

Bahninfrastrukturen

Ulrich Weidmann

Planen
Entwerfen
Realisieren
Erhalten

v/dlf

Weitere aktuelle vdf-Publikationen
finden Sie in unserem **Webshop:**

vdf.ch

- › Bauwesen
- › Naturwissenschaften,
Umwelt und Technik
- › Informatik, Wirtschafts-
informatik und Mathematik
- › Wirtschaft
- › Geistes- und Sozialwissen-
schaften, Interdisziplinäres,
Militärwissenschaft,
Politik, Recht

Gerne informieren wir Sie regelmässig per
E-Mail über unsere Neuerscheinungen.

Newsletter abonnieren

[Anmeldung auf vdf.ch](#)

Bahninfrastrukturen





Ulrich Weidmann

Bahninfrastrukturen

**Planen
Entwerfen
Realisieren
Erhalten**

v/d/f

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.dnb.de> abrufbar.

© 2020, vdf Hochschulverlag AG an der ETH Zürich

ISBN 978-3-7281-3974-0 (Printversion)

ISBN 978-3-7281-3975-7 (E-Book)

DOI-Nr. 10.3218/3975-7

Umschlaggestaltung: Isabel Thalman, buchundgrafik.ch

verlag@vdf.ethz.ch

www.vdf.ethz.ch

Das Werk einschliesslich aller seiner Teile ist urheberrechtlich geschützt. Jede Verwertung ausserhalb der engen Grenzen des Urheberrechtsgesetzes ist ohne Zustimmung des Verlages unzulässig und strafbar. Das gilt besonders für Vervielfältigungen, Übersetzungen, Mikroverfilmungen und die Einspeicherung und Verarbeitung in elektronischen Systemen.

Inhaltsverzeichnis

Vorwort	23
1 Einführung in die Bahninfrastrukturen	25
1.1 Bahninfrastrukturen als Teil der Verkehrsinfrastrukturen	25
1.1.1 Entwicklung der Bahnnetze	25
1.1.1.1 Entwicklung des weltweiten Bahnnetzes	25
1.1.1.2 Entwicklung des schweizerischen Bahnnetzes.....	26
1.1.1.3 Strukturelle Vereinheitlichung der Bahnnetze	27
1.1.2 Verkehrsinfrastrukturen als Teil der Verkehrssysteme	28
1.1.3 Eigenschaften von Verkehrs- und Bahninfrastrukturen	29
1.1.4 Kennwerte der Verkehrsinfrastrukturen	30
1.1.4.1 Netzdichte	30
1.1.4.2 Auslastung.....	30
1.1.4.3 Wiederbeschaffungswerte	30
1.1.5 Eigenschaften spurgeführter Systeme.....	31
1.1.6 Komparative Stärken des Stahlrad-Stahlschiene-Systems	32
1.1.7 Betrachtungsweisen der Bahninfrastrukturen	33
1.2 Funktionale, technische und organisatorische Sicht der Bahninfrastruktur	33
1.2.1 Funktionale Sicht.....	33
1.2.1.1 Funktionale Anlagengruppen	33
1.2.1.2 Streckennetze und Verkehrsnetze	34
1.2.1.3 Netzhierarchien	35
1.2.1.4 Verkehrliche und betriebliche Elemente.....	36
1.2.2 Technische Sicht.....	37
1.2.2.1 Technische Funktionalitäten an der Schnittstelle Fahrweg – Fahrzeug.....	37
1.2.2.2 Funktionsteilung zwischen Fahrweg und Fahrzeug	38
1.2.2.3 Fünf Teilnetze der Bahninfrastruktur.....	39
1.2.2.4 Technische Interaktionsfelder Fahrweg – Fahrzeug.....	40
1.2.3 Organisatorische Sicht	40
1.2.3.1 Organisatorische Aufgabenstellung	40
1.2.3.2 Regulierung der Europäischen Union	41
1.2.3.3 Diskriminierungsfrei zugängliche Bahninfrastrukturen	42
1.2.3.4 Regulierungsmodelle	43
1.2.3.5 Umsetzungsstand	44
1.2.3.6 Schweizerische Regulierung.....	46
1.2.3.7 Schweizerischer Netzzugang.....	46
1.2.3.8 Formalisierte Interaktionen zwischen EVU und EIU	47
1.3 Interoperabilität und Regelwerke.....	48
1.3.1 Einleitung.....	48

1.3.2	Interoperabilität	49
1.3.2.1	Definition	49
1.3.2.2	Spurweite als erste Interoperabilitätsaufgabe	49
1.3.2.3	Frühe formalisierte Schritte zur integralen Interoperabilität.....	50
1.3.2.4	Interoperabilitätsrichtlinien der Europäischen Union.....	51
1.3.3	Überblick über die aktuellen internationalen Regelungen.....	51
1.3.3.1	UIC-Merkblätter	51
1.3.3.2	Technische Spezifikationen Interoperabilität	52
1.3.3.3	Internationale technische Normen	53
1.3.4	Überblick über die nationalen Regelungen	54
1.3.4.1	Zusammenhang zwischen europäischen und schweizerischen Regelwerken.....	54
1.3.4.2	Gesetzgebung des Bundes.....	54
1.3.4.3	Regelwerk Technik Eisenbahn (RTE).....	55
1.3.4.4	Unternehmensspezifische Regelwerke	57
1.3.4.5	Normen nationaler Organisationen	57
1.3.4.6	Gesamtübersicht.....	57
1.3.5	Verbindlichkeiten.....	57
	Literatur	58
2	Infrastrukturplanung	59
2.1	Aufgaben, Prozesse und Akteure der Infrastrukturplanung	59
2.1.1	Entwicklung der Infrastrukturplanung	59
2.1.1.1	Anfänge der Infrastrukturplanung	59
2.1.1.2	Infrastrukturplanung im 19. Jahrhundert	59
2.1.1.3	Infrastrukturplanung im 20. Jahrhundert	61
2.1.2	Integrierte Infrastrukturplanung.....	61
2.1.2.1	Lebenszyklusphasen eines Bahnsystems.....	61
2.1.2.2	Teilaufgaben der Bahninfrastruktur	63
2.1.2.3	Übergeordnete Ziele der Infrastrukturstrategie	64
2.1.2.4	Kernkompetenzen für die Strategieumsetzung	64
2.1.3	Gliederung des Planungsprozesses	65
2.1.4	Finanzierung als Bestimmungsgrösse des Planungsprozesses	66
2.1.5	Infrastrukturplanung als Gemeinschaftsaufgabe von Staat und Infrastrukturunternehmungen.....	68
2.1.5.1	Überblick über die Infrastrukturplanungen des Staates	68
2.1.5.2	Überblick über die Infrastrukturplanungen der Infrastrukturunternehmungen .	68
2.1.5.3	Aufgabenteilung und Integrationsaufgaben	69
2.2	Staatliche Infrastrukturplanungen	69
2.2.1	Zielsetzungen der staatlichen Infrastrukturplanung.....	69
2.2.2	Kontinentale Infrastrukturplanung	71
2.2.2.1	Infrastrukturplanung der Europäischen Union.....	71
2.2.2.2	Transeuropäische Verkehrsnetze (TEN-T).....	72

2.2.2.3	Transeuropäische Bahnnetze	73
2.2.2.4	Paneuropäische Verkehrskorridore	74
2.2.3	Nationale Bahninfrastrukturplanung der Schweiz	74
2.2.3.1	Überblick	74
2.2.3.2	Bahn 2000	75
2.2.3.3	Neue Eisenbahn-Alpentransversale (NEAT)	77
2.2.3.4	Finanzierung der Infrastruktur des öffentlichen Verkehrs (FinöV)	79
2.2.3.5	Zukünftige Entwicklung der Bahninfrastruktur (ZEB)	80
2.2.3.6	Finanzierung und Ausbau der Bahninfrastruktur (FABI)	80
2.2.3.7	Interoperables Bahnnetz der Schweiz	82
2.2.4	Übergreifende Planungswerke	84
2.2.4.1	Überblick	84
2.2.4.2	Raumkonzept Schweiz	84
2.2.4.3	Sachpläne des Bundes	85
2.2.4.4	Richtpläne der Kantone	85
2.2.4.5	Nutzungspläne der Gemeinden	86
2.2.4.6	Agglomerationsprogramme des Bundes	86
2.3	Infrastrukturplanung der Eisenbahn-Infrastrukturunternehmungen	87
2.3.1	Aufgaben, Anlagengruppen, Koordination mit der Angebotsplanung	87
2.3.2	Netzentwicklung	89
2.3.2.1	Zielsetzungen der Netzentwicklung	89
2.3.2.2	Verkehrliche Einflüsse	90
2.3.2.3	Betriebliche Einflüsse	92
2.3.2.4	Technische Einflüsse	94
2.3.2.5	Finanzielle Einflüsse	94
2.3.3	Regionale Gesamtperspektiven	94
2.3.4	Rahmenpläne	95
2.3.5	Objektplanungen	97
2.3.5.1	Überblick	97
2.3.5.2	Projektprozess	98
2.3.5.3	Projektorganisation	100
2.3.5.4	Plangenehmigungsverfahren	101
2.3.5.5	Beschaffungsrechtliche Bestimmungen	103
2.3.5.6	Bestimmungsgrößen der terminlichen Projektplanung	104
2.3.6	Netzweite Steuerungsprozesse	104
2.3.6.1	Überblick	104
2.3.6.2	Inhaltliche Projektsteuerung	105
2.3.6.3	Programmbasierte Projektsteuerung	105
2.3.6.4	Terminliche Projektsteuerung	105
2.3.6.5	Finanzielle Projektsteuerung	106
2.3.6.6	Technologische Projektsteuerung	106
2.4	Lageplanung von Bahninfrastrukturen	107

2.4.1	Aufgaben der Lageplanung	107
2.4.2	Trassenwahl, Trassierungsparameter, Trassierungsregeln	107
2.4.2.1	Anforderungen an die Trassenwahl	107
2.4.2.2	Festlegung der Parameter	108
2.4.2.3	Trassierungsregeln	109
2.4.3	Korridorwahl, Linienführungsentwicklung, Trassenwahl.....	110
2.4.3.1	Überblick.....	110
2.4.3.2	Korridorevaluation.....	111
2.4.3.3	Linienführungsentwicklung.....	113
2.4.3.4	Trassenwahl.....	115
2.4.4	Lageplanung im städtischen Raum.....	116
2.4.4.1	Korridorevaluation.....	116
2.4.4.2	Aufgabenveränderungen der Bahnhöfe	117
2.4.4.3	Primäre, sekundäre und tertiäre Funktion von Bahnhöfen	118
2.4.4.4	Primäre Funktion: Zugang zur Bahn	119
2.4.4.5	Sekundäre Funktion: Verkaufs- und Freizeitzentrum.....	120
2.4.4.6	Tertiäre Funktion: Städtischer Entwicklungsschwerpunkt	121
2.4.4.7	Handlungsstrategien und planerische Aufgaben.....	122
	Literatur	123
3	Anlagenentwurf	127
3.1	Entwurf von Gleisanlagen.....	127
3.1.1	Grundlagen des Entwurfs von Gleisanlagen.....	127
3.1.1.1	Überblick.....	127
3.1.1.2	Definition und Aussagekraft der Gleistopologie.....	128
3.1.1.3	Betriebliche Planungsgrundlagen	130
3.1.2	Topologische Grundelemente, Teiltopologien.....	130
3.1.2.1	Topologische Grundelemente	130
3.1.2.2	Topologische Kombinationen für Doppelspuren	131
3.1.2.3	Topologische Kombinationen zur Querung von Gleisfeldern	132
3.1.2.4	Topologische Kombinationen für Bahnhofsköpfe	132
3.1.3	Betriebsformen der Topologie	133
3.1.3.1	Betriebsformen einzelner Topologieelemente	133
3.1.3.2	Betriebsformen mehrerer paralleler Topologieelemente.....	133
3.1.3.3	Topologien im Linienbetrieb und Richtungsbetrieb	134
3.1.4	Topologieelemente zur Gewährleistung der Sicherheit.....	134
3.1.4.1	Konfliktformen zwischen Zügen und deren Sicherung.....	134
3.1.4.2	Topologierelevante Restrisiken.....	136
3.1.4.3	Durchrutschweg.....	136
3.1.4.4	Schutzweichen.....	137
3.1.4.5	Gleissperren/Entgleisungsvorrichtungen.....	137
3.1.5	Entwurfsprozess	138

3.1.5.1	Entwurfsebenen.....	138
3.1.5.2	Topologieentwicklung durch Überlagerung von Partialtopologien	138
3.1.5.3	Integration der Personenverkehrs-, Güterverkehrs- und Betriebsanlagen.....	139
3.1.5.4	Integration in die Gesamtanlage.....	139
3.1.5.5	Entwurfsprinzipien	140
3.1.6	Topologie von Knoten.....	141
3.1.6.1	Funktion Durchfahrt	141
3.1.6.2	Funktion Halt	141
3.1.6.3	Funktion Überholung	142
3.1.6.4	Funktion Zugkreuzung	143
3.1.6.5	Funktion Wenden von Zügen	144
3.1.6.6	Funktion Streckenverzweigung.....	150
3.1.6.7	Funktion Streckenkreuzung.....	152
3.1.6.8	Funktion Zugvereinigung/Zugtrennung	154
3.1.7	Topologie von Strecken	155
3.1.7.1	Zusammenhänge zwischen Streckentopologie und Kapazität.....	155
3.1.7.2	Einspurstrecken	156
3.1.7.3	Fahrplanorientierte Doppelspurabschnitte	158
3.1.7.4	Durchgehende Doppelspurstrecken.....	159
3.1.7.5	Dreispurstrecken	161
3.1.7.6	Vierspurstrecken.....	161
3.1.8	Gesamttopologie und Bereichstopologien.....	162
3.1.8.1	Entwicklung der Gesamttopologie	162
3.1.8.2	Kritische Netzbereiche	163
3.1.8.3	Projektabgrenzung.....	163
3.1.8.4	Aufgabenstellungen bei Bereichstopologien.....	164
3.1.8.5	Kopfbahnhöfe	164
3.1.8.6	Integrierte Taktknoten	166
3.1.8.7	S-Bahn-Stammstrecken	166
3.1.8.8	Korridorverflechtungen.....	167
3.1.8.9	Lange Strecken mit Mischverkehr.....	169
3.2	Entwurf von Personenverkehrsanlagen	169
3.2.1	Grundlagen der Personenverkehrsanlagen und planerische Aufgaben	169
3.2.1.1	Räumliche und funktionale Abgrenzung.....	169
3.2.1.2	Haltepunkttypen	170
3.2.1.3	Nutzergruppen und deren Anforderungen	172
3.2.1.4	Gestaltungsaufgaben und Vorgehen	173
3.2.2	Einpassung der Fußgängeranlagen in die Gleisanlage.....	175
3.2.2.1	Aufgabenstellung und Anforderungen	175
3.2.2.2	Perronanordnung bei Doppelspuren	175
3.2.2.3	Perronanordnung bei Endstationen	176
3.2.2.4	Perronanordnung bei Umsteigepunkten von Bahnen gleicher Spurweite.....	177

3.2.2.5	Perronanordnung bei Umsteigepunkten von Bahnen unterschiedlicher Spurweite	178
3.2.2.6	Perrongestaltung	179
3.2.2.7	Perronerschiessung.....	180
3.2.3	Gestaltung des inneren Wegenetzes	181
3.2.3.1	Aufgabenstellung und Anforderungen	181
3.2.3.2	Lagebeziehungen zwischen Aufnahmegebäude, Gleisanlage und Perron	182
3.2.3.3	Raumprogramm des Aufnahmegebäudes, Anordnung der Nutzungen	183
3.2.3.4	Topologiekonzepte	185
3.2.3.5	Gestaltung	187
3.2.3.6	Orientierung	188
3.2.3.7	Information	189
3.2.4	Anbindung des Haltepunktes an das Umfeld	190
3.2.4.1	Aufgabenstellung und Anforderungen	190
3.2.4.2	Grossräumige Anbindung	191
3.2.4.3	Zugang zum Haltepunkt	191
3.2.4.4	Anbindung an öffentliche Zubringerverkehrsmittel	191
3.2.4.5	Intermodalität	193
3.2.4.6	Gestaltung	194
3.3	Entwurf von Güterverkehrsanlagen.....	195
3.3.1	Eigenschaften der Güter.....	195
3.3.1.1	Einführung.....	195
3.3.1.2	Umschlagprinzipien.....	196
3.3.1.3	Auswirkungen auf Betrieb und Infrastruktur.....	196
3.3.1.4	Standortwahl von Güterverkehrsanlagen	197
3.3.1.5	Ausgestaltung und Dimensionierung.....	197
3.3.2	Anlagen des konventionellen Güterverkehrs.....	198
3.3.3	Rangierbahnhöfe	199
3.3.4	Terminals des kombinierten Verkehrs	202
3.4	Entwurf von Betriebsanlagen.....	203
3.4.1	Überblick.....	203
3.4.2	Abstellanlagen	204
3.4.2.1	Standortwahl.....	204
3.4.2.2	Funktionen und erforderliche Kapazität	205
3.4.2.3	Anordnung von Abstellgleisen	205
3.4.3	Triebfahrzeugdepots	207
3.4.4	Werkstätten	208
3.5	Entwurf von Anlagen im Strassenraum	210
3.5.1	Öffentlicher Verkehr im Strassenraum	210
3.5.2	Gestaltung der Strecken.....	211
3.5.2.1	Querschnittsaufteilung.....	211
3.5.2.2	Räumliche Trennung.....	213

3.5.2.3	Betriebliche Trennung.....	215
3.5.2.4	Tram im Mischverkehr.....	216
3.5.2.5	Tram in Fussgängerzonen.....	217
3.5.3	Gestaltung der Knoten.....	219
3.5.3.1	Ziele der Knotengestaltung	219
3.5.3.2	Knoten mit Lichtsignalanlagen.....	219
3.5.3.3	Koordinierte Knoten	221
3.5.3.4	Anordnung der Haltestellen an Knoten.....	221
3.5.3.5	Fahrstrassenkonflikte an Strassenbahnknoten.....	221
3.5.4	Haltestellenanordnung.....	223
3.5.4.1	Haltestellentypen.....	223
3.5.4.2	Haltestellenplanung	225
3.5.4.3	Anordnung der Halteplätze und Ausstattung von Haltestellen	226
3.5.5	Wendeanlagen.....	227
3.5.5.1	Ausgangslage und Anforderungen.....	227
3.5.5.2	Realisierungsformen.....	227
3.5.5.3	Eignung der Anlagentypen.....	228
	Literatur	228
4	Anlagenprojektierung.....	231
4.1	Grundlagen	231
4.1.1	Einleitung.....	231
4.1.1.1	Überblick.....	231
4.1.1.2	Projektierungsaufgaben.....	231
4.1.1.3	Bestimmungsgrössen.....	232
4.1.2	Trassierungselemente, Zielgrössen, Grenzwerte	232
4.1.2.1	Trassierungselemente	232
4.1.2.2	Zielgrössen der Trassierung	233
4.1.2.3	Grenzwerte.....	234
4.1.3	Geschichte der Trassierung	234
4.1.3.1	Einflüsse auf die Entwicklung der Trassierungsparameter	234
4.1.3.2	Ausdifferenzierung der Trassierungselemente	235
4.1.3.3	Europäische Epochen der Trassierung	235
4.1.3.4	Trassierung der frühen Hauptbahnen	236
4.1.3.5	Trassierung der Gebirgsbahnen	238
4.1.3.6	Trassierung der normal- und schmalspurigen Regionalstrecken.....	240
4.1.3.7	Trassierung der Hochgeschwindigkeitsbahnen	241
4.1.3.8	Trassierung der elektrischen Strassen- und Überlandbahnen	241
4.1.3.9	Trassierung der Zahnrad- und Standseilbahnen.....	242
4.2	Horizontale Linienführung	243
4.2.1	Gerade.....	243
4.2.2	Kreisbogen	244

4.2.2.1	Kräfte bei der Fahrt durch einen Kreisbogen.....	244
4.2.2.2	Kreisbogen mit ausgleichender Überhöhung.....	246
4.2.2.3	Kreisbogen mit Überhöhungsfehlbetrag.....	247
4.2.2.4	Kreisbogen mit Überhöhungsüberschuss	249
4.2.2.5	Fahrzeugseitige Einflüsse bei konventionellem Rollmaterial	250
4.2.2.6	Fahrzeugseitige Einflüsse durch Wagenkastenneigung.....	251
4.2.2.7	Projektierungswerte der Überhöhung.....	253
4.2.2.8	Geometrische Minimalwerte bei Kreisbögen.....	255
4.2.3	Übergangsbogen zwischen Gerade und Kreisbogen.....	256
4.2.3.1	Aufgaben und Zielgrößen	256
4.2.3.2	Kontinuierlicher Übergang Gerade – Kreisbogen und Krümmungszuwachs	258
4.2.3.3	Diskontinuierlicher Übergang Gerade – Kreisbogen.....	260
4.2.3.4	Überhöhungsrampe und Hubgeschwindigkeit	260
4.2.3.5	Verwindung	263
4.2.3.6	Anordnung von Übergangsbogen und Überhöhungsrampe	263
4.2.3.7	Abfolge von Trassierungselementen	264
4.2.3.8	Weiterentwickelte Geometrien.....	265
4.2.4	Zulässige Geschwindigkeiten im Bogen	266
4.2.4.1	Limitierende Faktoren für die Geschwindigkeit im Bogen	266
4.2.4.2	Kippen des Fahrzeuges.....	267
4.2.4.3	Aufsteigen des Spurkranzes.....	267
4.2.4.4	Gleisverrückung	267
4.2.4.5	Komfort.....	268
4.2.4.6	Limitierende Faktoren	268
4.3	Vertikale Linienführung.....	268
4.3.1	Eisenbahnen	268
4.3.1.1	Bestimmungsgrößen der Längsneigung	268
4.3.1.2	Richtwerte	269
4.3.1.3	Ausgestaltung der Neigungswechsel.....	270
4.3.1.4	Zulässige Geschwindigkeiten im Gefälle	271
4.3.1.5	Darstellung des vertikalen Verlaufs.....	272
4.3.2	Strassenbahnen.....	273
4.3.3	Zahnradbahnen.....	275
4.3.4	Standseilbahnen	275
4.4	Weichen und Gleisdurchschneidungen	277
4.4.1	Überblick.....	277
4.4.2	Einfache Weichen.....	278
4.4.2.1	Grundformen.....	278
4.4.2.2	Geometrie und Bezeichnungen	279
4.4.2.3	Klothoidenweichen.....	282
4.4.2.4	Bezeichnungsschema für die Weichentypen.....	284
4.4.2.5	Überhöhung bei einfachen Weichen.....	285

4.4.3	Bogenweichen	285
4.4.3.1	Definitionen	285
4.4.3.2	Geometrie.....	287
4.4.3.3	Überhöhung bei Bogenweichen.....	289
4.4.4	Gleisdurchschneidungen, Kreuzungsweichen.....	290
4.4.5	Strassenbahnweichen	294
4.4.5.1	Besonderheiten von Strassenbahnweichen	294
4.4.5.2	Bogenweichen	294
4.4.5.3	Strassenbahnweichen mit vorgezogener Zunge	295
4.5	Lichtraumprofil und Perrongeometrie.....	297
4.5.1	Grundsätze und Aufbau des Lichtraumprofils	297
4.5.1.1	Überblick.....	297
4.5.1.2	Grundsätze, Definitionen	297
4.5.1.3	Aufbau des Lichtraumprofils	298
4.5.1.4	Herleitung des Lichtraumprofils.....	300
4.5.2	Schweizerische Lichtraumprofile, besondere Räume.....	302
4.5.2.1	Lichtraumprofile nach AB-EBV.....	302
4.5.2.2	Stromabnehmerräume	303
4.5.2.3	Sicherheitsräume	304
4.5.2.4	Abstände von Gleisachsen	304
4.5.3	Perrongeometrie.....	305
4.5.3.1	Aufgabenstellung	305
4.5.3.2	Perronhöhe	305
4.5.3.3	Spaltbreite	305
4.5.3.4	Angewandte Perron- und Wagenbodenhöhen	306
4.6	Kapazitätsdimensionierung von Personenverkehrsanlagen	308
4.6.1	Zielsetzungen und Anlagenelemente.....	308
4.6.1.1	Überblick.....	308
4.6.1.2	Planerische Grundlagen.....	309
4.6.1.3	Qualitätsorientierte Kapazitätsdimensionierung.....	310
4.6.2	Dimensionierungsnachfrage.....	311
4.6.2.1	Massgebende Lastfälle und deren Charakteristiken	311
4.6.2.2	Betriebliche Einflussgrössen auf die Perronbelastung.....	311
4.6.2.3	Ermittlung der Zusteigerströme.....	312
4.6.2.4	Ermittlung der Aussteigerströme.....	314
4.6.2.5	Ermittlung der übrigen Fussgängerströme.....	315
4.6.3	Kapazität von Fussgängeranlagen	315
4.6.3.1	Geschwindigkeiten von Fussgängern	315
4.6.3.2	Kapazitätsberechnung von ebenen Fussgängeranlagen und Treppen.....	317
4.6.3.3	Kapazitätsberechnung von Rolltreppen und Rollbändern.....	318
4.6.3.4	Kapazitätsberechnung von Liftanlagen	320
4.6.4	Benützungsqualität von Fussgängeranlagen, Level-of-Service.....	322

4.6.5	Vorgehen bei der qualitätsorientierten Dimensionierung	324
4.6.5.1	Dimensionierungsorientierte Gliederung der Anlage	324
4.6.5.2	Vorgehen bei der Kapazitätsberechnung	325
4.6.5.3	Kapazität und Benützungsqualität ebener Gehwege, Plätze und Treppen.....	327
4.6.5.4	Kapazität und Benützungsqualität von Rolltreppen und Liften.....	328
4.6.5.5	Kapazität von Zugangs- und Kontrollsystemen	328
4.6.5.6	Kapazität und Benützungsqualität von Warteflächen.....	329
4.6.5.7	Dimensionierung mittels mikroskopischer Simulationsverfahren	329
4.6.6	Perrondimensionierung	331
4.6.6.1	Zu dimensionierende Anlagenteile von Bahnhöfen	331
4.6.6.2	Dimensionierungsmethodik bei Bahnhöfen	332
4.6.6.3	Zu dimensionierende Anlagenteile bei Tram- und Bushaltestellen	333
4.6.6.4	Dimensionierungsmethodik bei Tram- und Bushaltestellen	334
4.6.6.5	Dimensionierungsformeln	335
4.6.7	Dimensionierung der Umsteigezeiten	336
4.6.7.1	Aufgabenstellung und Vorgehen.....	336
4.6.7.2	Berücksichtigung der Streuung der Fussgängergeschwindigkeit.....	336
4.6.7.3	Zusammenhang zwischen Anlagengestaltung und Umsteigezeiten	337
	Abkürzungen zur Linienführung	338
	Anhang.....	340
	Literatur	341
5	Bahntechnik	345
5.1	Fahrweg der Bahn, Entwicklung der Fahrbahn und Fahrbahnbauarten	345
5.1.1	Überblick über den Fahrweg der Bahn	345
5.1.2	Anforderungen an die Fahrbahn, Begriffe, Entwicklung	346
5.1.2.1	Anforderungen an die Fahrbahn.....	346
5.1.2.2	Begriffe.....	346
5.1.2.3	Entwicklung der Fahrbahn	347
5.1.3	Schotterfahrbahn.....	349
5.1.4	Feste Fahrbahnen	352
5.1.4.1	Überblick über die Systeme fester Fahrbahnen.....	352
5.1.4.2	Ausgewählte Bauarten: Systeme mit eingelagerten Schwellen STEDEF/LVT	354
5.1.4.3	Ausgewählte Bauarten: Eingegossene Schwellen Rheda	355
5.1.4.4	Ausgewählte Bauarten: System mit aufgelagerten Schwellen, GETRAC	355
5.1.4.5	Ausgewählte Bauarten: Plattenbauweisen Bögl und ÖBB-PORR	357
5.1.5	Anwendungsbereiche der Fahrbahnen.....	358
5.1.5.1	Systemvergleich zwischen Schotterfahrbahn und festen Fahrbahnen	358
5.1.5.2	Wirtschaftliche Anwendungsbereiche der Schotterfahrbahn und der festen Fahrbahnen	360
5.1.5.3	Technische Anwendungsbereiche der Schotterfahrbahn und der festen Fahrbahnen	361

5.1.5.4	Verbreitung	362
5.1.6	Fahrbahnbauarten der Strassenbahn.....	362
5.1.6.1	Anforderungen	362
5.1.6.2	Überblick über die Fahrbahnbauarten.....	363
5.1.6.3	Ausgewählte Bauarten: Querschwellengleis in Betontragschicht eingelagert....	364
5.1.6.4	Ausgewählte Bauarten: Rahmengleis mit Verankerung in der Tragschicht.....	365
5.2	Schotterfahrbahn.....	365
5.2.1	Schienen.....	365
5.2.1.1	Anforderungen	365
5.2.1.2	Profilformen	366
5.2.1.3	Schienenherstellung.....	368
5.2.1.4	Schienenmaterialien.....	368
5.2.1.5	Stosslückengleis	369
5.2.1.6	Ausziehstösse/Dilatationsvorrichtungen	370
5.2.1.7	Isolierstösse.....	371
5.2.1.8	Lückenlos verschweisstes Gleis.....	372
5.2.2	Schienenbefestigungen	373
5.2.2.1	Anforderungen	373
5.2.2.2	Befestigungsbauarten.....	374
5.2.2.3	Schienenbefestigung für schotterlosen Oberbau	375
5.2.3	Weichenbauteile	376
5.2.3.1	Bezeichnung der Weichenbauteile	376
5.2.3.2	Zungenvorrichtungen	376
5.2.3.3	Herzstücke.....	377
5.2.3.4	Weichenverschlüsse.....	380
5.2.3.5	Weichenheizungen	383
5.2.4	Leit- und Fangschienen	384
5.2.5	Zahnstangen.....	385
5.2.6	Schwellen.....	388
5.2.6.1	Anforderungen	388
5.2.6.2	Holzschwellen	389
5.2.6.3	Stahlschwellen	389
5.2.6.4	Betonschwellen	391
5.2.6.5	Kunststoffschwellen	394
5.2.6.6	Anwendungsbereiche der Schwellenbauarten	394
5.2.7	Schotterbett.....	395
5.2.8	Unterbau	395
5.3	Bahnstromversorgung	398
5.3.1	Elemente der Bahnstromversorgung	398
5.3.2	Bahnstromsysteme.....	398
5.3.2.1	Überblick.....	398
5.3.2.2	Gleichstrom.....	400

5.3.2.3	Einphasenwechselstrom	400
5.3.2.4	Drehstrom.....	400
5.3.3	Aufbau der Bahnstromversorgung.....	401
5.3.3.1	Struktureller Aufbau.....	401
5.3.3.2	Zentrale Bahnstromversorgung mit Sonderfrequenz.....	402
5.3.3.3	Dezentrale Bahnstromversorgung mit Sonderfrequenz.....	402
5.3.4	Bahnstromübertragung und -verteilung.....	403
5.3.5	Elektrische Interaktionen	404
5.3.5.1	Stromkreis der Bahnstromversorgung.....	404
5.3.5.2	Streustromkorrosion bei Gleichstrombahnen.....	405
5.3.5.3	Beeinflussung der Sicherungsanlagen durch Bahnstrom.....	407
5.3.6	Fahrleitungen	407
5.3.6.1	Überblick.....	407
5.3.6.2	Oberleitungsbauarten	408
5.3.6.3	Stützpunkte.....	411
5.3.6.4	Quertrageinrichtungen	414
5.3.6.5	Stromschienen, Deckenstromschienen.....	416
5.3.6.6	Fahrdraht.....	418
5.3.7	Interaktionen Stromabnehmer – Fahrdraht.....	418
5.4	Telekommunikation	419
5.4.1	Überblick.....	419
5.4.2	Festnetz der Bahn	420
5.4.3	Drahtlose Systeme.....	421
5.5	Sicherungs- und Leittechnik, Leitsysteme	421
5.5.1	Überblick.....	421
5.5.1.1	Sicherheit und Risiko	421
5.5.1.2	Sicherheitsaufgaben im Bahnsystem	422
5.5.1.3	Systemaufbau der Sicherungs- und Leittechnik.....	422
5.5.2	Aussenanlagen	424
5.5.2.1	Aussensignale	424
5.5.2.2	Weichen.....	425
5.5.2.3	Gleisfreimeldeeinrichtungen.....	427
5.5.2.4	Punkt förmige Zugbeeinflussungseinrichtungen.....	428
5.5.2.5	Linien förmige Zugbeeinflussungseinrichtungen.....	429
5.5.3	Stellwerke, Streckenblock	430
5.5.3.1	Aufgaben der Stellwerke.....	430
5.5.3.2	Stellwerkbauformen	430
5.5.3.3	Streckenblock.....	434
5.5.4	ERTMS.....	435
5.5.4.1	Einführung.....	435
5.5.4.2	Konzeptelemente von ETCS.....	435
5.5.4.3	Umsetzungsstufen von ETCS.....	436

5.5.4.4	Technischer und funktionaler Vergleich der ETCS-Levels.....	437
5.5.5	Leitsysteme	438
5.5.5.1	Steuerung und Regelkreise.....	438
5.5.5.2	Aufgaben der Betriebslenkung und Leittechnik.....	440
5.5.5.3	Stellwerkfernsteuerung, Fernsteuerzentren	440
5.5.5.4	Zuglenkung.....	441
5.5.6	Dispositionssysteme	441
5.5.7	Automationssysteme.....	442
5.5.8	Leit- und Störmeldesysteme.....	443
5.5.8.1	Überwachte und gesteuerte Anlagen.....	443
5.5.8.2	Funktionen der Leit- und Störmeldesysteme	444
5.5.8.3	Interaktion mit der Bahnsicherungs- und Leittechnik.....	445
5.6	Technologiestrategie und Innovation	446
5.6.1	Technologiestrategie.....	446
5.6.1.1	Überblick.....	446
5.6.1.2	Ausprägungen von Innovationen.....	446
5.6.1.3	Technologische Strategien	446
5.6.1.4	Prozess des Wissensmanagements	447
5.6.2	Herausforderungen und Schwerpunkte der bahntechnischen Innovation	448
5.6.2.1	Herausforderungen der Bahn.....	448
5.6.2.2	Konzentration auf komparative Stärken der Bahn	449
5.6.2.3	Schwerpunkte der bahntechnischen Innovation.....	449
5.6.3	Innovationsprozesse in der Bahntechnik.....	450
5.6.3.1	Definitionen und Innovationsprozess	450
5.6.3.2	Allgemeiner Innovationsprozess.....	451
5.6.3.3	Bahntechnische Innovationsperioden.....	451
5.6.3.4	Systeminnovationen bei der Bahn	452
5.6.4	Akteure im Innovationsprozess der Bahn	453
5.6.5	Innovationsprozess des Bahnsystems.....	455
5.6.6	Kosten, Erträge, Nutzentransfer.....	457
5.6.6.1	Finanzielle Herausforderungen von Systeminnovationen	457
5.6.6.2	Kostenverläufe	457
5.6.6.3	Ertragsverläufe.....	458
5.6.6.4	Wirtschaftliche Tragfähigkeit und Transferbedarf.....	459
5.6.7	Innovationsperspektiven	460
5.6.7.1	Aktuelle Innovationsansätze.....	460
5.6.7.2	Potenziale der Bahnautomation.....	462
5.6.7.3	Konsequenzen der Bahnautomation für das Gesamtsystem	462
	Literatur	463
6	Fahrbahnbau	467
6.1	Zusammenwirken von Fahrwerk und Schiene.....	467
6.1.1	Rad-Schiene-Geometrie.....	467

6.1.2	Fahrzeuglauf in der Geraden	469
6.1.2.1	Sinuslauf des Radsatzes	469
6.1.2.2	Laufinstabilität des Fahrzeugs.....	471
6.1.2.3	Äquivalente Konizität	472
6.1.3	Fahrzeuglauf im Bogen.....	473
6.1.3.1	Fahrzeugstellungen im Bogen	473
6.1.3.2	Rad-Schiene-Kräfte bei der Bogenfahrt.....	475
6.1.3.3	Sicherheit gegen Entgleisung	477
6.2	Statisches Modell der Kräfte in der Fahrbahn.....	478
6.2.1	Einwirkende Kräfte	478
6.2.1.1	Bewegungsformen der Fahrzeuge	478
6.2.1.2	Kräfte zwischen Fahrzeug und Fahrweg	479
6.2.1.3	Systematik der Kräfte zwischen Fahrzeug und Fahrweg.....	481
6.2.1.4	Beanspruchungsstufen für die Dimensionierung.....	482
6.2.1.5	Beanspruchungswerte der Oberbauberechnung.....	482
6.2.2	Horizontalkräfte.....	484
6.2.2.1	Horizontalkräfte zwischen Rad und Schiene	484
6.2.2.2	Kräfte am gesamten Fahrwerk.....	485
6.2.2.3	Kraftkomponenten der Führungskraft.....	488
6.2.2.4	Gleiskraft und Grenze der zulässigen horizontalen Kräfte.....	490
6.2.3	Längskräfte.....	491
6.2.3.1	Überblick.....	491
6.2.3.2	Längskräfte infolge von Temperaturänderungen.....	491
6.2.3.3	Längskräfte infolge des Beschleunigens und Bremsens	493
6.3	Oberbaudimensionierung.....	493
6.3.1	Statische Modelle für gesamte Fahrbahn und Oberbaukomponenten.....	493
6.3.2	Oberbaumodell nach Zimmermann und Winkler.....	494
6.3.3	Oberbauberechnung.....	496
6.3.3.1	Biegelinie der Schiene und abgeleitete Größen.....	496
6.3.3.2	Extremwerte	498
6.3.3.3	Überlagerung mehrerer Lastangriffspunkte.....	499
6.3.3.4	Grundwert des Langschwelenoberbaus	499
6.3.3.5	Bettungszahl.....	500
6.4	Dimensionierung der Oberbaukomponenten.....	501
6.4.1	Dimensionierung der Schiene.....	501
6.4.1.1	Beanspruchung des Schienenkopfes	501
6.4.1.2	Biegebeanspruchung des Schienensteges und -fusses.....	504
6.4.1.3	Verbiegen der Schienen	506
6.4.1.4	Innere Spannungen der Schiene.....	506
6.4.1.5	Dauerfestigkeit und Ermüdung	507
6.4.2	Dimensionierung der Schwelle.....	508
6.4.2.1	Schwellenkraft	508

6.4.2.2	Tragwirkung der Schwelle	508
6.4.2.3	Schwellenbeanspruchung unter vertikaler Last.....	510
6.4.2.4	Schwellenbeanspruchung unter kombinierter Last	511
6.4.3	Dimensionierung des Schotters.....	512
6.4.3.1	Spannungsverteilung in Schotter und Unterbau.....	512
6.4.3.2	Spannungen im Schotter.....	513
6.4.3.3	Massnahmen zur Verminderung der Schotterbeanspruchung	514
6.5	Gleislagestabilität	515
6.5.1	Überblick.....	515
6.5.2	Verlashtes Gleis und Dilatationsvorrichtungen	517
6.5.2.1	Kräfteverlauf im verlashten Gleis	517
6.5.2.2	Hysteresis der Längenveränderung	518
6.5.2.3	Schienenbewegung auf Brücken	518
6.5.2.4	Massgebende Dehnungslängen der Brücken.....	519
6.5.2.5	Anordnung von Dilatationsvorrichtungen.....	520
6.5.3	Querverschiebewiderstand, Rahmensteifigkeit, Neutralisationstemperatur	521
6.5.3.1	Haupteigenschaften für die Lagestabilität	521
6.5.3.2	Querverschiebewiderstand.....	521
6.5.3.3	Einflüsse von Nutzung und Erhaltung auf den Querverschiebewiderstand.....	523
6.5.3.4	Rahmensteifigkeit.....	525
6.5.3.5	Verlegetemperatur, Neutralisationstemperatur, Neutraltemperatur.....	526
6.5.3.6	Reparaturen ausserhalb der Neutralisationstemperatur.....	528
6.5.4	Nachweisverfahren für die Lagestabilität	528
6.5.4.1	Überblick.....	528
6.5.4.2	Differentialgleichung der elastischen Biegelinie.....	528
6.5.4.3	Finite-Elemente-Methode für die Verformung des Bogens	529
6.5.4.4	Energiemethode bei geradem Gleis	529
6.5.4.5	Energiemethode im Bogen	530
6.5.4.6	Radialatmung des lückenlos verschweissten Bogens	532
6.5.5	Anwendung des lückenlos verschweissten Gleises.....	532
6.5.5.1	Voraussetzungen für lagestabiles lückenlos verschweisstes Gleis	532
6.5.5.2	Risiken für die Lagestabilität.....	533
6.5.5.3	Grenzwerte für lückenlos verschweisste Gleise.....	534
	Literatur	535
7	Inbetriebnahme von Bahninfrastrukturen	539
7.1	Überblick.....	539
7.1.1	Definitionen	539
7.1.2	Zielsetzungen der Inbetriebnahme	540
7.1.3	Beteiligte Akteure	541
7.1.4	Zeitliche und räumliche Abgrenzung, Koordination	543
7.1.4.1	Zeitliche Abgrenzung.....	543

7.1.4.2	Räumliche Abgrenzung.....	544
7.1.4.3	Koordinationsaufgaben.....	544
7.1.5	Formelle Vorgaben und Nachweisführung	545
7.1.5.1	Abnahme und Betriebsbewilligung.....	545
7.1.5.2	Relevante Normen.....	545
7.1.5.3	Lebenszyklus nach EN 50126	546
7.1.5.4	Verifizierung und Validierung.....	547
7.2	Inbetriebnahmephasen und Teilprüfungen.....	548
7.2.1	Hauptaktivitäten der Inbetriebnahmephase.....	548
7.2.2	Inbetriebnahmephasen.....	549
7.2.3	1. bis 4. Teilprüfung	550
7.2.3.1	Prüfungen pro Werk (1. Teilprüfung).....	550
7.2.3.2	Integration der Gesamtanlage (2. Teilprüfung).....	551
7.2.3.3	Operativer Probebetrieb (3. Teilprüfung)	552
7.2.3.4	Reduzierter kommerzieller Betrieb (4. Teilprüfung)	553
7.2.4	Inbetriebsetzungen von Verkehrsunternehmungen.....	554
7.3	Testmethoden.....	556
7.3.1	Überblick.....	556
7.3.2	Reliability, Availability, Maintainability, Safety (RAMS).....	556
7.3.2.1	Grundsätze	556
7.3.2.2	Zuverlässigkeit/Reliability.....	557
7.3.2.3	Verfügbarkeit/Availability.....	557
7.3.2.4	Instandhaltbarkeit/Maintainability	558
7.3.2.5	Sicherheit/Safety.....	558
7.3.3	Prüfverfahren vor der Installation der Anlage.....	558
7.3.4	Prüfverfahren nach der Installation der Anlage.....	561
7.4	Organisation und Durchführung der Inbetriebnahme	562
7.4.1	Organisation	562
7.4.2	Verantwortlichkeiten	563
7.4.3	Planung.....	565
7.4.4	Durchführung	566
	Literatur	566
8	Erhaltung von Bahninfrastrukturen	569
8.1	Aufgaben der Erhaltung und des Betriebs, Anlagenerhaltung.....	569
8.1.1	Erhaltung und Betrieb von Bahninfrastrukturen.....	569
8.1.2	Herausforderungen und Teilaufgaben der Anlagenerhaltung	570
8.1.3	Gesetzliche Vorgaben.....	571
8.1.4	Unterhalt und Erneuerung	571
8.2	Arten von Wertminderungen, Einflussfaktoren.....	573
8.2.1	Überblick über die Wertminderungen	573
8.2.2	Technisch-physikalische Wertminderung.....	574

8.2.2.1	Abnutzung	574
8.2.2.2	Überlastung	574
8.2.2.3	Alterung und Obsoleszenz	574
8.2.3	Technisch-ökonomische Wertminderung	575
8.2.4	Einflussfaktoren auf die Wertminderung	576
8.2.5	Insbesondere Wertminderung und Schädigungsformen der Fahrbahn	576
8.3	Überwachung und Zustandsbewertung	579
8.3.1	Zielsetzungen	579
8.3.2	Inhaltliche und räumliche Erfassung der Objekte	580
8.3.2.1	Informationsinhalte	580
8.3.2.2	Positionierungstypen	581
8.3.2.3	Informationstechnische Systeme	582
8.3.3	Überblick über die Methoden des Zustandsmonitorings	582
8.3.4	Diagnose und Prognose des Anlagenzustandes	583
8.3.4.1	Beobachtungen und Begehungen	583
8.3.4.2	Fahrbahnmessungen mit Gleismessfahrzeugen	584
8.3.4.3	Überwachung mit tragbaren Geräten	585
8.3.5	Integrale Fahrweganalyse mit Diagnosefahrzeugen	587
8.3.6	Fahrweganalyse mit Regelfahrzeugen	589
8.3.7	Fernüberwachung und Fernentstörung	590
8.3.8	Zugkontrollleinrichtungen	591
8.4	Erhaltungsstrategie und Substanzerhaltungsbedarf	592
8.4.1	LCC als wirtschaftliches Konzept der Anlagenerhaltung	592
8.4.1.1	Wirtschaftliche Herausforderungen	592
8.4.1.2	LCC bei Bahninfrastrukturen	593
8.4.1.3	Wertmässige Anteile des Erhaltungsbedarfs	594
8.4.1.4	Haupteinflüsse auf die Kosten, Sensitivitäten	594
8.4.2	Zustandsbewertung und -prognose	595
8.4.2.1	Netzzustandsbeurteilungen	595
8.4.2.2	Netzzustandsbericht	596
8.4.2.3	Verlaufsverfolgung	598
8.4.2.4	Zustandsprognosen	598
8.4.3	Abbildung der Substanzerhaltung in der Finanzplanung	598
8.4.4	Erhaltungsstrategie	599
8.4.4.1	Grundstrategien der Erhaltung	599
8.4.4.2	Grenzwerte, Eingriffsschwellen	600
8.4.4.3	Erhaltungsmanagement	601
8.4.5	Ermittlung des Substanzerhaltungsbedarfs	602
8.4.5.1	Grundmodelle	602
8.4.5.2	Pauschale netzweite Bedarfsschätzung	602
8.4.5.3	Detaillierte netzweite Bedarfsschätzung	604
8.4.5.4	Bedarfserhebung für die Erhaltungsplanung	605

8.5	Ansätze zur Kostenminimierung	605
8.5.1	Überblick über die Ansätze	605
8.5.2	Anforderungsmanagement	606
8.5.3	Technologiestrategie	607
8.5.4	Unterhaltsoptimierte Bahntechnik.....	608
8.5.4.1	Unterhaltsarmut und rasche Reparierbarkeit.....	608
8.5.4.2	Vorfertigung und rasche Montage.....	608
8.5.4.3	Komponenten zur Verschleissminderung	609
8.5.5	LCC-orientierte Zustandssteuerung.....	610
8.5.5.1	Zielsetzung.....	610
8.5.5.2	Optimale Lebensdauer der Komponenten	610
8.5.5.3	Hohe Einbauqualität.....	611
8.5.5.4	Absolute Gleislage.....	612
8.5.5.5	Hohe Qualität der Bauteile über Lebenszyklus.....	612
8.5.6	Arbeitsorganisation, Unterhaltsplanung.....	613
8.5.6.1	Überblick.....	613
8.5.6.2	Synchronisierung der Erhaltungsmaßnahmen beim Schotteroberbau	613
8.5.6.3	Optimale Nutzung der Arbeitsintervalle	614
8.5.6.4	Konzentrierte Gesamterneuerung	615
8.5.7	Arbeitsproduktivität.....	617
8.5.7.1	Maschinelle Gleiserneuerung.....	617
8.5.7.2	Richten und Stopfen	618
8.5.7.3	Dynamische Gleisstabilisierung.....	619
8.5.7.4	Profilierung des Schotterbetts	620
8.5.7.5	Schienenschleifen.....	620
8.5.7.6	Schotterbettreinigung	622
8.5.8	Beschaffungsstrategie.....	623
8.5.8.1	Aufgaben und Zielsetzungen der Beschaffungsstrategie.....	623
8.5.8.2	Bestimmungsgrößen für den Eigenfertigungsanteil.....	624
8.5.8.3	Beschaffungsstrategie bei der Bahninfrastruktur	625
8.6	Bahnbetriebliche Erhaltungsplanung.....	626
8.6.1	Aufgaben der Baubetriebsplanung.....	626
8.6.2	Berücksichtigung der Bau- und Erhaltungsarbeiten in der Fahrplan- und Betriebsplanung	627
8.6.3	Baubetriebliche Planungsphasen.....	627
8.6.4	Sperrkonzepte.....	629
8.6.4.1	Formen der Nutzungsbeeinträchtigung	629
8.6.4.2	Systematik der Sperrkonzepte	629
8.6.4.3	Interdisziplinäre Gesamtsanierungen	630
Literatur	632

Vorwort

Sie befördert ihre Fahrgäste mit hohem Komfort, maximaler Sicherheit und minimalem Platzbedarf. Sie verbindet Metropolen direkt und schnell. Grösste Gütermengen über lange Distanzen transportiert sie effizient und zuverlässig. Sie braucht wenig Energie und die Elektromobilität hat sich bei ihr seit über hundert Jahren bewährt. Um ihre Haltepunkte herum entfalten sich Wohnen und Arbeiten. Sie ist für alle Personen zu gleichen Bedingungen zugänglich und garantiert damit die Mobilität für die ganze Gesellschaft. Kurz: Die Eisenbahn bietet sich als Mobilitätsträgerin der Zukunft geradezu an. Im 19. Jahrhundert entstanden, vor fünfzig Jahren totgesagt, hat sie im 21. Jahrhundert eine klare Mission, denn eine nachhaltige Welt ist ohne die nachhaltige Bahn undenkbar – leistungsfähig, sicher, zuverlässig, umweltfreundlich.

Rückgrat ist die Bahninfrastruktur, ein komplexes soziotechnisches System und ein beträchtliches volkswirtschaftliches Vermögen. Deren zentrale verkehrspolitische Bedeutung äussert sich in der Schweiz und anderen Ländern in umfangreichen langfristigen Investitionsprogrammen. Gleichzeitig ist sie bei Weitem nicht kostendeckend und höchste Wirtschaftlichkeit ist bei ihrer Weiterentwicklung gefordert. Dazu ist zunächst der Infrastrukturbedarf funktional richtig zu spezifizieren; nicht zu viel, aber auch nicht zu wenig und vor allem das Richtige ist zu bauen. Lebenszykluskostenoptimale Technologien sollen die Ausführung bestimmen und während der Nutzung sind die Anlagen effizient und effektiv zu erhalten.

Die Bahn ist für alle da und doch eine Welt für sich: Zahlreiche Planungsaufgaben und Projektierungsverfahren sind eigenständig, ebenso die bahntechnischen Systeme, die Diagnostik oder die Erhaltungsverfahren. Grund genug, der Bahninfrastruktur an der ETH Zürich eine eigene Vorlesungsreihe zu widmen. Das über die Jahre entstandene Stoffprogramm wurde in Skripten und Foliensätzen dokumentiert, die sich aber nicht für eine allgemeine Zugänglichkeit eignen. Die intensive Planungs- und Bautätigkeit im Bahnbereich äusserte sich indessen in einem breiten Interesse an einem Einführungswerk in die Materie. Dies motivierte mich, meine Skripte zu überarbeiten und zu aktualisieren sowie mit neuen Inhalten und Auszügen aus eigenen Publikationen abzurunden. Die erste Ausgabe liegt nun als Buch vor. Die Struktur folgt – nach einer übergreifenden Einleitung – dem Lebenszyklus einer Infrastruktur, von der Planung bis zu ihrer Erhaltung. Die Darstellung soll Grundlegendes aufzeigen und den Einstieg in die vertiefende Literatur oder das hervorragende Regelwerk Technik Eisenbahn (RTE) des schweizerischen Verbandes öffentlicher Verkehr erleichtern.

Über die Jahrzehnte haben zahlreiche Personen – bereits unter meinem Vorgänger Prof. Heinrich Brändli – recherchiert sowie Texte und Darstellungen beigezeichnet. Naturgemäss ist es mittlerweile unmöglich, all dies korrekt zuzuordnen; deshalb sei den folgenden Personen an dieser Stelle gedankt: Dr. Bernhard Alt, Daniel Boesch, Hans-Konrad Bareiss, Dr. Axel Bomhauer-Beins, Dr. Ernst Bosina, Dr. Patrick Braess, Prof. Heinrich Brändli (†), Dr. Dirk Bruckmann, Stefan Buchmüller, Dr. Robert Dorbritz, Dr. Nikolaus Fries, Dr. Tobias Fumasoli, Dr. Peter Giger, Dr. Sabrina Herrigel, Christoph Lippuner, Dr. Marco Lüthi, Uwe Kirsch, Dr. Michael Kohler, Christoph Kölblle,

Dr. Mark Meeder, Dr. Severin Rangosch, Dr. Markus Rieder (†), Hannes Schneebeili, Dr. Steffen Schranil, Dr. Marc Sinner, Lukas Stadelmann, Jost Wichser, René Zeller, Manuel Zimmermann.

Mit Sicherheit habe ich Personen vergessen. Dies geschah nicht aus Absicht und gerne trage ich diese in einer nächsten Auflage nach. Ähnliches gilt für die Quellenangaben: Ich habe sie nach bestem Wissen und Gewissen überprüft, auch sie sind aber wohl nicht vollständig. Abbildungen, deren Herkunft ich nicht mehr rekonstruieren konnte und die einen eher grundsätzlichen Charakter haben, habe ich als „eigene Darstellung“ deklariert. Auch hier ist jeder Hinweis erwünscht. Schliesslich ist zu erwarten, dass Inhalte vermisst werden; dies lässt sich gerne ein nächstes Mal hinzufügen.

Ein ganz grosser Dank geht schliesslich an den vdf Hochschulverlag AG an der ETH Zürich. Er hat das verlegerische Risiko auf sich genommen, ein umfangreiches Werk zu einer spezialisierten Materie in sein Programm aufzunehmen. Sein ganzes Team hat die Herstellung mit grossem Einsatz sowie kaum zu übertreffender Präzision und Effizienz geführt, sodass ich mich in aller Ruhe auf die Inhalte konzentrieren konnte.

Prof. Dr. Ulrich Weidmann

1 Einführung in die Bahninfrastrukturen

1.1 Bahninfrastrukturen als Teil der Verkehrsinfrastrukturen

1.1.1 Entwicklung der Bahnnetze

1.1.1.1 Entwicklung des weltweiten Bahnnetzes

In vielen Gebieten der Erde hat sich die Eisenbahn als leistungsfähiges, zuverlässiges und energieeffizientes Landverkehrssystem etabliert. Sie erschliesst dicht besiedelte Agglomerationen, verbindet Metropolen und befördert riesige Gütermengen quer durch die Kontinente. Ihre Kerneigenschaft, die dies ermöglicht, ist die Spurführung; aus dieser wiederum leiten sich zahlreiche Charakteristiken der Infrastruktur sowie ihrer Nutzung und Organisation ab.

Erste Ansätze zu spurgeführten Verkehrssystemen finden sich bereits in der Antike sowie wieder ab dem Spätmittelalter, dannzumal vorwiegend im Bergbau. Erst im industrialisierten England des 19. Jahrhunderts entstanden Eisenbahnen zum allgemeinen Personen- und Gütertransport, beginnend 1825 zwischen Stockton und Darlington. Waren es zuerst einzelne Strecken, die bedeutende Städte, Produktionsstandorte oder Rohstoffvorkommen mit Wasserstrassen verbanden, so erwies sich die Eisenbahn rasch den Strassen und Kanälen überlegen und revolutionierte damit das Verkehrswesen. Um 1930 erreichte das weltweite Bahnnetz mit rund 1,53 Mio. km seine bisher grösste Ausdehnung.

Ab den 1930er-Jahren sowie erneut ab den 1950er-Jahren wurden indessen in Europa und Nordamerika zahlreiche Regionalbahnen auf Busbetrieb umgestellt. Zudem wurden vor allem in Afrika und Südamerika längere Eisenbahnstrecken aufgegeben. In der jüngeren Zeit bis in die Gegenwart wurden im Gegenzug wieder neue Hochgeschwindigkeitsstrecken und Schwerlast-Güterbahnen in Asien, in Australien, im Nahen Osten sowie in Europa gebaut. Nach einem Tiefpunkt ist das weltweite Bahnnetz deshalb erneut auf etwa 1,37 Mio. km angewachsen.

Vierteljahrhundert	Aufbau der Bahnnetze	Rückbau der Bahnnetze
1825–1850	Normalspurige Hauptbahnen im einfachen Gelände	
1850–1875	<ul style="list-style-type: none">Normalspurige Hauptbahnen im schwierigen GeländeNormalspurige Nebenbahnen	
1875–1900	<ul style="list-style-type: none">Normalspurige Hauptbahnen im GebirgeSchmalspurbahnenStrassenbahnen in Gross- und Mittelstädten	
1900–1925	<ul style="list-style-type: none">Überland-StrassenbahnenOrts- und touristische Strassenbahnen	

Vierteljahr-hundert	Aufbau der Bahnnetze	Rückbau der Bahnnetze
1925–1950	Beginnender Aufbau des Busnetzes	Ab 2. Weltkrieg, normal- und schmalspurige Nebenbahnen, Überland-Strassenbahnen und kleine Strassenbahnnetze wegen Strassenkonkurrenz und Abnutzung der Infrastruktur
1950–1975	Rasche Ausdehnung des Busnetzes	
1975–2000	Ergänzung der Hauptbahnen zum Teil durch Hochgeschwindigkeitsstrecken	Normal- und schmalspurige Regionalbahnen
2000–heute	<ul style="list-style-type: none"> ■ Wiedereinführung von Tramnetzen ■ Verbindung der Hochgeschwindigkeitsstrecken zu einem Netz 	Regionalbahnen in bevölkerungsschwachen oder sich entvölkernden Gegenden, insbesondere Osteuropa

Tabelle 1 Entwicklungsperioden der Bahnsysteme in Europa, generalisiert [eigene Darstellung].

1.1.1.2 Entwicklung des schweizerischen Bahnnetzes

In der Schweiz setzte der Bahnbau, in Folge schwacher Industrialisierung und politischer Zersplitterung, vergleichsweise spät ein. Nicht zufälligerweise war es mit der Strecke Strassburg – Basel eine ausländische Bahn, die das Bahnzeitalter im Jahr 1844 einleitete. Als erste inner-schweizerische Strecke wurde 1847 die Verbindung Zürich – Baden dem Betrieb übergeben. Erst 1852 – nach Gründung des schweizerischen Bundesstaates – konnte aber die Rechtssituation

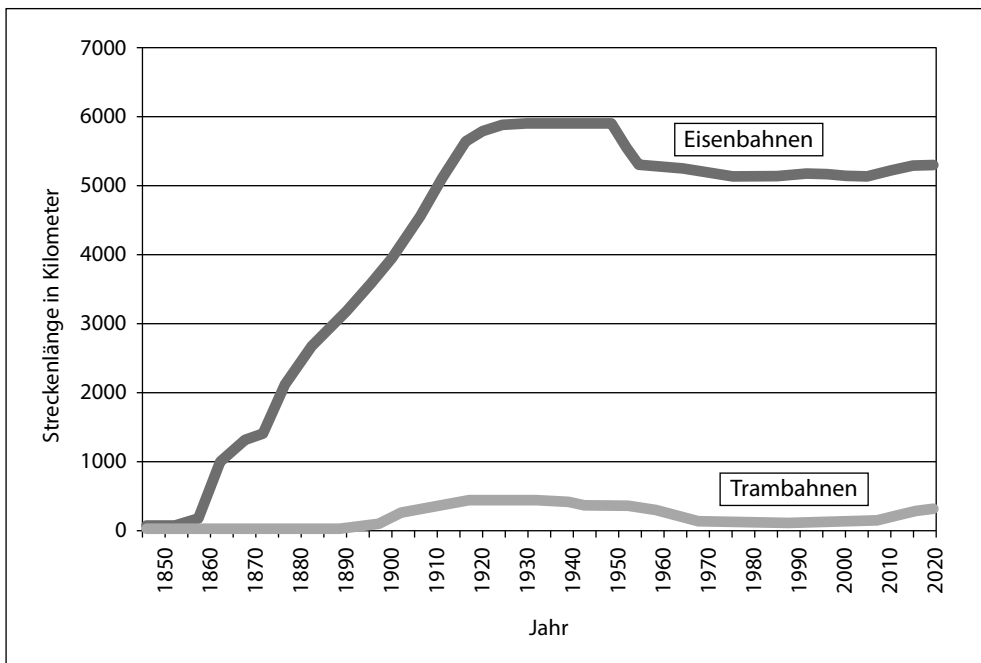


Abbildung 1 Entwicklung des schweizerischen Bahnnetzes seit 1844, getrennt nach Eisenbahnen und Trambahnen; die Zahnradbahnen sind in der Kategorie der Eisenbahnen enthalten [eigene Darstellung].

mit dem schweizerischen Eisenbahngesetz verlässlich geklärt werden. Bis etwa 1875 entstand in der Folge nahezu das gesamte Hauptstreckennetz, mit einer Baugeschwindigkeit von rund 190 km/Jahr. Ab den 1870er-Jahren folgten die regionalen Netzergänzungen. Dabei erlaubte das hydroelektrische Potenzial bereits früh die Erstellung kostengünstiger und leistungsfähiger elektrischer Regional- und Bergbahnen. Nach dem 1. Weltkrieg kam der Bahnbau weitgehend zum Erliegen und die weitere Verdichtung des Netzes des öffentlichen Verkehrs erfolgte vorwiegend mit dem Autobus. Die grösste Netzausdehnung der Schweizer Bahnen wurde um 1940 mit rund 5900 km erreicht. Anschliessend wurden zwar noch einzelne Netzergänzungen realisiert, insgesamt aber rund 800 km oder 14 % stillgelegt. Erst in jüngerer Zeit wurden wieder namhafte Netzerweiterungen realisiert.

1.1.1.3 Strukturelle Vereinheitlichung der Bahnnetze

Wurde das Bahnnetz zunächst in einer grossen Vielfalt – oft situativ gewählter – technischer und betrieblicher Eigenschaften aufgebaut, ist seit den 1920er-Jahren eine Vereinheitlichung im Gang. Die Infrastrukturen wurden sukzessive standardisiert und die vielfältigen Überlandstrassenbahnen wurden entweder eigentrassiert oder auf Bus umgestellt. Zudem verschwanden zahlreiche kürzere Strecken mit meist eigenständigen Ausbauparametern. Das heutige schweizerische Netz setzt sich aus normalspurigen Haupt- und Regionalbahnen, Schmalspurbahnen und den Tramnetzen der vier grössten Städte zusammen. Verschwunden sind dagegen vor allem die Überlandstrassenbahnen sowie die Strassenbahnen in Kleinstädten und Tourismusorten. In den europäischen Metropolen verbreiteten sich zudem vor allem in den letzten rund sechzig Jahren die U- und Stadtbahnen.

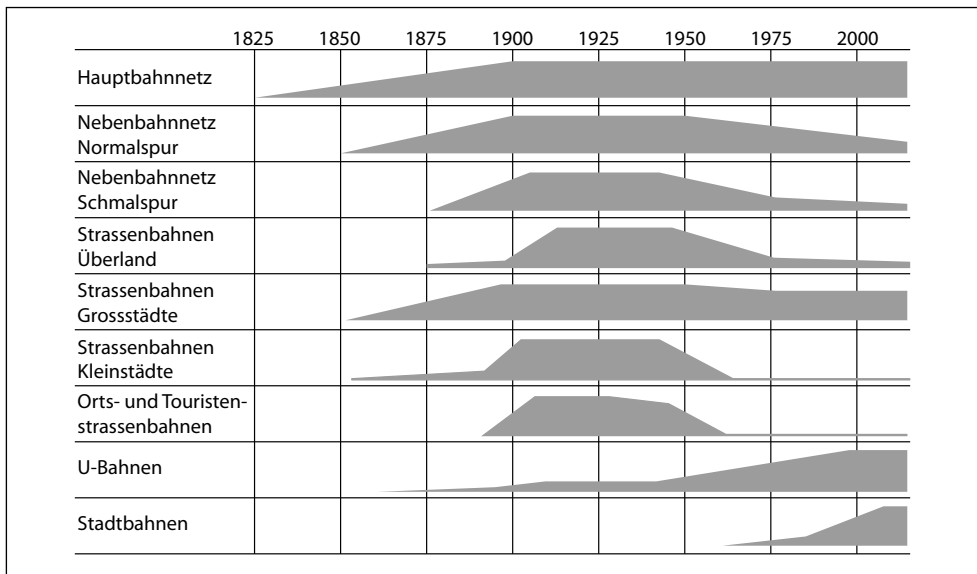


Abbildung 2 Strukturelle Entwicklung der europäischen Schienennetze (qualitativ), Entwicklung der Netzausdehnung in Relation zur jeweils grössten Ausdehnung; starke Vereinheitlichung der Netze seit Ende des 2. Weltkrieges und Konzentration auf grosse Verkehrsströme [eigene Darstellung].

1.1.2 Verkehrsinfrastrukturen als Teil der Verkehrssysteme

Die Eisenbahn ist das Verkehrssystem mit der komplexesten Infrastruktur. *Verkehrssysteme* sind – generell formuliert – soziotechnische und ökonomische Systeme, die Verkehrsangebote hervorbringen. *Infrastruktur* geht auf Lateinisch „infra“ zurück, was „unten“ oder „unterhalb“ bedeutet. Infrastrukturen umfassen im Allgemeinen alle physischen Einrichtungen, die über einen langen Zeitraum bestehen und welche die Grundlage für andere Aktivitäten bilden. *Verkehrsinfrastrukturen* im Besonderen lassen sich verstehen als beständige ortsfeste Einrichtungen, welche die Fortbewegung von Personen und Gütern ermöglichen. Sie sind die Basis einer effizienten Raumüberwindung und sowohl Konsequenz aus als auch Voraussetzung für eine spezialisierte Flächennutzung. Verkehrsinfrastrukturen beeinflussen damit die Standortgunst von Siedlungen oder ganzen Regionen und Ländern.

Die Verkehrsinfrastrukturen werden von den beweglichen Transporteinheiten genutzt, welche die Ortsveränderungsleistung erbringen. Die Vorleistungen der Verkehrsinfrastruktur bestehen zum Ersten in der Vorhaltung des physischen Fahrweges und zum Zweiten in der Koordination und Sicherung aller Transporteinheiten. Daraus leiten sich drei Leistungsebenen von Verkehrssystemen ab [Höppner 2009]:

1. *Verkehrsebene*: Transporte mittels Transporteinheiten (Fahrzeuge, Flugzeuge, Schiffe).
2. *Steuerungsebene*: Koordination der Transporteinheiten, gegenseitige Sicherung.
3. *Fahrwegsebene*: Planung, Bau und Erhaltung des Fahrweges.

Ebene	Funktionen/Subsysteme	Dreiebenenmodell	Zweiebenenmodell
Verkehrsebene (Ebene 1)	Beförderungsdienstleistung durch Transporteinheiten (Fahrzeuge, Flugzeuge, Schiffe etc.)	Verkehrsmittel	Verkehrsmittel
Steuerungsebene (Ebene 2)	Kapazitätsbewirtschaftung, Fahrwegsteuerung und -sicherung (Informations- und Detektionssysteme, Sicherheitssysteme, Dispositionssysteme)	Kapazitätsbewirtschaftung und Fahrwegsicherung	Gesamte Verkehrsinfrastruktur
Fahrwegsebene (Ebene 3)	Bau und Erhaltung der Fahrwege (Planung, Projektierung, Inbetriebnahme, Erhaltung einschliesslich benötigter Ressourcen)	Bau und Erhaltung	
	Anwendung	Strassenverkehr Luftfahrt Schifffahrt Stadt- und Strassenbahn Eisenbahn (selten)	Eisenbahn (Regelfall)

Tabelle 2 Verkehrsökonomisches Drei- und Zwei-Ebenen-Modell der Verkehrssysteme; bei der Eisenbahn in das Zwei-Ebenen-Modell die Regel, bei den sogenannten integrierten Bahnen sind alle drei Ebenen in einer Hand [eigene Darstellung].