

Zeitschrift: Bulletin de l'Association suisse des électriciens
Herausgeber: Association suisse des électriciens
Band: 29 (1938)
Heft: 23

Artikel: Über den beschränkten Wert von Reservestufen an Stufentransformatoren von Einphasen-Triebfahrzeugen zur Kompensierung des Spannungsabfalles der Fahrleitung
Autor: Duerler, W.
DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-1059014>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. 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. [Siehe Rechtliche Hinweise.](#)

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. [Voir Informations légales.](#)

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. [See Legal notice.](#)

Download PDF: 18.01.2025

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

für die sechsphasige Gabelschaltung, sondern sind ganz allgemein.

Zum Beispiel bekommt man zwangsläufig bei sechsphasiger Doppel-Sternschaltung genau gleiche Ströme und genau gleiche Phasenverschiebungen, wenn man nach 3 Durchmessern kurzschliesst. Schliesst man dagegen beide Sterne für sich kurz, so ist man noch von den Streuungsverhältnissen abhängig. Erst dann, wenn die beiden Drehstromwick-

lungen ganz symmetrisch angeordnet sind, wird eine vollkommene Symmetrie verwirklicht.

Bei zwölfphasiger Gabelschaltung kann man beim Kurzschliessen nach 6 Durchmessern keine zwangsläufige vollständige Symmetrie erreichen. Dabei spielen die Streuungsverhältnisse auch eine massgebende Rolle. Aber es ist auch in diesem Fall leicht einzusehen, dass die obige Kurzschlussmethode immerhin die besten Resultate ergibt.

Ueber den beschränkten Wert von Reservestufen an Stufentransformatoren von Einphasen-Triebfahrzeugen zur Kompensierung des Spannungsabfalles der Fahrleitung.

Von W. Duerler, Agno.

621.314.214 : 621.335

Der Verfasser zeigt zunächst am Beispiel einer einseitig gespeisten Bahnstrecke, betrieben mit 15 000 V Einphasenwechselstrom, mit etwas knapp bemessener Fahrleitung, an Hand des aufgestellten Vektordiagramms, wie trotz der Möglichkeit der Stufenregulierung der Triebfahrzeuge der Spannungsabfall in der Fahrleitung die Fahrgeschwindigkeit nicht unerheblich beeinflusst. Sodann werden die Verhältnisse analytisch untersucht, wobei nachgewiesen wird, dass es eine Höchstgeschwindigkeit gibt, die bei einem bestimmten Zuggewicht nicht überschritten werden kann, wie weit auch der Führer seinen Regulierhebel am Kontrollier auslegt. Aus der Untersuchung wird der Schluss gezogen, dass, wo ähnliche Verhältnisse vorliegen, es für den projektierenden Elektroingenieur wie auch für das technische Betriebspersonal einer Bahn von Wert sein dürfte, sich mit den erläuterten Beziehungen vertraut zu machen. Speziell wird empfohlen, die Führer von Triebfahrzeugen dahin zu instruieren, dass bei allzustarkem Eingriff in die selbsttätige Regulierung des Einphasenseriomotors durch Stufenzuschalten bei starkem Spannungsabfall an der Fahrleitung die Verhältnisse an der Leitung nur noch verschlimmert und zudem die Belastungsspitzen des Netzes erhöht werden. Bei Neuanschaffungen wird empfohlen, von Fall zu Fall zu untersuchen, ob und wie weit Reservestufen, die die Gewichte von Triebfahrzeugen erhöhen und darum auch den Preis ungünstig beeinflussen, überhaupt von Wert sind. Zum Schluss wird noch auf einen Fall hingewiesen, wo Reservestufen am Platze sein dürften.

Partant de l'exemple d'un tronçon monophasé à 15 000 V, à alimentation simple, dont la section du fil de contact est un peu juste, l'auteur démontre à l'aide du diagramme vectoriel que, malgré le réglage par touche utilisé sur les locomotives, la chute de tension dans la ligne de contact exerce une influence sensible sur la vitesse. Il examine ensuite les conditions analytiquement et prouve l'existence d'une vitesse maximum qui ne peut être dépassée pour un tonnage donné, quelle que soit la position de la manette de commande. Il en conclut que, dans des conditions semblables, tant l'ingénieur chargé de dresser un projet que le personnel technique d'exploitation ont intérêt à se familiariser avec les relations établies. Il recommande spécialement d'inculquer aux mécaniciens de locomotives qu'une immixtion intempestive dans le réglage automatique du moteur série monophasé par l'adjonction de nouvelles touches, ne fait qu'empirer les conditions dans la ligne lorsque la chute de tension dans celle-ci est déjà forte, et augmente en outre les pointes de charge du réseau d'alimentation. Lors de l'achat de nouvelles locomotives il sera indiqué d'étudier dans chaque cas si et jusqu'à quel point l'adjonction de touches de réserve, qui augmentent le poids des véhicules et en influencent défavorablement le prix, est justifiée. Finalement, l'auteur signale encore un cas où des touches de réserve semblent indiquées.

Beim Bau von Einphasentriebfahrzeugen war es bei uns von den ersten Anfängen an üblich geworden, am Haupttransformator neben den nötigen Regulierstufen für das Anfahren und normale Fahrten noch einige Reservestufen vorzusehen, um bei etwaigem starkem Spannungsabfall an der Fahrleitung den Motoren doch ihre normale Spannung zuführen zu können, wodurch die Einhaltung der Fahrzeiten des Fahrplanes erleichtert werden sollte.

Dass das gesteckte Ziel dabei aber nur in beschränktem Masse erreicht werden kann und dass besonders dort, wo es sich nicht um grössere Netze handelt, also der einzelne Zug selbst den Spannungsabfall bedingt, dieser Eingriff in die selbsttätige Regulierung des Seriomotors infolge der Vergrösserung des Spannungsabfalles sehr oft den gegenteiligen Effekt zur Folge hat, soll hier an einem Beispiel, das in der Praxis bei Nebenbahnen vorkommen kann, erläutert werden:

Es handle sich um eine bergwärtsführende eingleisige Bahnlinie mit folgenden Daten:

Spurweite: Normalspur.
 Schienengewicht: 46 kg/m.
 Fahrleitung (ohne eine parallel geführte Speiseleitung): Gesamtquerschnitt 112 mm².
 Grösste Steigung: 50 ‰ auf lange Strecken.
 Stromart: Einphasenwechselstrom 15 000 V, 16 2/3 Hertz.
 Speisung der Strecke: einseitig am untern Endpunkt.
 Grösstes vorkommendes Zuggewicht: 2 Lokomotiven von je 128 t mit 420 t Anhängelast, also insgesamt 676 t.

Die ungünstigste Zuglage für die genannte Strecke soll sich ergeben, wenn der schwere Zug in einer Entfernung von 30 km vom Speisepunkt sich auf der Steigung von 50 ‰ befindet.

Unter der vorläufigen Schätzung, dass bei dieser Belastung der Spannungsabfall an den Stromabnehmern etwa 17 ‰ betrage, was nachher noch an Hand eines Diagrammes zu kontrollieren sein wird, sei zunächst als Fall A) angenommen, dass die beiden Lokomotivführer sich noch keiner Reservestufen bedienen, also beide etwa auf der 10. Stufe fahren und dass zufolge des Spannungsabfalles an den Stromabnehmern die Fahrgeschwindigkeit, die bei normaler Spannung auf dieser Steigung 40 km/h betrage, auf 34 km/h falle.

Die Leistungsberechnung für den ganzen Zug ergibt sich dann unter Zugrundelegung eines Zugwiderstandes von 5 kg/t in der Ebene wie folgt:

Zugkraft am Triebbradumfang auf 50% Steigung:

$$Z = (5 + 50) \cdot 676 = \underline{37\,180 \text{ kg.}}$$

Leistung am Triebbradumfang für $v = 34 \text{ km/h}$:

$$P_t = \frac{37\,180 \cdot 34}{3,6 \cdot 102} = \underline{3440 \text{ kW}}$$

entsprechend einer Leistungsaufnahme an den Stromabnehmern von:

$$3440 : 0,82 = \underline{4200 \text{ kW.}}$$

(0,82 = Wirkungsgrad der Lokomotiven.)

Daraus folgt die Stromaufnahme an den Stromabnehmern bei 17% Spannungsabfall und einem Leistungsfaktor der Lokomotiven von 0,9.

$$I = \frac{4200 \cdot 1000}{15\,000 \cdot 0,83 \cdot 0,9} = \underline{375 \text{ A.}}$$

Zur raschen Ermittlung des Spannungsabfalles bedient sich der Praktiker am einfachsten bekannter Werte des ohmschen und des induktiven Widerstandes der Strecke, die aus Messungen unter ähnlichen Verhältnissen ermittelt worden sind. Eine sehr sorgfältige und reichhaltige Zusammenstellung solcher berechneter und gemessener Werte hat H. Forwald in seinem Aufsatz «Streckenimpedanz und Schienenstrom bei Einphasenbahnen» in «Elektrische Bahnen», April/Mai 1932, veröffentlicht. Seiner Zusammenstellung Tabelle C, Messung 18 b, entnehmen wir für Streckenverhältnisse, die unserm Beispiel entsprechen:

Ohmscher Streckenwiderstand pro km = 0,178 Ω .
Induktiver Streckenwiderstand pro km = 0,1555 Ω .

Es ergeben sich daraus für die 30 km lange Strecke und den vorhin berechneten Strom von 375 A:
Ohmscher Spannungsabfall zu $0,178 \cdot 30 \cdot 375 = 2000 \text{ V}$.
Induktiver Spannungsabfall zu $0,1555 \cdot 30 \cdot 375 = 1750 \text{ V}$.

Mit diesen Werten wurde zur Kontrolle, ob der geschätzte Spannungsabfall von 17% richtig ist, von der Spannung $15\,000 \cdot 0,83 = 12\,400 \text{ V}$ ausgehend das Vektor-Diagramm (Fig. 1) aufgezeichnet und kontrolliert, ob sich dabei eine Speisepunktspannung von 15 000 V wirklich ergibt. Wird die Zahl nicht erreicht, so muss die Schätzung korrigiert werden und wäre auch die obige Rechnung der Stromstärke und Spannungsabfälle entsprechend zu berichtigen. In Fig. 1 ist:

OA Spannung am Stromabnehmer 12 400 V;
der Stromvektor OB wurde für $\cos \varphi_1$

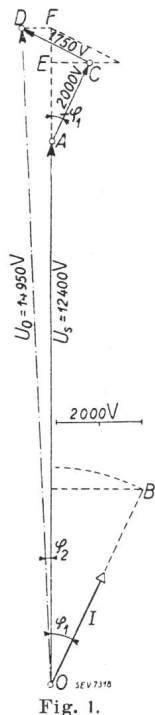


Fig. 1.

= 0,9 (Leistungsfaktor der Lokomotiven) gezeichnet;

AC parallel I ohmscher Spannungsabfall;

CD senkrecht I induktiver Spannungsabfall;

OE ergibt sich als Spannung am Speisepunkt zu 14 950 V und daraus der gesamte Spannungsabfall zu:

$$\frac{(14\,950 - 12\,400) \cdot 100}{14\,950} = 17,1 \%,$$

der also nur unbedeutend von der Schätzung abweicht.

Als Fall B) sei nun angenommen, die Führer beützen im Bestreben, keine Zeit zu verlieren, noch die beiden Reservestufen und es fahre jeder auf der 12. Stufe, die einer Geschwindigkeitserhöhung von 18% gegenüber Stufe 10, also bei gleicher Spannung am Stromabnehmer einer Geschwindigkeit von etwa 40 km/h entsprechen sollte. In gleicher Weise, wie vorher für $v = 34 \text{ km/h}$ lassen sich jetzt für 40 km/h die Daten berechnen; man erhält:

$$P_t = 4050 \text{ kW und } P_s = 4960 \text{ kW.}$$

Unter der Schätzung, dass die Spannung jetzt auf 11 700 V sinke, d. h., dass sich 22% Spannungsabfall ergebe, und für den gleichen Leistungsfaktor der Lokomotiven ergibt sich $I = 470 \text{ A}$.

Ebenfalls wie vorher lässt sich, ausgehend von der Spannung 11 700 V und für den Strom von 470 A, das Vektordiagramm aufstellen, welches aber, der Kürze halber, hier nicht wiedergegeben wird. Dessen Aufstellung ergab als Spannung am Speisepunkt tatsächlich $U_0 = 15\,000 \text{ V}$, womit nachgewiesen ist, dass der geschätzte Spannungsabfall richtig ist.

Am Stromabnehmer ist also jetzt (im Fall B) die Spannung $U_s = 11\,700 \text{ V}$ gegenüber 12 400 V im Fall A), also 6% tiefer. Die Geschwindigkeit könnte also darnach nur $40 \cdot 0,94 = 37,6 \text{ km/h}$ sein. Diese 37,6 km/h ergäben allerdings einen etwas geringeren Strom als vorhin berechnet und damit wieder eine kleine Verminderung des Spannungsabfalles; wir werden daher auf eine Fahrgeschwindigkeit zwischen 37,6 und 40 km/h kommen. Durch weiteres Probieren mit Aufzeichnung eines neuen Vektordiagramms kamen wir bei 37,8 km/h und für $U_s = 12\,000 \text{ V}$ auf $U_0 = 15\,125 \text{ V}$, d. i. 23,2% Spannungsabfall, also 6% weniger Spannung am Stromabnehmer als im Fall A); es würde sich also wirklich für Stufe 12 ergeben:

$$v = 34 \cdot 1,18 \cdot 0,94 = \underline{37,8 \text{ km/h.}}$$

Man ersieht bereits aus dem Resultat, dass eben wegen der Zunahme des Spannungsabfalles die Fahrgeschwindigkeit nicht entsprechend der Zuschaltung von Spannung auf der Sekundärseite des Transformators zunimmt; anstatt 18% sind es nur 14% Geschwindigkeitszunahme.

Die Verhältnisse werden wesentlich übersichtlicher, wenn man das Problem analytisch behandelt:

Man berechnet zunächst den Spannungsabfall als Funktion des gesamten Primärstromes I an den

Stromabnehmern. Wie aus dem Vektordiagramm (Fig. 1) ersichtlich ist, macht man bei der Kleinheit des Winkels φ_2 , der die Vergrößerung der Phasenverschiebung durch die Leitungsanlage darstellt, keinen grossen Fehler, wenn man den Vektor U_o auf den von U_s projiziert und $OF = U_o$ setzt.

Es ergibt sich dann:

$$U_s = U_o - (AE + EF)$$

oder, da $AE = AC \cdot \cos \varphi_1$ und $EF = CD \cdot \sin \varphi_1$:

$$U_s = U_o - (AC \cdot \cos \varphi_1 + CD \cdot \sin \varphi_1) \quad (1)$$

wir machten:

$$AC = I \cdot R \text{ und } CD = I \cdot \omega L$$

wo $R =$ gesamter ohmscher Streckenwiderstand und $\omega L =$ gesamter induktiver Streckenwiderstand.

Diese Werte in (1) eingesetzt ergibt:

$$U_s = U_o - (I \cdot R \cdot \cos \varphi_1 + I \cdot \omega L \sin \varphi_1) \quad (2)$$

Daraus berechnet sich die am Stromabnehmer aufgenommene Leistung zu

$$P_s = \frac{I \cdot U_s \cdot \cos \varphi_1}{1000} = \frac{I \cdot [U_o - (I \cdot R \cdot \cos \varphi_1 + I \cdot \omega L \sin \varphi_1)] \cdot \cos \varphi_1}{1000}$$

oder

$$P_s = \frac{[I \cdot U_o - (I^2 \cdot R \cdot \cos \varphi_1 + I^2 \cdot \omega L \sin \varphi_1)] \cdot \cos \varphi_1}{1000} \quad (3)$$

Nun berechnet sich andererseits für unsern Spezialfall die Leistung am Triebbradumfang folgendermassen:

Schon eingangs wurde Z zu 37 180 kg ermittelt und daraus die Leistung am Triebbradumfang

$$P_t = \frac{Z \cdot v}{3,6 \cdot 102} = 101 \cdot v$$

bestimmt; die am Stromabnehmer aufgenommene Leistung beträgt bei einem Wirkungsgrad der Lokomotive von 0,82

$$P_s = \frac{101 \cdot v}{0,82} = 123 \cdot v,$$

woraus

$$v = \frac{P_s}{123}$$

oder, P_s aus Formel (3) eingesetzt:

$$v = \frac{I \cdot U_o - (I^2 \cdot R \cdot \cos \varphi_1 + I^2 \cdot \omega L \cdot \sin \varphi_1) \cdot \cos \varphi_1}{123 \cdot 1000} \quad (4)$$

Wenn für den Spezialfall weiter gesetzt wird:

$$U_o = 15\,000 \text{ V}$$

$$R = 0,178 \cdot 30 = 5,36 \, \Omega$$

$$\omega L = 0,1555 \cdot 30 = 4,65 \, \Omega$$

$\cos \varphi_1 = 0,9$ (praktisch unveränderlich für verschiedene Belastungen, bzw. Geschwindigkeiten).

so erhält man:

$$v = \frac{[I \cdot 15\,000 - (I^2 \cdot 5,35 \cdot 0,9 + I^2 \cdot 4,65 \cdot 0,435)] \cdot 0,9}{123 \cdot 1000}$$

oder

$$v = \frac{15\,000 \cdot I - 6,825 \cdot I^2}{138\,000} \quad (5)$$

Diese Gleichung hat also die Form

$$y = \frac{ax - bx^2}{c},$$

welches die Gleichung einer Parabel ist. Sie muss irgendwo ein Maximum für y bzw. v haben. Man findet dieses Maximum, indem man die Differentialquotienten

$$\frac{df(xy)}{dx} \text{ und } \frac{df(xy)}{dy}$$

bildet und diese gleich 0 setzt. Die Rechnung ergibt ein Maximum von $v = 60 \text{ km/h}$ für $I = 1100 \text{ A}$,

was sich durch punktweises Aufzeichnen der Kurve aus Formel (5) (Fig. 2) bestätigt. In Fig. 2 sind nicht nur die Werte der Fahrgeschwindigkeit v in Abhängigkeit der Stromaufnahme I an den Stromabnehmern aufgetragen, sondern auch die Spannung $U_s = f(I)$ nach Formel (2) und schliesslich auch die aufgenommene Leistung P_s in kW.

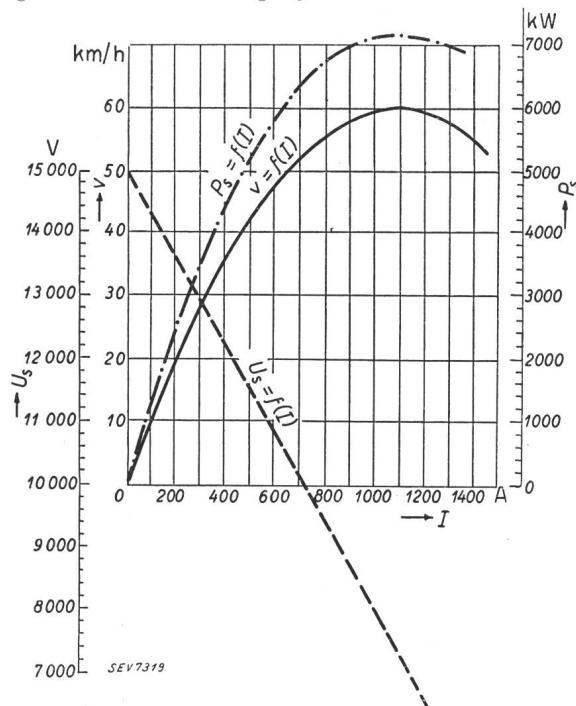


Fig. 2.

Man ersieht daraus, dass bei hinsichtlich des Spannungsabfalles knapp dimensionierten Leitungsanlagen infolge des beträchtlichen Einflusses des Spannungsabfalles auch bei kontinuierlicher Zuschaltung von Spannung für die Triebmotoren keine

lineare Zunahme der Fahrgeschwindigkeit eintritt und dass man dabei nicht über eine gewisse Höchstgeschwindigkeit, in unserm Fall 60 km/h hinauskommen kann, wie weit auch der Führer seine Steuerung auslegen möge.

Es liesse sich einwenden, dass dies nur theoretisch von Bedeutung sei, da man wohl kaum ein Bedürfnis hätte, mit einem derartigen schweren Zug auf 50 ‰ Steigung mit über 60 km/h zu fahren. Die Ergebnisse werden aber ganz anders, wenn zwei Züge des gleichen Gewichtes kurz hintereinander die Strecke befahren müssen. Man kann auch dafür leicht für jeden beliebigen Primärstrom I die Fahrgeschwindigkeit aus Formel (4) berechnen, wenn man einfachheitshalber annimmt, die Züge fahren wirklich unmittelbar hintereinander (in Wirklichkeit wäre Stationsdistanz zu beachten) und im ersten Teil des Zählers, der sich auf die Leistung eines Zuges bezieht, für I die Stromstärke eines Zuges, im Klammerausdruck, der den Spannungsabfall darstellt, aber für I den Strom beider Züge, also $2I$, einsetzt. In dieser Weise die gleiche Rechnung wie vorher gemacht, ergibt für $I = 275$ A einen Höchstwert der Fahrgeschwindigkeit von rd. 15 km/h.

Diese Tatsache, dass man hier wegen des Spannungsabfalles die Geschwindigkeit von 15 km/h gegen das Ende der Steigung auf keinen Fall überschreiten könnte, dürfte nun schon mehr Eindruck machen. Erwähnt sei aber, dass es sich nicht um ein lediglich aus der Luft gegriffenes Beispiel handelt, sondern, dass bei dem Fall aus der Praxis, den wir im Auge haben, tatsächlich die Forderung gestellt worden war, man sollte zwei solcher Züge hintereinander führen können. Weil der Spannungsabfall den für Einphasenwechselstrom-Bahnen als maximal zulässig erachteten überschritten hätte, ist man dann allerdings von der Forderung abgekommen. — Auch in bezug auf die Erwärmung der Fahrleitung durch die Strombelastung wäre man wohl an die Grenze gekommen. — Der Verfasser ist aber gerade bei dieser Rechnung auf den bedeutenden Einfluss des Spannungsabfalles, auch bei Einphasentriebfahrzeugen, auf die Fahrgeschwindigkeit gestossen, Verhältnisse, die nun etwas entwickelt wurden.

Als *Schlussfolgerung* darf wohl gesagt werden, dass es für den projektierenden Ingenieur bei Berechnung des Spannungsabfalles und für den Betriebsmann bei Aufstellung des Fahrplanes nur nützlich sein könnte, über diese Beziehungen im klaren zu sein; denn gewöhnlich dürfte im zweiten Fall lediglich auf die bekannte Kurvenschar des Triebfahrzeuges $v = f(Z)$, die sich in der Regel auf die mittlere Spannung am Speisepunkt bezieht

und höchstens den bescheidenen Spannungsabfall des Transformators einschliesst, abgestellt werden.

Das technische Personal des Fahrdienstes einer Einphasenwechselstrombahn aber wird besonders das Führerpersonal dahin zu instruieren haben, dass auf Strecken mit knapp dimensionierten Leitungsanlagen bei starkem Spannungsabfall das zu Hilfe nehmen etwaiger vorhandener Reservestufen nur beschränkter Wert hat; man reisst dadurch im Gegenteil die schlechte Spannung nur noch mehr zusammen und vergrössert zugleich unnötigerweise noch die Belastungsspitzen des Netzes, die wohl mancherorts bezahlt werden müssen, wogegen man ja gerade dem Seriemotor es von jeher zum Vorteil anrechnet, dass er mit steigender Belastung die Fahrgeschwindigkeit reduziere.

Beim Bau von Stufentransformatoren für Triebfahrzeuge aber wird man, wenn es sich um Fälle handelt, die den behandelten ähnlich sind, besser überhaupt nicht mehr Reservestufen vorsehen als unbedingt nötig sind, womöglich gar keine, denn sie bedingen nur einen grösseren Transformator, der ein Mehrgewicht und einen entsprechenden Mehrpreis bringt, den natürlich die Bahn zu tragen hat; auch muss sie das Mehrgewicht beständig mitführen, was doch sicher der heutigen Tendenz nach Gewichtersparnis zuwiderläuft.

Gewöhnlich geschieht das Zuschalten der Reservestufen durch den Führer in der Absicht, den Fahrplan einzuhalten, was ihm ja stets als das Wichtigste beigebracht wird. Dazu ist zu bemerken, dass nach Vorschrift der Aufsichtsbehörde Zuschläge zu den berechneten Fahrzeiten gemacht werden müssen, und gerade diese sollten doch schon Gewähr leisten, dass auch bei schwererem Verkehr die Fahrzeiten nach Fahrplan eingehalten werden können. Nicht die Reservestufen sollten hierzu benötigt werden, die, wie gezeigt wurde, ein zweiseitiges Schwert sind.

Beispielsweise ist es in Amerika gar nicht üblich, Transformatoren mit Reservestufen zu bauen; in einem Falle, wo aus dem Ausland bezogene Einphasenlokomotiven mit Reservestufen geliefert wurden, wurden diese sogar blockiert, weil die Führer zu viel auf den Reservestufen fuhren.

Am Platze wären Reservestufen allenfalls dort, wo die Spannung in einem Netzteil sinkt, ohne dass die Belastung in jenem Abschnitt daran schuld ist und ohne dass eine Ueberlastung der speisenden Anlagen eintritt. Unter solchen Umständen könnte wahrscheinlich mit Vorteil auf Reservestufen gefahren werden, da dann durch die Fahrt auf solchen die Gesamtbelastungsverhältnisse wohl kaum wesentlich geändert werden.