

Dr.-Ing. Max Süberkrüb

TECHNIK DER BAHNSTROM-LEITUNGEN

Bearbeitet von
Professor Dipl.-Ing. Gerhard Krienitz
unter Mitwirkung von
Dipl.-Ing. Lorenz Schmid
und Ing. (grad.) Ulrich Hübner



1971

VERLAG VON WILHELM ERNST & SOHN
BERLIN • MÜNCHEN • DÜSSELDORF

Inhaltsverzeichnis

1.	Die allgemeinen Voraussetzungen und Bestimmungen	1
1.1.	Die Vorplanung für die Gesamtanlage	1
1.1.1.	Voraussetzungen für die Planung	1
1.1.2.	Der Einfluß der Stromart auf die Abmessungen der Leitungen	1
1.1.3.	Die Stromführung im Bahnstromnetz	2
1.2.	Die Vorschriften, Bestimmungen, Normen	3
1.2.1.	VDE-Bestimmungen	3
1.2.2.	Vorschriften der DB	4
1.2.3.	Richtlinien für den Nahverkehr	4
1.2.4.	DIN-Normblätter	4
1.3.	Die Sachbegriffe nach den VDE-Bestimmungen	5
1.4.	Die Spannungsverhältnisse	7
1.4.1.	Spannungsnormen	7
1.4.2.	Grenzwerte für die Spannung und Frequenz	7
1.5.	Die elektrischen Abstände gegen Erde	7
1.5.1.	Erdungsabstände	8
1.5.2.	Sicherheitsabstände	9
2.	Die Bahnstrom-Freileitung und -Speiseleitung auf eigenem Tragwerk sowie die Bahnstrom-Kabel	11
2.1.	Die Bahnstrom-Freileitung	11
2.1.1.	Erste Bauergebnisse und Weiterentwicklung	11
2.1.2.	Die Entwicklung und Ausführung der Klemmen und Aufhängungen	13
2.1.3.	Freiluft-Isolatoren für Bahnstrom-Freileitungen	16
2.1.3.1.	Die Beanspruchung, Prüfung, Abmessungen und Kennwerte der Isolatoren	16
2.1.3.2.	Beschaffenheit der Isolatoren	19
2.1.3.3.	Der Fremdschichteinfluß	19
2.1.3.4.	Der Schutz der Isolatoren und Leitungen gegen mechanische Schwingungen, Lichtbogenüberschläge, Überspannungen und atmosphärische Störungen	22
2.1.4.	Erder für Hochspannungs-Bahnstrom-Freileitungen	23
2.1.5.	Die Leiter-Abstände und -Anordnung sowie Leiter-Werkstoffe	24
2.1.5.1.	Leiter-Abstände und -Anordnung	24
2.1.5.2.	Festigkeitswerte der Leiter-Werkstoffe für die Durchhangsberechnung	26
2.1.5.3.	Die physikalischen und technologischen Eigenschaften der Seile für die 110 kV-Bahnstrom-Fernleitung der DB	26
2.1.6.	Die Ermittlung des Leiterdurchhanges	26
2.1.6.1.	Allgemeines über Leiterdurchhänge und Grenzspannweiten	26
2.1.6.2.	Die Berechnung des Durchhanges bei ungleichmässig verteilter Zusatzlast	29
2.1.6.3.	Die Temperaturerhöhung der Leiter durch Stromerwärmung	30
2.1.7.	Maste, Gestänge und ihre Berechnung	30
2.1.7.1.	Die Mastarten der Bahnstrom-Freileitung	30
2.1.7.2.	Die Belastungsannahmen	31

2.1.7.3.	Mastberechnung nach VDE 0210 mit Beispiel	32
2.1.8.	Mastgründungen für Bahnstrom-Freileitungen	36
2.1.8.1.	Wahl der Gründungsart	36
2.1.8.2.	Die Mehrblockgründungen und ihre Berechnung	37
2.1.9.	Die wirtschaftlich günstigsten Mastabstände und Leiterquerschnitte der Bahnstrom-Freileitung	38
2.1.9.1.	Die günstigsten Mastabstände	38
2.1.9.2.	Die günstigsten Leiterquerschnitte	40
2.1.9.3.	Die Berechnung des Dauerstromes	41
2.2.	Die Bahnstrom-Speiseleitung auf eigenem Tragwerk	43
2.3.	Die Bahnstromkabel	47
3.	Der Konstruktionsraum für Fahrleitungen und Stromabnehmer	52
3.1.	Allgemeine Angaben über die Umgrenzung des lichten Raumes und ihre Bedeutung	52
3.2.	Die Umgrenzung des lichten Raumes für die Deutsche Bundesbahn und Österreichischen Bundesbahnen (Haupt- und vollspurige Nebenbahnen), obere und untere Umgrenzung	52
3.2.1.	Das halbe Breitenmaß bei 15 kV ¹	52
3.2.2.	Die lichten Höhen bei 15 kV ¹	54
3.2.3.	Das halbe Breitenmaß bei 25 kV ¹	57
3.2.4.	Die lichten Höhen bei 25 kV ¹	57
3.2.5.	Das halbe Breitenmaß und die lichten Höhen bei 1,5 und 3 kV —	57
3.2.6.	Die untere Umgrenzung bei Haupt- und vollspurigen Nebenbahnen mit Stromschiene nach BO § 11	60
3.3.	Die Umgrenzung des lichten Raumes bei Neben- und Straßenbahnen ...	61
3.4.	Übersicht über die verwendeten Fahrdraht Höhen über SO	61
3.5.	Die Umgrenzung des lichten Raumes bei ausländischen Bahnen	62
3.6.	Die Umgrenzung des lichten Raumes des Internationalen Eisenbahnverbandes UIC	63
4.	Die Fahr-, Speise- und Verstärkungsleitung auf gleichem Tragwerk und die Stromschiene	64
4.1.	Die Fahrleitungsarten, Nachspannungen und der Verwendungsbereich ..	64
4.1.1.	Die Fahrleitung mit Einfachaufhängung (Einfach-Fahrleitung)	64
4.1.1.1.	Die feste Einfach-Fahrleitung und Pendelaufhängung	64
4.1.1.2.	Die nachgespannte Einfach-Fahrleitung für Straßenbahnen	67
4.1.1.3.	Die Einfach-Fahrleitung mit Schrägpendel-, Parallelogramm- und Trapez-aufhängung für Obuslinien	68
4.1.1.4.	Die Einfach-Fahrleitung für Unterpflaster-Straßenbahnen	69
4.1.1.5.	Kritik der Einfach-Fahrleitungen und Übergang auf die Dreiecksaufhän-gung	71
4.1.1.6.	Die nachgespannte Einfach-Fahrleitung mit Dreiecksaufhängung und kleiner Bauhöhe (Schwebeaufhängung)	75
4.1.1.7.	Die nachgespannte Einfach-Fahrleitung mit Dreiecksaufhängung und großer Bauhöhe (Kölner System)	77
4.1.1.8.	Die nachgespannte Einfach-Fahrleitung mit Dreiecksaufhängung (Bauart Böhm)	77
4.1.1.9.	Die Einfach-Fahrleitung für Werk- und Grubenbahnen über und unter Tage	80
4.1.2.	Vielfach- oder Kettenfahrleitungen	82
4.1.2.1.	Die volle Flachkette	86
4.1.2.2.	Die halbe Flachkette für Krümmungen	87
4.1.2.3.	Die Ketten-Fahrleitung mit festem Trageil und nachgespanntem Fahr-draht	89

4.1.2.4.	Die Y-Fahrleitung mit nachgespanntem Trageseil und Fahrdraht	90
4.1.2.5.	Die Ketten-Fahrleitung mit nachgespanntem Trageseil und Fahrdraht (Einheits-Fahrleitung der DB für 160 km/h)	91
4.1.2.6.	Die windschiefe Ketten-Fahrleitung ohne und mit seitlicher Beiseilverspannung des Fahrdrahtes	96
4.1.2.7.	Die windfeste Ketten-Fahrleitung mit seitlicher Beiseilverspannung des Fahrdrahtes	96
4.1.2.8.	Die windfeste Ketten-Fahrleitung mit seitlicher Beiseilverspannung des Trageseiles	97
4.1.2.9.	Die Ketten-Fahrleitung für Höchstgeschwindigkeiten von 200 km/h und mehr	97
4.1.3.	Die Berechnung des Durchhangsverhaltens der Fahrleitungen	101
4.1.3.1.	Die Baustoff-Eigenschaften der Fahrleitungsbauteile: Fahrdrähte, Drähte, Seile	101
4.1.3.2.	Die Erwärmung der Drähte und Seile durch den Bahnstrom	105
4.1.3.3.	Die Durchhangsberechnung des Längstragwerkes mit gleichmäßig verteilter Last (nach Weil [17])	109
4.1.3.4.	Berechnungsbeispiel für den Durchhang eines Fahrdrahtes (oder Seiles) . .	111
4.1.3.5.	Das Durchhangsverhalten der Flachketten	112
4.1.3.6.	Die halbe Flachkette für Krümmungen	116
4.1.3.7.	Das Durchhangsverhalten bei verschiedenen Temperaturen mit ungleicher Zusatzlast, spezielle Durchhangsformel für die Hochkette	120
4.1.4.	Die Rückstellkräfte am Trageseil und Fahrdraht	122
4.1.4.1.	Die Rückstellkraft als Folge von Temperaturänderungen	123
4.1.4.2.	Die Rückstellkräfte am Seitenhalter und Drehausleger	123
4.1.4.3.	Die Rückstellkräfte an der Pendelaufhängung für nachgespannte Fahrdrähte und Trageile	127
4.1.4.4.	Die Rückstellkräfte am Fahrdrahthänger und an den Läuferinrichtungen .	130
4.1.4.5.	Das Ergebnis für die Nachspannung	132
4.1.5.	Die Berechnung der Windkräfte, des Windantriebes, der Mastabstände und der Kurventeiler (waagerechtes Verhalten)	134
4.1.5.1.	Die aerodynamischen Einflüsse und Windkraftformeln	134
4.1.5.2.	Die Windkräfte und die verschiedenen Windantriebsarten	136
4.1.5.3.	Die Grundgleichungen für die Berechnung des Windantriebes	137
4.1.5.4.	Die Windantriebsformeln für die gerade Strecke und für Krümmungen .	140
4.1.5.5.	Die Berechnung des Mastabstandes der Fahrleitung für die gerade Strecke .	141
4.1.5.6.	Die Berechnung des Mastabstandes der Fahrleitung für Krümmungen . . .	142
4.1.5.7.	Formelzusammenstellung und Zahlenwerte für Mastentfernungen	146
4.1.5.8.	Der Windantrieb und die Höchstspannweiten bei Pendelaufhängungen (mit Beispiel)	147
4.1.5.9.	Die Erzielung von Höchstspannweiten durch Seitenverspannung (Berechnungsbeispiele)	152
4.1.6.	Die Nachspannung und die Nachspannvorrichtungen	161
4.1.6.1.	Der Zweck der Nachspannung und die Nachspannlängen	161
4.1.6.2.	Die Abfangungen	162
4.1.6.3.	Die Anforderungen an die Nachspannvorrichtungen	163
4.1.6.4.	Arten und Eigenschaften der Nachspannvorrichtungen	163
4.1.6.5.	Die Berechnung der Charakteristik der Spanner sowie Seil- und Drahtbruchversuche	166
4.1.6.6.	Vergleich der Charakteristiken	169
4.1.6.7.	Die für die Nachspannung notwendigen Einrichtungen	170
4.1.7.	Die Fahrleitungs-Weichen und -Kreuzungen	173
4.1.7.1.	Weichen und Kreuzungen für Bügelbetrieb	173
4.1.7.2.	Weichen für Schleifschuh- und Rollenbetrieb	175
4.1.7.3.	Feste und verstellbare Kreuzungen für die Obus- und Straßenbahn-Fahrleitung	177

4.1.7.4.	Kreuzungen von Fahrleitungen verschiedener Stromsysteme und Strom- abnehmer	178
4.2.	Das Quertragwerk und die Halterung von Trageisil, Fahrdralt und Speise- leitung	181
4.2.1.	Quertragwerke	182
4.2.1.1.	Das Querseil für Einfach-Fahrleitungen	182
4.2.1.2.	Das Querseil für Vielfach- oder Ketten-Fahrleitungen	183
4.2.1.3.	Querträger (Joche)	185
4.2.1.4.	Feste und Dreh-Ausleger, Traversen	186
4.2.2.	Die Halterungen und Stützpunkte für Einfach-Fahrleitungen	189
4.2.2.1.	Feste Aufhängung für gerade Strecke und Kurven	189
4.2.2.2.	Gleit- und Pendelaufhängungen	195
4.2.2.3.	Stützpunkte für Dreiecksaufhängungen	195
4.2.3.	Stützpunkte für Vielfachaufhängungen und Speiseleitungen	196
4.2.3.1.	Stützpunkte im Querseil	196
4.2.3.2.	Stützpunkte an Querträgern (Jochen) und Auslegern	197
4.2.3.3.	Aufhängung des Fahrdralles am Trageisil	198
4.2.3.4.	Stützpunkte für Speise- und Verstärkungsleitungen	198
4.3.	Isolatoren und Isoliermittel für Fahrleitungen	198
4.3.1.	Der Einfluß der Isolierstoffe auf die Konstruktionen	198
4.3.2.	Die Vorschriften für die Fahrleitungsisolation	200
4.3.2.1.	Die Bestimmungen des VDE über die Isolation der Bahnstrom-Leitungen und Fahrleitungen	200
4.3.2.2.	Richtlinien für Isolatoren der Deutschen Bundesbahn	203
4.3.2.3.	Ausführung und Befestigung der Kappen	204
4.3.3.	Die verschiedenen Isolatorausführungen	204
4.3.4.	Der Widerstand des Isolators gegen Übersclilag	206
4.3.4.1.	Isolator-Oberflächenwiderstand bei Fremdschichtcinfluß	206
4.3.4.2.	Übersclilagswerte und Bruchfestigkeit von Isolatoren für Nahverkehrs- und Grubenbahn-Betriebe	213
4.3.4.3.	Prüfwechselfpannung für verschiedene Isolatorformen für 15 und 25 kV Nennspannung	213
4.3.5.	Nichtkeramische Isolation	213
4.4.	Trennung, Schaltung, Speisung und Überspannungsschutz für Fahrlei- tungen	215
4.4.1.	Die Trennabschnitte	215
4.4.1.1.	Die Trennstellen	215
4.4.1.2.	Die Streckentrennungen vor Bahnhöfen und auf der Strecke	215
4.4.1.3.	Die Schutzstrecken	217
4.4.2.	Entwicklung, Arten und Ausführungen der Streckentrenner	221
4.4.2.1.	Konstruktionsbedingungen	221
4.4.2.2.	Kritik des Streckentrenner-Durchhanges und des Verhaltens der Masse beim Befahren	224
4.4.2.3.	Ausgleich der Masse	225
4.4.2.4.	Das Verhalten des Steckentrenners bei Lichtbogenübersclilag	226
4.4.3.	Die Streckenschalter	227
4.4.3.1.	Schalter-Arten, -Benennungen, -Vorschriften	227
4.4.3.2.	Schalter-Konstruktionsbedingungen und Erwärmungsversuche	230
4.4.3.3.	Ausführung der Schalter-Isolation und -Kontaktstücke	232
4.4.3.4.	Schaltversuche mit Hörnerschaltern unter Last, Hörnerausbildung	233
4.4.3.5.	Schalter ohne Hörner mit Momentausschaltung	235
4.4.3.6.	Das Schaltergestänge	236
4.4.4.	Der Überspannungsschutz	239
4.5.	Die Rückleitung, Erdung, Berührungs- und Schrittspannung	239
4.5.1.	Allgemeine Richtlinien und Leitsätze	239
4.5.2.	Die Rückleitung	241
4.5.2.1.	Rückleitung bei elektrischen Bahnen ohne Isolierschiene	241

4.5.2.2.	Rückleitung bei Gleichstrombahnen mit Isolierschiene	242
4.5.2.3.	Rückleitung bei Wechselstromstrecken mit Gleisstromkreisen	244
4.5.3.	Die Erdung der Fahrleitung und Schutzmaßnahmen	247
4.5.3.1.	Berührungs- und Schrittspannung	247
4.5.3.2.	Schutzmaßnahmen bei Fahrleitungen	248
4.5.3.3.	Schutzmaßnahmen bei Speise- und Verstärkungsleitungen	249
4.5.4.	Die Erdung von nicht zur Fahrleitung gehörenden Starkstromanlagen im Bereich der Fahrleitungen	249
4.6.	Die Fernbetätigung bei Fahrleitungen	249
4.6.1.	Die Fernbetätigung von Luftweichen und Kreuzungen	249
4.6.2.	Die Fernbetätigung von Mastschaltern	251
4.6.2.1.	Verwendung und Einteilung des Fernantriebs	251
4.6.2.2.	Der Motor-Fernantrieb von Mastschaltern	251
4.6.2.3.	Die Steuerung des Mastschalter-Fernantriebs	253
4.6.3.	Die Fernbetätigung von Gleisweichen mit Stellmagnet	253
4.6.3.1.	Verwendung und Einteilung der Gleisweichen	253
4.6.3.2.	Das Magnetstellgerät	255
4.6.3.3.	Die Teile der Weichenstellanlage	255
4.6.3.4.	Die Schaltung der Weichenstellanlage	259
4.6.3.5.	Die Ausführung mit Richtungsanzeiger	261
4.6.3.6.	Die Betätigung der Weiche vom Triebfahrzeug aus	261
4.6.4.	Die Fernbetätigung bei Gleisweichen mit Motorantrieb	262
4.6.4.1.	Allgemeines	262
4.6.4.2.	Die Einzelteile des Motorstellgerätes	263
4.6.5.	Die Fernbetätigung von Schutzstrecken	264
4.7.	Die Berechnung der Maste und des Gestänges	265
4.7.1.	Die Mastarten	265
4.7.2.	Belastungs- und Berechnungsannahmen für die Maste	266
4.7.3.	Mastberechnung und Belastungen	267
4.7.4.	Mastberechnung, die zulässigen Spannungen und das Omega-Verfahren	267
4.7.5.	Mastberechnungsbeispiele für die Momentenfläche und das Gestänge	269
4.7.5.1.	Auslegertragmaste	270
4.7.5.2.	Querseilüberspannung mit großer Spannweite für Vollbahnen	271
4.7.5.3.	Einfaches Quertragwerk für Nahverkehrsbetriebe und Grubenbahnen	280
4.7.5.4.	Rechnerische Ermittlung der Durchhänge eines Quertragwerkes	282
4.7.5.5.	Berechnung eines einfachen Joches	284
4.7.5.6.	Berechnung eines Joches über mehrere Gleise	287
4.7.5.7.	Auslegerberechnung, Auswahl der Rohre und Versuche mit nahtlos gezogenen Rohren von 42 und 55 mm \varnothing	289
4.7.5.8.	Ausleger-Berechnungsbeispiel nach dem Omega-Verfahren	291
4.7.5.9.	Beispiel für die Berechnung des Spitzenzuges eines Flachkettenmastes	292
4.7.6.	Berechnung der Mast-Querschnitte und -Durchbiegung, Masttabellen	294
4.7.6.1.	Vierstielige Maste und Flachmaste, Masttabellen	294
4.7.6.2.	Rohrmaste, Masttabelle	305
4.7.6.3.	Betonmaste, Masttabelle	306
4.7.6.4.	Vollprofilmaste, Masttabelle	309
4.7.6.5.	Winkel-Aufsetzmaste für die Fahrleitungen der Deutschen Bundesbahn, Masttabellen	309
4.7.6.6.	Mastfüße	313
4.7.6.7.	Füße für Anklammermaste und deren Berechnung	314
4.7.6.8.	Vergleich der Mast-Gewichte und -Kosten	316
4.8.	Die Berechnung der Mastgründungen	317
4.8.1.	Wesentliche Gesichtspunkte bei der Mastgründung	317
4.8.2.	Die Möglichkeiten der Mastgründung	319
4.8.3.	Die Spannung im Erdreich und die zulässige Bodenpressung	320
4.8.4.	Berechnungsformeln für Einblockgründungen	323
4.8.4.1.	Der Sicherheitsgrad	323

4.8.4.2.	Die Unterschiede in den Berechnungsverfahren	324
4.8.4.3.	Berechnung des gesamten Grenzmomentes	328
4.8.4.4.	Das Nennmoment für Stufengründungen	329
4.8.4.5.	Schmale stufenlose Blockgründungen mit $l_0/t \cong 0,65$	333
4.8.4.6.	Gründung mit Seitenschwellen	333
4.8.4.7.	Mastgründungen der Deutschen Bundesbahn	334
4.8.5.	Berechnungstabellen	334
4.8.6.	Sonderfälle für Einblockgründungen	341
4.8.6.1.	Block mit Kreisquerschnitt	341
4.8.6.2.	Mehrtiefe für Stufenfundamente mit unveränderlichem Querschnitt, aber veränderlicher Bodenpressung	342
4.9.	Die Stromschiene	345
4.9.1.	Die Stromschienearten	345
4.9.2.	Die Aufnahme der Längenänderung und der Schienenaufwurf	346
4.9.3.	Stützpunkte und Berührungsschutz	347
4.9.4.	Die Speisung der Stromschiene	348
4.9.5.	Schalter für Stromschienen	349
5.	Das elastische und dynamische Verhalten der Fahrleitungen und Stromabnehmer	350
5.1.	Die Statik der Fahrleitung und die Dynamik beim Befahren	350
5.1.1.	Die Statik der Fahrleitung	350
5.1.2.	Die Fahrleitungen als Schwingungsursache	355
5.2.	Elastizität der Fahrleitungen, Benennungen, Formeln, Beispiele	355
5.2.1.	Benennungen und allgemeine Formeln	355
5.2.2.	Die Elastizität der Aufhängungen	356
5.2.2.1.	Feste Einfachaufhängung und lotrechte Pendelaufhängung	356
5.2.2.2.	Schrägpendelaufhängung (Schweizer System)	358
5.2.2.3.	Mehrpunkts- und Dreiecks-Aufhängung, lotrecht und schräg	359
5.2.2.4.	Flachketten-Fahrleitungen	362
5.2.2.5.	Hochketten-Fahrleitungen	365
5.2.3.	Anhub und Elastizität Mitte Feld	365
5.2.3.1.	Allgemeine Anhubformel	365
5.2.3.2.	Elastizität in Feldmitte bei Einfach-Fahrleitungen	365
5.2.3.3.	Elastizität in Feldmitte bei Schrägpengel-, Dreiecks- und Schwebel-Aufhängung	366
5.2.3.4.	Anhub Mitte Feld bei Kettenfahrleitungen (Hoch- und Flachketten)	366
5.2.3.5.	Elastizität des Y-Beiseiles in Beiseilmitte	370
5.2.4.	Die Fahrleitungselastizität	371
5.2.4.1.	Berechnungsformeln und Beispiele	371
5.2.4.2.	Wie groß sollte die Stützpunktelastizität sein?	372
5.2.4.3.	Ist Vollelastizität ein Vorteil?	373
5.3.	Das dynamische Zusammenarbeiten von Fahrleitung und Stromabnehmer	373
5.3.1.	Theorie der Fahrleitungsschwingungen	373
5.3.2.	Formeln für die Schwingungen in der lotrechten Ebene	375
5.3.3.	Das Kriterium der lotrechten und waagerechten Winkelumlenkung am Fahrdrabt	378
5.4.	Höhenschwingungen von Fahrleitungen,	380
5.5.	Gemeinsames Verhalten von Fahrleitung und Stromabnehmer	383
5.5.1.	Übersicht über die Konstruktionsmöglichkeiten	383
5.5.2.	Maßnahmen zur Beherrschung der entstehenden Schwingungen	383
5.5.2.1.	Einfluß der Fahrwindkomponente bei großer Geschwindigkeit	383
5.5.2.2.	Die möglichen Eigenfrequenzen des Stromabnehmers	385
5.5.2.3.	Frei arbeitende Schleifstücke (Zwillingswippe)	387
5.5.3.	Änderung der Schwingungsursachen in den Fahrleitungen,	387

Inhaltsverzeichnis

XIII

Abkürzungen	XIV
Schrifttum	392
Stichwortverzeichnis	396