

Eckehard Schnieder (Hrsg.)

Verkehrsleittechnik

Automatisierung
des Straßen- und Schienenverkehrs

Mit Beiträgen von

Uwe Becker, Imma Braun, Andreas Busemann, Stefan Detering, Frank Hänsel,
Jörg May, Lars Müller, Jan Poliak, Eckehard Schnieder, Harald Schrom,
Roman Slovak und Stefan Wegele

Mit 236 Abbildungen und 45 Tabellen



Springer

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
1.1	Aufgabenstellung der Verkehrsleittechnik	1
1.2	Methodischer Ansatz	2
1.3	Gliederung	4
2	Grundlegende Begriffe und Konzepte	7
2.1	Begriffsentwicklung und -konzept	8
2.2	Beschreibungsmittel	10
2.3	Paradigmen und Modellkonzepte	11
2.3.1	Paradigma der Objektorientierung	11
2.3.2	System als Begriffs- und Modellkonzept	15
2.3.3	Regelkreis-Funktionsstrukturen	18
2.3.4	Petrinetze als Modellkonzept und Beschreibungsmittel	18
2.3.5	Formalisiertes Prozessmodell	23
2.3.6	Spieltheoretischer Ansatz	24
2.4	Sichten der Verkehrsleittechnik	27
2.4.1	Konstituenten und Umfeld	27
2.4.2	Ziele der Verkehrsleittechnik	29
2.4.3	Rollenverständnis und Beteiligte	32
2.4.4	Wirtschaftliche Aspekte	33

2.5	Strukturierung von Verkehrsleitsystemen	35
2.5.1	Hierarchische Strukturierung	35
2.5.2	Generische Referenzmodelle	37
3	Regelung der Längsbewegung eines Verkehrsmittels	39
3.1	Aufgabenstellung der Fahrdynamik	39
3.2	Fahrdynamik der Längs- bzw. Translationsbewegung	40
3.2.1	Fahrzeugbewegung	41
3.2.2	Fahrwiderstandskräfte	44
3.2.3	Antriebs- und Bremskräfte	47
3.2.4	Kraftübertragung Rad-Fahrbahn, Rad-Schiene	51
3.2.5	Modellierung der Regelstrecke in Blockschaltbildern ...	53
3.2.6	Fahrzeitberechnungen	54
3.2.7	Darstellung der Bewegungsvorgänge	56
3.3	Regelungskonzepte für die Fahrzeugbewegung	56
3.3.1	Grundstruktur	56
3.3.2	Automatisierungsgrad	58
3.3.3	Kaskadenregelung	60
3.3.4	Zeitoptimale Regelung	61
3.3.5	Zeitoptimale Regelung mit 3-Punkt-Regler	62
3.3.6	Vorschuhung	62
3.3.7	Weitere Regelungskonzepte	64
3.4	Anwendungsbeispiele	66
3.4.1	Kraftfahrzeugregelung	66
3.4.2	Regelungsansätze für die Metro Mailand	66
3.4.3	Magnetschnellbahn Transrapid	68
3.4.4	Rekordfahrt des Hochgeschwindigkeitszugs Train à Grande Vitesse (TGV) 2007	68

4	Messsysteme und Sensorik	73
4.1	Klassifikation von Sensoren	74
4.1.1	Physikalische Ausprägung der Mess- und Sensorgrößen	75
4.1.2	Lokalisierung des Sensors bzw. Messsystems	78
4.1.3	Dynamisches Verhalten der Messgrößenerfassung	79
4.1.4	Prinzip der Auswertungsverfahren	80
4.1.5	Energieeinsatz	80
4.2	Wellenausbreitungssensorik und Auswertungsverfahren	81
4.2.1	Messung der Laufzeit	82
4.2.2	Messung der Phasenverschiebung	83
4.2.3	Messung der Frequenzverschiebung (Dopplereffekt)	84
4.2.4	Korrelation	86
4.3	Elektromagnetische und akustische Sensoren	87
4.3.1	Akustische Sensoren (Ultraschall)	88
4.3.2	Radar	89
4.3.3	Lidar/Ladar	91
4.3.4	Laser-Scanner	93
4.3.5	(Stereo-)Kamerasysteme	94
4.4	Fahrzeugseitige Sensoren	95
4.4.1	Tachometer	95
4.4.2	Beschleunigungssensoren	97
4.4.3	Odometer	98
4.4.4	Induktive Sensoren	100
4.4.5	Hallsensoren	100
4.5	Infrastrukturseitige Sensoren	101
4.5.1	Induktionsschleifen in der Straße	101
4.5.2	Induktionsschleifen im Schienenverkehr	103
4.5.3	Achszähler	103
4.5.4	Gleisstromkreis	104

4.5.5	Lichtschranke	104
4.5.6	Personen-/Fahrgast-Zählung	104
4.6	Kombinierte Sensorsysteme zur Ortung	105
4.6.1	Punktförmige Zugbeeinflussung (PZB)	105
4.6.2	Transponderbasierte Systeme	107
4.6.3	Linienförmige Zugbeeinflussung (LZB)	110
4.7	Kombinierte satellitenbasierte Systeme	110
4.7.1	GNSS-Systeme	113
4.7.2	GPS	113
4.7.3	GLONASS	114
4.7.4	Zukünftige GNSS-Systeme	114
4.7.5	GNSS-Erweiterungssysteme	115
4.7.6	Leistungsfähigkeit der Satellitenortung	116
4.8	Menschliche Sinnesorgane als Sensorsysteme	116
4.9	Zusammenfassung	117
5	Kommunikation für die Verkehrsleittechnik	119
5.1	Aufgabe der Kommunikation	120
5.1.1	Zielsetzung	120
5.1.2	Örtliche Verteilung und Abdeckungsgrad	121
5.1.3	Anforderungen	121
5.2	Klassifizierung	122
5.2.1	Lokalisierung von Sendern, Empfängern und Übertragungskanälen	122
5.2.2	Eigenschaften	126
5.2.3	Übertragungsmedien und Technologien/Verfahren	127
5.2.4	Anwendungsbereiche	133

5.3	Repräsentative Kommunikationssysteme für die Verkehrsleittechnik	135
5.3.1	Rundfunksysteme	135
5.3.2	Mobilfunksysteme	137
5.3.3	Leitungsgebundene Systeme	142
5.3.4	Ortsdiskrete Kommunikationssysteme	147
5.3.5	Menschliche Kommunikation in der Verkehrsleittechnik ..	149
5.4	Verkehrstelematik	151
6	Flusssteuerung im Straßenverkehr	155
6.1	Zielsetzung der Regelungs- und Steuerungsaufgabe	156
6.2	Mikroskopische Verkehrsmodelle	159
6.2.1	Grundlagen der mikroskopischen Modellbildung	159
6.2.2	Fahrzeugfolgemodelle	159
6.2.3	Verfeinerung der mikroskopischen Modellierung	165
6.2.4	Verkehrsmodellierung mit Zellularautomaten	168
6.2.5	Einfluss von Assistenzsystemen auf den Verkehrsfluss ..	170
6.3	Makroskopische Verkehrsmodelle	173
6.3.1	Kenngrößen des Verkehrsablaufs	173
6.3.2	Bestimmung der Kenngrößen aus Messergebnissen	174
6.3.3	Stationäre makroskopische Verkehrsmodelle	176
6.3.4	Dynamische makroskopische Verkehrsmodelle	177
6.3.5	Regelungstechnische Stabilitätsbetrachtung	183
6.3.6	Zusammenhang zwischen mikro- und makroskopischen Verkehrsmodellen	185
6.4	Konzepte zur Verkehrsflusssteuerung	187
6.4.1	Grundsätzliche Regelungsstruktur	188
6.4.2	Verkehrsbeeinflussung auf Autobahnen	188
7	Sicherung und Steuerung von Zugbewegungen (Zugbeeinflussung)	195

7.1	Einleitung und Übersicht	195
7.2	Aufgabenstellung und Ziele der Zugbeeinflussung	196
7.3	Abstandshaltung	197
7.3.1	Kenngrößen der Abstandshaltung	197
7.3.2	Grundprinzip der Abstandshaltung	198
7.3.3	Konzepte der Abstandshaltung	199
7.3.4	Formalisierung der Abstandshaltung	202
7.3.5	Kapazitätsbetrachtung	205
7.3.6	Korrespondenz zum Fundamentaldiagramm	208
7.3.7	Zugfolge und Mindestzugfolgezeit	210
7.3.8	Absoluter Bremswegabstand / „Moving Block“	211
7.3.9	Blocksicherung	213
7.3.10	Sicherung auf quantisierten Bremswegabstand	213
7.3.11	Vergleich der Mindestzugfolgezeiten bei verschiedenen Abstandssicherungssystemen	214
7.3.12	Optimale Fahrweise	217
7.4	Realisierung der Zugbeeinflussung	218
7.4.1	Diskret wirkende Zugbeeinflussungssysteme	219
7.4.2	Kombinierte Systeme	220
7.4.3	Kontinuierlich wirkende Zugbeeinflussungssysteme	221
7.5	ERTMS	222
8	Kreuzungsmanagement im Straßenverkehr	225
8.1	Aufgabenstellung und Verkehrsqualität	225
8.2	Straßenknoten ohne Lichtsignalsteuerung	227
8.3	Konzepte zur Verkehrsflusssteuerung an Straßenknoten mit Lichtsignalen	228
8.3.1	Motivation zum Einsatz von Lichtsignalanlagen	228
8.3.2	Eingriffsmöglichkeiten und Stellvariablen	229
8.3.3	Steuerungsverfahren	230

8.3.4	Grüne Welle	232
8.4	Auslegung von Steuerungen	233
8.4.1	Vorgehensweise	233
8.4.2	Analyse des Verkehrsverhaltens	235
8.4.3	Phasensysteme	236
8.4.4	Signalisierungszeichen und -zeiten	239
8.4.5	Auslegung eines Einzelknotenpunktes	245
8.5	Beispiele für Standards und Steuerungssysteme	249
8.5.1	Standardisierung	250
8.5.2	Steuerungssysteme im Einsatz	250
8.5.3	Fahrerassistenzsysteme für die Verkehrsabwicklung an Knotenpunkten	251
9	Knotenmanagement im Schienenverkehr	253
9.1	Struktur und Funktion des Schienenverkehrsnetzes	253
9.2	Das Netzmodell und das Knoten-Kanten-Modell	254
9.3	Der Begriff des (Netz-)Managements	258
9.3.1	Planerische Aufgaben des Netzmanagements aus Sicht der Verkehrsleittechnik	259
9.3.2	Operative Aufgaben des Netzmanagements	262
9.4	Konzepte und Funktionen der Fahrwegsicherung	268
9.4.1	Konzepte der Fahrwegsicherung	268
9.4.2	Topologische Bestandteile einer Fahrstraße	269
9.4.3	Die Fahrstraße als Gegenstand des Sicherungskonzepts	270
9.5	Varianten der Steuerungs- und Sicherungslogik	273
9.5.1	Tabellarische Fahrstraßenlogik (Verschlussplanprinzip)	274
9.5.2	Geographische Fahrstraßenlogik (Spurplanprinzip)	276
9.6	Technische Realisierungskonzepte	281
9.6.1	Mechanische Stellwerke	282
9.6.2	Elektromechanische Stellwerke	286

9.6.3	Relaisstellwerke	286
9.6.4	Elektronische Stellwerke	289
9.6.5	Varianten der streckenseitigen Allokation von Funktionen der Fahrwegsicherung	293
10	Rangiertechnik	297
10.1	Aufgabenstellung für die Betriebs- und Leittechnik	297
10.2	Ablaufdynamik (Antriebs- und Widerstandskräfte)	301
10.2.1	Neigungskraft	301
10.2.2	Rollwiderstand	302
10.2.3	Bogenwiderstand	302
10.2.4	Weitere Widerstände	302
10.3	Rangiertechnische Verfahren	303
10.3.1	Talbremsenalgorithmien	303
10.3.2	Dezentrale Regelung der Gleisbremsen	310
10.3.3	Weichensteuerung	313
11	Technische Sicherung von Bahnübergängen	315
11.1	Aufgabenstellung	315
11.2	Verkehrlicher Gegenstandsbereich	317
11.2.1	Geometrische Struktur von Bahnübergängen	317
11.2.2	Verhalten (Zeiten und Wege)	318
11.2.3	Sicherheitsverhalten	319
11.2.4	Modellierung des Bahnübergangs ohne technische Sicherung	320
11.3	Leittechnisches Sicherungskonzept	325
11.3.1	Leittechnische Sicherungsfunktionen	325
11.3.2	Bahnübergang mit technischer Sicherung	326
11.3.3	Straßenseitige Funktionen	328
11.3.4	Schienenseitige Funktionen	329
11.3.5	Bahnübergang mit Lichtzeichen	330

11.3.6	Bahnübergang mit Lichtzeichen und Halbschranke	331
11.3.7	Konventionelle Überwachungsstrukturen der Bahnübergangssicherungsanlagen	333
11.4	Entwicklung der Bahnübergangstechnik	337
11.4.1	Historische Entwicklung der technologischen Implementierung	337
11.4.2	Zukünftige Entwicklungen in der Bahnübergangssicherungstechnik	339
12	Netzmanagement im Straßenverkehr	345
12.1	Aufgabenstellung	346
12.2	Verhaltensdynamik auf Straßennetzen	348
12.2.1	Physikalische Analogien	348
12.2.2	Nichtlineare Systemdynamik	349
12.2.3	Kopplungsstrukturen zwischen Verkehrsmittel und Verkehrswegenetz	351
12.2.4	Simulationsmodelle des Netzverhaltens	351
12.2.5	Stationäre Dynamik	354
12.3	Steuerungs- und Regelungskonzepte	355
12.3.1	Paradigmen des Netzmanagements	355
12.3.2	Regelungsstrategien	356
12.3.3	Hierarchische Funktionsstrukturierung der infrastrukturseitigen Netzregelung	359
12.3.4	Infrastrukturseitige Steuerungsmaßnah- men und -strategien	359
12.3.5	Verkehrslenkung und individuelle Fahrzeugnavigation . .	362
12.3.6	Verkehrserfassung, -lagebilderstellung und -informationsverteilung	365
12.4	Wirtschaftliche Aspekte	366
12.5	Beispiele für Standards und Anwendungen	370
12.5.1	Standards für Verkehrstelematik	370
12.5.2	Regionale Verkehrsleit- und -managementzentralen	372

12.5.3 Nationales Verkehrsmanagement in den Niederlanden ..	375
13 Netzmanagement des Schienenverkehrs	377
13.1 Aufgaben des Netzmanagements	377
13.1.1 Rechtlicher Rahmen	377
13.1.2 Rollen und Aufgaben	378
13.1.3 Aufgaben des Netzbetreibers	379
13.1.4 Qualitätskriterien von Schienenverkehrsleistungen	381
13.2 Trassenplanung und Fahrplankonstruktion	383
13.2.1 Trassenpreissystem	384
13.2.2 Trassenbestellung	385
13.2.3 Trassenlagen	387
13.2.4 Zeiten für die Trassenkonstruktion	392
13.2.5 Durchsatzsteigerung	393
13.2.6 Fahrpläne zur Betriebsführung	397
13.3 Disposition als Regelung in Echtzeit	400
13.3.1 Überblick der Optimierungsansätze	401
13.3.2 Wissensbasierte Disposition	402
13.3.3 Optimierungsbasierte Disposition	404
13.4 Realisierung der Betriebsführung bei der Deutschen Bahn Netz AG	407
13.4.1 Funktionshierarchie	407
13.4.2 Organisatorischer Aufbau	407
14 Flottenmanagement	413
14.1 Ziel und Aufgaben des Flottenmanagements	413
14.2 Flottenbetrieb auf den Straßen- und Schienenverkehrsnetzen ..	417
14.2.1 Allokation der Konstituenten	417
14.2.2 Produktionsverfahren im Schienengüterverkehr	418
14.3 Optimierungsverfahren zur Flottendisposition	422

14.3.1 Greedy-Algorithmus	423
14.3.2 Branch-and-Bound-Verfahren	423
14.3.3 Evolutionäre Algorithmen	425
14.3.4 Simulated Annealing	427
14.3.5 Tabu Search	427
14.3.6 Constraint basierte Verfahren	428
14.3.7 Agentenorientierte Ansätze	428
14.4 DOGMA – ein agentenbasiertes Konzept zur Flottendisposition	430
14.5 Technische Implementierung und Anwendungsbeispiele	434
14.5.1 Technische Implementierung	434
14.5.2 LogiOffice	436
14.5.3 WIDAS	436
15 Modal-Split-Management	439
15.1 Problemstellung, Aufgaben und Ziele	439
15.1.1 Definition	439
15.1.2 Problemstellung	441
15.1.3 Ziele	442
15.1.4 Modal-Split Aufgabenstellung	442
15.2 Modal-Split Verhaltensbeschreibung	445
15.2.1 Globale regelungstechnische Beschreibung	445
15.2.2 Differenzierung nach Einzelaspekten	447
15.2.3 Mathematische Modellierung	451
15.3 Modal-Split Steuerung	455
15.4 Anwendungsbeispiele	457
15.4.1 Modal-Split-Management im urbanen Personenverkehr	457
15.4.2 Modal-Split im Güterverkehr	461
15.4.3 Strategien zur Verlagerung des Güterfernverkehrs – von der Straße auf die Schiene	464

Literaturverzeichnis	471
Sachverzeichnis	489
Abkürzungsverzeichnis	494
Autorenverzeichnis	498