

Inhalt

Vorbemerkungen	5
Inhalt	7
1 Grundlagen	13
1.1 Definitionen	14
1.1.1 Was ist eine Eisenbahn?	14
1.1.2 Einteilung der Bahnen	14
1.2 Historische Entwicklung der elektrischen Eisenbahn	15
1.3 Kurzer Überblick über die Bahnstromsysteme	20
1.3.1 Gleichstrom-Bahnssysteme	20
1.3.2 Wechselstrom-Bahnssysteme	20
1.3.3 Drehstrom-Bahnssysteme	21
1.3.4 Spannungen der Zugsammelschiene	22
1.3.5 Stand der Elektrifizierung in ausgewählten Ländern	22
1.4 Vergleich der Traktionsarten	23
1.5 Europäische Bahnindustrie	24
2 Zugförderungsmechanik	29
2.1 Prinzipien der Spurführung	30
2.1.1 Spurweiten	30
2.1.2 Spurführung des Radsatzes	31
2.1.3 Fahrwerk und Drehgestell	34
2.1.4 Drehgestelle mit selbststeuernden Radsätzen	37
2.1.5 Gleisbogenabhängige Wagenkastensteuerung (Neigetechnik)	38
2.2 Fahrwiderstand	40
2.2.1 Laufwiderstand	40
2.2.2 Bogenwiderstand	41
2.2.3 Steigungswiderstand	42
2.2.4 Beschleunigungswiderstand	42
2.2.5 Dauer- und Anfahrkräfte (Z-v-Diagramm)	43
2.2.6 Radsatzentlastung	44
2.3 Adhäsion, Gleit- und Schleuderschutz	47
2.4 Zeitverlust durch Anfahren und Bremsen	51
3 Fahrwerk und Antrieb von elektrischen Triebfahrzeugen	53
3.1 Einteilung der Triebfahrzeuge, Achsbild	54
3.1.1 Einteilung der Triebfahrzeugbauarten	54
3.1.2 Radsatzfolge	54
3.2 Mechanische Komponenten der Kraftübertragung	56
4 Kommutator-Fahrmotoren und ihre Steuerung	65
4.1 Gleichstromfahrmotor	66
4.1.1 Gleichstrom-Kommutatormotor	66

4.1.2	Steuerung der Motorspannung über Vorwiderstände	71
4.1.3	Steuerung der Motorspannung bei Gleichstrombahnen mittels Gleichstromsteller	72
4.1.4	Steuerung der Motorspannung bei Wechselstrombahnen mit Anschnittsteuerung	77
4.2	Wechselstromfahrmotor	81
4.2.1	Wechselstrom-Kommutatormotor	81
4.2.2	Haupttransformator	83
4.2.3	Hauptschalter	86
4.2.4	Spannungssteuerung beim Wechselstrom-Kommutatormotor	87
5	Asynchronfahrmotoren und ihre Steuerung	91
5.1	Aufbau und stationäres Betriebsverhalten	92
5.1.1	Grundlagen	92
5.1.2	Frühe Triebfahrzeuge mit Asynchronfahrmotoren	98
5.1.3	Frequenzvariabler Betrieb mit Pulswechselrichter	100
5.2	Pulswechselrichter	103
5.3	Geregelter Betrieb des Asynchronmotors	107
5.3.1	U/f_s -Kennliniensteuerung	107
5.3.2	U/f_s -Kennliniensteuerung mit Impulsgeber	107
5.3.3	Schlupffrequenz-Strom-Kennliniensteuerung	107
5.3.4	Rotorflussorientierte (Vektor-)Regelung	110
5.3.5	Direkte Selbstregelung (DSR)	110
5.3.6	Indirekte Statorgrößen-Regelung (ISR)	111
5.4	Gruppenpeisung von Asynchronfahrmotoren	111
5.5	Vierquadrantsteller	113
5.6	Wechselrichter-Schaltungs- und Aufbautechnik	119
5.6.1	Zwangskommutierte Thyristor-Wechselrichter	119
5.6.2	Wechselrichter mit Gate-Turn-Off-Thyristoren	122
5.6.3	IGBT-Wechselrichter	124
5.6.4	Dreipunkt-Wechselrichter	125
5.6.5	Stromzwischenkreis-(I-)Wechselrichter	126
5.6.6	Leistungselektronischer Mittelfrequenz-Transformator	128
5.6.7	Kühlungs- und Aufbautechnik, ausgeführte Beispiele	131
6	Synchronfahrmotoren und ihre Steuerung	139
6.1	Synchronmotor mit elektrischer Erregung	140
6.2	Speisung des Synchronfahrmotors mit lastgeführtem Wechselrichter	141
6.3	Permanenterregte Synchronmaschine mit Pulswechselrichterspeisung	145
7	Elektrische Triebfahrzeuge für Vollbahnen	151
7.1	Elektrische Triebfahrzeuge mit Gleichstrom-Fahrmotoren	152
7.1.1	Gleichstromsteller-Steuerung	152
7.1.2	Thyristor-Anschnittsteuerung	152

7.2	Elektrische Triebfahrzeuge mit Wechselstrom-Fahrmotoren	155
7.3	Elektrische Triebfahrzeuge mit Asynchron-Fahrmotoren	157
	7.3.1 Lokomotiven	157
	7.3.2 Hochgeschwindigkeits-Triebzüge	163
7.4	Hochgeschwindigkeits- und Regional-Triebzüge mit Synchron-Fahrmotoren . . .	167
8	Mehrsystemfahrzeuge	171
8.1	Bauformen mit Gleichstrom-Kommutatormotoren und mit Synchronmotoren . . .	172
8.2	Bauformen mit Asynchronmotoren	176
9	Dieselelektrische Fahrzeuge	183
9.1	Klassische Technik – Hydraulische und elektrische Kraftübertragung	184
9.2	DE-Fahrzeuge mit Drehstromantriebstechnik	189
9.3	Permanentmagnet-Synchrongeneratoren	198
9.4	Zweikraft-Triebfahrzeuge	200
10	Nahverkehrsfahrzeuge	205
10.1	S- und U-Bahn-Fahrzeuge	207
10.2	Straßenbahnen, besonders in Niederflurtechnik	211
	10.2.1 Konventionelle Straßenbahnwagen und -gelenkzüge	211
	10.2.2 Zweisystem-Stadtbahnfahrzeuge (Leichte Nahverkehrs-Triebwagen) . . .	213
	10.2.3 Niederflur-Straßenbahnen	215
10.3	Speichertriebfahrzeuge	223
11	Bremstechnik	227
11.1	Druckluftbremse	228
11.2	Magnetschienenbremse	232
11.3	Lineare Wirbelstrombremse	233
12	Unkonventionelle Bahnen	235
12.1	Spurgeführte Bahnen mit Luftgummirädern	236
12.2	Hängebahnen	238
12.3	Gleislose Bahnen	240
12.4	Magnetschwebbahnen	245
	12.4.1 Tragen und Führen	246
	12.4.2 Berührungsloser Antrieb	248
	12.4.3 Umrichter	251
	12.4.4 Bordnetzversorgung der Fahrzeuge	251
	12.4.5 Anwendungsstrecke Pudong International Airport – Shanghai	252
13	Stromversorgung der elektrischen Bahnen	253
13.1	Wechselstrombahnen mit $16\frac{2}{3}$ Hz	254
	13.1.1 Zentrales und dezentrales Netz der DB	254
	13.1.2 Rotierende Umformer	258

13.1.3	Statische Bahnstromumrichter	260
13.1.3.1	Zwischenkreisumrichter	260
13.1.3.2	Regelung	266
13.1.3.3	Netzschutz	267
13.1.3.4	Modularer Mehrpunkt-Umrichter (MMC)	267
13.2	Wechselstrombahnen mit 50 Hz	271
13.2.1	Eigenschaften, Vergleich mit $16\frac{2}{3}$ Hz-System	271
13.2.2	Kompensation der Unsymmetrie mit leistungselektronischen Betriebsmitteln	273
13.2.3	Autotransformatorschaltung	276
13.2.4	Höhere Betriebsspannung	277
13.3	Gleichstrombahnen	279
13.4	Fahrleitungen und Stromabnehmer	282
14	Netzzrückwirkungen	289
14.1	Überblick	290
14.2	Störquellen bei Gleichspannungsbahnen	291
14.2.1	Spannungsüberschwingungen der Unterwerks-Gleichrichter	291
14.2.2	Eingangstromüberschwingungen der Gleichstromsteller	292
14.2.3	Eingangstromüberschwingungen des I-Wechselrichters	293
14.2.4	Eingangstromüberschwingungen des Pulswechselrichters	294
14.3	Störquellen bei Wechselspannungsbahnen	295
14.3.1	Spannungsüberschwingungen der Einspeisungen	295
14.3.2	Eingangstromüberschwingungen der Phasenanschnittsteuerung	295
14.3.3	Eingangstromüberschwingungs-Anteile durch WR-Eingangstrom	299
14.3.4	Eingangsspannungsüberschwingungen des Vierquadrantstellers	300
14.3.5	Modulation der ZK-Strom-Oberschwingungen des PWR durch den 4q-Steller	303
14.4	Impedanzen im Bahnnetz	304
14.4.1	Parameter von Bahnoberleitungen	304
14.4.2	Von der 4q-S-Taktung angeregte Resonanzen	305
14.4.3	Niederfrequente Instabilität	307
14.5	Kopplungsmechanismen, psophometrischer Störstrom	309
14.6	Gleisfreimeldekreise	310
14.7	Geregelte frequenzselektive Unterdrückung von signalfrequenten Störstromanteilen	311
14.8	Hochfrequente Störwirkungen	313
15	Anhang	315
15.1	Regelungsverfahren für Traktionsumrichterantriebe	316
15.1.1	Anforderungen der Traktion	316
15.1.2	Raumzeigerdarstellung von dreisträngigen Systemen	316
15.1.3	Dynamisches Raumzeigerersatzschaltbild der Asynchronmaschine	317

15.1.4	Feldorientierte Regelung	318
15.1.5	Direkte Selbstregelung	323
15.1.6	Indirekte Statorgrößen-Regelung	328
15.1.7	Zusammenfassung	330
15.2	Drehzahlgeberlose statorflussorientierte Regelung des Asynchronmotors in der Traktion	332
15.2.1	Einführung	332
15.2.2	Modell der Asynchronmaschine	333
15.2.3	Statorflussorientierte Regelung	334
15.2.4	Feldschwächbetrieb	337
15.2.5	Korrektur der Wechselrichterspannungsfehler	338
15.2.6	Drehgeberlose Identifikation der Drehzahl	339
15.2.7	Identifikation des Statorwicklungswiderstands	343
15.2.8	Unterdrückung parasitärer Gleichspannungsanteile	345
15.2.9	Betrieb mit unendlich langsamem Wechsel zwischen Fahren und Bremsen	346
15.2.10	Unterschiede zur Direkten Feldorientierten Regelung	348
15.2.11	Zusammenfassung	350
15.3	Einheitliche Kennzeichnung der Waggons von UIC und OSShD (Ziffer 3 und 4 der Wagenbezeichnung)	351
15.4	Formelzeichen und Abkürzungen	352
16	Literatur	355
16.1	Vorlesungsskripte	356
16.2	Zeitschriften	356
16.3	Bücher und Zeitschriftenaufsätze	356
17	Übungen mit Musterlösungen	377
17.1	Z-v-Diagramm einer Universallokomotive	378
17.2	Mechanische Auslegung einer Universallokomotive	380
17.3	Mittlere Reisegeschwindigkeit einer U-Bahn	382
17.4	Gleichstromstellergespeister Gleichstrom-Traktionsmotor	384
17.5	Zweigpaar-halbsteuerbare Zweipuls-Brückenschaltung in Folgesteuerung	387
17.6	Asynchronfahrmotoren für Universallokomotive 6400 kW	391
17.7	Radreifendurchmesserunterschiede bei Gruppenspeisung von ASM	394
17.8	Vierquadrantsteller für Universallokomotive 6,4 MW mit ASM	397
17.9	Bremswege einer Straßenbahn ohne und mit Magnetschienenbremse	401
17.10	Speisung von elektrifizierten Bahnstrecken aus dem 16 ² / ₃ -Hz-Bahnnetz und dem 50-Hz-Landesnetz	403
	Firmenverzeichnis	407
	Index	408