

Inhaltsverzeichnis

1	Einführung	1
2	Einführung in mechatronische Systeme	9
2.1	Zweimassensystem	9
2.2	Regelung der Arbeitsmaschinendrehzahl	12
2.3	Regelung der Antriebsmaschinendrehzahl	13
2.4	Proportionale Zustandsregelung	18
2.5	Integrale Zustandsregelung	19
2.6	Nichtlineares Zweimassensystem	23
2.7	Dreimassensystem	25
2.8	Zusammenfassung: Mechatronische Systeme	29
2.9	Kontinuierliche Produktionsanlagen	31
2.10	Zusammenfassung: Technologische Systeme	33
3	Statische Funktionsapproximatoren	35
3.1	Übersicht: Neuronale Netze	36
3.2	Statische nichtlineare Funktionen	37
3.3	Methoden der Funktionsapproximation	38
3.4	Beurteilungs-Kriterien für künstliche neuronale Netze	40
3.5	Funktionsapproximation mit lokalen Basisfunktionen	41
3.6	Radial Basis Function (RBF) Netz	43
3.7	General-Regression-Neural-Network (GRNN)	45
3.7.1	Ursprüngliche Anwendung des GRNN	47
3.7.2	Optimierung bei mehrdimensionalem Eingangsraum	47
3.7.3	Beispiele	48
3.8	Harmonisch Aktiviertes Neuronales Netz (HANN)	55
3.8.1	Grundstruktur	56
3.8.2	Erweiterung	58
3.9	LOLIMOT — LOcal LInear MOdel Tree	60
3.9.1	Grundlegende Idee	60
3.9.2	Parameter- und Strukturoptimierung	61

3.9.2.1	Parameterberechnung	61
3.9.2.2	Strukturoptimierung	63
3.9.3	Beispiele	66
3.10	Multi-Layer-Perceptron (MLP) Netze	73
3.10.1	Einleitung	73
3.10.2	Technische Abstraktion	73
3.10.3	Transferfunktionen	75
3.10.4	Mehrschichtiges MLP-Netz	75
3.10.5	Auslegung von feedforward Netzen	78
3.10.6	Beispiele	79
3.11	Funktionsapproximatoren - Bewertung und Vergleich	84
3.11.1	Bewertung der Eigenschaften des GRNN und RBF-Netzwerks	84
3.11.2	Bewertung HANN	84
3.11.3	Bewertung LOLIMOT	85
3.11.4	Bewertung MLP Netz	85
3.11.5	Einsatzbereich der Netztypen	86
4	Lernen bei statischer Funktionsapproximation	87
4.1	Gradientenabstiegsverfahren	90
4.1.1	Lerngesetz für das RBF und GRNN-Netz	92
4.1.1.1	Gradientenverfahren mit Momentum Term	93
4.1.1.2	Stabilität nach Lyapunov	93
4.1.1.3	Parameterkonvergenz	94
4.1.1.4	Fehlermodell 1 für das Gradientenabstiegsverfahren	95
4.1.2	Lerngesetz für das HANN	95
4.1.3	Lerngesetz für mehrschichtige Netze	98
4.1.3.1	Herleitung der Backpropagation-Regel	99
4.1.3.2	Zusammenfassung des BP-Algorithmus	103
4.1.3.3	Gradientenverfahren bei mehrschichtigen Netzen	104
4.1.3.4	Gradientenverfahren mit Momentum Term	105
4.1.3.5	Beispiele	105
4.1.4	Probleme beim einfachen Gradientenabstieg	111
4.1.4.1	Lokale Minima der Fehlerfläche	112
4.1.4.2	Flache Plateaus	113
4.1.4.3	Oszillationen in steilen Schluchten	114
4.1.4.4	Verlassen guter Minima	114
4.2	Lerngesetz: Least-Squares-Verfahren	115
4.2.1	Nichtrekursiver Least-Squares-Algorithmus (LS)	115
4.2.2	Rekursiver Least-Squares-Algorithmus (RLS)	116
4.2.3	Weighted-Least-Squares-Algorithmus (WLS)	119
4.2.4	Anwendung des Least-Squares-Algorithmus zur Parameteroptimierung bei RBF-Netzen	120
4.2.5	Bewertung des Least-Squares-Algorithmus	121

5	Lernfähiger Beobachter	123
5.1	Strecken mit isolierter Nichtlinearität	123
5.2	Beobachterentwurf bei messbarem Eingangsraum	125
5.2.1	Voraussetzungen	125
5.2.2	Beobachterentwurf zur Identifikation der Nichtlinearität	126
5.2.3	Parameterkonvergenz	133
5.3	Beobachterentwurf bei nicht messbarem Eingangsraum	134
5.3.1	Zusätzliche Voraussetzung	134
5.3.2	Beobachteransatz analog Luenberger	134
5.4	Zweimassensystem mit Reibung	137
5.5	Identifikation mehrerer Nichtlinearitäten	143
5.6	Ergänzung: Fehlermodelle	146
5.6.1	Fehlermodell 1	146
5.6.2	Fehlermodell 2	148
5.6.3	Fehlermodell 3	148
5.6.4	Fehlermodell 4	150
5.7	Anwendung auf einen Vorschubantrieb	152
5.7.1	Modellbildung	153
5.7.2	Identifikation der Reibungskennlinie	156
5.7.3	Kompensation	161
5.8	Identifikation von Hysterese	167
5.8.1	Modellierung der Hysterese	167
5.8.2	Physikalisch motiviertes Modell der Hysterese	168
5.8.3	Parametrierung	170
5.8.4	Verallgemeinertes Hysteresemodell	170
5.8.5	Der allgemeingültige Signalflußplan	171
5.8.6	Identifikation von Hysterese	173
5.9	Zusammenfassung und Bewertung	174
6	Identifikation mit vorstrukturierten rekurrenten Netzen	177
6.1	Strukturierte rekurrente Netze	178
6.1.1	Anwendung der Transformation	178
6.1.2	Parameteradaption	180
6.1.3	Zustandsdarstellung	182
6.2	Erweiterung zum Luenberger-Beobachter	187
6.2.1	Partielle Ableitungen	189
6.2.2	Implementierung der statischen Neuronalen Netze	192
6.2.3	Anwendung der Beobachterstruktur	192
6.2.4	Durchführung der Identifikation	194
6.3	Beurteilung des Identifikationsverfahrens	198
6.4	Anwendungsbeispiel	200
6.4.1	Losmodellierung und Approximation	200
6.4.2	Approximation der Reibungskennlinie	204

6.4.3	Identifikation des losebehafteten Zweimassensystems	205
6.4.4	Identifikation	208
7	Identifikation linearer dynamischer Systeme	213
7.1	Grundlagen der Identifikation	213
7.1.1	Parametrische und nichtparametrische Identifikationsverfahren .	213
7.1.2	Identifikation	214
7.2	Lineare dynamische Modellstrukturen	216
7.2.1	Modelle mit Ausgangsrückkopplung	218
7.2.1.1	Autoregressive with Exogenous Input Model	218
7.2.1.2	Output Error Model	221
7.2.2	Modelle ohne Ausgangsrückkopplung	223
7.2.2.1	Finite Impulse Response Model	224
7.2.2.2	Orthonormal Basis Function Model	225
7.3	Identifikationsbeispiele	230
7.3.1	ARX-Modell	230
7.3.2	OE-Modell	232
7.3.3	FIR-Modell	234
7.3.4	OBF-Modell	237
7.4	Zusammenfassung	240
8	Identifikation nichtlinearer dynamischer Systeme	241
8.1	Klassifikation nichtlinearer dynamischer Systeme	243
8.1.1	Nichtlineare Zustandsdarstellung	243
8.1.2	Blockorientierte nichtlineare Modelle	243
8.1.3	Allgemeine nichtlineare Systembeschreibung	244
8.2	Verfahren zur Identifikation nichtlinearer dynamischer Systeme	244
8.2.1	Nichtlineare Modelle mit Ausgangsrückkopplung	250
8.2.1.1	Time Delay Neural Network	251
8.2.1.2	Local Linear Model Tree	252
8.2.2	Nichtlineare Modelle ohne Ausgangsrückkopplung	255
8.2.2.1	Volterra-Funktionalpotenzreihe	255
8.2.2.2	Hammerstein-Modell und Wiener-Modell im Ansatz der Volterra-Funktionalpotenzreihe	258
8.2.2.3	Eigenschaften der Volterra-Funktionalpotenzreihe	260
8.2.2.4	Volterra-Funktionalpotenzreihe mit Basisfunktionen	262
8.2.2.5	Allgemeiner Ansatz für Wiener- und Hammerstein-Modelle . .	265
8.2.2.6	Erweiterung des Identifikationsansatzes	266
8.2.2.7	Rekonstruktion der blockorientierten Modellstruktur	267
8.2.3	Anregungssignale zur Identifikation	271
8.3	Zusammenfassung	274

9	Beobachterentwurf bei dynamischen Nichtlinearitäten	275
9.1	Systeme mit dynamischen Nichtlinearitäten	277
9.2	Beobachterentwurf	279
9.2.1	Beobachterentwurf bei messbarem Eingangsraum der dynamischen Nichtlinearität	281
9.2.2	Beobachterentwurf bei nicht messbarem Eingangsraum der dynamischen Nichtlinearität	285
9.3	Identifikation von global integrierenden Systemen	288
9.4	Simulationsbeispiel für Beobachterentwurf	294
9.5	Identifikation eines mechatronischen Antriebssystems	300
9.5.1	Identifikation in der Simulationsumgebung	303
9.5.2	Validierung am realen System	308
9.6	Zusammenfassung	310
10	Nichtlineare Optimierung in der Systemidentifikation	311
10.1	Optimierungsverfahren 0. Ordnung	313
10.1.1	Die Simplex-Methode	313
10.1.2	Das Hooke-Jeeves-Tastverfahren	316
10.2	Verfahren zur Liniensuche	318
10.2.1	Ein klassisches Liniensuchverfahren mit Intervallsuchphase und Intervallverkleinerungsphase	320
10.2.1.1	Die Intervallsuchphase	320
10.2.1.2	Die Intervallverkleinerungsphase	322
10.2.2	Adaptives Liniensuchverfahren mit Lagrange-Interpolation	328
10.3	Optimierungsverfahren 1. Ordnung	336
10.3.1	Gradientenabstieg mit Momentumterm	340
10.3.2	Gradientenabstieg mit variabler Lernschrittweite	342
10.4	Optimierungsverfahren 2. Ordnung	344
10.4.1	Das Nichtlineare Konjugierte Gradientenverfahren	344
10.4.2	Das Skalierte Konjugierte Gradientenverfahren	348
10.4.3	Das Newton-Verfahren	355
10.4.3.1	Konvergenz des Newton-Verfahrens	356
10.4.3.2	Hessematrixberechnung beim Newton-Verfahren	358
10.4.4	Die Quasi-Newton-Verfahren	359
10.4.4.1	Die Quasi-Newton-Bedingung	359
10.4.4.2	Die Aufdatierungsformel von Broyden	361
10.4.4.3	Die DFP-Aufdatierungsformel	362
10.4.4.4	Die BFGS-Aufdatierungsformel	363
10.4.5	Levenberg-Marquardt-Algorithmus	368
10.5	Zusammenfassung: Deterministische Optimierungsverfahren	370
10.5.1	Konvergenz der Parameter	371
10.5.2	Rechen- und Speicheraufwand	372
10.5.3	Aufwand bei der Implementierung	372

10.5.4	Ergebnisse des Optimierungsbeispiels	372
10.6	Identifikationsbeispiele	373
10.6.1	Identifikation einer statischen Reibkennlinie	373
10.6.2	Identifikation von stark verrauschten Messdaten	375
11	Stochastische Optimierungsverfahren	377
11.1	Simulated Annealing	377
11.2	Evolutionsstrategien	382
11.3	Particle Swarm Optimization	390
11.4	Stochastische Optimierungsverfahren bei der Identifikation mit Neuronalen Netzen	394
12	Robuste Parameterschätzung für reale Anwendungen (Simon Altmannshofer, Christian Endisch)	399
12.1	Robuste Parameterschätzung	400
12.1.1	Robustheit gegen Messausreißer	400
12.1.1.1	Messausreißer und stochastische Verteilung der Modellfehler . .	401
12.1.1.2	Robustheit gegenüber Messausreißern durch M-Schätzer	409
12.1.2	Robustheit gegen mangelnde Anregung	430
12.1.2.1	Systemanregung und Windup-Effekt	430
12.1.2.2	Anti-Windup-Methoden	433
12.1.3	Berücksichtigung von Parameterbeschränkungen	444
12.1.3.1	Einfache Parameterbeschränkung durch Projektion	444
12.1.3.2	Optimale Parameterbeschränkung durch Transformation und Projektion	446
12.1.3.3	Optimale Parameterbeschränkung über Lagrange-Funktion . . .	447
12.1.3.4	Parameterbeschränkung durch weiche Grenzen	448
12.1.4	Zusammenfassung der robusten Parameterschätzung	450
12.2	Anwendung der robusten Parameterschätzung an einem Elektrofahrzeug	451
12.2.1	Parameterschätzung der Fahrzeug-Längsdynamik	452
12.2.1.1	Modellierung der Fahrzeug-Längsdynamik	452
12.2.1.2	Ergebnisse der Parameterschätzung für die Längsdynamik . . .	454
12.2.2	Parameterschätzung für Asynchronmaschinen	456
12.2.2.1	Modellierung der Asynchronmaschine	456
12.2.2.2	Identifizierbarkeits-Analyse der Schätzung von Asynchronmaschinen-Parametern	460
12.2.2.3	Messergebnisse an der Asynchronmaschine	463
12.2.3	Parameterschätzung für Batterien	468
12.2.3.1	Modellierung der Batterie	468
12.2.3.2	Ergebnisse der Parameterschätzung für eine Batterie	470

13	Verfahren zur Regelung nichtlinearer Systeme	473
13.1	Relativgrad und Ordnung	473
13.2	Nulldynamik	475
13.2.1	Nulldynamik bei linearen Systemen	476
13.2.2	Auswirkung von Nullstellen auf die Impulsantwort	477
13.2.3	Auswirkung von Nullstellen auf den geschlossenen Regelkreis	479
13.2.4	Unterdrückung von Eingangssignalen durch Nullstellen	481
13.2.5	Nulldynamik im nichtlinearen System	484
13.2.6	Analogie zwischen Kompensation der Nulldynamik und Pol-Nullstellen- Kürzung	485
13.2.7	Zusammenfassung	490
13.3	Nichtlineare Regelungsnormalform	490
13.3.1	Beispiel zur NRNF	494
13.4	Exakte Ein-/Ausgangslinearisierung	496
13.4.1	Beispiel zur exakten Ein-Ausgangslinearisierung	498
13.4.2	Beispiel zur exakten Ein- Ausgangslinearisierung mit Reglerentwurf	503
13.5	Regelung auf ein Referenzsignal (Tracking)	511
13.5.1	Beispiel zur Regelung auf ein Referenzsignal	512
13.5.2	Wahl des Referenzsystems	523
13.6	Der Einsatz von neuronalen Beobachtern	529
13.6.1	Anwendung auf das nichtlineare System 2. Ordnung	530
13.6.2	Simulationsergebnis	531
13.6.3	Anwendung auf Regelung mit NRNF	532
13.6.4	Simulationsergebnisse	534
13.6.5	Kurzzusammenfassung: NRNF und lernfähiger Beobachter	534
13.7	Ein-Ausgangslinearisierung zur neuronalen Regelung	535
13.7.1	Erlernen der Input-Output Linearisierung mit Neuronalen Netzen	537
13.7.2	Regelung einer nichtlinearen Strecke zweiter Ordnung	538
13.8	Stabile referenzmodellbasierte Neuroregelung (SRNR)	542
13.8.1	Parameteradaption	546
13.8.2	Stellgrößen-Beschränkung	546
13.8.3	Aufteilung in Teilfunktionen	547
14	Modellbasierte Adaptive Regelung (Christian Westermaier)	549
14.1	ARMA-Modell als Prädiktionsmodell	552
14.2	Systemidentifikation	560
14.2.1	Projektionsalgorithmus	563
14.2.2	Rekursiver Least-Squares-Algorithmus (RLS)	574
14.3	Entwurf des adaptiven Regelkreises	579
14.3.1	Inverser Regler mit integrierter Systemidentifikation	580
14.3.2	Stabilitätsuntersuchung des geschlossenen Regelkreises	583
14.4	Adaptive Regelung eines Zwei-Massen-System	587

15	Disturbance Rejection	595
15.1	Linear Disturbance Rejection	596
15.1.1	Deterministic Disturbances	596
15.1.2	Stochastic Disturbances	600
15.1.2.1	A Qualitative Analysis	601
15.1.2.2	Stochastic Adaptive Control	607
15.2	Nonlinear Disturbance Rejection	611
15.3	Time-Varying Disturbances	615
15.3.1	Multi-Model Adaptive Control	617
15.3.1.1	General Methodology	617
15.3.1.2	Models	619
15.3.1.3	Switching and Tuning	620
15.3.1.4	Control	621
15.3.1.5	Benefits	621
15.3.2	Proof of Stability	624
15.3.2.1	Case (i): All adaptive models	624
15.3.2.2	Case (ii): One adaptive model and one fixed model	625
15.3.2.3	Case (iii): (N-2) fixed models and 2 adaptive models	626
15.4	Mathematical background	627
15.4.1	Nonlinear Differential Equations	627
15.4.2	Concepts from Analysis	627
15.4.3	Existence and uniqueness	634
15.4.4	Lyapunov's direct method	638
15.4.5	LTI Systems and Lyapunov Stability	644
15.4.6	Barbalat's Lemma	646
16	Lernende Automaten	
	(Paul Kotyczka, Matthias Feiler)	649
16.1	Einleitung	649
16.2	Mathematische Grundlagen	650
16.2.1	Stochastische Prozesse	650
16.2.2	Markov-Ketten	651
16.2.3	Konvergenzbegriffe	657
16.3	Automaten	658
16.3.1	Automat und Umgebung	659
16.3.2	Nützlichkeit und Optimalität	662
16.3.3	Stochastische Automaten veränderlicher Struktur	664
16.3.3.1	Ein ergodisches Lerngesetz: <i>Linear Reward-Penalty</i>	666
16.3.3.2	Ein absolut nützliches Lerngesetz: <i>Linear Reward-Inaction</i>	670
16.3.3.3	Ein Kompromiss: Der <i>$L_{R-\varepsilon P}$-Algorithmus</i>	674
16.3.4	Ein deterministischer Automat mit fester Struktur	676
16.4	Prognose stochastischer Parameterwechsel	680
16.4.1	Regelung mit multiplen Modellen	680

16.4.2	Stochastische Parameterwechsel	682
16.4.3	Erweiterte Regelungsstruktur	684
16.4.4	Quantifizierung der erreichten Regelgüte	685
16.4.5	Simulationsbeispiel	687
17	Concurrent Learning (Stefan Kersting)	689
17.1	Adaptive Regelung und Identifikation kontinuierlicher Zustands- raummodelle	690
17.1.1	Beständige Anregung	690
17.1.2	Adaptive Regelung	692
17.1.3	Parameter Identifikation	694
17.2	Concurrent Learning	696
17.2.1	Einführung in Concurrent Learning	696
17.2.2	Parameter Identifikation mit Concurrent Learning	698
17.2.3	Adaptive Regelung mit Concurrent Learning	702
17.2.4	Concurrent Learning mit History Stack Management	704
17.3	Anwendungsbeispiel	706
17.4	Zusammenfassung	708
18	Hochverstärkungsbasierte Regelung	711
18.1	Grundidee der hochverstärkungsbasierten Regelung	712
18.2	Auswirkung großer Verstärkungen im Regelkreis	714
18.3	Empfindlichkeit gegenüber hohen Relativgraden	719
18.4	Funnel-Control	722
18.5	Hochverstärkungsbasierte Regelung mit zeitvarianter Verstärkung	730
18.6	Anwendung am Beispiel Einmassensystem	731
18.7	Internes Modell für eine stationär genaue Regelung	731
18.8	Allgemeines zur Regelung mit Funnel-Control	738
18.9	Funnel-Regelung für das lineare Zweimassensystem	739
18.9.1	Antriebsdrehzahl als Regelgröße	740
18.9.2	Arbeitsmaschinendrehzahl als Regelgröße	743
18.9.3	Zustandsregler mit Funnel	744
18.10	Funnel-Regelung für das nichtlineare Zweimassensystem	758
18.11	Ergebnisse mit Filter und Integralanteil	774
19	Funnel-Control: Implementierung, Erweiterung und An- wendung (Christoph M. Hackl)	777
19.1	Funnel-Control (FC)	779
19.1.1	Trichterentwurf: Trichterfunktion und Trichterrand	782
19.1.2	Referenz- bzw. Sollwertsignale	788
19.1.3	Systemklasse \mathcal{S}	790

19.1.3.1	LTI SISO Systeme der Klasse \mathcal{S}	793
19.1.3.2	Beispielsysteme	797
19.1.4	Regelziel	803
19.2	Kundenanforderungen	803
19.3	Skalierung der Reglerverstärkung	807
19.4	Minimale zukünftige Distanz (MD)	811
19.4.1	Analytischer Ansatz (aMD)	813
19.4.2	Numerischer Ansatz (nMD)	815
19.4.3	Differenzierender Ansatz (dMD)	817
19.4.4	Simulationsbeispiele	819
19.5	Error Reference Control (ERC)	820
19.6	Anwendung	825
19.6.1	Nichtlineares Zwei-Massen-System (2MS)	825
19.6.2	Aktive Dämpfung durch statische Zustandsrückführung	829
19.6.3	Erweiterung des 2MS für Zugehörigkeit in \mathcal{S}	831
19.6.4	Messung und Bewertung der Ergebnisse	834
20	Einführung in die Fuzzy-Regelung	841
20.1	Grundlagen der Theorie der unscharfen Mengen	842
20.1.1	Definition der unscharfen Menge	842
20.1.2	Weitere Definitionen	843
20.1.3	Grundlegende Mengenoperationen für unscharfe Mengen	847
20.1.4	Modifikatoren	850
20.2	Grundlagen der unscharfen Logik	851
20.2.1	Einführung	851
20.2.2	Grundbegriffe der unscharfen Logik	854
20.2.3	Fuzzyfizierung und logisches Schließen	855
20.2.4	Logische Operatoren	857
20.3	Grundlagen der Fuzzy-Regelung	871
20.3.1	Fuzzyfizierung	873
20.3.2	Inferenz	875
20.3.3	Defuzzyfizierung	876
20.4	Anhang: Die „theoretische“ Darstellungsweise der unscharfen Logik	881
20.4.1	Grundlagen des plausiblen Schließens	883
20.4.2	Implikationsoperatoren	887
20.4.3	Berücksichtigung von Verbundaussagen und mehreren Regeln	888
20.4.4	Berücksichtigung zusätzlicher Unsicherheiten	891
20.4.5	Die „anwendungsorientierte“ unscharfe Logik als Spezialfall des plausiblen Schließens	891
	Literaturverzeichnis	893
	Stichwortverzeichnis	909