

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



---

# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Einleitung</b>	1
1.1	Aufgabenstellung der Verkehrsleittechnik	1
1.2	Methodischer Ansatz	2
1.3	Gliederung	4
<b>2</b>	<b>Grundlegende Begriffe und Konzepte</b>	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

X        Inhaltsverzeichnis

2.5	Strukturierung von Verkehrsleitsystemen . . . . .	35
2.5.1	Hierarchische Strukturierung . . . . .	35
2.5.2	Generische Referenzmodelle . . . . .	37
<b>3</b>	<b>Regelung der Längsbewegung eines Verkehrsmittels . . . . .</b>	<b>39</b>
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

<b>4</b>	<b>Messsysteme und Sensorik</b>	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

## XII Inhaltsverzeichnis

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
<b>5</b>	<b>Kommunikation für die Verkehrsleittechnik .....</b>	<b>119</b>
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	Leistungsgebundene Systeme .....	142
5.3.4	Ortsdiskrete Kommunikationssysteme .....	147
5.3.5	Menschliche Kommunikation in der Verkehrsleittechnik .	149
5.4	Verkehrstelematik .....	151
<b>6</b>	<b>Flusssteuerung im Straßenverkehr</b> .....	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
<b>7</b>	<b>Sicherung und Steuerung von Zugbewegungen</b> <b>(Zugbeeinflussung)</b> .....	195

## XIV Inhaltsverzeichnis

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
<b>8</b>	<b>Kreuzungsmanagement im Straßenverkehr . . . . .</b>	<b>225</b>
8.1	Aufgabenstellung und Verkehrsqualität . . . . .	225
8.2	Straßenknoten ohne Lichtsignalsteuerung . . . . .	227
8.3	Konzepte zur Verkehrsflussteuerung 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
<b>9</b>	<b>Knotenmanagement im Schienenverkehr . . . . .</b>	<b>253</b>
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

## XVI Inhaltsverzeichnis

9.6.3 Relaisstellwerke . . . . .	286
9.6.4 Elektronische Stellwerke . . . . .	289
9.6.5 Varianten der streckenseitigen Allokation von Funktionen der Fahrwegsicherung . . . . .	293
<b>10 Rangiertechnik . . . . .</b>	<b>297</b>
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 Talbremsenalgorithmen . . . . .	303
10.3.2 Dezentrale Regelung der Gleisbremsen . . . . .	310
10.3.3 Weichensteuerung . . . . .	313
<b>11 Technische Sicherung von Bahnübergängen . . . . .</b>	<b>315</b>
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
<b>12 Netzmanagement im Straßenverkehr . . . . .</b>	<b>345</b>
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 Verkehrsnetz . . . . .	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

## XVIII Inhaltsverzeichnis

12.5.3 Nationales Verkehrsmanagement in den Niederlanden ..	375
<b>13 Netzmanagement des Schienenverkehrs .....</b>	<b>377</b>
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
<b>14 Flottenmanagement .....</b>	<b>413</b>
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
<b>15 Modal-Split-Management .....</b>	<b>439</b>
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

XX	Inhaltsverzeichnis
Literaturverzeichnis	471
Sachverzeichnis	489
Abkürzungsverzeichnis	494
Autorenverzeichnis	498