

Dipl.-Ing. Friedemann Grupp, München

**Parameteridentifizierung  
nichtlinearer mechanischer  
Deskriptorsysteme mit  
Anwendungen in der  
Rad-Schiene-Dynamik**

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

Nr. **550**

# Inhalt

<b>1</b>	<b>Einleitung</b>	<b>1</b>
1.1	Problemstellung . . . . .	1
1.2	Existierende Arbeiten . . . . .	4
1.2.1	Lineare Parameteridentifizierung . . . . .	4
1.2.2	Identifizierung nichtlinearer Systeme . . . . .	5
1.3	Ziel und Gliederung der Arbeit . . . . .	7
<b>2</b>	<b>Beschreibung von Mehrkörpersystemen in Deskriptorform</b>	<b>9</b>
2.1	Struktur der Bewegungsgleichungen . . . . .	9
2.2	Ausgangsgleichung und Messungen . . . . .	11
2.3	Grundlagen differential-algebraischer Gleichungssysteme . . . . .	12
2.3.1	Differentieller Index von Mehrkörpersystemen . . . . .	12
2.3.2	Konsistenz der Anfangswerte und Lösbarkeit . . . . .	13
2.3.3	Numerische Lösung . . . . .	14
<b>3</b>	<b>Modellbildung und Parameteridentifizierung</b>	<b>16</b>
3.1	Deterministische und stochastische Modelle . . . . .	16
3.2	Fehler . . . . .	17
3.2.1	Fehlerursachen und Fehlerbildung . . . . .	17
3.2.2	Statistisches Wissen über den Fehler . . . . .	18
3.3	A priori Information über Parameter . . . . .	19
3.4	Bestimmung der Parameter und Schätzverfahren . . . . .	20
3.4.1	Punktschätzwerte . . . . .	21
3.4.2	Gütekriterien der Schätzverfahren . . . . .	23

<b>4</b>	<b>Minimierung mit Nebenbedingungen</b>	<b>26</b>
4.1	Methoden zur Minimierung ohne Nebenbedingungen . . . . .	26
4.1.1	Theoretische Grundlagen . . . . .	26
4.1.2	Minimierungsstrategien numerischer Verfahren . . . . .	27
4.2	Minimierung mit Nebenbedingungen . . . . .	31
4.2.1	Theoretische Grundlagen . . . . .	31
4.2.2	Numerische Verfahren für restringierte Minimierungsprobleme . . . . .	34
<b>5</b>	<b>Formulierung der Identifizierungsaufgabe als Minimierungsproblem</b>	<b>40</b>
5.1	Parameterschätzproblem . . . . .	40
5.1.1	Anfangswertansatz . . . . .	41
5.2	Mehrzielansatz zur Parameteridentifizierung . . . . .	42
5.2.1	Motivation . . . . .	42
5.2.2	Prinzip des Mehrzielansatzes . . . . .	43
5.2.3	Problemformulierung beim Mehrzielansatz . . . . .	44
5.3	Schätzung des gesamten Deskriptorvektors . . . . .	47
5.4	Schätzung eines erweiterten Deskriptorvektors . . . . .	48
5.5	Schätzung der Lage- und Geschwindigkeitskomponenten . . . . .	49
5.6	Schätzung in Minimalkoordinaten . . . . .	50
5.7	Gegenüberstellung der vier Problemformulierungen . . . . .	51
<b>6</b>	<b>Kinematisch konsistent erweiterte differential-algebraische Gleichungssysteme</b>	<b>54</b>
6.1	Motivation . . . . .	54
6.2	Modifikation des Systems . . . . .	55
6.3	Erweiterung für Systeme höheren Indexes . . . . .	55
6.4	Baumgarte-Stabilisierung und kinematisch konsistente Erweiterung . . . . .	57
6.5	Einfluß der Abklingkonstanten . . . . .	58
6.5.1	Einfluß der Abklingkonstanten $\alpha$ auf die Integration . . . . .	59
6.5.2	Beispiel: Kinematisch konsistente Erweiterung beim Pendel . . . . .	60
6.5.3	Einfluß der Abklingkonstanten $\alpha$ auf die Minimierung . . . . .	66
6.5.4	Beispiel: Parameteridentifizierung eines Lkw . . . . .	67
6.6	Zwischenbilanz . . . . .	69

<b>7</b>	<b>Realisierungsaspekte</b>	<b>70</b>
7.1	Reduzierung der Gleichungsnebenbedingungen . . . . .	70
7.2	Skalierung des Minimierungsproblems . . . . .	72
7.2.1	Skalierung der Variablen . . . . .	72
7.2.2	Skalierung des Gütekriteriums . . . . .	74
7.2.3	Skalierung der Minimierungsnebenbedingungen . . . . .	75
7.3	Gradientenberechnung . . . . .	76
7.3.1	Finite Differenzen Approximation der Gradienten . . . . .	77
7.3.2	Trajektorienvariation mit indirekt festgehaltener Diskretisierung . . . . .	80
7.3.3	Modifikation von ODASSL zur Trajektorienvariation . . . . .	82
7.4	Statistische Analyse der Parameteridentifizierung . . . . .	84
7.4.1	Kovarianzmatrix der geschätzten Parameter . . . . .	85
7.4.2	Numerische Berechnung der Hesse-Matrix . . . . .	87
7.4.3	Konfidenzgebiete und Konfidenzintervalle . . . . .	88
7.5	Koordinatenwahl und Minimierung . . . . .	89
7.6	Implementierung . . . . .	91
7.7	Untersuchungen an einem Testbeispiel . . . . .	94
7.7.1	Testbeispiel . . . . .	94
7.7.2	Einfluß des Meßzeitintervalls . . . . .	95
7.7.3	Mehrzielansatz . . . . .	96
7.7.4	Einfluß der kinematisch konsistenten Erweiterung . . . . .	99
7.7.5	Bewertung der Ergebnisse . . . . .	99
<b>8</b>	<b>Parameteridentifizierung eines Drehgestells</b>	<b>101</b>
8.1	Generisches Drehgestell und Rollprüfstand . . . . .	101
8.1.1	Modellierung des Drehgestell-Rollprüfstands . . . . .	103
8.1.2	Modellierung des Rad-Schiene-Kontakts . . . . .	106
8.2	Meßkonfiguration . . . . .	114
8.2.1	Beobachtbarkeit . . . . .	117
8.2.2	Behandlung der nicht-beobachtbaren Zustände . . . . .	119
8.3	Experimente . . . . .	119
8.3.1	Meßwerterfassung . . . . .	119
8.3.2	Versuchsdurchführung . . . . .	120
8.3.3	Einfluß von Störungen . . . . .	121

8.4	Vorgehensweise bei der Identifizierung . . . . .	123
8.4.1	Anpassung der Modellierung . . . . .	126
8.4.2	Modifikation der Messungen . . . . .	129
8.4.3	Schätzverfahren . . . . .	130
8.4.4	Anwendung von Mehrziel- und Anfangswertansatz . . . . .	130
8.5	Ergebnisse . . . . .	131
8.5.1	Parameter . . . . .	131
8.5.2	Anfangswerte . . . . .	140
<b>9</b>	<b>Zusammenfassung und Ausblick</b>	<b>142</b>
9.1	Beiträge dieser Arbeit . . . . .	143
9.1.1	Zur praktischen Anwendung . . . . .	144
9.2	Weiterführende Arbeiten . . . . .	144
	<b>Anhang</b>	<b>146</b>
A1	Drehgestell: Details und Daten . . . . .	146
A1.1	Abschätzung der Primärfedersteifigkeit . . . . .	146
A1.2	Steifigkeit der Inertialfesselung . . . . .	147
A1.3	Kinematik des Viergelenks . . . . .	148
A1.4	Geometrie-Daten . . . . .	149
A1.5	Materialwerte für Rad-Schiene-Kontakt . . . . .	149
A1.6	Massen und Massenträgheitsmomente der Körper . . . . .	150
A1.7	Startwerte . . . . .	151
A2	Meßaufnehmer und Meßwerterfassungsanlage . . . . .	152
A2.1	Meßkonfiguration . . . . .	152
A2.2	Optische Wegaufnehmer . . . . .	154
A2.3	Induktive Wegaufnehmer . . . . .	155
A2.4	Beschleunigungsaufnehmer . . . . .	155
A2.5	Meßwerterfassungsanlage . . . . .	156
	<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>157</b>