 2013



D 17

Darmstädter Dissertationen

Inhaltsverzeichnis

Vorwort	V
Kurzfassung	VI
Symbole und Abkürzungen	XI
1 Einleitung	1
1.1 Einführung	1
1.2 Gliederung der Arbeit	2
2 Modellbildung und Identifikation	4
2.1 Überblick	4
2.2 Theoretische Modellbildung	4
2.2.1 Überblick über das Gesamtsystem	4
2.2.2 Pulsbreitenmodulation der Stellgröße	5
2.2.3 Spannungsversorgung und Leistungsverstärker	6
2.2.4 Modellbildung der Drosselklappe	8
2.2.5 Messdatenerfassung	13
2.2.6 Gesamtmodell der Drosselklappe	15
2.3 Parameteridentifikation des Modells	16
2.3.1 Parameteridentifikation des Motors	17
2.3.2 Bestimmung der Getriebeübersetzung	20
2.3.3 Entwurf eines modellbasierten Reglers für die weiteren Messungen	20
2.3.4 Messung des statischen Übertragungsverhaltens	21
2.3.5 Parameteridentifikation der Drosselklappe	23
2.4 Vereinfachtes Prozessmodell	25
2.4.1 Zusammenfassung der Parameter des Modells	26
2.4.2 Herleitung des vereinfachten Prozessmodells	27
2.4.3 Parameteridentifikation des Hilfsmodells	28
2.4.4 Parameteridentifikation des Modells	30
2.5 Parameterabhängigkeiten und -unsicherheiten	33
2.5.1 Batteriespannung	34
2.5.2 Temperaturabhängigkeiten der Modellparameter	34
2.6 Zustandsraumdarstellung des Systems	37
2.6.1 Totzeitapproximation	37
2.6.2 Interpretation der Nichtlinearitäten als Störgrößen	38
2.6.3 Zustandsraumdarstellung	39
2.7 Modellfamilie	39
2.8 Diskretisierung des Systems	40
2.9 Zusammenfassung	41

3	Reglerstruktur	43
3.1	Stand der Technik	43
3.2	Neue Reglerstruktur	44
3.3	Lageregelung	45
3.3.1	Zwei-Freiheitsgradstruktur	45
3.3.2	Vorsteuerung	46
3.3.3	Zustandsregler mit Störgrößenbeobachter	49
3.3.4	Auslegung von Vorsteuerung und Folgeregelung	51
3.4	Regelung vor den Anschlägen	55
3.4.1	Geschwindigkeitsregelung	56
3.4.2	Steuerung im Anschlag	59
3.4.3	Umschaltstrategie	61
3.4.4	Umschaltung von Geschwindigkeitsregelung auf Lageregelung	63
3.5	Zusammenfassung	69
4	Maßnahmen zur Erhöhung der Robustheit	70
4.1	Einführung	70
4.2	Multi-Modell-Ansatz	70
4.3	Gamma-Stabilität	71
4.3.1	Definition des Polgebiets	71
4.4	Entwurf eines Gamma-stabilisierenden Reglers	73
4.5	Polgebietsvorgabe	74
4.5.1	Transformation des Polgebiets in den z -Bereich	75
4.5.2	Definition des Gütemaßes für das Polgebiet	76
4.6	Übertragung des Entwurfs auf die Lageregelung	76
4.6.1	Definition der Polgebiete	76
4.6.2	Bewertung des geschlossenen Folgeregelkreises	78
4.6.3	Bewertung von Regler- und Beobacherverstärkung	78
4.6.4	Gütekriterium	78
4.6.5	Berechnung der Gradienten	79
4.6.6	Fixierung von Reglerparametern	80
4.6.7	Durchführung des Entwurfs	81
4.7	Übertragung des Entwurfs auf die Geschwindigkeitsregelung	83
4.7.1	Polgebiet	84
4.7.2	Bewertung des geschlossenen Regelkreises	85
4.7.3	Gütekriterium und Ansatz für den Regler	85
4.7.4	Durchführung des Entwurfs	86
5	Anwendung der Regelung	88
5.1	Verhalten der Lageregelung	88
5.2	Anfahren des Anschlags	90
5.3	Robustheit	91

6	Temperaturschätzung	95
6.1	Einleitung	95
6.2	Temperaturabhängige Modelle	96
6.3	Beobachterbasierte Temperaturschätzung	96
6.3.1	Untersuchung der Beobachtbarkeit des Systems	96
6.3.2	Temperaturschätzung mit einem erweiterten Kalmanfilter	100
6.3.3	Adaption des erweiterten Kalmanfilters	102
6.3.4	Anwendung des erweiterten Kalmanfilters	104
6.4	Online-Parameterschätzung	105
6.4.1	Ableitungsschätzung	107
6.4.2	Aktivierung und Umschaltung	111
6.4.3	Rekursive Methode der kleinsten Quadrate	112
6.4.4	Überleitung von der LS-Methode auf ein EKF	114
6.4.5	Parameterschätzung mit einem erweiterten Kalmanfilter	115
6.5	Zusammenfassung	121
7	Zusammenfassung und Ausblick	124
A	Anhang	127
A.1	Reglerstrukturen	127
A.1.1	Zustandsregler	127
A.1.2	Störgrößenkompensation	129
A.1.3	Störgrößenbeobachter	132
A.1.4	Zeitdiskrete Realisierung der Reglerstrukturen	133
A.2	Separationseigenschaften der Reglerstrukturen	135
A.2.1	Modellfolgeregelung	135
A.2.2	Modellfolgeregelung mit Beobachter	137
A.2.3	Modellfolgeregelung mit Störgrößenbeobachter	138
A.3	Stationäre Genauigkeit der Regelung mit Störgrößenbeobachter bei Modellfehlern	138
A.4	Robuster Entwurf	140
A.4.1	Berechnung der Polempfindlichkeiten des Folgeregelkreises	140
A.4.2	Verschieben eines Eigenwerts der Geschwindigkeitsregelung	142
A.4.3	Polempfindlichkeit der Geschwindigkeitsregelung	143
B	Beobachter für nichtlineare Systeme	145
B.1	Beobachtbarkeit nichtlinearer Systeme	145
B.1.1	Beobachtbarkeitsnormalform	145
B.1.2	Globale Beobachtbarkeit	146
B.1.3	Lokale Beobachtbarkeit	147
B.1.4	Anwendung auf ein lineares System	147
B.2	Erweitertes Kalmanfilter	148
B.2.1	Kalmanfilter für zeitdiskrete Prozesse	148
B.2.2	Erweitertes Kalmanfilter für zeitdiskrete Prozesse	149

B.2.3	Erweitertes Kalmanfilter für zeitkontinuierliche Prozesse	150
B.2.4	Auslegung des Kalmanfilters	150
B.3	Anwendung eines nichtlinearen Beobachters an einem einfachen Beispielsystem .	151
B.3.1	Zeitkontinuierliches System mit zwei konstanten Störgrößen	151
B.3.2	Zeitdiskretes System mit zwei konstanten Störgrößen	154
C	Methode der kleinsten Quadrate	157
C.1	Nichtrekursive Methode der kleinsten Quadrate	157
C.2	Rekursive Methode der kleinsten Quadrate	158
C.3	Rekursive Methode der kleinsten Quadrate für zeitvariante Systeme	159
	Literaturverzeichnis	161