

Andreas Steimel

Elektrische Triebfahrzeuge und ihre Energieversorgung

Grundlagen der Praxis
4. Auflage



Vorbemerkungen

Zielsetzung des Buches, Kurzübersicht

Das vorliegende Buch ist aus der seit 1996 gehaltenen Vorlesung „Elektrische Bahnen“ an der Fakultät für Elektrotechnik und Informationstechnik der Ruhr-Universität Bochum entstanden. Es wendet sich an Studierende der Elektrischen Energietechnik, der Regelungstechnik und des Maschinenbaus sowie an junge Ingenieure der Elektrotechnik, besonders aber der Leistungselektronik, in der Bahnindustrie sowie bei den Bahnbetreibern.

Es will zuerst mechanische Grundlagen der elektrischen Zugförderung vermitteln wie die Spurführung im Gleis, die Zugkraftübertragung vom Rad auf die Schiene unter dem Einfluss der wechselnden Adhäsionsbedingungen und die Übertragung des Motordrehmoments auf den gefederten und damit relativ zum Motor beweglichen Treibradsatz.

Schwerpunkt ist der Aufbau elektrischer Triebfahrzeuge mit Drehstromantriebstechnik (DAT). Das Betriebsverhalten der Drehfeldmaschinen und der Aufbau von Pulswechselrichtern, von skalaren sowie feldorientierten Regelungssystemen und von Vierquadrant-Einspeisestromrichtern werden behandelt. Der heute geringeren Bedeutung entsprechend werden Antriebe mit Gleich- und Wechselstrom-Kommutatormotoren und ihre Spannungsstellglieder nur noch cursorisch beschrieben. Exemplarisch werden Hochleistungslokomotiven, Hochgeschwindigkeits-Triebwagenzüge, dieselektrische Lokomotiven und Nahverkehrsfahrzeuge dargestellt. Ein kurzer Seitenblick gilt den unkonventionellen Bahnen wie Hänge- und Magnetschwebbahnen.

Da die spezielle – vom allgemeinen Landesnetz gesonderte – Energieversorgung ein wichtiger Faktor für die Funktion des Systems „Elektrische Bahnen“ ist, werden im 13. Kapitel die verschiedenen Bahnstromsysteme behandelt, unter den Aspekten der Umrichtertechnik in der Bahnstromversorgung wie der Netzurückwirkungen leistungselektronisch gespeister Triebfahrzeuge (14. Kapitel). Das 15. Kapitel enthält einen gerafften Überblick über die wichtigsten Verfahren der feldorientierten Regelung sowie ein Verfahren zum drehgeberlosen Betrieb von Asynchronmaschinen. Im 16. Kapitel ist die Literaturzusammenstellung zu finden und das 17. Kapitel gibt dem Leser die Möglichkeit, anhand von Übungen den Stoff zu vertiefen und dies an Hand von Musterlösungen zu verifizieren.

Die verwendete Terminologie entspricht im Wesentlichen dem International Technical Vocabulary (IEV) der IEC [1] und dem UIC Railway Dictionary [2].

Die Wiedergabe von Gebrauchsnamen, Handelsnamen, Warenbezeichnungen usw. in diesem Werk berechtigt auch ohne besondere Kennzeichnung nicht zu der Annahme, dass solche Namen im Sinne der Warenkennzeichnungs- und Markenschutz-Gesetzgebung als frei zu betrachten wären und daher von jedermann benutzt werden dürfen.

Das vorliegende Werk wurde sorgfältig erarbeitet. Dennoch übernehmen Autor und Verlag für die Richtigkeit von Angaben, Hinweisen und Ratschlägen keine Haftung.

Voraussetzungen

Grundkenntnisse des Aufbaus und des Betriebsverhaltens der elektrischen Maschinen und des Transformators entsprechend z. B. der Vorlesung „Grundlagen der Energietechnik“ [V1], Grundkenntnisse der „Leistungselektronik“ [V2] bzw. Lehrbücher [3] [4] [5] Grundkenntnisse der Mechanik auf Schulniveau.

Vorwort zur 4. Auflage

Dank des stetigen Interesses des Fachpublikums wird nun eine 4. Auflage – unter gleichem Titel – möglich. In dieser werden in der 3., wesentlich überarbeiteten Auflage noch übersehene Fehler korrigiert und notwendige Aktualisierungen vorgenommen.

Danksagung

Jeder Ingenieur in der industriellen wie akademischen Praxis „steht auf den Schultern der Kollegen vor ihm“. So möchte ich meinen herzlichen Dank aussprechen, zuerst meinem Vater Karl Steimel, 1956–1967 F&E-Vorstand der AEG in Frankfurt und Berlin, ein unbeirrbarer Vorkämpfer des wechselrichtergespeisten Asynchron-Traktionsantriebs, und meinem akademischen Lehrer R. Jötten an der Technischen Universität Darmstadt, ein Pionier der Thyristor-Anschnittsteuerung, der HGÜ und der feldorientierten Regelung, 1990 bzw. 2000 verstorben. Sodann – ich kann nur wenige stellvertretend nennen – meinen älteren Kollegen bei Brown, Boveri & Cie./ABB in der leistungselektronischen Entwicklung L. Abraham (†), E. Futterlieb, W. Lienau (†), H. Stemmler und W. Runge, ebenso wie im Lokomotiv-Engineering W. Teich (†), J. Körber, M. Schulz und R. Gammert (†); R. Pfeiffer (†), Akademischer Oberrat am Lehrstuhl für Elektrische Energiewandlung der Technischen Universität Darmstadt und W.-D. Weigel, früher Siemens Verkehrstechnik.

Sodann meinem älteren Kollegen und Amtsvorgänger an der Ruhr-Universität Bochum M. Depenbrock, dem Erfinder von Vierquadrantsteller als Netzstromrichter bei Wechselstromtriebfahrzeugen sowie der Direkten Selbstreglung (DSR), und unseren vielen einträchtig betreuten Doktoranden, die an der Weiterentwicklung der DSR und ISR, dem stabilen Netzverhalten der selbstgeführten Netzstromrichter und schließlich der erfolgreichen Entwicklung der drehgeberlosen Regelung von Induktionsmaschinen gearbeitet haben. Nicht zuletzt möchte ich unserer Sekretärin Fr. K. Knop und der technischen Zeichnerin Fr. V. Pietschek meinen Dank aussprechen für die vielfältige Hilfe auch bei der Überarbeitung dieses Buches!

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 Anfahrkkräfte (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	Gruppenspeisung 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 Niederflertechnik	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	Eingangsstromüberschwingungen der Gleichstromsteller	292
14.2.3	Eingangsstromüberschwingungen des I-Wechselrichters	293
14.2.4	Eingangsstromüberschwingungen des Pulswechselrichters	294
14.3	Störquellen bei Wechselspannungsbahnen	295
14.3.1	Spannungsüberschwingungen der Einspeisungen	295
14.3.2	Eingangsstromüberschwingungen der Phasenanschnittsteuerung	295
14.3.3	Eingangsstromüberschwingungs-Anteile durch WR-Eingangsstrom	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 Waggon 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

5

5 Asynchronfahrmotoren und ihre Steuerung

Bei Drehfeldmaschinen unterscheidet man Synchron- und Asynchronmaschinen. Sie sind frei von der Begrenzung des Produkts $P \cdot n^{0,5}$ durch den Kommutator (Abschnitt 4.1.1) und können somit sowohl für höchste Leistungen (Synchrongeneratoren bis 1,9 GW bei 1500 min^{-1}) wie für höchste Drehzahlen ($10\,000 \text{ min}^{-1}$ im Mehr-MW-Bereich) gebaut werden. Wegen der höheren möglichen Drehzahl sind sie bei gleicher Leistung deutlich leichter als Kommutatormotoren und – besonders als Asynchronkäfigläufermotoren – extrem robust und wartungsarm [73]. Die Nennspannungen erreichen bei Traktionsmotoren Werte von 2400 V, entsprechend sind die Ströme relativ niedrig im Vergleich zu denen bei Kommutatormotoren, was die Verkabelung erleichtert.

Der Asynchron- oder Induktionsmotor ist – besonders als Käfigläufermotor – das „Arbeitspferd“ der elektrischen Antriebstechnik und daher seit jeher der Wunschkandidat der Traktionstechniker. 1888 von M. Dolivo-Dobrowolski in eine industriell verwendbare Form gebracht, wurde er 1899 von der BBC in den Triebfahrzeugen für die erste mit Drehstrom 750 V/40 Hz elektrifizierte Vollbahn Burgdorf – Thun (Schweiz) eingesetzt. 1903 erreichten die Drehstrom-Triebwagen der „Studiengesellschaft für elektrische Schnellbahnen“ auf der Versuchsstrecke Marienfelde-Zossen (südlich von Berlin) 210 km/h . Bis etwa 1920 wurden verschiedene Strecken in Oberitalien sowie die Simplon-Tunnelstrecke mit Drehstrom $3 \dots 3,7 \text{ kV}/16\frac{2}{3} \text{ Hz}$ ⁹ elektrifiziert, bis der inzwischen betriebsstauglich gewordene Wechselstrom-Kommutatormotor mit seiner freizügigen Drehzahlverstellbarkeit – und weil er nur eine einpolige Fahrleitung benötigte – dem Asynchronmotor vorerst den Rang ablief. In den sechziger Jahren waren bis auf wenige lokale Ausnahmen die letzten Drehstrombahnen auf Wechsel- oder Gleichstromspeisung umgebaut.

Im Jahre 1971 begann die zweite – und sehr viel erfolgreichere – Wirkungsphase des Asynchronmotors in der Traktion. In der dieselektrischen Lokomotive DE 2500 von BBC-Mannheim und Henschel (vgl. Bild 1.8) [17] [74] [75] wurde die Möglichkeit der frequenzvariablen Speisung des Asynchronmotors durch Thyristorwechselrichter mit Zwangskommutierung erstmals erfolgreich erprobt. Seit der Mitte der 1990er-Jahre werden praktisch alle Hochleistungstriebfahrzeuge nur noch mit Asynchronmotoren ausgerüstet, die ein günstiges Leistungsgewicht ($< 1 \dots 1,5 \text{ kg/kW}$) mit großer Robustheit und geringem Wartungsaufwand verbinden. Entscheidend dafür war nicht zuletzt die außerordentliche Leistungssteigerung und Verbilligung der Wechselrichter durch die Einführung der selbstabschaltenden Leistungshalbleiter-Bauelemente GTO-Thyristor und IGBT (vgl. Unterkapitel 5.6, [76] [77] [78] [79] [80] [81] [82] [83]).

5.1 Aufbau und stationäres Betriebsverhalten

5.1.1 Grundlagen

Der Stator der Traktions-Asynchronmaschine ist stets mit einer dreisträngigen Drehfeldwicklung (Bild 5.1, 5.2) ausgeführt. Bild 5.1 zeigt – beispielhaft für Motoren größerer Leistung – die Wicklungszonen einer zweipoligen Zweischicht-Drehstromwicklung mit zwei mal sechs Zonen. Zugehörige Zonen einer Ober- und Unterschicht sind nicht um eine Polteilung p versetzt, sondern unter „Sehnung“ (Wickelschrittverkürzung) um $\pi - \epsilon$. Damit werden Oberwellen in der Durchflutungs- und Flusswelle abgeschwächt. Bild 5.2 zeigt einen (von drei) zugehörigen Wicklungssträngen mit $q = 3$ Nuten pro Strang und Pol. Die Wicklungsachsen der drei Stränge sind um 120° el. gegeneinander versetzt.

⁹ 1928 in Süditalien (Rom-Sulmona) auch mit $10 \text{ kV}/45 \text{ Hz}$

Bild 5.1:
Wicklungszonen bei
zweipoliger gesehnter
Zweischicht-
Drehfeldwicklung

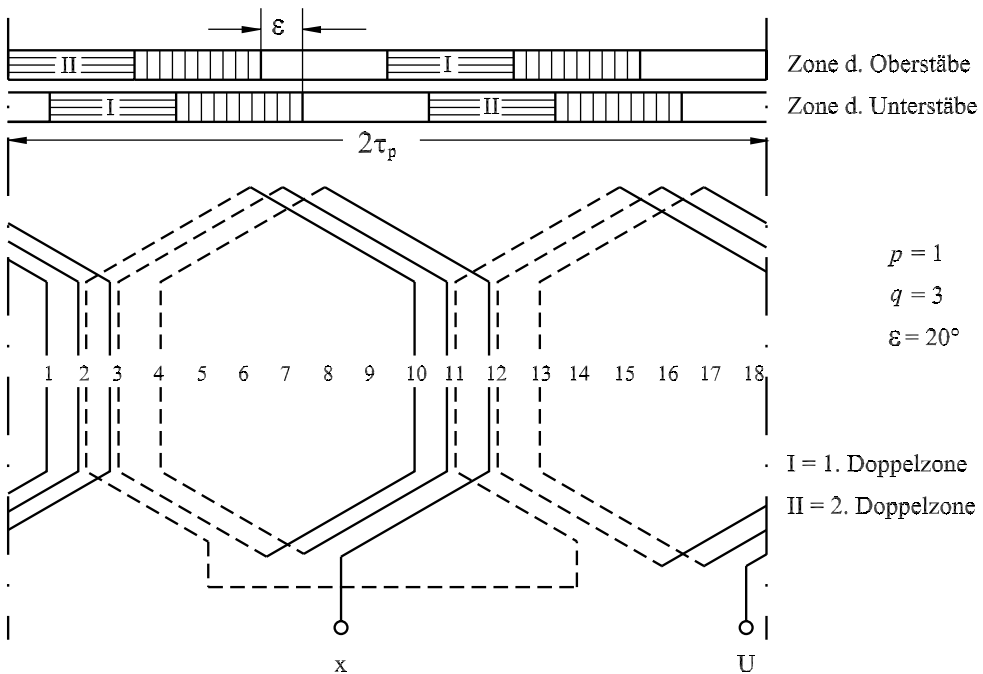
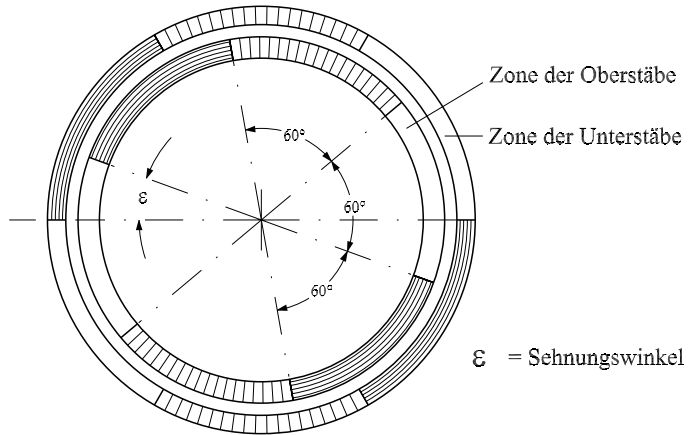


Bild 5.2: Strang einer Drehstrom-Zweischichtwicklung ($p = 1$, $q = 3$, $\varepsilon = 20^\circ$)

Bild 5.3 zeigt links den Stator des Fahrmotors BQg4843 der BR 120 (1400 kW, $p = 2$). Der Rotor oder Läufer kann mit einer gleichartigen Dreiphasenwicklung versehen sein, wobei dann die drei Wicklungsanschlüsse über Schleifringe zugänglich gemacht sind („Schleifringläufer“) oder mit einer Käfigwicklung aus Kupferstäben, die über stabile Kurzschlussringe auf den beiden Stirnseiten der Rotortrommel miteinander verbunden sind („Kurzschlussläufer“), Bild 5.3 rechts.

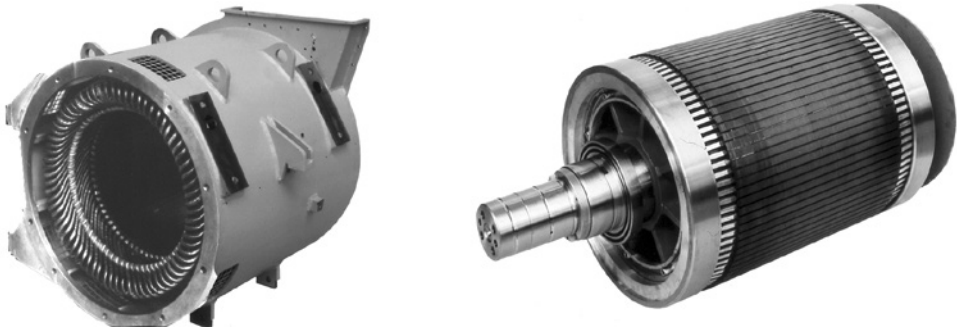


Bild 5.3: Drehstrom-Fahrmotor BQg4843 der BR 120 DB (BBC)
links: Stator mit Gehäuse; rechts: Rotor (A-, Ritzelseite); $P_N = 1400 \text{ kW}$ $U_{\max} = 2200 \text{ V}$,
 $I_N = 600 \text{ A}$, $G = 2380 \text{ kg}$, $n_1 = 1778 \text{ min}^{-1}$, $n_{\max} = 3600 \text{ min}^{-1}$ (Bombardier Transportation)

Bild 5.4 zeigt den Größen- und Gewichtsvergleich dieses Motors mit dem Wechselstrom-Kommutatormotor der BR 110 der DB aus den 50er Jahren.

Zur Beschreibung des Betriebsverhaltens wird der Kurzschlussläufer durch einen äquivalenten Schleifringläufer mit gleichen Windungszahlen wie die Statorwicklung ersetzt (vgl. [V1]). Die Maschine wird symmetrisch angenommen, und es werden nur die magnetischen Grundwellenerscheinungen betrachtet. Wird an die Statorklemmen ein symmetrisches Drehspannungssystem mit dem Effektivwertzeiger \underline{U}_s und der Frequenz f_s gelegt, entsteht ein die Feldwelle beschreibender, mit $\omega_s = 2\pi \cdot f_s$ umlaufender konstanter Drehfeldzeiger

$$\underline{\Psi}_s = \frac{\underline{U}_s}{\omega_s}. \quad (5.1)$$

Dieser induziert in der stillstehenden Rotorwicklung ein Drehspannungssystem, das durch den Effektivwertzeiger $\underline{U}_2 = \underline{U}_s$ beschrieben wird, und mit ω_s schwingt. Dreht jedoch der Rotor (im

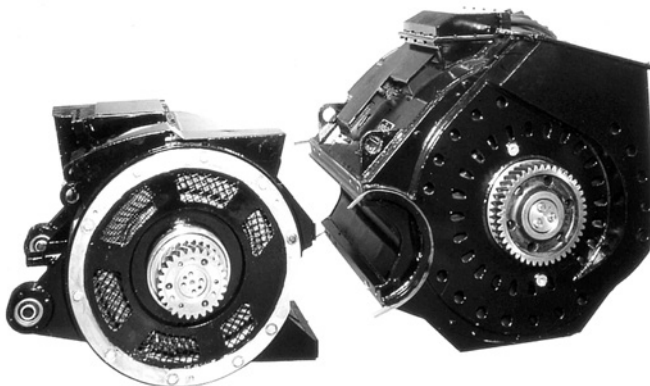


Bild 5.4:
Größenvergleich
Drehstrom-Fahrmotor
mit Wechselstrom-
Kommutator-Fahrmotor;
links: QD 646 (Prototyp)
1400 kW/2380 kg;
rechts: WB 372-22
925 kW/3500 kg
(Bombardier
Transportation)

elektrischen Winkelsystem) mit $\omega = \Omega_{\text{mech}} \cdot p = 2\pi \cdot n \cdot p$ in gleicher Richtung wie das Drehfeld, beträgt die Differenzfrequenz also

$$\omega_r = \omega_s - \omega, \quad (5.2)$$

wird in der Rotorwicklung nur noch die mit der Kreisfrequenz ω_r schwingende Spannung

$$\underline{U}_2 = \underline{U}_1 \cdot \frac{\omega_r}{\omega_s} \quad (5.3)$$

induziert. Das Verhältnis ω_r/ω_s wird als Schlupf s bezeichnet.

Wird die gesamte Streuung der Asynchronmaschine als im Rotor konzentriert angenommen, dazu der Rotorwiderstand R_r und ggf. ein außen an die Schleifringe angeschlossener Widerstand R_a (Anlasswiderstand, s. u.), erhält man das in Bild 5.5 links dargestellte einsträngige Ersatzschaltbild für den Rotorkreis (in Zeigerdarstellung).

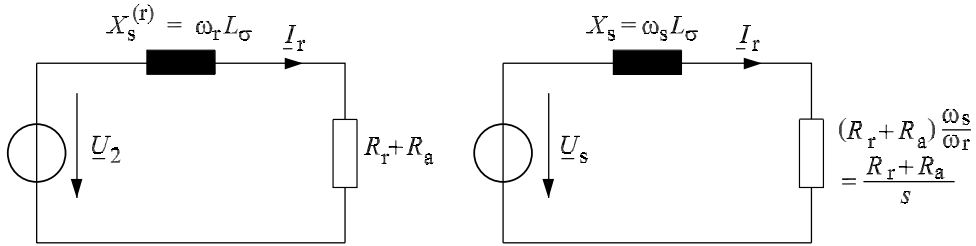


Bild 5.5: Ersatzschaltbild des Rotorkreises
links in rotorbezogenen Koordinaten,

rechts in statorbezogenen Koordinaten

Werden alle Spannungen, Frequenzen und Impedanzen formal mit ω_s/ω_r multipliziert, bekommt man das rechts dargestellte Ersatzsystem in statorbezogenen Koordinaten, in dem alle Wechselgrößen mit Speisefrequenz schwingen und die Rotorwicklung stillsteht. Alle Strom- und Flusswerte sowie die Winkelbeziehungen bleiben erhalten.

Der transformierte Widerstand $(R_r + R_a)/s$ kann in einen real vorhandenen Anteil $R_r + R_a$ – in dem die Rotorverluste anfallen – sowie den Rest $(R_r + R_a) \cdot (1/s - 1)$ aufgeteilt werden, der für die Umsetzung der mechanischen Leistung steht. Unter Anwendung der Wechselstromlehre erhält man für die in $R_r + R_a$ umgesetzte Leistung

$$P_{is} = 3 \cdot s^2 \cdot U_s^2 \frac{R_r + R_a}{(R_r + R_a)^2 + s^2 X_s^2} \quad (5.4)$$

und für die über den Luftspalt übertragene Leistung P_d

$$P_d = \frac{1}{s} P_{is} = 3 U_s^2 \frac{\frac{(R_r + R_a)}{s}}{\left\{ \frac{(R_r + R_a)}{s} \right\}^2 + X_s^2} \quad (5.5)$$

Die mechanische Leistung ist

$$P_{\text{mech}} = P_{\delta} - P_{\text{is}} = P_{\delta} \cdot (1 - s) \quad (5.6)$$

Die Stromortskurve beschreibt den aktuellen Betriebszustand bei vorgegebener, zuerst fester Speisefrequenz, d. h. Drehzahl, Drehmoment und Leistung. Zusätzlich ist in Bild 5.5 parallel zur Quelle \underline{U}_s die Magnetisierungsinduktivität L_{μ} einzufügen; der Statorwiderstand wird vernachlässigt, da bei höheren Motorleistungen bis herab zu wenigen Hz Speisefrequenz nur von geringem Einfluss. Die Hauptfeldspannung ist damit gleich der Klemmenspannung \underline{U}_s .

Aus der Rotormasche erhält man für den Rotorstromzeiger:

$$\underline{I}_r = \frac{\underline{U}_2}{R_r + R_a + j\omega_r \cdot L_{\sigma}} = \frac{\underline{U}_s}{(R_r + R_a)/s + j\omega_s \cdot L_{\sigma}} = \underline{Y}_r \cdot \underline{U}_s \quad (5.7)$$

Der Rotorstrom ist also proportional zur Admittanz \underline{Y}_r der Rotormasche. Die Ortskurve ergibt sich auf einfache Weise durch Inversion der Impedanzortskurve $\underline{Z}_r(\omega_r) = R_r + R_a + j\omega_r L_{\sigma}$, die eine Parallele zur reellen Achse im Abstand $\omega_s L_{\sigma}$ darstellt. Damit ergibt sich die Admittanzortskurve als ein Kreis durch den Ursprung, wie in Bild 5.6a (links) dargestellt ist. Durch Multiplikation mit \underline{U}_s und Drehung des Koordinatensystems um 90° erhält man die geläufige Rotorstromortskurve, die nach Addition des Magnetisierungsstroms $\underline{I}_{\mu} = \underline{U}_s / (j\omega_s L_{\sigma})$ die als Heylandkreis bekannte Ortskurve für den Statorstrom ergibt (Bild 5.6b). Die Eisenverluste werden im Folgenden vernachlässigt.

Die Komponente des Stroms parallel zur reellen Achse, der Wirkstrom, liefert mit \underline{U}_s die Wirkleistung

$$P = 3 \cdot U_s \cdot I_s \cdot \cos \varphi \quad (5.8)$$

und dividiert durch die synchrone mechanische Drehkreisfrequenz $\Omega_s = \omega_s/p$ das Drehmoment

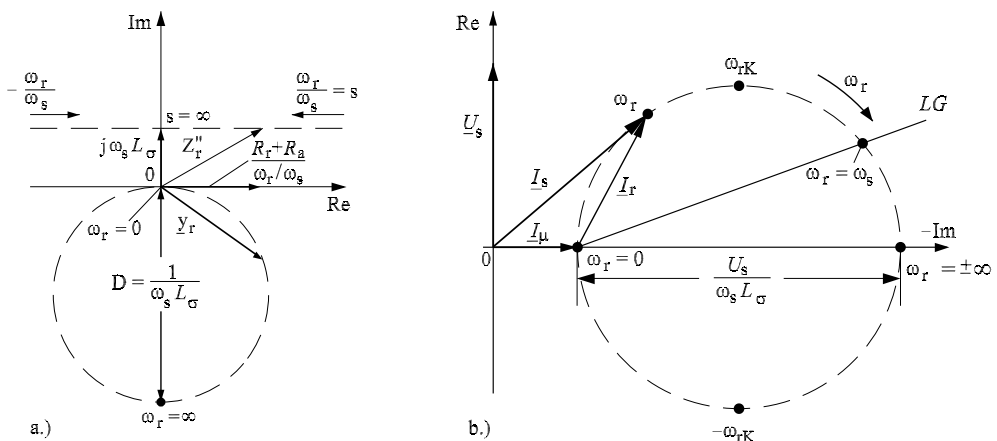


Bild 5.6: Entwicklung der Statorstromortskurve des Asynchronmotors (Heylandkreis)

$$M_d = \frac{P}{\Omega} = p \frac{P_6}{\omega_s} = 3p \cdot \frac{U_s^2}{\omega_s} \frac{\frac{(R_r + R_a)}{s}}{\left\{ \frac{(R_r + R_a)}{s} \right\}^2 + X_s^2} \quad (5.9)$$

Dies ist gleichbedeutend mit dem Abstand der Betriebspunkte zur imaginären Achse. Die Abstände der Betriebspunkte auf dem Kreis zur strichpunktiert eingezeichneten Verbindungsgeraden LG („Leistungsgerade“) zwischen den Betriebspunkten $\omega_r = 0$ ($s = 0$) und $\omega_r = \omega_s$ ($s = 1$) sind proportional zur mechanischen Leistung P_{mech} . Während der Durchmesser des Kreises – und damit das größtmögliche Drehmoment, das Kippmoment M_{dk} – nur reziprok von der Streuinduktivität L_σ abhängt, werden die tatsächlichen Betriebspunkte vom wirksamen Rotorwiderstand bestimmt.

Besondere Betriebspunkte sind:

- $\omega_r = 0$ ($s = 0$) Synchron- oder Leerlaufpunkt
- $\omega_r = \pm \infty$ ($s = \pm \infty$) Ideeller Kurzschlusspunkt
- $\omega_r = \omega - \omega_s$ ($s = 1$) Anlaufpunkt
- $\omega_r = \pm \omega_{\text{rk}} = \pm R_r/L_\sigma$ ($s = s_K = \pm (R_r + R_a)/(\omega_s L_\sigma)$) Kippunkt

Mit ω_{rk} kann das Drehmoment auch als

$$M_d = 3p \cdot \frac{U_s^2}{\omega_s^2 \cdot L_\sigma} \frac{1}{\frac{\omega_{\text{rk}}}{\omega_r} + \frac{\omega_r}{\omega_{\text{rk}}}} \quad (5.10)$$

geschrieben werden. Der Maximalwert, das Kippmoment, hat den Wert

$$M_{\text{dk}} = \frac{3}{2} p \cdot \frac{U_s^2}{\omega_s^2 L_\sigma} \quad (5.11)$$

Bezieht man das aktuelle Drehmoment auf diesen Maximalwert, erhält man die so genannte Kloss'sche Formel:

$$\frac{M_d}{M_{\text{dk}}} = \frac{2}{\frac{\omega_{\text{rk}}}{\omega_r} + \frac{\omega_r}{\omega_{\text{rk}}}} = \frac{2}{\frac{s_K}{s} + \frac{s}{s_K}} \quad (5.12)$$

Bild 5.7 zeigt diese Funktion des Drehmoments in Abhängigkeit von der Drehkreisfrequenz ω für $R_a = 0$ und für $R_a = 3 \cdot R_r$. Im ersten Fall liegt das Maximum bei $\omega = \omega_s - \omega_{\text{rk}}$, im zweiten Fall bei $\omega = \omega_s - 4 \cdot \omega_{\text{rk}}$. Wird die Maschine – wie üblich – so ausgelegt, dass das Nennmoment etwa 40 % des Kippmoments beträgt, und legt man zugrunde, dass bei Maschinen mit $P > 100$ kW $\omega_{\text{rk}} \approx 5 \dots 10\%$ der Nennkreisfrequenz ω_{sN} beträgt, bedeutet das, dass bei $R_a = 0$ das Anfahr-drehmoment bei Betrieb mit $\omega_s = \omega_{\text{sN}}$ und $\omega_r = \omega_s$ lediglich 10...20 % von M_{dk} entsprechend 25...50 % von M_{dN} beträgt, was für die Traktion unzureichend ist.

Deswegen musste beim früheren Festfrequenzbetrieb des Asynchrontraktionsmotors dieser immer als Schleifringläufer ausgeführt werden: Im Anlauf wurde der wirksame Rotorwiderstand durch Einfügen des (äußeren) Anfahrwiderstands R_a vergrößert. Man erkennt in Bild 5.7, dass das Anfahr-drehmoment in diesem Fall ($R_a = 3 \cdot R_r$) etwa viermal so groß ist wie mit $R_a = 0$, und damit hier sogar größer als das Nenn-drehmoment.

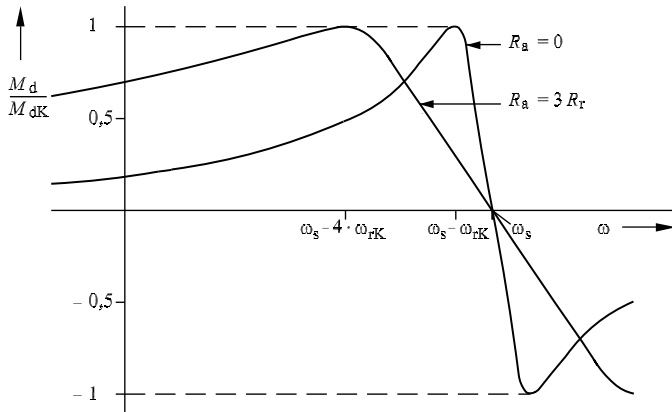


Bild 5.7:
Drehfrequenz-Drehmoment-Charakteristik des Schleifringläufermotors bei fester Speisefrequenz mit verschiedenen Rotorwiderständen

Trägt man ω über M_d auf, erkennt man, dass der Asynchronmotor im Bereich kleiner Schlüpfе eine Nebenschlusscharakteristik aufweist. Damit lassen Asynchronmotoren unmittelbar Generatorbetrieb mit $\omega > \omega_s$ und damit $\omega_r < 0$ ($s < 0$, übersynchroner Bremsbetrieb) zu.

5.1.2 Frühe Triebfahrzeuge mit Asynchronfahrmotoren

Solange noch keine Wechselrichter zur Verfügung standen, mit denen die Frequenz ω_s verändert werden konnte, standen zur Drehzahlregulierung und zur Anfahrt mit voller Zugkraft nur wenige technische Hilfsmittel zur Verfügung:

Die dreipolige Fahrleitung der ersten Versuchsstrecke (vgl. Bild 1.3) war schon bald durch eine Fahrleitung von zwei waagrecht über dem Gleis liegenden Fahrdrähten ersetzt worden; den dritten Pol des Drehspannungssystems bildeten die Fahrschienen. Zur Überbrückung der notwendigen langen Isolierstrecken bei Weichen und Kreuzungen waren zwei Stromabnehmerschleifstücke in ausreichendem Abstand erforderlich (siehe Bild 5.8).

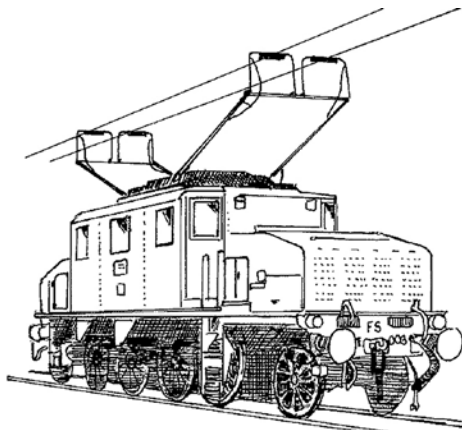
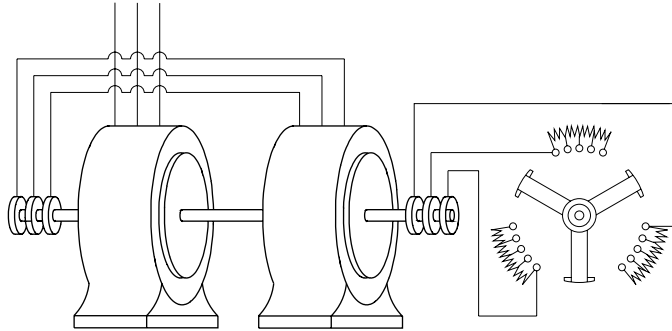


Bild 5.8: Italienische Drehstromlokomotive Reihe 431 (1920)

Bild 5.9:
Kaskadenschaltung
von zwei Schleifring-
läufer-Drehstrommotoren



Als Anfahrwiderstände wurden große Eisenplatten in mit Sodalösung gefüllte Kessel gehängt, die motorisch aus- und eingefahren wurden; bei maximaler Geschwindigkeit wurden sie überbrückt.

Mehrere verlustarme synchrone Geschwindigkeiten wurden durch Polpaarzahlumschaltung (z. B. $p = 4$ und $p = 6$) sowie durch Kaskadenschaltung (vgl. Bild 5.9) von zwei mechanisch gekuppelten Fahrmotoren erreicht. Dabei wird die Statorwicklung der zweiten Maschine aus den Schleifringen der ersten gespeist, es stellt sich für beide die halbe synchrone Drehzahl ein. Mit beiden Maßnahmen zusammen konnten vier wirtschaftliche Dauerfahrgeschwindigkeiten eingestellt werden, die (in diesem Beispiel) in den Verhältnissen 33,3 : 50 : 66,6 : 100 gestuft waren. Ein flexibler Fahrbetrieb mit der Möglichkeit, Verspätungen durch etwas schnelleres Fahren aufzuholen, war damit nicht möglich; als Vorteil ist aber die einfache Nutzbremsung durch Übergang in den übersynchronen Betrieb zu nennen.

Phasenzahl- und/oder Frequenz-Maschinenumformer erlaubten die Speisung von Drehstromfahrmotoren auch aus der 50-Hz-Einphasenwechselstrom-Fahrleitung. Beim Kandó-System [84] [34] in Ungarn hatte der Phasenzahlumformer eine Hochspannungs-Einphasenwicklung und eine Niederspannungs-Dreiphasenwicklung. Eine sehr kräftig ausgeführte Dämpferwicklung auf dem Rotor (mit Wasserkühlung!) schwächt das entstehende Gegendrehfeld ausreichend ab. Über die Erregung wurde am Stromabnehmer $\cos \varphi = 1$ eingestellt. Die synchronen Fahrgeschwindigkeiten wurden aus den zwei-, drei- oder sechsisphasigen Spannungssystemem des Phasenzahlumformers durch Polpaarzahlumschaltung am (hier einzelnen) Fahrmotor gewählt. Die MÁV ließ 1932–37 bei Ganz, Budapest, Schnell- und Güterzuglokomotiven mit gleicher elektrischer Ausrüstung (mit Parallelkurbelantrieb mit Kandó-Rahmen) für die Hauptstrecke Budapest–Hegyeshalom (-Wien) bauen¹⁰ [85]:

- 29 Stück V40, 1'D1', $P_{dd} = 1620 \text{ kW}/P_{\max} = 2575 \text{ kW}$, $G = 94 \text{ t}$, $v_{\text{syn}} = 25/50/75/100 \text{ km/h}$
- 3 Stück V60, F, $P_{dd} = 1620 \text{ kW}/P_{\max} = 2575 \text{ kW}$, $G = 94 \text{ t}$, $v_{\text{syn}} = 17/34/51/68 \text{ km/h}$

1952 wurde dann Drehgestelllokomotiven mit Phasen- und Frequenzumformern gebaut; hier erfolgt die Geschwindigkeitsstellung durch Polpaarzahlumschaltung am Umformer selbst, die Tatzlagermotoren können damit einfache Drehstrom-Kurzschlussläufermotoren sein:

- 12 Stück V55, B₀'C₀', $P_{1h} = 2355 \text{ kW}$, $G = 90 \text{ t}$, $v_{\text{syn}} = 25/50/75/100/125 \text{ km/h}$.

¹⁰ Nennspannung 16 kV, bis ca. 1970

Diese doch recht schweren Lokomotiven wurden Ende der 1960er Jahre von Diodenlokomotiven (ähnlich Bild 4.14, in Lizenz der 50-Hz-Arbeitsgemeinschaft) abgelöst.

Ähnlichen Gedanken folgt die von Krupp und Garbe-Lahmeyer 1936 gebaute $B_0' B_0'$ -Lokomotive E 244 31 für den 50-Hz-Probebetrieb auf der Höllentalbahn [86], S. 175 f. in [9], [65]. Auf der Welle jeden Radsatzes sitzen als Tatzlagerantrieb eine sechspolige „Phasenspalter“-maschine mit einer Ein-Drei-Phasenwicklung im Stator, einer Dreiphasenwicklung im Rotor und einem freilaufenden gleichstromerregten Zwischenläufer zur Kompensation des Gegenfeldes sowie eine gewöhnliche Asynchronmaschine; beider Rotorwicklungen sind auf Flüssigkeits-Anfahrwiderstände geführt. Im 1. Geschwindigkeitsbereich ist die ASM in Kaskadenschaltung an den Rotor der Phasenspaltermaschine angeschlossen; zum Anfahren wird der Zwischenläufer vom Drehstrom-Hilfsbetriebeumformer auf Synchronismus beschleunigt. Im 2. Bereich arbeitet die Phasenspaltermaschine allein, im 3. Bereich nur die ASM mit dem von der Phasenspaltermaschine mit offenem Rotor gelieferten Drehstrom. Auch hier ließ sich der Netz-Grundschiebungsfaktor auf Eins regeln. Die drei verlustarmen Geschwindigkeiten waren 33, 57 und 80 km/h, die Dauerleistung P_{dd} 2000 kW, das Gewicht 83 t, also 5 t mehr als bei der Einheitslok E 44. Die Lokomotive wurde erst mit Umstellung der Höllentalbahn auf das $16\frac{2}{3}$ -Hz-System im Jahr 1961 außer Betrieb gesetzt und museal aufbewahrt.

Auch in den U.S.A. gab es Lokomotiven mit Phasenspaltermaschinen, allerdings einfacherer Bauart als die Lösung von Kandó. Für den schweren Kohlenverkehr aus dem Allegheny-Gebirge zur Küste bei Norfolk ließ die Virginian Railroad 1927 dreiteilige Lokomotiven ($3 \times 1'D1'$) mit einer Dauerleistung von 6 MW bei einem Gewicht von 570 t und einer Anfahrzugkraft von 1220 kN (!) bauen; sie hatten nur zwei Dauerfahrstufen von 22,5 und 45 km/h (S. 8f. in [9]).

Für den schweren, aber langsamen Kohlentransport im Nordosten von Frankreich hat MFO um 1955 Güterzuglokomotiven mit zwei Umformersätzen, einem Einphasensynchronmotor-Gleichstromgenerator-Satz und einem Gleichstrommotor-Drehstromgenerator-Satz gebaut, die aber für europäische Verhältnisse sehr schwer waren: SNCF Reihe 14 100, Radsatzfolge $C_0'C_0'$, $P = 2600 \text{ kW/G} = 124 \text{ t}$ [87].

5.1.3 Frequenzvariabler Betrieb mit Pulswechselrichter

Heute bieten Pulswechselrichter die Möglichkeit, Frequenz f_s und Effektivwert U_s der Grundschwingung des speisenden Drehspannungssystems frei einzustellen und damit den besonders vorteilhaften Asynchronmotor mit Kurzschlussläufer freizügig einzusetzen. Bild 5.10 zeigt das vereinfachte kanonische Ersatzschaltbild des Asynchronmotors mit den besprochenen Vereinfachungen (symmetrische Maschine, Grundwellen-ESB, $R_s = 0$, $R_{fe} \rightarrow \infty$ gesetzt).

Mit $\Psi_\mu = U_s/\omega_s = L_\mu \cdot I_\mu$ wird die Drehmomentgleichung umgeformt zu:

$$M_d = 3 \cdot p \cdot \Psi_\mu^2 \cdot \frac{\frac{\omega_r}{R_r}}{1 + L_\sigma^2 \cdot \left(\frac{\omega_r}{R_r}\right)^2} \quad (5.13)$$

Daraus wird das Steuergesetz abgeleitet: Der Magnetisierungsfluss ist so weit wie möglich durch frequenzproportionale Veränderung der Spannungsamplitude mit der Statorkreisfrequenz ω_s auf dem Nennwert zu halten, um die Maschine immer optimal magnetisiert zu halten. Steuergröße für