Zeitschrift: Bulletin des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins

Herausgeber: Schweizerischer Elektrotechnischer Verein ; Verband Schweizerischer Elektrizitätswerke

Band: 32 (1941)

Heft: 11

Artikel: Stossspannungen grosser Steilheit

Autor: Kläy, Hans

DOI: https://doi.org/10.5169/seals-1060012

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Mehr erfahren

Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. En savoir plus

Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. Find out more

Download PDF: 09.08.2025

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, https://www.e-periodica.ch

sollten, wenn sie von einem nicht isolierten Fussboden oder gleichzeitig mit geerdeten Maschinenteilen berührt werden können.

An *medizinischen Apparaten* wurde dem Starkstrominspektorat ein einziger Unfall gemeldet. Dieser stiess einem Monteur bei der Reparatur eines Kurzwellenapparates dadurch zu, dass eine Drittperson die Zuleitung zu diesem Apparat ohne Aufforderung in die Wandsteckdose einsteckte und so die Arbeitsstelle des Monteurs unter ca. 4000 V Spannung brachte.

Von den Unfällen in den *übrigen Hausinstallationen* sind besonders drei Todesfälle, die sich beim Gebrauch elektrischer Heizapparate in Badzimmern bei einer wirksamen Spannung von 220 V gegen Erde ereignet haben, bemerkenswert. In zwei Fällen wiesen Parabolstrahler, die vom Bade aus erfasst wurden, Isolationsdefekte auf. Bei einem Strahler handelte es sich um einen ganz neuen Apparat, an dem sich nach dem Unfall kein Fehler feststellen liess und wo die Unterspannungsetzung des Gehäuses wahrscheinlich nur vorübergehend durch umhergespritztes Badwasser verursacht worden war. — Der dritte tödliche Unfall ereignete sich an einem neuen fahrbaren Ofen, der mit einer dreipoligen Anschlußschnur versehen war (Polleiter, Nulleiter und Erdleiter). Eine nicht fachkundige Person brachte nun am Ende dieser Schnur einen zweipoligen Stecker an und zwar so, dass die Erdungsader und eine stromführende Ader zusammen unter den gleichen Steckerstiften geklemmt waren. Je nach der Lage des Steckers geriet dadurch das Ofengehäuse zwangsläufig unter eine Spannung von 220 V gegen Erde. Als der Eigentümer vom Bade aus den Ofen berührte, um dessen Oberflächenwärme zu kontrollieren, wurde er tödlich elektrisiert. — Ein weiterer tödlicher Unfall stiess einem zweijährigen Kinde zu, als es in Unkenntnis der Gefahr zwei Apparatesteckhülsen eines elektrischen Kochers, deren Isolierhülsen defekt waren, in die Hände nahm. Da die Zuleitungsadern zu den Steckhülsen unter einer Spannung von 250 V standen, hatte der Stromdurchgang von einer Hand zur andern den bedauernswerten tödlichen Ausgang der Elektrisierung zur Folge. — Die übrigen Unfälle in Hausinstallationen weisen keine besondern Merkmale auf. In der Hauptsache handelte es sich um leichte Flammenbogenunfälle von Monteuren bei Arbeiten in Hausinstallationen unter Spannung, wobei in einigen Fällen die Abschaltung der Arbeitsstelle nicht ohne Schwierigkeiten möglich gewesen wäre, während sie in andern Fällen mehr aus Bequemlichkeitsgründen unterlassen wurde.

Stoßspannungen grosser Steilheit.

Von *Hans Kläy*, Langenthal.

621.3.015.33

Die Sekundärentladungen bei der Stossprüfung von Isolatoren werden auf Grund von Versuchen untersucht und deren Elemente bestimmt.

L'auteur examine les décharges secondaires se produisant lors des essais au choc électrique et détermine leurs éléments caractéristiques.

Bei Stossversuchen kann es vorkommen, dass *Sekundärentladungen* auftreten. Darunter sollen alle diejenigen Fälle verstanden sein, bei denen ein teilweiser oder gestaffelter Durchschlag stattfindet.

Das Schema Fig. 1 soll dies erläutern. Es zeigt eine normale Stossprüfanlage mit

Stosskapazatät C_s
Dämpfungswiderstand R_D
Parallelkapazität C_P
Entladungswiderstand R_E
Funkenstrecke F_1

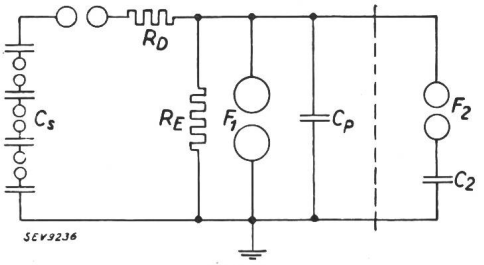

Fig. 1.
Schema einer normalen Stossprüfanlage.

R_D ist mit C_P so abgeglichen, dass die normale Stosswelle (1/50) entsteht.

Als Prüfobjekt (C_2) soll nun eine Anordnung gewählt werden, bei der typische Sekundärentladungen auftreten können, z. B. eine Isolatorenkette mit Teilentladungen in die Kette.

Allgemein treten immer dann Sekundärentladungen auf, wenn die Stoßspannung sich nicht in *einer* Stufe ausgleicht, sondern wenn durch einen Funken zuerst eine Kapazität aufgeladen wird, die sich erst nach Aufladung in einem zweiten Funken entlädt. In diesem Falle können unbeeinflusst durch die Elemente des Stossgenerators *sehr steile Spannungsstösse* auftreten.

Dies soll im folgenden erläutert werden. Das vereinfachte Schema entspricht dann Fig. 2. Die

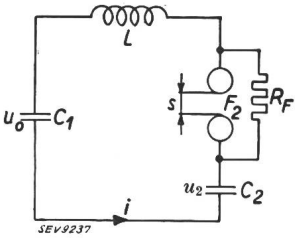

Fig. 2.
Schwingungskreis, der für die sekundären Spannungsstösse massgebend ist.

Kapazität $C_1 \equiv C_P$ wird durch die normale Stosswelle aufgeladen. Sobald die der Funkenstrecke entsprechende Durchschlagspannung (Stoss!) erreicht ist, zündet diese und lädt C_2 auf. Zündverzug und statische Streuung sind hier nur insofern von Bedeutung, als dadurch die *Höhe* der Zündspannung beeinflusst wird. Die weitere Be-

trachtung des Vorganges beginnt erst, nachdem die Funkenentladung an F_2 begonnen hat.

Die entsprechende Differentialgleichung lautet:

$$u_0 - \frac{1}{C_1}\int i\,dt = \frac{1}{C_2}\int i\,dt + i\cdot R + L\frac{di}{dt}$$

$$\int i\,dt = q; \qquad i = \frac{dq}{dt} = q'; \qquad \frac{di}{dt} = q''$$

$$u_0 - \frac{1}{C_1}\cdot q = \frac{1}{C_2}\cdot q + q'\cdot R + q''\cdot L$$

$$u_0 = q\left(\frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2}\right) + q'\cdot R + q''\cdot L$$

$$u_0 = q\cdot\frac{C_1 + C_2}{C_1\cdot C_2} + q'\cdot\frac{k\cdot s}{q^*} + q''\cdot L \qquad (1)$$

Funkenwiderstand nach Töpler:

$$R \equiv R_F = \frac{k\cdot s}{q^*} \qquad q^* = \int\sqrt{i^2}\,dt$$

$k = 0{,}15\cdot 10^{-3}$

s = Funkenlänge in cm

q^* Elektrizitätsmenge in Coulomb

Die Lösung dieser Differentialgleichung stösst auf Schwierigkeiten wegen dem Gliede q'/q^*. Dabei ist zu bemerken, dass q^* nicht mit q identisch ist. Der Widerstand des Funkens wird nach Töpler um so kleiner, je mehr Ladung hindurchgeflossen ist (Erhitzen der Luftstrecke!). Die *Stromrichtung* ist dabei gleichgültig. Solange der Strom nur in einer Richtung fliesst, ist $q^* \equiv q$. Bei allen Schwingungsvorgängen — wir werden im folgenden sehen, dass diese in der Mehrzahl sind — trifft das nicht zu.

Da das Vorzeichen erst nach dem ersten Scheitelwerte umkehrt, kann die *Frontsteilheit* berechnet werden mit $q^* = q$[1]). Für den vollständigen Spannungsverlauf am Prüfobjekt ist die Berücksichtigung $q^* \neq q$ unerlässlich.

Die Lösung der angegebenen Differentialgleichung geschieht am besten graphisch nach bekanntem Verfahren[2]).

Für die 4 charakteristischen Funkenstrecken wurden die Lösungen bestimmt:

Kugel-Kugel	s = 16,7 cm	$k\cdot s = 2{,}5\cdot 10^{-3}$
Spitze-Platte	33,4	$5\cdot 10^{-3}$
Spitze-Spitze	60	$9\cdot 10^{-3}$
Platte-Spitze	83	$12{,}5\cdot 10^{-3}$

Die angegebene Schlagweite entspricht bei —400 kV Stoßspannung dem 50 % Ueberschlag. Die Kapazitäten wurden gewählt zu:

$$C_p = C_1 = 200\text{ pF}; \qquad C_2 = 50\text{ pF};$$

$$C = \frac{C_1\cdot C_2}{C_1 + C_2} = 40\cdot 10^{-12}\text{ F}$$

[1]) Beindorf, Arch. f. Elektrotechn. 1938.

[2]) Hort, Die Differentialgleichungen des Ingenieurs, 2. Aufl., S. 309 ff.

Die Induktivität des Stromkreises ist $L = 10^{-5}$ H entsprechend einem Kreis von 100 cm Radius. Ausserdem wurden für andere L und C die Lösung bestimmt. Die Anfangsbedingungen sind:

$$\text{für } t = 0: q = 0 \quad q' = 0 \quad q'' = 0$$

Allerdings ist zu beachten, dass der Funke erst dann Lichtbogencharakter annimmt, wenn eine minimale Elektrizitätsmenge $q_0 = \sim 1$ (E = $3\cdot 10^{-10}$ C) [3]) hindurchgeflossen ist. Vor diesem Zeitpunkte gilt die Töplersche Formel nicht. Deshalb ist der Kurvenverlauf im Anfang unklar.

Zur Bestimmung wurde für eine Zeit grösser Null (2...7 · 10^{-8} s) die Werte von q q' q'' geschätzt, so dass sie die Gleichung erfüllten. Diese Werte wurden so lange verändert, bis die Kurve durch die nächstfolgenden Punkte einen stetigen Verlauf zeigte. Ein guter Kurvenverlauf war mit den Ansätzen $q = a\cdot t^3$ $q' = a\cdot 3\cdot t^2$ $q'' = a\cdot 6\cdot t$ zu erreichen (a mittels der Gleichung (1) zu bestimmen).

In Fig. 3 sind die charakteristischen Kurven für die Kugelfunkenstrecke gezeigt.

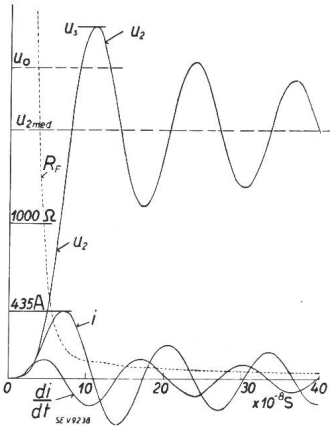

Fig. 3.
Kugelfunkenstrecke
$s = 16{,}6$ cm, $u_0 = 400$ kV, $L = 10^{-5}$ H, $C = \frac{C_1\cdot C_2}{C_1 + C_2} = 40\cdot 10^{-12}$ F.
u_2 Spannung an C_2
i Strom in der Funkenstrecke.
R_F Funkenwiderstand.

Die Spannung an C_2 erreicht nach 11 · 10^{-8} s den Scheitelwert von 455 kV. Sie ist also höher als die ursprüngliche Stoßspannung (400 kV). Die *mittlere Steilheit* beträgt 8200 kV/μs.

Der Ausgleich auf $u_{2\,med}$ erfolgt in einer schwach gedämpften Schwingung von einer Periodendauer $T = 2\pi\sqrt{LC} = 12{,}63\cdot 10^{-8}$ s. Der Strom in der

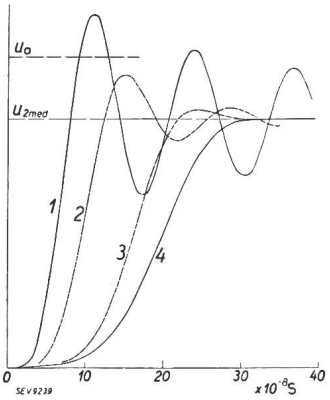

Fig. 4.
Aufladung von C_2 über verschiedene Funkenstrecken.
1 Kugeln 25 cm ∅, $s = 16{,}7$ cm, 24 kV/cm.
2 — Spitze, + Platte, $s = 33$ cm, 12 kV/cm.
3 Spitze, Spitze, $s = 60$ cm, 6,7 kV/cm.
4 — Platte, + Spitze, $s = 83$ cm, 4,8 kV/cm.

Funkenstrecke erreicht einen Scheitelwert von 435 A.

[3]) Töpler, Arch. f. Elektrotechn. 1921.

Der *Funkenwiderstand* fällt von 17 500 Ohm bei $2 \cdot 10^{-8}$ s auf 41 Ohm bei $40 \cdot 10^{-8}$ s.

In Fig. 4 ist der Einfluss der verschiedenen Funkenstrecken gezeigt. Bei einer Feldstärke von

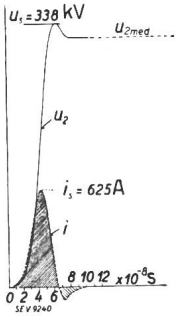

Fig. 5.
Aufladung von C_2 über die Kugelfunkenstrecke.
$u_0 = 400$ kV, $s = 16{,}7$ cm, $L = 10^{-6}$ H, $C = 40 \cdot 10^{-12}$ F.

4,8 kV/cm findet kein Ueberschwingen mehr statt.

In Fig. 5 ist eine *besonders steile* Kurve (10 000 kV/μs) gezeigt. Der entsprechende Ladestrom i hat eine Spitze von 625 A (Möglichkeit kurzer starker Stromstösse!).

Der Einfluss der Kreiskonstanten $L \cdot C$ ist aus Fig. 6 ersichtlich. Die Aufladung erfolgt über eine *Spitzenfunkenstrecke*, was etwa den Ueberschlägen an Isolatoren entspricht. Mit zunehmendem $L \cdot C$ werden die Kurven flacher, die Maximalwerte jedoch höher. Als Vergleich ist die Normalwelle 1/50 eingezeichnet.

Uebersicht.

Der Kurvenverlauf ist abhängig von folgenden Grössen:

Stoßspannung u_0
Funkenstrecke (mittlere Feldstärke) kV/cm
Kapazitäten C_1 C_2
Induktivität des Kreises $(C_1—F_2—C_2)$ L

Findet keine Entladung durch einen Funken oder Entladewiderstand statt, so ist die *Endspannung auf* C_2:

$$u_{2med} = u_0 \frac{C_1}{C_1 + C_2}$$

Massgebend für die Rechnung ist die *resultierende Kapazität:*

$$C = \frac{C_1 \cdot C_2}{C_1 + C_2}$$

Die Spannungskurven sind charakterisiert durch den *ersten Scheitelwert* u_s und die *Zeit* bis dahin T_{s1}.

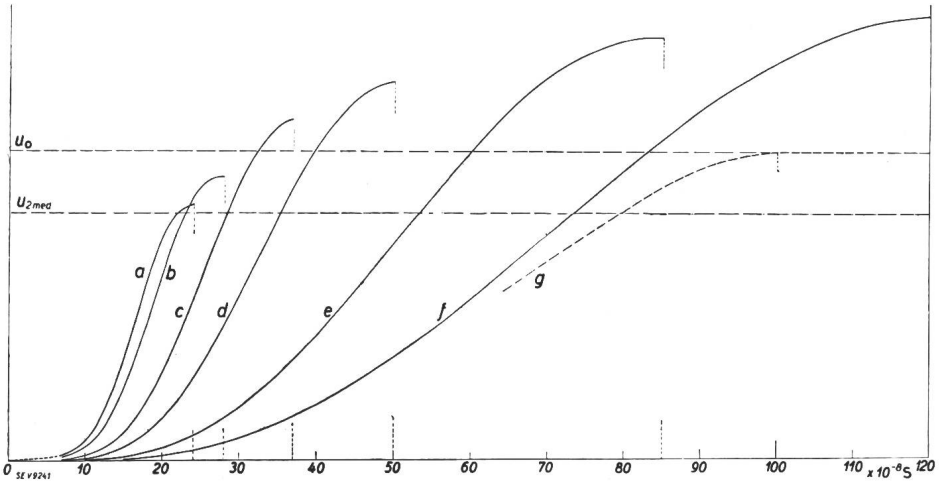

Fig. 6.
Aufladung von C_2 über eine Spitzenfunkenstrecke bei verschiedenen Kreiskonstanten.
u_0 Stoßspannung.
u_{2med} Endspannung.
a) $L \cdot C = 4 \cdot 10^{-16}$
b) $L \cdot C = 10^{-15}$
c) $L \cdot C = 4 \cdot 10^{-15}$
d) $L \cdot C = 10^{-14}$
e) $L \cdot C = 4 \cdot 10^{-14}$
f) $L \cdot C = 10^{-13}$
g) Normalwelle 1/50 zum Vergleich.

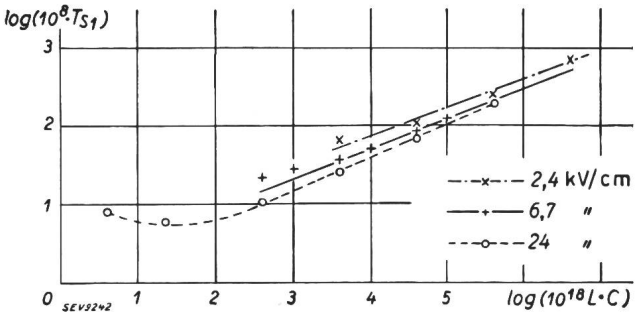

Fig. 7.
Zeit bis zum ersten Scheitelwert in Abhängigkeit vom Schwingungskreis.

In Fig. 7 sind zu den Grössen L C die Zeiten T_{s1} aufgetragen. Die Punkte für gleiche Feldstärken liegen auf Geraden; Abweichungen davon bei Zeiten unterhalb $10 \cdot 10^{-8}$ s.

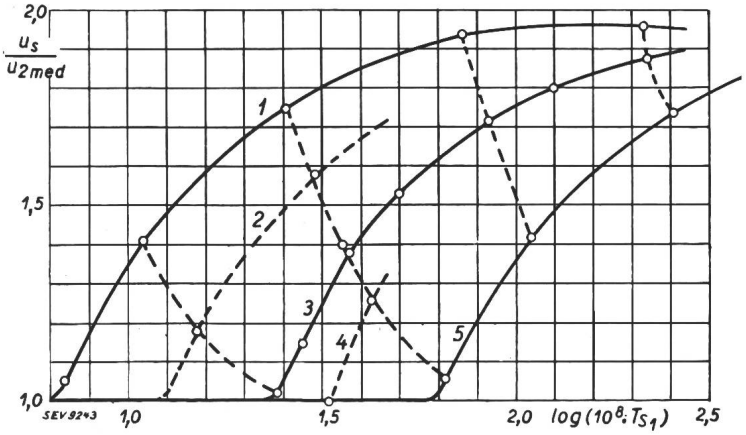

Fig. 8.
Scheitelwert in Abhängigkeit von der Zeit bis zum ersten Scheitelwert.
1 24 kV/cm, *2* 12 kV/cm, *3* 6,7 kV/cm, *4* 4,8 kV/cm, *5* 2,4 kV/cm.
Die Trajektorien verbinden die Punkte $L \cdot C$ = konstant.

Für die Feldstärke 6,7 kV/cm (Spitzenfunkenstrecke) findet man die Beziehung:

$$\log (T_{s1} \cdot 10^8) = 0{,}38 \log (L \cdot C \cdot 10^{18}) + 0{,}19$$

Zu T_{s1} findet man in den Kurven der Fig. 8 die zugehörigen *Scheitelwerte* u_s.

Die Kurve für die Feldstärke 6,7 kV/cm wurde durch mehrere Punkte möglichst genau bestimmt, weil sie für Isolationsanordnungen massgebend ist.

Zusammenfassung.

Die bei stufenweiser Entladung auftretenden *sekundären Spannungsstösse*, charakterisiert durch den steilen Spannungsanstieg, sind bestimmt durch:

die Anfangsspannung u_0
die mittlere Feldstärke u_0/s
die Kapazitäten C_1 und C_2
die Induktivität L

Aus Fig. 7 findet man zu $L \cdot C$ auf der der Feldstärke entsprechenden Geraden die *Zeit bis zum ersten Scheitelwert* T_{s1}. Dazu ist aus Fig. 8 die *Scheitelspannung* $u_s/u_{2\,med}$ zu entnehmen. Damit ist der Spannungsanstieg bestimmt.

Für $L \cdot C$ gross ($\sim 10^{-10}$) und $C_1 \gg C_2$ kann eine Spannungsüberhöhung auf den doppelten Wert der Stoßspannung auftreten; allerdings ist dann die Stirnzeit etwa 1 μs.

Ganz steile Stösse (Steilheit 10 000 kV/μs) treten bei kleinem $L \cdot C$ ($\sim 10^{-14}$) und grossen Feldstärken (Kugelfunkenstrecken) auf und können zum *Durchschlag der festen Dielektriken* führen.

Ein Isolator ist so konstruiert, dass die Durchschlagspannung ein Vielfaches der Ueberschlagspannung beträgt. Eine Ueberspannung soll sich *um* den Isolator herum ausgleichen. Steigt die Spannung sehr rasch an, so kann sie infolge der *Durchschlagsverzögerung der Luft* zu einem Werte anwachsen, der zum Durchschlag des festen Dielektrikums führt.

Darüber soll später berichtet werden.

Die durchschnittliche Reiselänge der Strassenbahn-Fahrgäste.

Von *W. Kummer*, Zürich.

656.4

Die durchschnittliche Reiselänge der Strassenbahn-Fahrgäste kann infolge der besondern Tarife dieser Bahnen ihren statistischen Erhebungen nicht unmittelbar entnommen werden; sie kann jedoch, bei Benutzung des Gesetzes der Häufigkeit verschiedener Reiselängen, aus den statistisch normal bekanntgegebenen Verkehrsdaten rechnerisch ermittelt werden.

Par suite des tarifs usuels, la longueur moyenne des voyages en tramvay ne peut être déduite directement des rapports de gestion des tramways; par contre, en combinant la loi des fréquences des parcours avec les données statistiques divulguées normalement par les rapports on peut évaluer analytiquement cette longueur.

In verschiedener Hinsicht, insbesondere auch zur Beurteilung des Energieverbrauchs elektrisch betriebener Bahnen, bedient man sich im Eisenbahnwesen der in tkm ausgedrückten Verkehrsgrösse, die daher in den jährlich ausgeführten Betriebsstatistiken in der Regel berücksichtigt wird. Die Genauigkeit für die im Personen-Verkehrsdienst aus dem Eigengewicht der beförderten Personen folgende Verkehrgrösse war bisher neben den entsprechenden Werten für die meist sehr schwer gebauten Fahrzeuge belanglos. Mit dem Eindringen besonders leichter Fahrzeuge in den Personen-Verkehrsdienst hat aber die genauere Bestimmung der für die Personen selbst anzurechnenden tkm eine erhöhte Bedeutung gewonnen. Diese Verkehrsgrösse ergibt sich als das Produkt der zurückgelegten Personenkilometer und des mittleren Personengewichts. Die geleisteten Personenkilometer erscheinen als Produkt der Gesamtzahl der beförderten Personen und ihrer mittleren Reiselänge. Im normalen Eisenbahnbetrieb kann die mittlere oder durchschnittliche Reiselänge der Fahrgäste ohne weiteres der Statistik der verkauften Fahrkarten entnommen werden, da diese ja stets für den Verkehr zwischen bestimmten Stationen, d. h. je für bekannte Reiselängen ausgegeben werden. Im Strassenbahnbetrieb beruhen aber die Fahrpreise vorzugsweise auf Einheitsansätzen, die bald für ein Gesamtnetz, bald für Zonen eines solchen oder etwa auch für eine Zahl von Tarifteilstrecken gelten. Für Strassenbahnen kann daher im allgemeinen die durchschnittliche Reiselänge der Fahrgäste erst mittels eines besondern Verfahrens festgestellt werden.

Das im folgenden zu entwickelnde Verfahren für die Berechnung der durchschnittlichen Reiselänge der Strassenbahn-Fahrgäste geht von der Gesamtzahl z der beförderten Personen aus, die statistisch regelmässig Jahr für Jahr ermittelt wird. Multipliziert man z mit der vorläufig noch unbekannten durchschnittlichen, in km zu messenden Reiselänge l der Fahrgäste, so stellt das Produkt:

$$P = z \cdot l \qquad (1)$$

die Zahl der jährlich geleisteten Personenkilometer (in der Folge Pskm bezeichnet) dar. Nun kann man aber eine sog. Besetzungsziffer b bilden, die das Verhältnis der Pskm zu den statistisch bekannten jährlichen Fahrleistungen, ausgedrückt in Platzkilometern (in der Folge Plkm bezeichnet), mit dem Symbol P_0 als Formelgrösse eingeführt, darstellt; aus der Definition:

$$b = \frac{P}{P_0},$$

die stets $b < 1$ ergibt, folgt eine zweite Beziehung für P gemäss:

$$P = b \cdot P_0 \qquad (2)$$