

Inhaltsverzeichnis

1	Einführung	1
1.1	Maritime Regelungs- und Sensorsysteme	1
1.2	Grundstruktur maritimer Regelungsprozesse	2
1.3	Technischer Stand und Klassifizierung maritimer Regelungs- und Sensorsysteme	4
1.3.1	Regelungs- und Sensorsysteme für das „Tracking“ maritimer Fahrzeuge im Rahmen der Transittfahrt	5
1.3.2	Regelungssysteme für das Manövrieren von maritimen Fahrzeugen	8
1.3.3	Regelungssysteme für unbemannte, autonome Oberflächenfahrzeuge (<i>Unmanned Surface Vehicle-USV</i>)	9
1.3.4	Regelung unbemannter, autonomer Unterwasserfahrzeuge (<i>Unmanned Underwater Vehicles/UUV</i>)	9
1.3.5	Dynamische Positionierungsregelungssysteme (<i>DP Control</i>) von Offshore-Fahrzeugen und -objekten	10
1.3.6	Modellbildung und Regelung von Bodeneffektfahrzeugen	11
1.4	Prozesseigenschaften und Besonderheiten maritimer Regelungs- und Sensorsysteme	11
1.5	Überblick zur Stoffdarstellung im Buch	15
	Literatur	18
2	Praktische Beispiele für maritime Regelungs- und Sensorsysteme	21
2.1	Automatische Kursregelungssysteme (<i>Heading Control Systems</i>)	21
2.1.1	Historische Entwicklung	21
2.1.2	Aufgaben der Kursregelung	25
2.1.3	Die Regelgröße Kurs	25
2.1.4	Wirkungsprinzip der Kursregelung	26
2.1.5	PID-Kursregler mit Seegangfilter, Parametereinstellungen	31
2.1.6	Der Mensch als Regler	37
2.1.7	Besonderheiten der Kursregelungssysteme	39

2.1.8	Zielstellungen beim Einsatz automatischer Kursregelungssysteme	41
2.2	Hierarchischer Aufbau maritimer Regelungssysteme-Mehrebenenregelung	42
	Literatur	45
3	Physikalisch-mathematische Bewegungsmodelle maritimer Fahrzeuge als Regelungsobjekt	47
3.1	Einführung zu Bewegungsmodellen der Fahrzeugdynamik	47
3.2	Variablen, Freiheitsgrade und Bezugssysteme der Bewegung maritimer Fahrzeuge	50
3.2.1	Vektoren zur Beschreibung der Bewegung von maritimen Fahrzeugen	50
3.2.2	Das maritime Fahrzeug als starrer Körper	52
3.2.3	Bezugssysteme und Koordinatensysteme	53
3.2.4	Körperfestes Bezugssystem	56
3.2.5	Erdfestes Bezugssystem	61
3.3	Transformationen zwischen Bezugssystemen (Kinematik)	65
3.3.1	Eulerwinkel	65
3.3.2	Mathematische Transformation der Geschwindigkeitskomponenten vom erdfesten in das körperfeste Koordinatensystem (Sechs-Freiheitsgrade-Kinematik)	65
3.3.3	Beispiel: Transformation der im erdfesten Bezugssystem definierten Schwerkraft in das körperfeste Bezugssystem.	68
3.3.4	Inverse Transformation vom körperfesten in das erdfeste Bezugssystem	69
3.4	Nichtlineare Sechs-Freiheitsgrade-Bewegungsmodelle für maritime Fahrzeuge (Newton–Euler- und Kirchhoff’sche Gleichungen)	70
3.4.1	Newton–Euler-Bewegungsgleichungen im erdfesten Bezugssystem (Inertialsystem) für das maritime Fahrzeug als starrer Körper (Kinetik)	70
3.4.2	Newton–Euler-Bewegungsgleichungen im körperfesten Bezugssystem	73
3.4.3	Hydrodynamische Massen (<i>Added Masses</i>) und hydrodynamische Trägheitsmomente (<i>Added Inertia Moments</i>)	77
3.4.4	Kirchhoff’sche Bewegungsgleichungen bei Beschleunigungseinwirkung für sechs Freiheitsgrade	83
3.4.5	Externe Kräfte und Momente	85
3.4.6	Bahngleichungen (Kinematik)	86

3.4.7	Matrixgleichung für die allgemeine Bewegung im körperfesten Bezugssystem.	87
3.4.8	Regelungstechnische Interpretation der Matrixgleichung	89
3.4.9	Anwendungen des Sechs-FHG-Bewegungsmodells	89
3.5	Nichtlineare Drei-Freiheitsgrade-Bewegungsmodelle maritimer Fahrzeuge.	90
3.5.1	Reduzierung der Zahl der Freiheitsgrade.	90
3.5.2	Kirchhoff'sche Bewegungsgleichungen für drei Freiheitsgrade (Kinetik).	94
3.5.3	Nichtlineare externe Kräfte- und Momentenpolynome für drei Freiheitsgrade	95
3.5.4	Bahngleichungen (Kinematik).	101
3.5.5	Matrix-Bewegungsmodell für drei Freiheitsgrade.	103
3.5.6	Anwendungen des Drei-Freiheitsgrade-Bewegungsmodells ...	104
3.6	Kräfte- und Momentenmodelle für Stellsysteme (Aktoren)	105
3.6.1	Einteilung der Aktoren.	105
3.6.2	Konventionelle Schraubenpropeller.	106
3.6.3	Ruder als Steuerorgan	111
3.6.4	Querstrahlruder als Manövrierhilfen	117
3.6.5	Manövriersysteme	118
3.7	Lineare Bewegungsgleichungen	124
3.7.1	Grundlegendes zur Linearisierung.	124
3.7.2	Linearisierung der nichtlinearen Bewegungsgleichungen für Querkraft und Giermoment	126
3.7.3	Berechnung der linearen Querkraft und des linearen Giermoments am Fahrzeugkörper mittels der Näherungstheorie des schlanken Körpers	129
3.7.4	Lineares Matrixmodell.	132
3.8	Kräfte- und Momentenwirkungen bei einem Drehkreismanöver	133
	Literatur.	135
4	Regelungstechnische Modelle maritimer Fahrzeuge	139
4.1	Lineares Richtungssteuerungsmodell und seine Simulation	139
4.1.1	Gleichung für die Zustandsvariable Gierwinkel	139
4.1.2	Gleichung für die Zustandsvariable Kurswinkelgeschwindigkeit.	140
4.1.3	Bahnabstandmodell	140
4.1.4	Simulation des linearen Richtungssteuerungsmodells und Regelstreckenhierarchie	142
4.2	Lineare Differenzialgleichungen für Kurswinkelgeschwindigkeit, Gierwinkel, Kurs und Bahnabstand	146
4.2.1	Einführung in die Laplace-Transformation	146

4.2.2	Ermittlung linearer Differenzialgleichungen für Kurswinkelgeschwindigkeit, Kurs, Gierwinkel, Bahnwinkel und Bahnabstand mittels Laplace-Transformation	150
4.2.3	Lösungen der homogenen Differenzialgleichungen für Kurswinkelgeschwindigkeit, Gierwinkel und Kurs sowie Analyse des Eigenstabilitätsverhaltens (dynamische Gierstabilität)	153
4.2.4	Zusammenhänge zwischen der stationären Kennlinie (Spiralkennlinie), der dynamischen Gierstabilität und der Drehfähigkeit eines maritimen Fahrzeugs	160
4.3	Übertragungsfunktionen für die Kurswinkelgeschwindigkeit-, Kurs- und Gierwinkel-Regelstrecken des maritimen Fahrzeugs	163
4.3.1	Übertragungsfunktionen in Polynomform	163
4.3.2	Übertragungsfunktionen in Pol-Nullstellenform	166
4.3.3	Übertragungsfunktionen in Zeitkonstantenform	169
4.3.4	Übertragungsfunktionen mit reduzierter Ordnung	174
4.3.5	Testfunktionen: Sprungantwortfunktionen und Frequenzgangfunktionen der Kurswinkelgeschwindigkeit- und Kurs-Regelstrecke	179
4.4	Modelle für die Bahnabstand-Regelstrecke (Übertragungsfunktionen, Frequenzgänge, Sprungantwortfunktionen)	186
4.4.1	Bahnabstand-Übertragungsfunktionen	186
4.4.2	Bahnabstandsmodell mit Einführung eines Allpasselements ...	191
4.4.3	Bahnabstand-Übertragungsfunktion mit Kurs- und Gierwinkel-Übertragungsfunktionen reduzierter Ordnung	195
4.5	Kontinuierliche Zustandsgleichungen	196
4.5.1	Einführung	196
4.5.2	Zustandsgleichung für Richtungssteuerungsmodell	198
4.5.3	Zustandsgleichung für Kurs-Regelstrecke 2. Ordnung	200
4.5.4	Zustandsgleichung für Kurs-Regelstrecke 3. Ordnung	201
4.5.5	Allgemeine Lösung der inhomogenen Zustandsgleichung	203
4.5.6	Lösung der Zustandsgleichung mit Fundamentalmatrix	205
4.5.7	Lösung der Zustandsgleichung für Kursregelstrecke 2. Ordnung	206
4.5.8	Zusammenhang zwischen Zustandsgleichung und Übertragungsmatrix bzw. Übertragungsfunktion	207
4.6	Kurs-Modell für gierinstabile maritime Fahrzeuge	209
4.7	Zeitdiskrete Modelle	211
4.8	Parametervariables Modell für Manöverfahrt	215
4.8.1	Vorbetrachtung	215

4.8.2	Modellgrundlage und Parametervariabilität	218
4.8.3	Praktische Modellstrukturierung	221
	Literatur	223
5	Ruder-Regelungssysteme	225
5.1	Wirkungsprinzip von Ruder-Regelungssystemen	225
5.2	Regelungs-Betriebsarten (<i>Control-Modes</i>)	226
5.3	Elektrohydraulische Rudermaschinen	228
5.4	Mathematisches Modell eines Folge(FU)-Ruder-Regelungs-Systems	230
	Literatur	235
6	Experimentelle Systemidentifikation von Bewegungsmodellen maritimer Fahrzeuge	237
6.1	Einführung	237
6.2	Grundstruktur der Identifikation	239
6.3	Klassifikation von Identifikationsverfahren in Abhängigkeit der verwendeten Testsignale	240
6.4	Identifikation der Steuerparameter K_S und T_S des IT1-Kursmodells durch Bordtests mit determinierten Testsignalen und ihre Interpretation als Gütemaße für die Praxis.	243
6.4.1	Algorithmen der Identifikation der Steuerparameter K_S und T_S mit Sprungantworttest für Kurs und Gier-Drehrate	243
6.4.2	Testbedingungen	249
6.4.3	Qualitätseinschätzungen zu Steuerparametern.	249
6.5	Identifikation der Steuerparameter K_S und T_S auf seegehenden Fahrzeugen unterschiedlicher Größe mit determinierten Testsignalen	250
6.6	Grundlagen ausgewählter statistischer Parameterschätzverfahren (<i>Parameter Estimation Methods</i>)	257
6.7	Vergleich unterschiedlicher Parameterschätzverfahren mit synthetischen, gestörten Daten	267
6.8	Vergleich unterschiedlicher Parameterschätzverfahren mit gestörten Borddaten des Ausbildungs- und Forschungsschiffs AS „Klaus Störtebeker“	269
6.9	Parameterschätzung des parametrischen Kursmodells 2. Ordnung des unbemannten, autonomen Oberflächenfahrzeugs (<i>Unmanned Surface Vehicle/USV</i>) Messdelphin (MESSIN) mit PEM-Schätzmethode	271
6.10	Parameterschätzung von Kurs- und Bahnabstandmodellen auf Containerschiffen Typ Warnow CS 1400.	274

6.11	Schätzung des Richtungssteuerungsmodells von Containerschiff MS „Nordwelle“, Typ Warnow CS 1400/Bau-Nr. 421	279
6.12	Notwendige Testmanöver zur Parametrierung des parametervariablen Modells für die Manöverfahrt	279
6.13	Bedatung des parametervariablen Modells	283
6.13.1	Iterativer Ansatz zur Parameterschätzung	283
6.13.2	Umsetzung des parametervariablen Modells und Verifikation der Bedatung	288
	Literatur	291
7	Störgrößenmodelle	293
7.1	Übersicht zu Störgrößen	293
7.2	Windbedingter Seegang	294
7.2.1	Einführung	294
7.2.2	Beschreibung der stochastischen, irregulären Windsee	296
7.2.3	Modellansätze für seegangsbedingte Störgrößen in maritimen Regelkreisen	305
7.3	Wind	318
7.3.1	Einführung	318
7.3.2	Berechnung der Windkräfte bei stationärem Windeinfluss	321
7.3.3	Modellansätze für stationären Windeinfluss, weitere stationäre Störgrößen und Windböen in maritimen Regelkreisen	324
7.4	Meeresströmungen	329
	Literatur	333
8	Kurssensoren (Kompass)	337
8.1	Überblick zu Kurssensoren	337
8.2	Kurs als Messgröße	338
8.3	Kreiselkompass (<i>Gyro Compasses</i>)	341
8.3.1	Einführung	341
8.3.2	Historische Entwicklung des Kreiselkompasses	342
8.3.3	Definition des Kreiselkurses und Kreiselgrundgrößen	344
8.3.4	Verhalten eines freien Kreisels auf der Erde	345
8.3.5	Umwandlung des kräftefreien Kreisels in einen nordsuchenden Kreiselkompass	348
8.3.6	Prinzipaufbau eines elektronischen Kreiselkompasses und Einschwingverhalten des ungedämpften elektronischen Kreiselkompasses	349
8.3.7	Elektronischer Kreisel mit Dämpfungseinrichtung	352
8.3.8	Kreiselkompassfehlweisungen	355
8.4	Satellitenkompass (<i>Satellite Compasses</i>)	357
8.5	Faseroptik-Kreisel (<i>Fiber-Optic Gyroscopes, FOG</i>)	358

8.6	Redundante Mehrfachkompasssysteme (<i>Multiple Compass Systems</i>)	360
	Literatur	361
9	Geschwindigkeitssensoren (Logs)	363
9.1	Einführung	363
9.2	Klassifikation von Geschwindigkeitssensoren	364
9.3	Elektromagnetische Geschwindigkeitssensoren (Elektromagnetische/EM-Logs, Induktionslogs)	366
9.3.1	Messprinzip	366
9.3.2	Messfehler und ihre Korrektur	372
9.4	Doppler-Sonar-Geschwindigkeitssensoren (Dopplerlogs)	377
9.4.1	Messprinzip	377
9.4.2	Parameter von Doppler-Geschwindigkeitssensoren	380
9.4.3	Systemvarianten in Verbindung mit Reglerkonzepten	381
9.4.4	Messfehler und ihre Korrektur	383
9.5	Satelliten-Geschwindigkeitssensoren (Satellitenlogs)	385
	Literatur	386
10	Hydroakustische Doppler-Strömungsprofilsensoren (Acoustic Doppler Current Profiler/ADCP)	387
10.1	Klassifizierung von Strömungs- und Strömungsprofilsensoren	387
10.2	Wirkungsprinzip von Vertikal(V)-ADCP-Sensoren	389
10.3	Strömungsprofilmessungen mit Vertikal-ADCP-Sensor	391
10.4	Strömungsprofilmessungen mit Horizontal-ADCP-Sensor	401
	Literatur	407
11	Globale Satellitennavigations und -ortungssysteme (GNSS)	409
11.1	Überblick zu GNSS	409
11.2	<i>Global Positioning System</i> (GPS)	411
11.2.1	GPS-Dienste	411
11.2.2	Prinzip der dreidimensionalen GPS-Positionsbestimmung	413
11.2.3	Segmente des GPS-Systems	415
11.2.4	Satellitensignale (Frequenzen, Codes)	420
11.2.5	Prinzip der Laufzeitmessung und der Positionsbestimmung	425
11.2.6	GPS-Leistungsparameter, GPS-Fehlermaße, GPS-Fehlerquellen, GPS-Fehlerbudget und vorgegebene GPS-Fehlertoleranzen	427
11.2.7	GPS-Modernisierung (<i>GPS Modernization</i>) (GPS.GOV 2020)	433
11.3	GLONASS	435

11.4	Europäisches ziviles, globales Satellitennavigationssystem GALILEO	437
11.4.1	Einführung	437
11.4.2	Technische Konzeption (European GNSS Agency 2020)	438
11.4.3	Stand des Aufbaus von GALILEO (European GNSS Agency 2020).	440
11.5	Differential-GNSS (DGNSS)	444
11.5.1	Lokales Differential-GNSS	444
11.5.2	Weitbereichs-Differential-GNSS	447
11.6	Satellitenbasierte Erweiterungs-Systeme (<i>Satellite Based Augmentation Systems/SBAS</i>)	448
11.6.1	Überblick zu SBAS	448
11.6.2	EGNOS-Architektur	448
11.7	GNSS-Positionsmessungen	451
11.7.1	Statische GNSS-Positionsmessungen mit GPS-L1-C/A	451
11.7.2	Positionsmessungen mit EGNOS	453
11.8	Relative GNSS-Positionierung (<i>Differential Absolute and Relativ Positioning Sensor/DARPS</i>)	455
11.8.1	Grundprinzip von <i>DARPS</i>	455
11.8.2	Typische Bedien- und Anzeigefunktionen eines DARPS-Empfängers	457
	Literatur	463
12	Automatische Kursregelungssysteme (<i>Heading Control Systems</i>)	465
12.1	Grundstruktur des Kursregelkreises	465
12.2	Wirkungen der Regleranteile des PID-Kursreglers im simulierten Kursregelkreis	472
12.2.1	Simulation des Kursregelkreises	472
12.2.2	Simulation der Festwertkursregelung (Störgrößenausregelung) bei Impulsstörgröße	474
12.2.3	Simulation der Festwertkursregelung (Störgrößenausregelung) bei stationärer Eingangs-Störgröße	476
12.2.4	Simulation der Folgekursregelung (automatische Kursänderung)	477
12.3	Übertragungsverhalten des geschlossenen Kursregelkreises und Reglerentwurf mit Polvorgabeverfahren	478
12.3.1	Übertragungsfunktionen und Zeitverhalten des Kursregelkreises	478
12.3.2	Reglersynthese mit Polvorgabeverfahren	480
12.3.3	Bleibende Kurs(Regel)-Abweichung	486

12.4	Entwurf der Regelgüte des Kursreglers mit dem Wurzelortskurven(WOK)-Verfahren nach Evans.	488
	Literatur.	495
13	Filtersysteme in maritimen Regelungssystemen zur Eliminierung hochfrequenter Störgrößen	497
13.1	Problemstellung	497
13.2	Simulation des Kursregelkreises ohne Filtereinrichtung bei hochfrequenter Störeinwirkung	499
13.3	Entwurf eines linearen Tiefpassfilters zur Eliminierung hochfrequenter, nicht ausregelbarer Seegangsgierung.	501
13.3.1	Übertragungsverhalten eines linearen Tiefpassfilters.	501
13.3.2	Simulation des Kursregelkreises mit linearem Tiefpassfilter.	504
13.4	Entwurf eines nichtlinearen Filtersystems mit Totzoneglied zur Eliminierung hochfrequenter, nicht ausregelbarer Seegangsgierung	505
13.4.1	Übertragungsverhalten des nichtlinearen Filtersystems.	505
13.4.2	Simulation des Kursregelkreises mit nichtlinearen Filtersystem mit Totzoneglied	508
13.5	Treibstoffeinsparung durch optimale Einstellung der Filterparameter.	509
	Literatur.	512
14	Automatische Bahnregelungssysteme (<i>Track Control Systems</i>).	513
14.1	Einführung	513
14.2	Grundprinzip des Bahnregelungssystems	514
14.3	Einläufiger Bahnregelkreis.	518
14.4	Kaskaden-Bahnregelung	521
14.5	Simulation der Kaskaden-Bahnregelung bei Führungs- und Störgrößeneinwirkung	529
	Literatur.	534
15	Regelungssystem für manövrierende Fahrzeuge	535
15.1	Einordnung.	535
15.2	Regelungsstruktur	536
15.3	Geschwindigkeitskaskade	538
15.3.1	Strukturelle Betrachtung.	538
15.3.2	Entwurf der modellbasierten Vorsteuerung	541
15.3.3	Robuste Parametrierung der Regelung.	547
15.4	Kurs- und Bahnregelung beim Manövrieren von Standardschiffen	549
15.4.1	Definition der Manöverregelung	549

15.4.2	Entwurfsmodell zur Manöverregelung.	551
15.5	Anwendungsbeispiel unbemanntes Oberflächenfahrzeug SMIS-USV	553
15.6	Anwendungsbeispiel Kreuzfahrtschiff	554
	Literatur.	556
16	Modellbildung und Regelung unbemannter, autonomer Oberflächenfahrzeuge (<i>Unmanned Surface Vehicles/USV</i>)	557
16.1	Einführung	557
16.2	Prototyp MESSIN: Entwicklungsanforderungen, schiffbautechnisches und hydromechanisches Konzept.	559
16.3	Elektrisch/elektronische Entwicklungskomponenten des MESSIN.	563
16.4	Hierarchisches Steuerungssystem des MESSIN	565
16.5	Positionsbestimmung und Navigationssysteme des MESSIN	567
16.6	Modernisierte Konfiguration des MESSIN	570
16.7	Modellbildung und Identifikation	571
16.8	Ergebnisse von Manövertests	576
16.9	Automatisches Bahnführungssystem	577
16.10	Messkampagnen des MESSIN	582
	Literatur.	586
17	Regelung von unbemannten Unterwasserfahrzeugen (<i>Unmanned Underwater Vehicles/UUV</i>)	589
17.1	Einführung zu unbemannten Unterwasserfahrzeugen	589
17.2	Anwendungsbeispiel: Messung von Temperaturgradienten mit einem AUV	591
17.3	Modellierung und Parametrierung des eingesetzten AUV	592
17.4	Entwurf der Temperaturfolgeregelung	595
17.5	Simulationsergebnisse mit verschiedenen Temperaturverteilungen	596
17.6	Konstruktionsparameter des AUV DORISα und Designparameter des Regelungssystems.	598
	Literatur	599
18	Modellbildung und Simulation von Bodeneffektfahrzeugen	601
18.1	Einführung	601
18.2	Der Bodeneffekt.	603
18.3	Die Bewegungsarten eines Bodeneffektfahrzeugs	605
18.4	Modellbildung	607
18.4.1	Mehrpunktmodell	607
18.4.2	Allgemeine Bewegungsgleichungen	608
18.4.3	Beschreibung und Bezeichnungen der Seitenbewegung eines Bodeneffektfahrzeugs	612

18.4.4	Berechnung der Querkraft und des Giermoments für den Rumpf des Bodeneffektfahrzeugs mit der Theorie des schlanken Körpers (Streifentheorie).	615
18.4.5	Querkraft und Giermoment am Seitenleitwerk	620
18.4.6	Simulationsmodell der Steuerbewegung (Richtungssteuerung)	623
	Literatur.	627
19	Assistenzsysteme für sichere Schiffsführung und autonome Schiffsführung	629
19.1	Motivation für den Einsatz von Assistenz- und Beratungssystemen	629
19.2	Projekt MAPSYS „Entwicklung eines Prototypen für ein Manöver-Prädiktions-System für Schiffe mit externem Strömungsmess- und -informationssystem“	630
19.3	Projekt ASFOSS „Entwicklung eines Prototypen für ein Assistenzsystem für sichere nautische Schiffsführung“	635
19.4	Manöverassistenzsystem STRÖWAR mit ADCP-Strömungsmessungen vor der Hafeneinfahrt Rostock-Warnemünde	640
19.5	Lösungen für eine potenziell zukünftige autonome Schifffahrt.	646
19.6	Beispiel: automatisiertes Begegnungsszenario mit Störer.	650
	Literatur.	652
	A.1. Bewegungsgleichungssystem für sechs Freiheitsgrade, bei dem der Koordinatenursprungspunkt des körperfesten Bezugssystems nicht mit dem Schwerpunkt des Körpers zusammenfällt.	657
	A.2. Korrekturfaktoren und Trägheitskoeffizienten für die Berechnung der hydrodynamischen Massen X_u, Y_v und des hydrodynamischen Trägheitsmoments N_r	656
	Anhang A.3. Größen nach SNAME, Derivate, Streifenmethode	660
	Anhang A.4. Konstruktive Daten maritimer Fahrzeuge	666
	Anhang A.5. MATLAB®-Programme (Version MATLAB® R 2017b)	668
	A.6. Beobachtungs-Normalformen der Zustandsgleichungen für Kursmodelle 2. und 3. Ordnung und Bahnabstandmodell 4. Ordnung	687

Anhang A.7. Zusammenstellung der wichtigsten Formeln	689
Anhang A.8. Experimentierumgebung ANS5000, eingesetzte Simulatorschiffe und Experimentierumgebung USVs	696
Literatur	701