

METHODE ZUM BEMESSEN VON BAHNENERGIEVERSORGUNGSANLAGEN

P. SCHMIDT und G. HOFMANN

Hochschule für Verkehrswesen »Friedrich List« Dresden
Sektion Fahrzeugtechnik

Eingegangen am 15 April 1986

Abstrakt

Die an die ortsfesten Anlagen (Betriebsmittel) zur Energieversorgung elektrischer Bahnen für den ungestörten Betriebsfall gestellten Anforderungen. Die infolge des Stromflusses über der Zeit auftretende Erwärmung des Betriebsmittels als Kriterium für ein sicheres Übertragen einer bestimmten Leistung durch ein Betriebsmittel. Jahresmittelwert und Stundenmittelwert der Belastung (bei Straßenbahnen) sowie der Belastungsstrom als Ausgangsbasis der Betriebsmittelbewertung. Die Zufallsgröße Bahnbelastung als Überlagerung des Jahres- und Tagesganges der Belastung. Berechnung der Temperaturänderung von Elementen der Bahnenergieversorgungskette auf grund von Wärmenetzwerken.

Die ortsfesten Anlagen (Betriebsmittel) zur Elektroenergieversorgung elektrischer Bahnen sind für den ungestörten Betriebsfall so zu bemessen, daß

- bei den größten im Betriebsfall auftretenden Belastungen eine schädigende Überlastung vermieden und gleichzeitig
- eine gute mittlere Auslastung (also niedrige Investitionskosten und Betriebskosten) der Anlagen

erreicht werden.

Infolge der sich widersprechenden Forderungen wurde nach herkömmlichen Methoden praktisch ausnahmslos die Bahnenergieversorgungsanlage überdimensioniert, weil die Bahnbelastung eine zeitlich stark schwankende Größe ist. Die Dimensionierung erfolgte dabei meist in der Form, daß die ortsfesten Anlagen so bemessen wurden, daß die installierte Leistung gleich der maximal zu erwartenden Belastung gesetzt wurde. Ein bewußtes Nutzen der Gesetzmäßigkeit der Bahnbelastung einerseits und des thermischen Verhaltens der Betriebsmittel (zum Beispiel Fahrleitung, Kabel, Transformator, Freileitung, Stromrichter) andererseits erlaubt ein den heutigen Forderungen entsprechendes volkswirtschaftlich optimales Bemessen der einzelnen Betriebsmittel.

1. Energiebedarf elektrischer Bahnen

Ausgangsgröße für die Leistungsbemessung der einzelnen Betriebsmittel im System der Bahnenergieversorgung ist die ökonomische Größe Transportleistung. Die Transportleistung ist die während einer Bezugszeit T vom jeweili-

gen Verkehrsmittel zu bewältigende Transportarbeit, sie wird in der Regel in der Einheit $t \cdot \text{km}$ gemessen. Der kommerziellen Größe Transportleistung ist unter definierten Transportbedingungen eine physikalische Leistung proportional. Die physikalische Leistung ist der Gesamtheit der in jedem Augenblick zu überwindenden Fahrwiderstände der fahrenden Züge äquivalent. Die elektrische Leistung in einem Abschnitt (z. B. im Bereich eines Unterwerkes) als Momentanwert $p(t)$ ist der Summe der Fahrwiderstände aller gleichzeitig im Abschnitt fahrenden Züge proportional. Dieser Momentanwert $p(t)$ ist mithin von vielen Faktoren abhängig. In der Projektierungspraxis ist es deswegen üblich, als Grundlagen für die Bemessung der zu installierenden Leistung der einzelnen Betriebsmittel die Energiebedarfsermittlung zu nehmen. Bewährte Methoden der Energiebedarfsermittlung für einen Abschnitt sind von Jansa und Kother angegeben worden und zum Beispiel in [1] ausführlich beschrieben. Daraus resultierende Rechenprogramme für die Energiebedarfsermittlung sind entwickelt worden [2] und werden in der Projektierungspraxis in der DDR bei Betreibern von Gleichstrom- und Einphasenwechselstrombahnen angewendet.

Im Ergebnis der Energiebedarfsermittlung wird der gesamte Elektroenergiebedarf zum Bewältigen der Transportarbeit in einem Abschnitt während der Bezugszeit T ermittelt, der im weiteren mit A_T bezeichnet wird. Für den gesamten Energieaufwand in einem Straßenbahnunterwerk während einer Stunde (zum Beispiel in der Stunde der stärksten Belastung) wird die Bezeichnung A_{U_i} und für den jährlichen Arbeitsverbrauch eines Vollbahnunterwerkes das Symbol A_{U_j} verwendet.

2. Leistungsbedarf elektrischer Bahnen

Kennzeichen des Momentanwertes der Leistung $p(t)$ in einem Abschnitt elektrischer Bahnen ist das zeitlich sehr starke Schwanken. Die Betriebsmittel müssen die für den Transportprozeß in jedem Augenblick benötigte Leistung sicher übertragen. Kriterium für ein sicheres Übertragen einer bestimmten Leistung durch ein Betriebsmittel ist nicht in erster Linie die Größe des zu übertragenden Momentanwertes der Leistung oder des augenblicklich fließenden Stromes, sondern die infolge des Stromflusses über der Zeit auftretende Erwärmung des Betriebsmittels.

Alle folgenden Betrachtungen erfolgen deswegen unter dem Gesichtspunkt der zu erwartenden Betriebsmittelerwärmung bei Belastung. Aus dem Energieverbrauch A_T ist die mittlere Leistung in einem Abschnitt während der Bezugszeit T berechenbar zu

$$P_T = \frac{A_T}{T} \quad (1)$$

Für ein Vollbahnunterwerk folgt daraus z. B. für die Jahresmittelleistung P_{Uj}

$$P_{Uj} = \frac{A_{Uj}}{8760} \quad \frac{P_{Uj}}{k\overline{W}} \left| \frac{A_{Uj}}{k\overline{W}h} \right. \quad (2)$$

a

Ist beispielsweise für ein Straßenbahnunterwerk der Arbeitsverbrauch in der Stunde der stärksten Belastung (meist Frühspitze) bekannt, so findet man für diese Stundenmittelleistung

$$P_{Uh} = \frac{A_{Uh}}{1} \quad \frac{P_{Uh}}{k\overline{W}} \left| \frac{A_{Uh}}{k\overline{W}h} \right. \quad (3)$$

h

Dieser für die weiteren Betrachtungen und in der Projektierungspraxis wichtige Ausgangsparameter Mittelwert der Leistung während einer Bezugszeit T ist in jedem Fall kleiner als die im Ergebnis der Bemessung gesuchte zu installierende Leistung P_i .

Man kann schreiben:

$$P_i > P_T \quad (4)$$

In den weiteren Betrachtungen wird davon ausgegangen, daß der Jahresmittelwert P_j der Belastung in einem Abschnitt die in der Projektierungspraxis übliche Ausgangsgröße der Dimensionierung von Energieversorgungsanlagen von Vollbahnen bildet. Bei Straßenbahnen [3] wird gefordert, die Bahnenergieversorgungsanlagen für die höchste betriebsmäßige Belastung (Berufsverkehr, Umleitungsverkehr sowie gestörten Verkehr) auszulegen. Dabei ist erfahrungsgemäß der Stundenmittelwert der Belastung P_h , die bei Beachtung der genannten Transportbelastungen ermittelt wurde, Ausgangsbasis der Betriebsmittelbemessung. Ferner wird angenommen: die Spannung und der mittlere Leistungsfaktor sind an der Unterwerksammelschiene konstant. Der für das thermische Bemessen der Betriebsmittel die Basis bildende Belastungsstrom und die Leistung sind dann bei Wechselstrombahnen durch die Beziehung

$$P = UI \cos \varphi_m, \text{ d. h. } P \sim I, \quad (5)$$

miteinander verknüpft.

Auf der Grundlage langjähriger Untersuchungen der Bahnbelastung durch die Hochschule für Verkehrswesen »Friedrich List« Dresden kann als gesicherte Erkenntnis formuliert werden, daß die Bahnbelastung als Zufallsfunktion beschreibbar ist. Die Bahnbelastung als Zufallsfunktion unterliegt zu jedem Zeitpunkt Normalverteilungen, deren Mittelwerte und Standardabweichungen determinierte Zeitfunktion sind [4], [5].

Für die ingenieurpraktische Anwendung wurde deswegen vorgeschlagen [6], [7], die Zufallsfunktion Bahnbelastung zu beschreiben als Überlagerung zweier determinierter Größen

- des Jahresganges und
- des Tagesganges

der Belastung, denen eine zufällige Belastung mit veränderlichem Variationskoeffizienten aufgeprägt ist.

Jahres- und Tagesgang stellen dabei den Zeitverlauf von Belastungsmittelwerten dar, die durch das statistische Auswerten von Realisierungsensembles gewonnen werden.

2.1. Jahresgang der Tagesmittelwerte

Statistische Untersuchungen besagen, daß Tagesmittelwerte der Bahnbelastung charakteristische, jährlich in nahezu gleicher Weise ausgeprägte, zeitliche Schwankungen aufweisen. Dieser dabei registrierbare Jahresgang der Belastung ist mit Hilfe der harmonischen Analyse beschreibbar.

Die Betriebsmittel werden nach Erwärmung durch den Betriebsstrom bemessen. Deswegen genügt es zu wissen, wie sich der größte Tagesmittelwert P_t im Verlaufe eines Jahres vom Jahresmittelwert P_j der Belastung unterscheidet. Der Tagesfaktor ist für die Berücksichtigung des Jahresganges der Belastung bei der Dimensionierung völlig ausreichend. Der für das Bemessen interessierende Tagesmittelwert des Belastungsstromes I_t bzw. die Scheinleistung S_t sind damit bestimmbar. Der Tagesfaktor eines Unterwerkes selbst ist definiert als

$$c_t = \frac{\text{größte Tagesmittelleistung im Jahr}}{\text{Jahresmittelleistung}} = \frac{P_{Ut,gr}}{P_{Uj}} \quad (6)$$

Durch Schnabel (8) wurde der im Abb. 1 dargestellte Verlauf des Tagesfaktors als Funktion der Jahresmittelleistung für die Verhältnisse bei der Deutschen Reichsbahn ermittelt.

2.2. Tagesgang der Stundenmittelwerte

Die Stundenwerte der Bahnbelastung im Verlauf eines Tages weisen ebenfalls typische, sich täglich in fast gleicher Weise wiederholende Schwankungen auf. Harmonische Analysen einer sehr großen Anzahl von Tagesgängen von Straßenbahn- und Vollbahnbelastungen wurden von uns vorgenommen. Die Tagesgänge der Belastung (des Stroms) sind als Fourier-Reihe darstellbar. Dabei werden alle Fourier-Koeffizienten auf den Koeffizienten a_0 (Gleichstromglied) bezogen und nach dem jeweils 6. Glied abgebrochen, weil damit die Genauigkeit ausreicht.

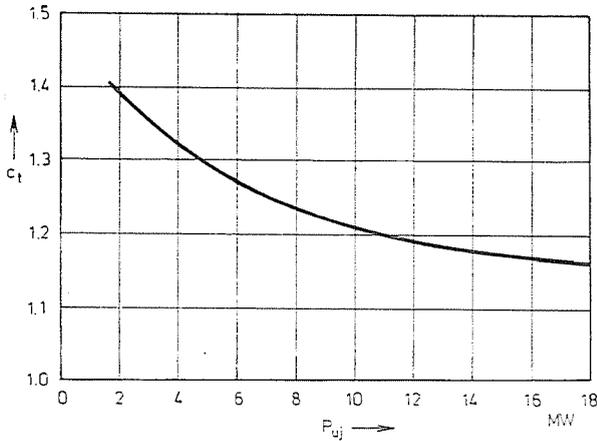


Abb. 1. $c_t = f/P_{uj}$, Mittelwerte der DR 1969...1973

Man findet für den Tagesgang des Belastungsstromes

$$i_i(t) = I_i \left(1 + \sum_{n=1}^6 A_n \cos \omega n t + \sum_{n=1}^6 B_n \sin \omega n t \right) \quad (7)$$

$$\omega = \frac{2\pi}{86400} \frac{1}{s}$$

(A_n, B_n bezogene Fourier-Koeffizienten des Tagesganges;
 $i_i(t)$ augenblicklicher Mittelwert des normalverteilten Prozesses).

Neuere Untersuchungen belegen, daß es ausreichend ist, zwei Typen von Unterwerksbelastungen zu unterscheiden:

- Vollbahnunterwerke (»normierter« Tagesgang ist im Abb. 2 zu sehen)
- Unterwerke für Nahverkehrsbahnen.

In Tabelle 1 sind die ermittelten Fourierkoeffizienten aufgetragen.

Tabelle 1

Normierte Fourierkoeffizienten für Vollbahnunterwerk
 und Unterwerk für Nahverkehrsbahnen

n	Vollbahnunterwerk		Unterwerk für Nahverkehrsbahnen	
	A_n	B_n	A_n	B_n
1	-0,0886	0,0156	-0,3101	-0,1129
2	-0,1300	0	-0,3000	
3	0,1311	0,0918	+0,1032	-0,1474
4	0,0200	0,0348	+0,1472	-0,0850
5	-0,0082	-0,0226	+0,0194	+0,0720
6	0,0250	0,0433		+0,0350

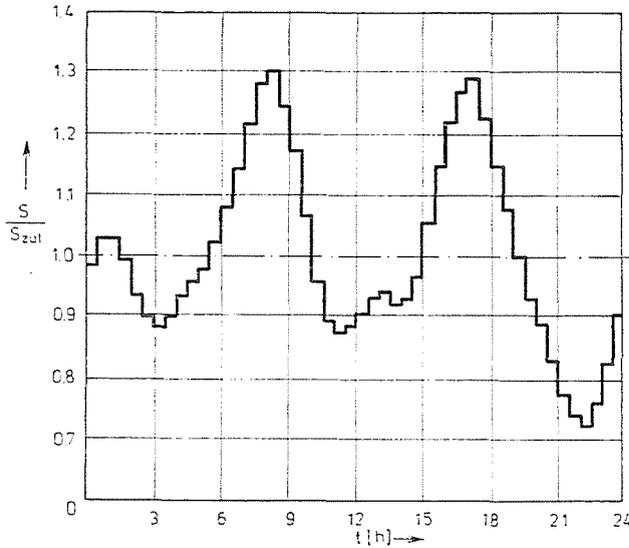


Abb. 2. Normierter Tagesgang der Halbstundenmittelwerte eines Vollbahnunterwerkes

2.3. Belastungsverlauf während der Stunde der stärksten Belastung

Die bei allen Arten von elektrischen Bahnen geführten Untersuchungen des Belastungsverlaufs während einer Stunde ergaben, daß sich kein determinierter Zusammenhang von Zeit und Belastung finden läßt. Deshalb ist das Beschreiben dieser Stundenbelastung mit der eindimensionalen Verteilungsfunktion möglich. Die Auswertungsergebnisse besagen, daß in praktisch allen Fällen die Normalverteilung zur Beschreibung geeignet ist. Mit größer werdendem Mittelwert der Belastung wird die normierte Streuung, der Variationskoeffizient v kleiner (Abb. 3). Daraus läßt sich ein funktioneller Zusammenhang des Variationskoeffizienten $v_i(t)$ des normalverteilten Prozesses und der Belastung angeben.

2.4. Simulationsmodell der Bahnbelastung

Ausgehend von den analysierten Größen, die die Bahnbelastung beschreiben, wurde ein Simulationsmodell für die Bahnbelastung entwickelt. Ausgangsgröße des Belastungsmodells ist der größte Tagesmittelwert des Belastungsstromes I_i am Tage der stärksten Belastung im Jahre. I_i kann für Vollbahnunterwerke über den Tagesfaktor c_i bestimmt werden; bei Straßenbahnunterwerken wird der Wert I_i ausgehend von den größten zu erwartenden täglichen Betriebsbelastungen ermittelt.

Wird mit $z(t)$ eine normalverteilte Zufallszahl bezeichnet, so findet man für den Momentanwert des Belastungsstromes $i(t)$ aus der Überlagerung des

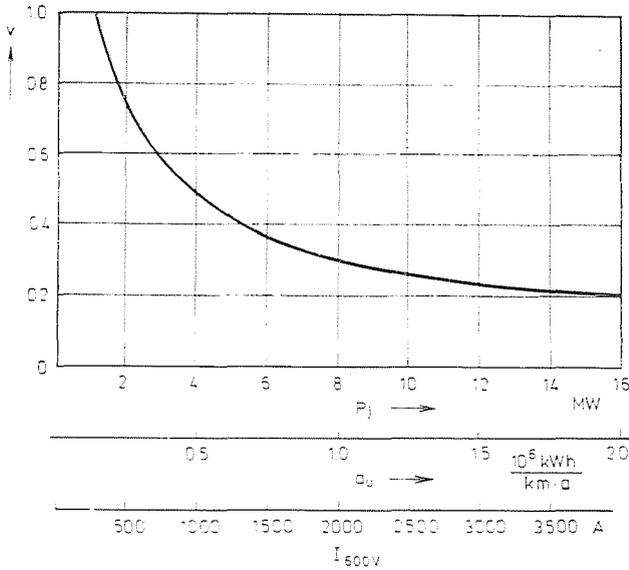


Abb. 3. Variationskoeffizient in Abhängigkeit wichtiger Projektierungsparameter (Jahresmittelleistung P_j , spezifischer Energieverbrauch je km und Jahr, Belastungsstrom auf 600-V-Ebene bei Strassenbahnen)

Tagesganges der Belastung nach Gl. (7) und der während einer Stunde zufällig schwankenden Belastung

$$i(t) = i_i(t) + z(t) v[i_i(t)] i_i(t) \quad (10)$$

Als Simulationsschrittweite haben sich 60 s als zweckmäßig erwiesen. Viele Einzeluntersuchungen für verschiedene Verkehrsträger ergaben dabei, daß eine erstaunlich genaue Synthese des wirklichen Zeitverhaltens der Bahnbelastung in der vorgeschlagenen Weise möglich ist, die mit Meßwerten sehr gut übereinstimmt.

3. Thermische Modelle der Betriebsmittel

Ziel des Verfahrens ist ein Dimensionieren der Betriebsmittel hinsichtlich ihrer thermischen Belastbarkeit im ungestörten Betriebsfall.

Für die Betriebsmittel Fahrleitung und Freileitung bei elektrischen Bahnen wurden bei der Betrachtung als Einkörpersystem aus der Wärmebilanz geeignete Gleichungen zur Erwärmungsberechnung hergeleitet und für die Simulation aufbereitet [6], [9].

Bei den elektrotechnischen Betriebsmitteln Kabel, Transformator, Synchron-Synchronumformer befinden sich eine größere Anzahl von Körpern im Wärmeaustausch. Ausgehend von thermischen Ersatzschaltbildern in

Form von Kettenleitern von Wärmekapazitäten und Wärmewiderständen unter Berücksichtigung der einzelnen Wärmequellen wurden für die Simulation geeignete Modelle der genannten Betriebsmittel entwickelt [6], [10], [11]. Alle Modelle beschreiben hinreichend wirklichkeitsgetreu den terminierten Zusammenhang zwischen der Strombelastung und der Temperatur der Betriebsmittel bei vorgegebenen Belastungs-, Umgebungs- und Konstruktionsbedingungen.

4. Stochastische Dimensionierung

Das Bemessen der elektrotechnischen Betriebsmittel bei Betriebsbelastung und unter Berücksichtigung deren stochastischen Charakters geschieht in folgender Weise: Zunächst werden für jeden Zeitpunkt durch statistisches Auswerten von Realisierungs-Ensembles der Übertemperatur-Zeitverläufe die Verteilungsfunktion der Übertemperaturen der Betriebsmittel bestimmt. Anschließend wird geprüft, ob bei der gewählten Überschreitungswahrscheinlichkeit die zugeordnete Übertemperatur-Zeit-Funktion $\Delta\theta_z(t)$ die vorgeschriebene, zulässige Grenzübertemperatur $\Delta\theta_{zul}$ nicht überschreitet, es gilt also:

$$\Delta\theta_z(t) \leq \Delta\theta_{zul}. \quad (15)$$

Die Überschreitungswahrscheinlichkeit wird meist zu 0,05 bis 0,01 gewählt, sie ist ein Maß für das eingegangene Risiko.

Für die ingenieurpraktische Nutzung wurden ausgehend von den »normierten« Tagesgängen von Belastungen für einzelne Typen von Betriebsmitteln zulässige Tagesmittelwerte der Belastung I_{zul} oder S_{zul} ermittelt. Damit kann in sehr einfacher Weise [12] die Anzahl der für ein Unterwerk erforderlichen Betriebsmittel bestimmt werden.

$$n = \frac{I_{erf}}{I_{zul}} \quad \text{bzw.} \quad (16)$$

$$n = \frac{S_{erf}}{S_{zul}}. \quad (16a)$$

Für wichtige elektrotechnische Betriebsmittel der Bahnenergieversorgung wurden ausgehend von einer Belastung mit dem »normierten« Tagesgang eines Vollbahnunterwerkes (thermisch ungünstiger als Unterwerk für Nahverkehrsbahnen) die in Tabelle 2 aufgeführten zulässigen Tagesmittelwerte der Scheinleistung bzw. des Belastungsstromes mit Hilfe der vorgestellten Methode ermittelt.

Dieses Verfahren wurde von der Deutschen Reichsbahn verbindlich für die Projektierung von Unterwerken vorgeschrieben [13], [14].

Tabelle 2

Zulässige Tagesmittelwerte der Belastung für wesentliche elektrotechnische Betriebsmittel der Bahnenergieversorgung bei realer, d. h. stochastischer Bahnbelastung

Betriebsmittel	I_{zul} A	S_{zul} MVA	Nenngröße	Grenzwerte	Maximale Schutzzei- stellung
10-MVA-Umformer		8,31	10 MVA	$1,7 \cdot S_n$	$1,7 \cdot S_n$
10-MVA-Transformator		8,28	10 MVA		$2,3 \cdot S_n$
30-kV-Kabel, NA2YHCaY					
185 mm ²	360		345 A ¹	Leitergrenz- temperatur (70 °C)	
240 mm ²	480		410 A		
300 mm ²	530		465 A		
400 mm ²	580		545 A		
500 mm ²	650		635 A		
1-kV-Kabel, NAYY					
185 mm ²	370		395 A ¹	dto	
240 mm ²	480		460 A		
300 mm ²	540		520 A		
400 mm ²	650		600 A		
500 mm ²	760		680 A		
Freileitung 185/32, AlSt	280		600 A	dto	
Fahrleitung (Kettenwerk.) Ri 100 + 50 mm ² Bz2	400		600 A	Grenztemperatur d. Kettenwerkes (70 °C)	$4 \cdot I_n$
Fahrdraht 10% abgenutzt	265 (Vollbahn) 175 (Straßenbahn)				

Kabelbelastbarkeit gilt für erdverlegtes, einadriges Kabel (zul. Werte bei Luftverlegung liegen höher) unter folgenden Bedingungen:

- Belastung entsprechend Bild 2 für $f = 16 \frac{2}{3}$ Hz und Einzellegung
- Umgebungstemperatur der Erde von 20 °C Erde = $100 \text{ W} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{cm}^{-1}$
- Maximale Leitertemperatur von 70 °C und Kabeloberflächentemperatur = 40 °C

¹ Maximal zulässige Belastbarkeit nach TGL 200-0612/03, Entwurf Juli 1984

Zusammenfassung

Es wird ein Verfahren zur thermischen Bemessung elektrotechnischer Betriebsmittel im ungestörten Betriebsfall für die Energieversorgung elektrischer Bahnen, das von der Hochschule für Verkehrswesen Dresden gemeinsam mit der Abteilung Elektrische Zugförderung im Zentralen Forschungsinstitut des Verkehrswesens der DDR entwickelt wurde, vorgestellt. Dieses Verfahren wird bereits in der Praxis verbindlich durch Werkstandards mit Erfolg angewendet und erlaubt Einsparungen für die Bahnenergieversorgung von mehr als 20%.

Die beschriebene Methode berücksichtigt den stochastischen Charakter der Bahnbelastung. Mit dieser Belastung werden thermische Modelle (Wärmequellennetzwerke) beaufschlagt. Damit ist ein den wirklichen Verhältnissen entsprechendes, reales Bemessen der Betriebsmittel möglich.

Literatur

1. VEM-Handbuch: Energieversorgung elektrischer Bahnen, Berlin: VEB Verlag Technik 1975.
2. HOFMANN, G.: Jugendobjekt der HfV. DET — Die Eisenbahntechnik Berlin/23 10, 477 (1975).
3. Bau- und Betriebsordnung für Straßenbahn (BO Starb) vom 22. Januar 1976.
4. SCHMIDT, P.—HOFMANN, J.: Optimale Dimensionierung elektrotechnischer Betriebsmittel elektrischer Bahnen. DET — Die Eisenbahntechnik (Berlin)21 12, 558—661 (1973).
5. HOFMANN, J.: Beitrag zur Bemessung einiger Betriebsmittel elektrischer Bahnanlagen in Tagebauen. Dresden: Hochschule für Verkehrswesen »Friedrich List«, 1971 (Diss. A).
6. HOFMANN, G.: Ein stochastisches Simulationsmodell der Bahnbelastung und dessen Verwendung bei der thermischen Dimensionierung elektrotechnischer Betriebsmittel elektrischer Bahnen für den ungestörten Betriebsfall. Dresden: Hochschule für Verkehrswesen »Friedrich List« 1978 (Diss. A).
7. SCHMIDT, P.—HOFMANN, G.: Zur stochastischen Bemessung von Betriebsmitteln für die Energieversorgung elektrischer Bahnen. Die Eisenbahntechnik 27 11, 451—454 (1979).
8. SCHNABEL, D.: Elektrische Belastung und Belastbarkeit der Energieversorgungsanlagen von 16 2/3-Hz-Vollbahnen, ihre rechnerische Erfassung und Auswertung. Diss. A, Hochschule für Verkehrswesen »Friedrich List«, Dresden 1975.
9. SCHMIDT, P.: Erwärmung und thermische Belastbarkeit von Fahrleitungen elektrischer Bahnen. Wissenschaftliche Zeitschrift der Hochschule für Verkehrswesen »Friedrich List« Dresden 27 H. 1, 123—133 (1980).
10. SCHMIDT, P.—DRESSLER, Th.: Optimale Dimensionierung von Leistungskabeln in dezentralen Umformerwerken der DR Manuskript, 1982.
11. DRESSLER, Th.: Untersuchungen zur optimalen Dimensionierung und Betriebsführung von Leistungskabeln in Unterwerken der DR. Dissertation A, Hochschule für Verkehrswesen »Friedrich List« Dresden, 1983.
12. ZIMMERT, G.—HOFMANN, G.—HEUNEMANN, W.: Zur optimalen Dimensionierung von Umformerwerken Die Eisenbahntechnik 27 H. 4, 152—154 (1979).
13. DR-M 21-05.0001: Bahnenergieversorgung 16 2/3 Hz, Berechnung zu installierender Leistungen, Berechnungsverfahren, verbindlich ab 1.5.1979.
14. DR-M 22-30.0002: Bahnenergieversorgung 16 2/3 Hz, Leistungskabel für Unterwerke, Elektrische Bemessung, September 1982.

Dr.-Ing. Peter SCHMIDT	}	DDR-8010 Dresden
Dr.-Ing. Gerhard HOFMANN	}	Friedrich-List-Platz 1.