

ELEKTRISCHE FAHRZEUGANTRIEBE

Grundzüge der Theorie und Berechnung

Von Paul Müller

Herausgegeben von

Albert Peters und Albert Gladigau

R. OLDENBOURG VERLAG MÜNCHEN



Inhaltsverzeichnis

(Nummer der Absätze)

Kapitel I. Betriebsbedingungen 9

Gewicht (1). Raumbedarf (2). Betriebssicherheit (3). Wirtschaftlichkeit (4). Spannungsschwankungen (5). Parallellauf (6). Überlastbarkeit (7). Regelung/Steuerung (8). Elektrische Bremse: Verzögerungs-, Gefällebremse (9), Widerstands-, Nutzbremse (10). Stromarten (11): Gleichstrom (12), Wechselstrom (13), 50 Hz-Betrieb (14).

Kapitel II. Berechnung der Motorleistung 10

a) Leistungsprogramm und Berechnungsgang 10

Nennleistung aus Zugkraft und Geschwindigkeit (15): Zugkraft (16), Geschwindigkeit (17), Nennleistung (18).

b) Berechnung der Zugkraft 11

Fahrwiderstand (19): Reibungswiderstand (20), Luftwiderstand (21), Messung des Fahrwiderstandes (22), Formeln für Lokomotivzüge (23), Triebwagen (24), Industriebahnen (25), Obus (26); erhöhter Losreißwiderstand (27), Krümmungswiderstand (28), Steigungswiderstand (29), Beschleunigungswiderstand (30), Massenzuschlag (31), Beispiele (32), Umrechnung des Trägheitsmomentes (33). Haftreibung: Übertragbare Zugkraft (34), Achslast (35), Haftwert (36). Schlupf und Gleitreibung (37).

c) Fahrgeschwindigkeit 14

Mittlere, Reise-, Höchstgeschwindigkeit (38). Messung (39).

d) Fern- und Nahverkehr 14

Verhältnis Anfahrt, volle Fahrt, Bremsung (40).

e) Fernverkehr 14

Grundlagen, Fahrtafeln: Geschwindigkeitscharakter (41—42), Leistung (43), Beispiel (44), Leistungs- und Zugkraftkennlinien (45), Nennleistung (46), Aufstellen der Fahrtafeln (47—48), Auslauf und Bremsen (49).

Beispiele für Fernverkehr 16

Zahlenangaben (50—51). Fall A: Wechselnde Geschwindigkeit, Gleichstrom normal (52): Aufteilung der Fahrzeit (53), des Weges (54); Anfahrlinien (55), Tabelle (56—57), vollständiges Fahrtafelbild (58), Energieverbrauch (59), Effektivstrom (60), Über-temperatur (61). Fall B: Wechselnde Geschwindigkeit, Gleichstrom konstanter Leistung (62—63). Fall C: Konstante Geschwindigkeit, Wechselstrom 16 2/3 Hz (64): Abschätzen der Geschwindigkeit (65), der Stundenzugkraft (66); Dauerleistung (67), Einheitskennlinien (68—69), Fahrtafelbild (70), Energieverbrauch (71), Leistungsfaktor (72), Erwärmung

der Motoren (73—74); Transformator: Transformatorleistung (75), Primärwicklung (76), Sekundärwicklung (77), Erwärmung der Ölfüllung (78), der Wicklungen (79); Heizung (80), Spannungsabfall (81). Vergleich der 3 Beispiele A, B und C (82).

Allgemeine Richtlinien (83) 24

f) Nahverkehr 24

Grundlagen, Fahrtafeln (84): Leistung und Arbeitsverbrauch (85—86), Auslauf, Bremsen (87), veränderliche Beschleunigung (88—89), Beispiel für gekrümmte Beschleunigung (90), kürzeste Fahrzeit, Mehrzeit bei Auslauf (91), Beispiel (92), Nennleistung (93), Beispiel (94), Aufstellen der Fahrtafeln (95).

Einheitsfahrtafeln (96) 27

Umrechnung Weg und Zeit (97—99). Annahmen für Einheitsfahrtafeln (100): Beispiel (101—103). Elektrische Bremsung: Kurzschlußbremse (104—105), Nutzbremse (106). Einheitszahlen für nicht elektrische und elektrische Bremse (107—109).

Besondere Verhältnisse 32

Grenzbeschleunigung (110). Mittlerer Haltestellenabstand (111). Wechselstrom (112).

Kapitel III. Der Gleichstrom-Bahnmotor 33

Allgemeine Forderungen (113).

a) Anker 33

Treibrad- und Ankerdurchmesser, Motordrehzahl, Getriebe (114—115). Ankerlänge, Spurweite (116). Eisenlänge (117). Grundformeln für Durchmesser und Eisenlänge (118—121). Grenzwerte: Lamellenspannung (122), Induktion im Luftspalt (123), Strombelag (124), Umfangsgeschwindigkeit (125). Ankerwicklungen: Windungszahl je Lamelle (126), Parallel- oder Schleifenwicklung (127), Reihen- oder Wellenwicklung (128), Reihenparallelwicklung (129). Anwendung der Grundformeln: Kommutator- und Ankerdurchmesser (130), Polzahl (131). Beispiele (132—137), Isolationszuschläge (138).

b) Ständer (139) 37

Hauptpole (140): Ankerquerfeld (141), Berechnung der resultierenden Feldkurve (142), kompensierte Motoren (143). Wendepole (144): Wendezone (145), Tatlagernmotoren (146). Lüftung (147).

Kapitel IV. Gleichstrombremse 39

a) Kurzschlußbremse (148) 39

Selbsterregung, Sättigung: Ungesättigter und gesättigter Reihenschlußmotor (149—150), Feldschwächung

(151), Selbsterregung über Wendepole (152), Verlauf der Selbsterregung mit Sättigung (153), Beispiel (154), Selbsterregung mit Berücksichtigung der Wirbelströme (155). Remanenz, Vorerregung (156—157). Stillstand, Schlupf, Rücklauf (158): Verlustloser Motor (159), Ohmscher Widerstand (160), Reibung zwischen Rad und Schiene (161). Kurzschlußbremsung mit zwei Motoren: Getrennte Bremsstromkreise (162), Reihenschaltung (163), Parallelschaltung (164), Kreuzschaltung (165), Kreuzschaltung mit Ausgleichswiderstand (166—167), Viereckschaltung (168). Kurzschlußbremsung mit vier Motoren: Getrennte Stromkreise (169), Reihenschaltung (170), Parallelschaltung (171), Kreuzschaltung (172), gemischte Kreuz- und Parallelschaltung (173).

b) Gleichstrom-Nutzbremse 44
 Vergleich mit Kurzschlußbremse (174—175). Grundlagen: Anwendung und Nutzeffekt (176), Motorschaltung (177—178), Erregerschaltungen (179), Kopplung zwischen Feld- und Ankerstrom (180), Bremscharakteristik (181—183), Regelung/Steuerung (184). Nutzbremse mit zwei oder mehr Motoren (185): Parallel-, Reihenschaltung (186), Fahrmotor als Erreger (187), Steuerung für Gefällebremse (188), für Verzögerungsbremse (189).

c) Fremderregte Widerstandsbremse (190) 48
 Widerstandsbremse mit zwei oder mehr Motoren (191): Differenzschaltung (192). Gleichstrom-Widerstandsbremse bei Wechselstrom-Lokomotiven (193).

d) Kombinierte Nutz- und Widerstandsbremse 50
 Netzerregte Nutzbremse (194). Selbsttätige Umschaltung (195). Zweimotorige Brückenschaltung für alle drei Bremsarten (196).

Kapitel V. Regelung/Steuerung des Gleichstrom-Bahnmotors 51
Regelmöglichkeiten (197).

a) Spannungsregelung 51
 Grobstufige Regelung, Schaltung in Reihe und Parallel (198—199): Übergang (200), Brückenschaltung (201—202). Stetige Spannungsregelung mittels Umformer (203): Leonard-Schaltung (204), Leonard-Sparschaltung (205), Zusatz-Absatz-Schaltung (206), zyklische Schaltung (207), Metadyne (208), Umformer in Verbindung mit Reihen-Parallel-Schaltung (209). Teilspannungen, Spannungsstufen: Kennlinien für Teilspannungen (210), Spannungsregelung und Abstufung (211).

b) Stromregelung 55
 Feldschwächung mittels Parallelwiderstand (212): Kennlinien (213), Grenzen des Erregergrades (214), Geschwindigkeitsregelung (215—216). Feldschwächung mittels Windungsanzapfung (217). Parallelwiderstand (218): Induktiver Shunt (219). Selbsttätige Regelung durch Gegenerregung (220).

c) Widerstandsregelung 57
 Kennlinien mit Vorwiderstand (221). Abstufung der Vorwiderstände (222). Abstufung für Kurzschlußbremse (223): Darstellung als Exponentialkurve (224), Beispiel (225). Abstufung für Anfahren (226): Darstellung als Exponentialkurve (227).

Stromanstieg mit Dämpfung (228): Beispiel (229—230). Auslegung der Widerstände: Stufenzahl (231), Grob-, Viel-, Feinstufung (232), Widerstandsstoffe (233), Erwärmung (234—235).

d) Schaltvorgänge 61
 Schaltfolge (236). Überschläge (237). Berechnungsunterlagen für Abs. 239—249 (238). Abklingen des Feldes nach dem Abschalten: Ohne Shunt (239), mit ohmschem Shunt (240), mit induktivem Shunt (241). Einschalten auf Netzspannung: Mit Shunt (242), Beispiel ohne Shunt (243), Beispiel mit ohmschem Shunt (244), Beispiel mit induktivem Shunt (245). Übergang auf 50% Erregergrad (246): Mit ohmschem Shunt (247), mit induktivem Shunt (248). Übergang auf Parallel (249).

e) Anhang: Dieselelektrische Antriebe 63
 Prinzip und Aufgabe (250).
 Regelung über Erregung 64
 Erregerschaltungen (251). Resonanz (252). Magnetverstärker (253). Gegenkompoundierung (254). Hilfsrerger (255). Fliehkraftregler (256). Servoregler (257).
 Dieselleistung und Verhältnis von Spannung, Strom, Drehzahl 65
 Generator und Fahrmotoren (258). Schaltung der Fahrmotoren in Reihe und Parallel (259). Umschaltbares Vorgelege (260). Differentialgetriebe (261).

Kapitel VI. Der Wechselstrom-Bahnmotor 66
Wechselstrom gegen Gleichstrom (262).

a) Theorie 67
 Entwicklung des Wechselstrom-Bahnmotors: Reihenschlußmotor (263), Repulsionsmotor (264—265), kompensierter Repulsionsmotor (266), Reihenschlußmotor mit phasenverschobenem Wendefeld (267). Leistungsfaktor (268—269). Bürstenkurzschluß im Stillstand (270): Einfluß der Bürstendicke (271), Dämpfung der Kurzschlußströme im Stand (272), Schichtbürsten (273), Spreizkohlen (274), Anfahr (275). Kurzschlußströme im Lauf (276—279).
 Gleichstromkommutierung (280) 71
 Stromwendespannung (281). Streuung der Wickelköpfe (282). Kommutierungszeit: Durchmesserwicklung (284), Sehnenwicklung (284—285), Beispiele (286—288). Wendefeld, Wendezone, Wendepollluftspalt (289—291). Wendepolerregung (292): Nebenschlußerregung (293), Restspannungen (294), Parallelwiderstand (295—296), Beispiel (297).
 Oberwellen 75
 Oberwellen und Wendefeld (298): Wendefeld für dritte Oberwelle (299). Kurvenform bei Sättigung (300—302). Oberwellen durch Ankernutung: Nutzpulsationen (303—304).

b) Berechnung des Wechselstrom-Bahnmotors 78
 Vorschriften und Grenzen für Leistung (305—306). Anker, Hauptmaße: Grundformeln für Durchmesser und Eisenlänge (307—308), Grenzwerte (309), Berechnungsbeispiel (310—311), Einfluß der Leistung (312). Vergleich zwischen $16\frac{2}{3}$ Hz- und Gleichstrommotor (313). 50 Hz-Wechselstrommotor (314):

	<i>Beispiel (315), Zweifach-Parallelwicklung (316—317), Tandemmotor (318), Doppelmotor (319), Verbesserung (320).</i>	
e) Anhang: Repulsionsmotor	82	
	Sonderformeln (321—322): <i>Beispiel (323).</i>	
Kapitel VII. Wechselstrombremse	83	
	<i>Gefällebremse (324).</i>	
a) Nutzbremse, Reihenschlußschaltungen	83	
	Reihenschlußmotor bei Gleichstrom (325). Wechselstrom-Reihenschlußmotor (326). Selbsterregung: <i>mit Gleichstrom (327), mit Wechselstrom (328—333).</i>	
b) Nutzbremse, Nebenschlußschaltungen	84	
	Nebenschlußschaltungen mit nachteilendem Feld: <i>Bremsdrossel (334—336), Drosselleistung (337—339), Regelung (340).</i> Nebenschlußschaltungen mit phasengleichem Feld (341): <i>Phasenumformer (342), Fahrmotor als Erreger (343), Phasenspaltung (344), Kondensatorschaltung (345), Frequenzempfindlichkeit (346), Ankerstrom, Ankerphase, Bremsmoment (347—348), Kopplung zwischen Anker- und Feldstrom (349—350), Beispiel (351).</i> Selbsterregung (352). Wendepolschaltung (353): <i>Wendepolerregung (354).</i> Wirkung von Oberwellen, Sättigung, Kurzschlußströmen: <i>Oberwellen (355), Sättigung (356), Rückwirkung der Kurzschlußströme (357).</i> Regelung der Nebenschlußschaltungen: <i>Gefällebremse (358), Verzögerungsbremse (359).</i>	
c) Wechselstrom-Widerstandsbremse	90	
	Selbsterregte (360), fremderregte Bremse (361).	
Kapitel VIII. Der Fahrzeugtransformator	91	
a) Berechnung	91	
	Spannung, Ströme, Leistung (362—364). Allgemeine Anforderungen, Transformatorgewicht (365). Isolation: <i>Transformatoröl (366—367), synthetische Öle (368).</i> Spezifische Belastung des aktiven Eisens: <i>Kraftliniendichte (369).</i> Spezifische Belastung der Wicklung: <i>Erwärmung (370), Spulen- und Spaltbreite (371), Beispiel (372), Erwärmung und Abkühlung (373).</i> Leistung, Abmessungen, Gewichte: <i>Leistungsformel (374), Größenverhältnisse, Eisen- und Kupferanteil (375), Aluminiumwicklung (376), Umrechnung auf andere Leistungen (377), Konstruktionsgewicht (378).</i>	
	Wicklungen	94
	Aufbau und Schaltung: <i>Form und Anordnung der Spulen (379), Schaltung der Primärwicklung (380), Schutz der Primärwicklung (381), Schaltung der Sekundärwicklung (382—383).</i> Streuung (384—385): <i>Formeln (386), Beispiele (387—392).</i> Kurzschlußkräfte (393): <i>Beispiel (394).</i>	
	Überströme und Überspannungen	97
	Überströme (395). Überspannungen (396—397).	
b) Steuerung/Regelung der Sekundärspannung	98	
	Regelverfahren (398). Abstufung (399—400).	
	Niederspannungssteuerung	98
	Grobstufenschaltungen (401): <i>Stromteilerschaltungen (402—403), Dreifachstromteiler (404), vierfache Stromteilung (405), Spannungsteiler (406).</i> Viel-	
	stufenschaltungen (407): <i>Zwischenstufen (408—409), Stromüberleitung (410—411).</i> Feinstufenschaltungen: <i>Feinregler (412—414).</i> Stufenlose Steuerung: <i>Drehtransformator (415—416), Drehregler mit Stromverschiebung (417), Schubtransformatoren (418), mechanisch veränderliche Windungszahl (419—420).</i>	
	Hoch- und Mittelspannungssteuerung	103
	Hochspannungssteuerung: <i>Vorder- und Hinterttransformator (421—423), Streuung und Verluste (424).</i> Vergleich zwischen Hoch- und Niederspannungssteuerung (425): <i>Beispiele für Hoch- und Niederspannungssteuerung (426).</i> Mittelspannungssteuerung (427).	
Kapitel IX. Sondersysteme für 50 Hz	105	
	<i>Umformung des Einphasenstromes (428).</i>	
a) Einphasen-Mehrphasen-Umformung	105	
	Drehstrom-Asynchronmotor (429): <i>Läufermaße (430), Vektordiagramm (431).</i> Phasenumformer (432): <i>Unsymmetrie (433—435), Regelung der Fahrgeschwindigkeit (436).</i> Frequenzumformung (437—438): <i>Stetige Regelung der Frequenz (439), variable Frequenz (440).</i> Motor nach Punga-Schön (441). Kondensatormotor (442—444).	
b) Einphasen-Gleichstrom-Umformer	108	
	Synchron-, Asynchron-Wechselstrommotor (445—446).	
c) Einphasen-Gleichstrom-Gleichrichter	108	
	Theorie (447)	108
	Spannungs-, Stromkurve: <i>Spannungskurve (448), Stromkurve (449), primäre Stromkurve (450).</i> Fahrmotor mit ungedämpftem Feld (451): <i>Beispiel (452).</i> Fahrmotor mit gedämpftem Feld: <i>Glättungsdrossel, Nullanode (453), Strom- und Feldschwankungen (454), Stromverlauf (455), Beispiel (456—457), Schaltung mit Nullanode (458).</i> Besondere Verhältnisse: <i>Gittersteuerung (459), Betrieb mit 16²/₃ Hz (460), Zweifrequenzantriebe (461), Oberwellen (462).</i>	
	Wirkungsweise der Gleichrichter	112
	Quecksilberdampfgleichrichter (463—464). Trocken- gleichrichter (465—466): <i>Germanium (467), Silizium (468).</i>	
Kapitel X. Anhänge	113	
a) Anhang I: Wirbelströme in massiven Leitern, mit Berücksichtigung der Stromphase	113	
	Wechselstrom: <i>Stromverdrängung (469), Verluste, Selbstinduktion (470).</i> Gleichstrom: <i>Kommutierter Gleichstrom (471), Verluste (472), Stromwende- spannung (473).</i>	
b) Anhang II: Erwärmung	114	
	Wärmeabgabe (474): <i>Spezifische Wärmeabgabe (475).</i> Wärmeleitung (476). Spezifische Wärme (477). Erwärmung und Abkühlung (478): <i>Zeichnerische Darstellung (479).</i> Temperaturanstieg bei Widerstandszunahme (480). Zweistufige Kühlung mit Zwischenmedium (481).	
c) Anhang III: Symbolisches Rechenverfahren für stationäre sinusförmige Wechselströme, Grundregeln	117	

Kapitel XI. Mechanik des Bahnmotors

und der Antriebe 117

a) Mechanik des Tatzlagermotors 117

Bauform (483). Kräfte, Trägheitsmoment: *Kräfte bei gleichförmiger Geschwindigkeit (484), bei konstanter Beschleunigung (485), am Treibrad (486); Trägheitsmoment des Motors in Bezug auf die Treibachse (487—488), Schwingung um die Treibachse (489).* Ungefederter Massenanteil des Tatzlagermotors (490—492): *Schwerpunktsüberhöhung (493).* Gefederte Zahnräder (494—495). Aufhängung, Stoßbeschleunigung: *Einfluß der Aufhängung (496), Stoßbeschleunigung (497).* Rüttelschwingungen beim Einphasenmotor, ohne Federung (498—502). Rüttelschwingungen beim Einphasenmotor, mit Federung (503—504): *Beispiel (505).* Hämmern bei Spiel im Getriebe (506).

b) Mechanik des Gestellmotors, Antriebe (507) 123

Stangenantrieb (508).

Einzelachsenantriebe 124

Bauarten (509). Drehungsstarre Kupplungen (510): *Kreuzkupplung (511—514), Gelenkhebelkupplungen (515—517), Kardanwellenantrieb (518—519), biegunselastische Kupplungen (520).* Drehelastische Kupplungen (521): *Federkupplungen (522).*

c) Mechanik der Gummiantriebe (523) 127

Dämpfungsvermögen (524). Resonanz (525—527). Schwingungsdämpfung: *Ohne Dämpfung (528), mit Dämpfung (529), gedämpfte Eigenschwingung (530), Reibung (531).* Stoßdämpfung (532): *Ohne Dämpfung (533), mit Dämpfung (534).* Bauformen der Gummiantriebe (535): *Schwebemotor (536), Gummiringfeder (537).* Kombinierte Schwingung bei senkrechtem Stoß: *Verhalten gegen Stöße (538—539).*

d) Achsentlastung 130

Ruhende Achslast, Entlastungsmoment: *Ursache und Größe der Entlastung (540), Entlastungsmoment (541).* Zweiachsige Fahrzeuge (542). Vierachsige Fahrzeuge: *Entlastungsminimum (543), stabile Drehgestelle (544—546), labile Drehgestelle (547—549), Achslastausgleich (550—552).* Sechachsige Fahrzeuge: *Entlastungsminimum (553), labile Drehgestelle (554—555), Achslastausgleich (556).* Anpassung des Drehmomentes an die Entlastung (557): *Mechanische (558), elektrische Anpassung (559), Feldregelung bei Gleichstrommotoren (560—562), Strom- oder Spannungsregelung bei Wechselstrommotoren (563).*

e) Anhang: Kreiselwirkung der umlaufenden Massen . 136

Kreiselmoment (564). Verhältnis zur Fliehkraft (565): *Beispiele (566).* Ankerwelle in Längsachse des Fahrzeugs (567).

Schrifttum. Triebfahrzeuge und Abkürzungen 138