

Inhaltsverzeichnis

1	Einführung	11			
	1.1 Übersicht	11			
	1.2 Regler-Mensch-Modelle	11			
	1.2.1 Manuelle Regelung	11			
	1.2.2 Menschen als Regler	13			
	1.2.3 Beschreibungsfunktionen	14			
	1.2.4 Schnittfrequenzmodelle	16			
	1.2.5 Optimaltheoretische Modelle	17			
	1.2.6 Regler-Mensch-Modelle für die Fahrermodellierung	18			
	1.2.7 Kritik des Ansatzes der Regler-Mensch-Modelle	19			
	1.3 Dimensionen der Kraftfahrzeugführung	21			
2	Modellbildungsmethoden	23			
	2.1 Modellbasierter Systementwurf	23			
	2.2 Modellbildung: Beispiel Querdynamik	24			
	2.2.1 Einführung	24			
	2.2.2 Diskretisierung	25			
	2.2.3 Programmierung	27			
	2.2.3.1 Textuelle Programmeingabe	27			
	2.2.3.2 Graphische Programm- eingabe	31			
	2.2.4 Simulationsexperimente und Ergebnisdarstellung	38			
	2.2.4.1 Zeitkontinuierliches Modell der Fahrzeug-Querdynamik	38			
	2.2.4.2 Zeitdiskretes Modell der Fahrzeug-Querdynamik	40			
	2.2.5 Analyse und Interpretation	42			
	2.2.5.1 Stationäres Verhalten	42			
	2.2.5.2 Instationäres Verhalten	44			
	2.2.5.3 Interpretation in Bezug auf die Fahrzeugführung	47			
	2.3 Graphische Modellentwicklung	48			
	2.3.1 Ikonische Modellierung	49			
	2.3.2 Signalflussmodellierung	52			
	2.3.3 Energieflussmodellierung	55			
	2.3.4 Graphische Analyse von Energieflussmodellen	56			
	2.3.5 Möglichkeiten und Grenzen graphischer Modelle	57			
	2.3.5.1 Ablauf der graphischen Modellbildung	57			
	2.3.5.2 Vor- und Nachteile der graphischen Modellbildung	58			
	2.3.5.3 Modellbildung mit Bondgraphen	60			
3	Längsführung	63			
	3.1 Modell der Längsdynamik	63			
	3.1.1 Komponenten des Antriebsstrangs	63			
	3.1.2 Längsdynamikanforderungen	65			
	3.1.3 Strategien bei der Geschwindigkeits- wahl	70			
	3.2 Geschwindigkeitsanpassung	71			
	3.2.1 Konstanthalten der Geschwindigkeit	71			
	3.2.2 Anpassung an die Straßenneigung	73			
	3.2.3 Anpassung an den Straßenverlauf	75			
	3.3 Abstandshaltung	76			
	3.3.1 Kinematik des Fahrzeugfolge- problems	77			
	3.3.2 Abstandshaltung durch lineare Zustandsregelung	77			
	3.3.3 Luenberger-Beobachter für die Abstandshaltung	79			
	3.3.4 Kolonnenfahrt bei linearer Zustandsregelung	81			
	3.3.5 Mikroskopisches Fahrzeugfolge- modell der Verkehrstheorie	82			
	3.3.6 Abstandshaltung mit unscharfem Regler (Fuzzy Control)	84			
	3.4 Bremsen	87			
	3.4.1 Kontinuierliches lineares Brems- modell	89			
	3.4.2 Diskontinuierliches nichtlineares Bremsmodell	89			
	3.4.3 Messstörungen	91			
4	Querführung	93			
	4.1 Fahrkinematik	94			
	4.1.1 Fahrkinematisches Fundamentäl- system	94			
	4.1.2 Fahrkinematik als Regelstrecke	96			
	4.1.3 Proportionalregelung	97			
	4.1.4 Linearisierte Fahrkinematik	99			
	4.1.5 Dynamische Eigenschaften der Proportionalregelung	101			
	4.2 Fahrdynamik	102			
	4.2.1 Fahrdynamisches Fundamentalsystem	102			
	4.2.2 Linearisierte Fahrdynamik	103			
	4.2.2.1 Lineare Fahrdynamik ohne Vorausschau	103			
	4.2.2.2 Interpretation der Fahrdynamik ohne Vorausschau	104			
	4.2.2.3 Lineare Fahrdynamik mit Vorausschau	105			
	4.3 Nichtmodellbasierte lineare Regelung	107			
	4.3.1 Einfacher PID-Regler	107			
	4.3.2 PID-Regler mit Störgrößenauf- schaltung	108			
	4.3.3 Parameterempfindlichkeit	108			
	4.4 Modellbasierte lineare Regelung ohne Vorausschau	110			
	4.4.1 Zustandsgeregelte Spurhaltung mit Polvorgabe	110			

4.4.2	Polvorgabe für Regelungs- Normalform	112	5.4.3.3	Frequenzgänge und Sprungantworten	165
4.4.3	Festwertregelung mit Zustandsregler ...	113	5.4.4	Verarbeitung der Sensorsignale	166
4.4.4	Erweiterter Zustandsregler	114	5.4.4.1	Bestimmung der Vertikalen	168
4.4.5	Optimaler Zustandsregler	116	5.4.4.2	Bestimmung von Verschiebung und Geschwindigkeit	168
4.4.6	Krümmungsschätzung durch Zustandsbeobachter	117	5.4.4.3	Beobachterkonzepte zur Raumorientierung	169
4.4.7	Optimaler Zustandsregler mit erweitertem optimalem Beobachter	119	5.5	Modellierung des Bewegungsempfindens	170
4.5	Modellbasierte lineare Regelung mit Vorausschau	124	5.5.1	Fahrzeug-Referenzbewegung	170
4.5.1	Erweiterung des Fahrdynamik- Modells für Störbeobachter	126	5.5.1.1	Verlauf der Teststrecke	172
4.5.2	Simulationsexperimente	127	5.5.1.2	Sensorische Erfassung der Referenzbewegung	172
4.6	Modellbasierte nichtlineare Regelung	131	5.5.1.3	Zeitverläufe der Bewegungs- wahrnehmung	173
4.6.1	Folgeregelung mit reduziertem Fahrkinematik-Modell	131	5.5.2	Bewegungsempfinden bei ausgewählten Fahrmanövern	174
4.6.2	Kompensationsregelung mit fahr- kinematischem Fundamentalsystem	134	5.5.3	Auswirkungen von Wahrnehmungs- dissoziationen	177
4.6.3	Fahrkinematische Regelung beim doppelten Spurwechsel	136	5.5.3.1	Beobachtermodell für erweiterte Querdynamik	177
4.6.4	Regler für Fahrkinematik in Polarkoordinaten	137	5.5.3.2	Nachbildung unerfüllter Erwartungen	178
5	Vektation	140	6	Fahrerassistenzsysteme	181
5.1	Einführung	140	6.1	Hintergrund	181
5.2	Geschwindigkeits-Vektorfelder	140	6.2	Grundlagen	184
5.2.1	Bildung von Bewegungsinvarianten	143	6.2.1	Aktive Sicherheit	184
5.2.2	Bewegungsinvarianten im Geschwindigkeitsvektorfeld	145	6.2.2	Fahrerassistenzsysteme für die aktive Sicherheit	187
5.2.3	Analyse vorgegebener Auswertungs- fenster	147	6.2.3	Zuverlässigkeitstechnische Analyse	189
5.3	Visuelle Orientierung beim Autofahren	149	6.2.3.1	Analyse mit Petri-Netzen	189
5.3.1	Augenbewegungen und visuelle Wahrnehmung	149	6.2.3.2	Klassifizierung von Fahrer- unterstützungssystemen	190
5.3.2	Kraftfahrzeugführung und Augenbewegungen	151	6.2.3.3	Analyse von Warnsystemen	192
5.3.3	Lands Tangentenpunkt	153	6.3	Stabilisierungsassistentenz	193
5.3.4	Ergebnisse aus Simulator- experimenten	155	6.3.1	Vorbemerkungen zur Stabilisierung	193
5.4	Dynamik der Bewegungswahrnehmung	158	6.3.2	Längsführungsassistentenz	195
5.4.1	Bewegungsempfinden	158	6.3.2.1	Antiblockiersystem	195
5.4.2	Sensordynamik bei rotatorischen Bewegungen	160	6.3.2.2	Antriebschlupfregelung	200
5.4.2.1	Aufbau des semizirkulären Kanals	160	6.3.3	Querführungsassistentenz	204
5.4.2.2	Dynamische Modelle des semizirkulären Kanals	160	6.3.3.1	Fahrdynamikregelung	204
5.4.2.3	Frequenzgänge und Sprungantworten	162	6.3.3.2	Spurhaltungsregelung	207
5.4.3	Sensordynamik bei translatorischen Bewegungen	163	6.4	Lenkungsassistentenz	211
5.4.3.1	Aufbau des otolithischen Systems	163	6.4.1	Notbremsassistent	211
5.4.3.2	Dynamische Modelle des otolithischen Systems	165	6.4.2	Stop-and-Go-Assistent	213
			6.4.3	Fahrgeschwindigkeitsassistent	214
			6.4.4	Spurwechselsassistent	216
			6.4.5	Kollisionsvermeidungsassistent	219
			6.4.6	Parkmanöverassistent	220
			6.5	Organisationsassistentenz	223
			6.6	Anmerkungen zur Automatisierung	225
			7	Zusammenfassung und Ausblick	229
			7.1	Anwendungen der Kraftfahrzeug- führungsmodelle	229

7.1.1	Design-Driver-Modelle.....	229			
7.1.2	Grobmodellierung.....	231			
7.1.3	Präzisionsmodelle.....	232			
7.2	Kraftfahrzeugführung und Kybernetik.....	235			
7.2.1	Visionen.....	235			
7.2.2	Ursprünge der Kybernetik.....	235			
7.2.3	Kybernetische Systemtheorie.....	237			
7.2.4	Kraftfahrzeugführung als komplexes System.....	238			
7.2.5	Modellierung komplexer Systeme.....	239			
7.2.6	Skizzierung einer Theorie der Kraftfahrzeugführung.....	241			
7.2.7	Schlussfolgerungen.....	243			
Anhang A: Mathematische Hilfsmittel.....			245		
A.1	Rechenoperationen mit Vektoren und Matrizen.....	245			
A.1.1	Vektoren.....	245			
A.1.2	Matrizen.....	246			
A.1.3	Eigenwerte quadratischer Matrizen.....	248			
A.2	Gewöhnliche Differentialgleichungen.....	249			
A.2.1	Lineare Differentialgleichungen.....	249			
A.2.1.1	Lösung linearer Differentialgleichungen.....	250			
A.2.1.2	Anregung mit speziellen Eingangsfunktionen.....	251			
A.2.1.3	Eingangs-Ausgangs- Darstellung linearer Systeme ...	252			
A.2.1.4	Reguläre Zustandstrans- formationen.....	252			
A.2.1.5	Funktionaltrans- formationen.....	253			
A.2.2	Nichtlineare Differential- gleichungen.....	255			
A.3	Partielle Differentialgleichungen.....	255			
A.3.1	Lösung partieller Differential- gleichungen 1. Ordnung.....	256			
A.3.2	Eigenschaften von Kurvenintegralen.....	256			
A.3.3	Interpretation der Lösungen.....	257			
Anhang B: Modellbildung.....			258		
B.1	Skriptbefehle.....	258			
B.1.1	Matlab.....	258			
B.1.2	Scilab.....	262			
B.1.3	Sidops+ (20-sim).....	262			
B.2	Strukturbilder.....	263			
B.2.1	Lineare Elemente.....	263			
B.2.2	Umformungsregeln.....	265			
B.3	Bondgraphen.....	267			
B.3.1	Eigenschaften von Bondgraphen.....	267			
B.3.1.1	Definitionen.....	267			
B.3.1.2	Kausalität von Bondgraphen....	268			
B.3.1.3	Knotensätze.....	270			
B.3.1.4	Vereinfachungsregeln.....	271			
B.3.2	Zusammenhang zwischen Energie- und Signalflussdiagrammen.....	272			
B.3.2.1	Signalflussdarstellung der Bondgraphenelemente.....	272			
B.3.2.2	Beispiele.....	274			
B.3.3	Bondgraphen der ebenen Bewegungen starrer Körper.....	276			
B.3.3.1	Geometrischer Ansatz.....	276			
B.3.3.2	Modellierung mit Vektorbonds.....	277			
Anhang C: Fahrkinematische Grundlagen.....			282		
C.1	Räumliche Kinematik.....	282			
C.1.1	Lage und Orientierung.....	282			
C.1.2	Geschwindigkeit und Beschleunigung.....	283			
C.2	Fahrzeug-Referenzbewegungen.....	284			
C.2.1	Erzeugendensystem.....	284			
C.2.2	Ebene Koordinate und Beschleunigung in bewegten Koordinaten.....	284			
C.3	Ebene Fahrkinematik.....	285			
C.3.1	Erzeugendensystem ebener Bahnen.....	285			
C.3.2	Ebene Koordinatentransformationen.....	286			
C.3.2.1	Translation.....	286			
C.3.2.2	Rotation.....	286			
C.3.3	Differentielle Transformation vorgegebener Konturen.....	288			
C.3.3.1	Partielle Ableitung nach dem Kurvenparameter r	288			
C.3.3.2	Partielle Ableitung nach dem Kurvenparameter s	289			
C.3.4	Fundamentalsystem der ebenen Fahrkinematik.....	290			
C.3.5	Integration des Fundamentalsystems.....	291			
Anhang D: Horizontaldynamik des Kraftfahrzeugs.....			293		
D.1	Ackermann-Modell.....	293			
D.2	Modellierung der ebenen Fahrdynamik.....	294			
D.2.1	Bewegungsgleichungen.....	294			
D.2.2	Nichtlineares Einspurmodell.....	295			
D.2.3	Lineares Einspurmodell.....	296			
D.3	Einfaches Modellbeispiel.....	298			
D.3.1	Modelle der Raddynamik.....	298			
D.3.1.1	Längsdynamik des Reifens.....	298			
D.3.1.2	Querndynamik des Reifens.....	301			
D.3.1.3	Gesamtmodell der Reifen- dynamik.....	302			
D.3.2	Dynamik des Fahrzeugaufbaus.....	302			
D.3.3	Gesamtmodell des Fahrzeugs.....	303			
D.3.3.1	Bondgraphenmodell.....	303			
D.3.3.2	Modifiziertes Gesamt- modell.....	304			
D.3.4	Simulationsexperimente.....	305			
D.4	Modellbildung mit Vektorbondgraphen.....	308			
D.4.1	Einspurmodell.....	308			
D.4.2	Zweispurmodell.....	312			

Anhang E: Regelungssysteme	314	E.3 Lineare Regler	327
E.1 Darstellungen im Zeit- und Frequenzbereich...	314	E.3.1 Nichtmodellbasierte Regler	327
E.1.1 Signale	314	E.3.1.1 PID-Regler	327
E.1.1.1 Definitionen.....	314	E.3.1.2 Einstellregeln	328
E.1.1.2 Laplace- und Fourier- Transformation	315	E.3.2 Modellbasierte Regler.....	328
E.1.1.3 Signaloperationen.....	315	E.3.2.1 Entwurf für nichtparametrische Streckenmodelle.....	329
E.1.2 Lineare Übertragungssysteme	316	E.3.2.2 Entwurf für parametrische Streckenmodelle.....	329
E.1.2.1 Linearität	316	E.4 Zustandsregler und Zustandsbeobachter	330
E.1.2.2 Übertragungsverhalten im Zeitbereich	317	E.4.1 Zustandsregler.....	330
E.1.2.3 Übertragungsverhalten im Frequenzbereich.....	317	E.4.1.1 Einfacher Zustandsregler mit Polvorgabe	330
E.1.2.4 Zustandsdarstellungen.....	319	E.4.1.2 Zustandsregler für Festwertregelung.....	332
E.1.2.5 Steuerbarkeit und Beobachtbarkeit.....	321	E.4.1.3 Erweiterter Zustandsregler.....	332
E.2 Stabilität dynamischer Systeme	322	E.4.2 Zustandsbeobachter	334
E.2.1 Erste Methode von Ljapunov.....	322	E.4.2.1 Luenberger-Beobachter.....	334
E.2.1.1 Konzept der Stabilität linearer Systeme	322	E.4.2.2 Störbeobachter	336
E.2.1.2 Konzept der Stabilität nichtlinearer Systeme.....	322	E.4.2.3 Zustandsregler mit Beobachter	336
E.2.1.3 Methode der lokalen Linearisierung	323	E.4.3 Weiterführende Konzepte der Zustandsregelung.....	337
E.2.1.4 Erste Methode für Ruhelagen...	323	E.4.3.1 Riccati-Zustandsregler	338
E.2.2 Zweite Methode von Ljapunov.....	324	E.4.3.2 Kalman-Beobachter	338
E.2.2.1 Ljapunov-Funktion.....	324	E.4.3.3 Butterworth-Konfiguration	339
E.2.2.2 Stabilitäts-Sätze.....	324	E.5 Nichtlineare Regler	339
E.2.2.3 Stabilität im Großen	324	E.5.1 Nichtmodellbasierte Regler: Fuzzy-Regler.....	339
E.2.2.4 Beziehungen zwischen Erster und Zweiter Methode von Ljapunov	325	E.5.2 Modellbasierte Regler.....	341
E.2.3 Stabilitätssätze für lineare Regelungssysteme.....	325	E.5.2.1 Eingangs-Zustands- Linearisierung	341
E.2.3.1 Hurwitz-Polynome	325	E.5.2.2 Eingangs-Ausgangs- Linearisierung	342
E.2.3.2 Stabilitätssätze von Cremer-Leonhard-Michailov ...	326	Literatur	344
E.2.3.3 Nyquist-Kriterium	326	Sachwortverzeichnis	353