

Dipl.-Ing. Ralf Rothfuß, Zell

**Anwendung der
flachheitsbasierten
Analyse und Regelung
nichtlinearer
Mehrgrößensysteme**

Reihe **8**: Meß-, Steuerungs-
und Regelungstechnik

Nr. **664**

Inhaltsverzeichnis

Symbolverzeichnis	VIII
1 Einleitung	1
1.1 Problemstellung	1
1.2 Flache Systeme	3
1.3 Einordnung der flachheitsbasierten Methode	9
1.4 Ziele	11
1.5 Gliederung	13
2 Flachheitsbasierte Analyse und Synthese	15
2.1 Flachheit nichtlinearer Systeme	17
2.1.1 Definition der Flachheit	17
2.1.2 Weitere Eigenschaften und Bemerkungen zur Flachheit	22
2.1.3 Flachheitsanalyse eines Zwei-Gelenk-Roboters	26
2.2 Flachheitsbasierte Lösung des Trajektorienfolgeproblems	30
2.2.1 Entwurf von Solltrajektorien und Trajektorienfolge im offenen Kreis	30
2.2.2 Flachheit und Inversion nichtlinearer Systeme	35
2.2.3 Flachheit und Steuerbarkeit	36
2.2.4 Trajektorienfolge im geschlossenen Kreis	39
2.3 Exakte Zustandslinearisierung nichtlinearer Systeme	44
2.3.1 Äquivalenz durch endogene Zustandsrückführung	45
2.3.2 Flachheit und exakte Zustandslinearisierung	48
2.4 Zusammenfassung	51
3 Existenz und Bestimmung eines flachen Ausgangs	52
3.1 Strukturell flache Systemdarstellungen	53
3.1.1 Lineare zeitvariante Regelungsnormalform	54
3.1.2 Nichtlineare Regelungsnormalform	56
3.1.3 Verallgemeinerte nichtlineare Regelungsform	59

3.2	Transformation in strukturell flache Systemdarstellungen	65
3.2.1	Transformation in eine lineare zeitvariante Regelungsform	65
3.2.2	Transformation in eine nichtlineare Regelungsform	71
3.2.3	Transformation in eine verallgemeinerte nichtlineare Regelungsform	78
3.2.4	Weitere Existenzbedingungen eines flachen Ausgangs	84
3.3	Zusammenfassung	87
4	Entwurfsmethodik flachheitsbasierter Steuerungen und Regelungen	89
4.1	Entwurfsschritte für das Trajektorienfolgeproblem	89
4.2	Zustandsschätzung für flache Systeme	95
4.2.1	Nichtlinearer Beobachter mit zeitvarianter Verstärkung	97
4.2.2	Nichtlineares Filter mit zeitvarianter Verstärkung	102
4.3	Rechnerunterstützte Durchführung mittels eines Computer-Algebra-Systems	103
4.3.1	Funktionen eines Computer-Algebra-Systems für die flachheitsbasierten Entwurfsschritte	104
4.3.2	Funktionsbibliothek zur flachheitsbasierten Analyse und Synthese	108
4.4	Zusammenfassung	110
5	Anwendungsbeispiele für die flachheitsbasierte Trajektorienfolge	111
5.1	Fedbatch-Bioreaktor	111
5.1.1	Das Trajektorienfolgeproblem für den Bioreaktor	112
5.1.2	Bestimmung eines flachen Ausgangs für den Bioreaktor	116
5.1.3	Entwurf von Solltrajektorien	118
5.1.4	Statische Zustandsrückführung zur Stabilisierung des Trajektorienfolgefehlers	120
5.1.5	Nichtlineares Folgefilter mit zeitvarianter Verstärkung	121
5.1.6	Simulationsergebnisse	124
5.1.7	Experimentelle Ergebnisse	126
5.2	Chemischer Rührkesselreaktor	130
5.2.1	Das Trajektorienfolgeproblem für den Rührkesselreaktor	131
5.2.2	Heuristische Bestimmung eines flachen Ausgangs	133
5.2.3	Systematische Bestimmung eines flachen Ausgangs	136
5.2.4	Stationäre Analyse und Entwurf von Solltrajektorien	138
5.2.5	Quasi-statische Zustandsrückführung zur Stabilisierung des Trajektorienfolgefehlers	142
5.2.6	Nichtlinearer Folgebeobachter mit zeitvarianter Verstärkung	143
5.2.7	Simulationsergebnisse	146
5.3	Zusammenfassung	147

6 Zusammenfassung	150
A Ergänzungen zu den Transformationen in verschiedene Regelungsformen	153
A.1 Herleitung der Transformation in die lineare zeitvariante Regelungsform . . .	153
A.2 Herleitung der Transformation in die nichtlineare Regelungsform	155
A.3 Integrierbarkeit partieller Differentialgleichungen	157
B Ergänzungen zu strukturell flachen Systemen	160
B.1 Algorithmus zur Bestimmung eines flachen Ausgangs	160
B.2 Vergleich von Satz 3.7 und Satz 3.4	165
C Systemgrößen und Parameterwerte für die Simulation	168
C.1 Systemgrößen und Parameterwerte für den Bioreaktor	168
C.1.1 Systemgrößen und Parameterwerte für die Trophophase	168
C.1.2 Systemgrößen und Parameterwerte für die Idiophase	169
C.2 Systemgrößen und Parameterwerte für den Rührkesselreaktor	172
Literaturverzeichnis	173