Zeitschrift: Bulletin des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins

Herausgeber: Schweizerischer Elektrotechnischer Verein ; Verband Schweizerischer Elektrizitätswerke

Band: 62 (1971)

Heft: 3

Artikel: Diskussionstagung des SEV über Leistungsthyristoren auf elektrischen Triebfahrzeugen

Autor: Richard, R. / Weber, G.

DOI: https://doi.org/10.5169/seals-915800

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: 04.12.2025

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

BULLETIN

DES SCHWEIZERISCHEN ELEKTROTECHNISCHEN VEREINS

Gemeinsames Publikationsorgan des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins (SEV)
und des Verbandes Schweizerischer Elektrizitätswerke (VSE)

Diskussionstagung des SEV

über

Leistungsthyristoren auf elektrischen Triebfahrzeugen

Begrüssung durch den Präsidenten des SEV, Direktor R. Richard, Lausanne

Der Präsident des SEV, Direktor *R. Richard*, Lausanne, richtete zu Beginn der Tagung folgende Begrüssung an die Teilnehmer:

L'ASE, son Comité, sa Commission des programmes et tous les collaborateurs de notre association qui ont œuvrés à la préparation de cette manifestation sont heureux de vous souhaiter une très cordiale bienvenue aux Journées de discussion consacrées aux thyristors qui sont utilisés en traction électrique. Le nombre élevé d'inscriptions, quelques 400 participants, entre eux environ 100 spécialistes d'Europe, d'Amérique, d'Asie même, est une démonstration, que le thème soulevé aujourd'hui, vient à son heure est qu'une telle manifestation répond à un besoin. C'est pourquoi j'adresse ici mes félicitations et nos remerciements anticipés à ceux, qui ont eu l'idée de ce thème, plus particulièrement à M. le Dr Weber et à M. le Directeur Dünner, qui n'ont pas ménagé leur temps pour passer à sa concrétisation. Je salue particulièrement ici les représentants de la Confédération, CFF, PTT, Ecoles polytechniques fédérales et avec eux, les représentants des autres écoles techniques de notre pays, nos membres d'honneur, mes collègues du Comité, nos hôtes étrangers qui par leur présence contribuent à faire de notre manifestation un événement de qualité dans la vie technique de notre pays et de notre association.

Vous m'excuserez, Messieurs, de ne pas vous saluer nommément ici, afin que votre modestie ne s'en trouve pas contrariée. Cependant, quoique conscient du risque encourru, je désire faire une exception pour saluer M. le Professeur Sachs que nous avons le grand plaisir d'acceuillir parmi nous.

De tradition dans notre Association, les Journées de discussion, rappelons-le, poursuivent un triple but. Apporter une contribution au problème de la formation, en tractant, en tirant vers des sommets, si possible toujours plus élevés, la culture professionnelle du téchnicien renseigné, en créant un véhicule, permettant le transport des idées du cerveau du conférencier vers celui de ses auditeurs, assurant ainsi un véritable échange de marchandises spirituelles. Notre troisième but enfin, sera, de favoriser les contacts, la vie de société à ceux qui, prenant notre train, participent à nos manifestations. C'est un lieu commun de rappeler que le rail ne date pas d'aujourd'hui. A chaque époque, des prophètes chagrins ont prédit la mort prochaine de nos transports, allant même jusqu'à considérer désormais inutile de consacrer de la matière grise à développer ou affiner les moyens techniques existants. Et pourtant chaque fois sachant adapter à ses besoins les plus récentes découvertes de la technique, les chemins de fer se sont retrouvés plus jeunes que jamais, le moyen de transport terrestre de masse par excellence offrant aux spécialistes des problèmes passionnants à résoudre et aux laïques de multiples sujets d'étonnements, d'admiration même. Pensons à l'adhérence en 1813, à la

[1]) Die der Tagung vorgelegten *Beiträge* wurden im Bull. SEV 62(1971)1, S. 1...86, veröffentlicht.

chaudière tubulaire en 1829, à la traction électrique en 1879 à 81, puis dans le cadre de cette dernière, au progrès du moteur de traction, à l'introduction du redresseur qui permet une électrification de plus en plus économique, et à l'introduction de la fréquence industrielle. Plus près de nous encore, à l'emploi de la cybernétique favorisant la gestion et à l'augmentation de la vitesse de croisière préparée avec le développement des semiconducteurs à grande puissance. L'événement de l'automatisation totale du transport par rail inscrivant ainsi une épisode de plus à la grande aventure des pays industrialisés, cherchant avant tout à pallier un manque de main d'œuvre, pour remplacer finalement la faiblesse humaine par une sûreté technique qui lui soit supérieure.

L'industrie suisse de la traction électrique a toujours été fort active et a inscrit au cours du 20e siècle des réussites marquantes à son palmarès. C'est pourquoi il est apparu à l'ASE que le moment est venu où le développement des thyristors a quitté le stade de l'expérimentation, mais où nombre de questions se posent encore dans leurs usages répandus. Il était indiqué d'inviter les spécialistes de tous pays à un échange d'idées, aussi large que possible. C'est pour nous une grande satisfaction d'avoir pu nous assurer la collaboration d'ingénieurs éminents et par eux, mieux grâce à eux, d'avoir pu réunir aujourd'hui et demain ici dans cette salle près de 400 spécialistes dont un tiers d'étrangers.

Nous espérons que par la participation active et disciplinée de chacun aux débats, ces deux jours resterons un événement marquant dans le domaine, qui nous occupe aujourd'hui. N'est-ce pas en effet un signe que le triple but de notre Association, rappelé, il y a un instant, sera le mieux rempli?

Par mes remerciements aux conférenciers, aux membres de la table ronde, à nos hôtes, à vous tous, chers participants, et au collaborateurs de l'ASE, je déclare ouverte les deux Journées de discussion 1970 de l'ASE.

Eröffnung durch den Tagungspräsidenten, Dr. G. Weber, Zug

Der Tagungspräsident, Dr. *G. Weber,* Zug, eröffnete die Tagung mit folgender Einleitung:

Bevor wir in medias res gehen, möchte ich Ihnen doch ganz kurz mit einigen Worten sagen, was eigentlich das Ziel unserer Tagung ist, und warum wir diesen Weg gegangen sind, der eher etwas ungewöhnlich für eine Diskussionstagung des SEV ist. Wir haben uns zum Ziel gesetzt, an dieser Tagung ein aktuelles Spezialgebiet der Elektrotechnik etwas in die Tiefe gehend zu bearbeiten. In die Tiefe gehend, indem wir Ihnen vorerst Material zur Verfügung stellen, um Ihnen damit die Möglichkeit zu schaffen, dieses Material zu studieren und dadurch die Diskussion zu beleben. In die Tiefe gehend auch, indem wir Panel-Discussions abhalten, in denen Fachleute unter sich die Probleme diskutieren, um damit die kontroversiellen Aspekte der Materie zum Vorschein zu bringen. Wir haben uns als zweites Ziel gesetzt, einen Problemkreis zu bearbeiten, welcher die Starkstromtechnik und die Schwachstromtechnik in einer gewissen Art miteinander verbindet, und damit die Gesamtprobleme der Elektrotechnik in diesem bestimmten Problemkreis aufzuzeigen.

Wir haben als Problem die schienengebundene elektrische Traktion gewählt, was vielleicht auf den ersten Blick etwas erstaunen kann. Aber dieser Problemkreis hat für uns Schweizer immer eine ganz besondere Rolle gespielt und spielt sie auch heute noch. Die Entwicklung der letzten Jahre ist eigentlich in vielem anders verlaufen, als man das vor zehn Jahren noch hätte erwarten können. Zu jener Zeit bestand der Eindruck, der Strassen- und Flugverkehr werde sukzessive den schienengebundenen Personentransport an Bedeutung übertreffen. Heute stellt man fest, dass der Personentransport durch die Eisenbahn rasch wieder an Bedeutung gewinnt, nicht nur bei uns in Europa, sondern auch in den Vereinigten Staaten. Woher kommt das? Ich glaube, die Gründe sind Ihnen allen klar: Die Verstopfung unserer Strassen, das Risiko im Strassenverkehr, heute sogar die Behinderung des Luftverkehrs, die Fragen der Umweltbedingungen, der Luftverschmutzung, des Lärms, alle diese Probleme werden durch den Bahntransport gemildert und verbessert. Dass Massentransport von Personen heute über grössere Distanzen vermehrt dem Bahntransport zufliesst, ist sicher im Wesentlichen eine Folge der Entwicklung der letzten Jahre. Die Verkehrsgeschwindigkeit und die Verkehrsdichte auf der Schiene sind wesentlich gestiegen. Die Zeitgenaue Abwicklung ist nach wie vor im Prinzip erhalten, und die Sicherheit des Schienenverkehrs spielt dabei eine ganz besonders grosse Rolle.

Was sind die Gründe für das Wiederaufwachen und für die Zunahme der Bedeutung des Schienenverkehrs? Es sind zweifellos eine ganze Reihe von Faktoren hierfür verantwortlich. Wohl kaum aber einer ist so entscheidend, wie die neuen Methoden der elektrischen Traktion. Diese neuen Methoden der motorischen Möglichkeiten wurden durch den Thyristor, eines der wohl bedeutendsten Produkte der modernen Halbleitertechnik, geschaffen.

Wir wollen uns heute und morgen intensiv mit dem Thyristor als Antriebsmittel beschäftigen. Wir wollen uns in der Folge mit den positiven und negativen Konsequenzen dieser Art von Antrieb auseinandersetzen, dem Positiven: Steigerung der Verkehrsgeschwindigkeit und der Verkehrsdichte, dem Negativen: Einfluss auf Signalübermittlung und Nachrichtenübermittlung, und damit Einfluss auf die Verkehrssicherheit.

Durch diesen Problemkreis dürfte es uns auch gelingen, das zweite Ziel zu erreichen, die Verbindung zwischen Energietechnik und Informationstechnik, den beiden wohl bedeutendsten Arbeitsgebieten der Elektrotechnik. Heute sind diese beiden Gebiete ja ganz generell nicht mehr isoliert zu betrachten. Die Energietechnik braucht Information zur Steuerung und zum Betrieb ihrer Anlagen. Sie braucht die Informatik, sie braucht die Regeltechnik. Die Informatik braucht die Energietechnik ihrerseits ebenfalls. Ein moderner Rundfunksender gleicht in gewisser Beziehung einem kleinen Kraftwerk.

Es geht uns also darum, an dieser Tagung einmal mehr zu zeigen, dass wir als Ingenieure nicht nur Spezialisten sein dürfen, sondern dass wir einen Überblick über die gesamte Technik bewahren müssen, um alle Aspekte eines Problems auf bestmögliche Weise zu lösen.

Ich möchte Sie bitten, Ihrerseits recht aktiv an unserer Tagung mitzuwirken. Wir legen an dieser Tagung mehr Wert auf Diskussion, als das normalerweise an einer SEV-Diskussionsversammlung der Fall ist. Die Betonung soll auf Diskussion liegen.

Damit wünsche ich Ihnen eine recht interessante Tagung.

Diskussion

1. Diskussionsbeiträge

zu den Referaten 1...3 [2])

Rekuperation bei Thyristorlokomotiven

Prof. Dr. *Ed. Gerecke,* Zürich

Herr Prof. Dr. Meyer hat als ein wünschenswertes Ziel den Bau von Thyristorlokomotiven genannt, welche bei Talfahrt (Gotthard!) die Rückgabe der mechanischen Energie an das Fahrleitungsnetz bei möglichst geringen Verlusten gestatten. Dabei werden gleichzeitig die Räder und die Bremsklötze geschont. Dieses Problem ist den Sécheronwerken wohlbekannt; sie haben 112 Lokomotiven der «Indian Railways» mit 448 Quecksilberdampfgleichrichtern ausgerüstet, mit welchen täglich während Stunden bei der Talfahrt der mit Erz beladenen Züge rekuperiert wird.

Bei den Thyristorlokomotiven ist jedoch ein neues erschwerendes Moment hinzugekommen, da bei Fahrgeschwindigkeiten von 200 km/h und darüber das Bügelspringen häufiger wird. Fällt während der Rekuperation die Fahrdrahtspannung aus, so tritt gleichstromseitig ein Kurzschluss auf,

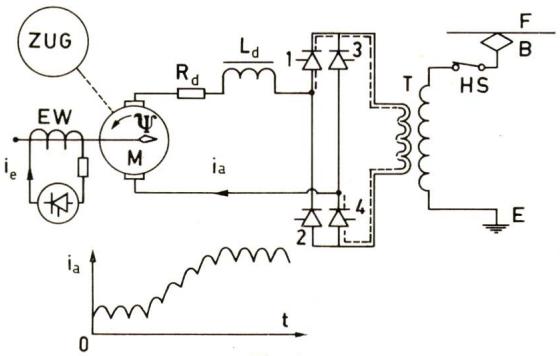


Fig. 1
Energierückgewinnung auf die Fahrleitung
Der als Generator arbeitende Bahnmotor M mit der Erregerwicklung EW, dem Erregerstrom i_e und dem Erregerfluss Ψ. Ankerstrom i_a. Totaler Ohmscher Widerstand R_d. Eisenhaltige Glättungsdrosselspule L_d. 4 Thyristoren 1 – 2 – 3 – 4. Transformator T mit Hochspannungsschalter HS, Bügel B und Fahrleitung F (16⅔ Hz). Oszillogramm des Ankerstromes i_a über der Zeit t

der normalerweise mit einem Schnellschalter unterbrochen wird. Findet dieser Spannungsunterbruch immer häufiger statt, so würde der Schnellschalter wie ein Hammerwerk arbeiten. Die Bahnen argumentieren nun folgendermassen: Da die Elektroniker vorgeben, sie könnten alle Probleme rein elektronisch lösen, wird nun auf der Starkstromseite (ausser dem Hochspannungsschalter) kein Leistungsschalter mehr zugelassen. Der Kurzschluss soll durch rein elektronische Mittel behoben werden.

Mit diesem Problem haben sich bei den Sécheronwerken die Herren dipl. Ing. H. Wallertshauser, M. Pont, H. Hintze, M. Noiset und M. Ragama sowie der Autor befasst.

Kurzschlüsse während der Rekuperation

Bei der Talfahrt liefert der vom Zug angetriebene Bahnmotor M (Fig. 1) als Generator Gleichstrom über eine ge-

[2]) Die Numerierung der Referate nimmt Bezug auf das Programm der Tagung, das jedem Teilnehmer zugestellt wurde. Es ist ausserdem veröffentlicht auf den Seiten 207...208 dieses Heftes.

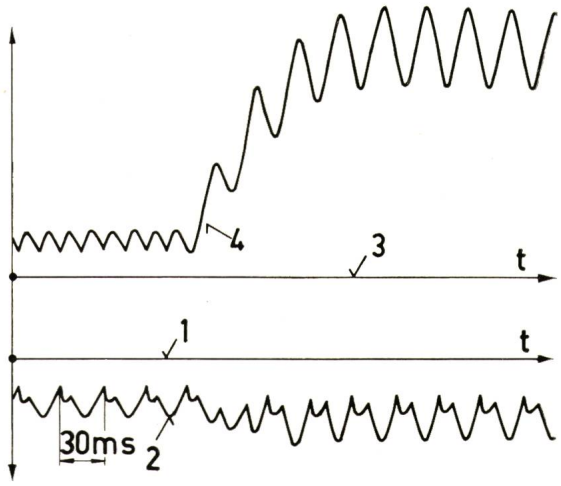


Fig. 2
Kurzschlußstrom bei Ausfallen von Zündimpulsen während der Rekuperation auf das Fahrleitungsnetz
Erregerstrom i_e Kurve 2 mit Nullinie 1. Ankerstrom i_a Kurve 4 mit Nullinie

steuerte Thyristorbrücke in den Transformator T, welcher bei Wechselrichterbetrieb die Energie an den Fahrdraht F liefert. Beim Bügelspringen, welches äquivalent zum Öffnen des Schalters HS ist, entsteht ein Kurzschluss, indem der Gleichstrom dauernd über die Ventile 1 und 4 längs dem punktierten Weg fliesst. Dasselbe tritt bei vorhandener Fahrdrahtspannung auf, wenn aus irgendeinem Grunde die Ventile 2 und 3 nicht mehr zünden. Der Ankerstrom i_a steigt dann nach Fig. 1 bis zu einem Dauerkurzschlußstrom an.

Fig. 2 zeigt ein Oszillogramm von i_a sowie dasjenige des Erregerstromes i_e. Bei diesem Versuch wurde nicht darauf

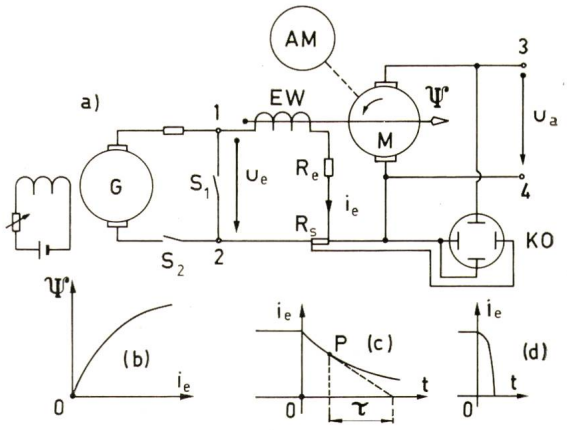


Fig. 3
Meßschaltung mit Gleichstrommaschine
a Zu untersuchender Bahnmotor M mit Antriebsmaschine AM, Erregerwicklung EW, Erregerstrom i_e und Erregerfluss Ψ. Fremderregter Gleichstromgenerator G mit Schnellschalter S_2 und Kurzschliesser S_1. Erregerwiderstand R_e und induktionsfreier Shunt R_s. Erregerklemmen 1 – 2 und Erregerspannung u_e. Ankerklemmen 3 – 4 und Ankerspannung u_a bei Leerlauf. Kathodenstrahloszillograph K. O.
b Statische Magnetisierungskennlinie $\Psi - i_e$
c Oszillogramm des Erregerstromes i_e bei Kurzschliessen vermittelst S_1. Zeitkonstante τ im Punkt P.
d Abschalten des Erregerstromes mittels S_2

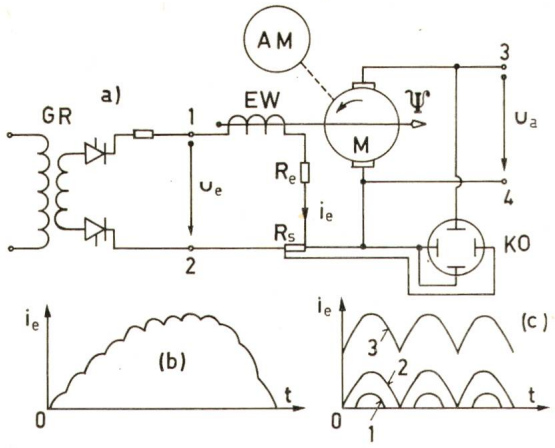


Fig. 4
Meßschaltung mit Gleichrichter

a Der Generator G von Fig. 2a wird durch einen Gleichrichter GR ersetzt
b Oszillogramm des transienten Erregerstromes
c Oszillogramm des stationären Erregerstromes. Gelückter Betrieb bei Kurve 1. Ungelückter Betrieb bei 3 und Grenzfall bei 2

geachtet, dass die Zündwinkel der beiden Halbwellen von i_e genau gleich gross seien. Trotzdem wurde dieses Oszillogramm für die Veröffentlichung gewählt, weil es demonstriert, dass alsdann ungeradzahlige Harmonische im Gleichstrom i_e auftreten. Obwohl die Spannungsquellen im Erreger- und Ankerkreis unabhängig voneinander waren und obwohl die Achsen des Erregerfeldes Ψ und des Ankerfeldes magnetisch senkrecht zueinander stehen, steigt beim Anwachsen des Ankerstromes i_a auch der Erregerstrom i_e an. Diese induktive Kopplung hängt mit der Eisensättigung in den Polen zusammen.

Dynamische Magnetisierungskennlinien

Eine Lösung des Kurzschlussproblems kann darin bestehen, dass man den Erregerstrom möglichst rasch reduziert, wozu man die Zeitkonstanten im Erregerkreis kennen sollte. Hierzu wurden eine Reihe von Versuchen unternommen. Die Schaltung nach Fig. 3a ermöglicht die Aufnahme der Magnetisierungskennlinie $\Psi - i_e$ mit dem Kathodenstrahloszillographen K.O., da die Klemmenspannung u_a am angetriebenen Bahnmotor M proportional zum Erregerfluss Ψ ist. Der Er-

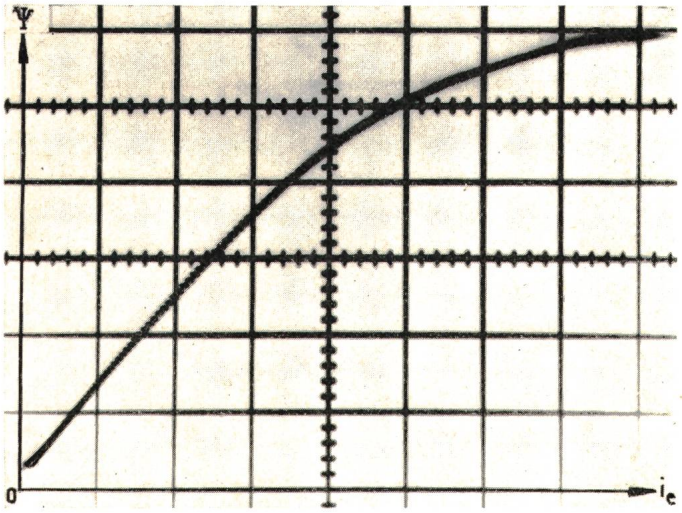


Fig. 5
Statische Magnetisierungskennlinie $\Psi - i_e$ bei Gleichstromspeisung nach Fig. 3a, 3b

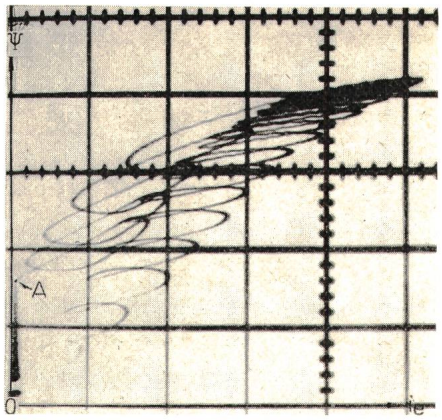


Fig. 6
Dynamische Magnetisierungskennlinie bei Gleichrichterspeisung nach Fig. 4a, 4b

regerstrom i_e wurde über einen garantiert induktionsfreien Shunt R_s auf den K.O. gegeben. Durch langsames Hochfahren der Erregung des Generators G erhält man am K.O.

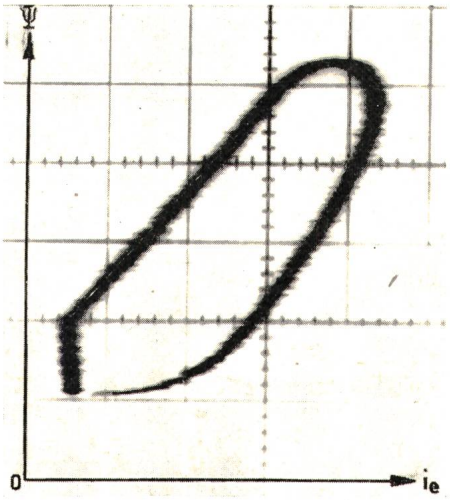


Fig. 7
Stationäre dynamische Magnetisierungskennlinie bei gelücktem Erregerstrom nach Fig. 4c1

die Kennlinie $\Psi - i_e$ (Fig. 3b). Einzelheiten der Schaltung entnehme man der Legende.

Das Resultat des Versuches zeigt Fig. 5. Ersetzt man nun den

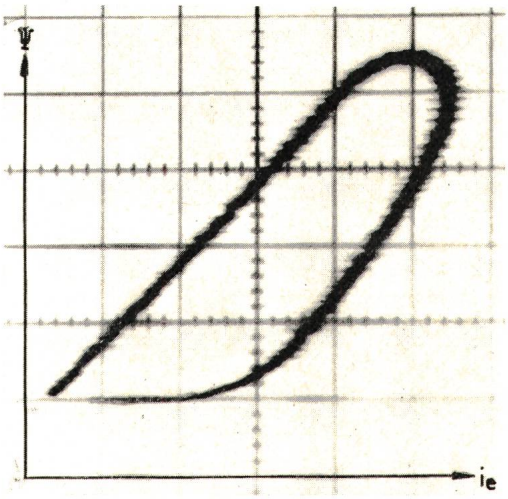


Fig. 8
Stationäre dynamische Magnetisierungskennlinie bei Grenzfall nach Fig. 4c2

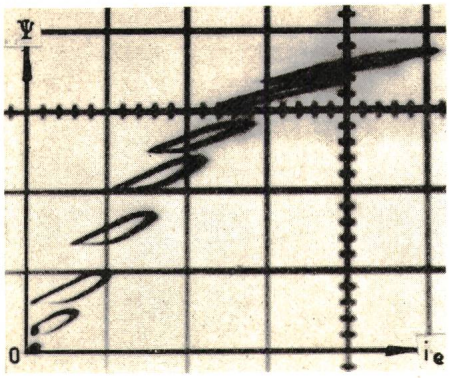


Fig. 9
Stationäre dynamische Magnetisierungskennlinien für 8 Erregerströme

Generator G (Fig. 3a) durch einen gesteuerten Gleichrichter GR nach Fig. 4a und fährt man jetzt mit i_e nach Fig. 4b herauf und herunter, so erhält man — erstaunlicherweise — die *dynamischen Magnetisierungskennlinien* von Fig. 6. Insbesondere bleibt nach dem Abschalten des Erregerstromes (Punkt A) noch ein beträchtlicher Erregerfluss übrig! Die Lenzsche Regel macht sich auch hier in unangenehmer Weise bemerkbar.

Zur weiteren Abklärung wurden ein *Abschalt-* und ein *Kurzschlussversuch* vorgenommen. Beim letzteren legt man plötzlich den Kurzschliesser S_1 (Fig. 3a) ein und beobachtet das Abklingen des Erregerstromes $i_e(t)$ nach Fig. 3a. Es ergibt sich hierfür (Fig. 10) keine Exponentialkurve, i_e fällt zuerst schnell und dann immer langsamer ab. Der ganze Vorgang dauert über 1 Sekunde! Fig. 11 zeigt den Verlauf der nach Fig. 3c konstruierten Subtangente τ, welche als momentane Zeitkonstante definiert werden kann laut

$$\tau = \frac{L\,(i)}{R_e}$$

τ variiert von 120 bis 540 Millisekunden. L(i) ist die differentielle Induktivität.

Beim *Abschaltversuch* öffnet man im Erregerkreis den Schnellschalter S_2 von Fig. 3a, in Fig. 3d ist der zugehörige Verlauf des Erregerstromes skizziert. Fig. 12 zeigt, dass i_e nach 18 ms verschwunden ist, die Ankerspannung u_a und damit der Erregerfluss Ψ betragen jedoch noch 72 % des ursprünglichen Wertes (Punkt P.) Es existiert also ein *Erregerfluss* Ψ, *ohne dass ein Erregerstrom* i_e *vorhanden ist!* Ψ klingt langsam gegen Null ab. Fig. 12 zeigt zudem die Erregerspannung u_e

$$u_e = \frac{d\,\Psi}{dt}$$

an den Klemmen 1–2 von Fig. 3a bei $i_e = 0$.

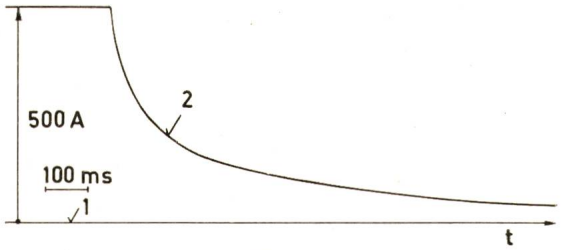


Fig. 10
Erregerstrom i_e beim Kurzschliessen der Erregerklemmen 1—2 von Bild 3a an einem 200 kW-Motor M
Verlauf entsprechend Fig. 3c. Kurve 2 Erregerstrom i_e mit Nullinie 1

Nun wurden die dynamischen Erregerkennlinien $\Psi - i_e$ bei *gleichgerichtetem Erregerstrom* (Fig. 4c) aufgenommen. Fig. 7 zeigt diese bei gelücktem Strom (Fig. 4c1), Fig. 8 gerade an der Grenze des gelückten Stromes (Fig. 4c2) und auch bei ungelücktem Strömen in Fig. 9 (vgl. Fig. 4c3), wo für 8 Erregerströme die Schleifen lagerichtig aufgenommen wurden, sie umschlingen die statische Kennlinie von Fig. 5.

Digitale Berechnung der Wirbelströme

Bei der in Fig. 13 dargestellten Gleichstrommaschine beträgt die Erregerdurchflutung z.B. 2 · 20 · 500 A = 20000 AW. Da nach dem Abschalten des Erregerstromes i_e nach Fig. 12 ein beträchtlicher Erregerfluss, nämlich 72 %, noch vorhanden

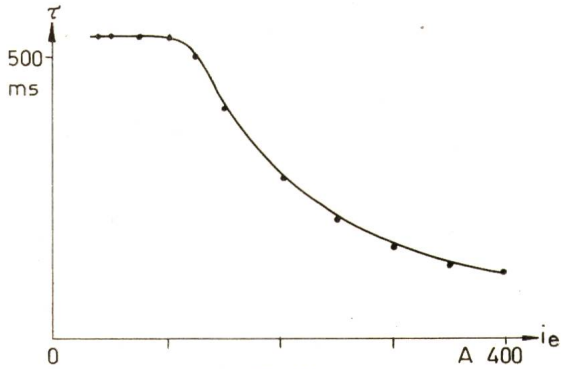


Fig. 11
Verlauf der Zeitkonstante τ des Erregerstromes nach Fig. 10
i_e als Abszisse und τ als Ordinate

ist, werden mindestens immer noch 14400 AW benötigt, denn die 1. Maxwellsche Gleichung

$$\text{rot}\,\vec{H} = \vec{j}\quad \Phi\vec{H}\cdot d\vec{l} = \Theta$$

ist weiterhin gültig. Es müssen daher Wirbelströme von min-

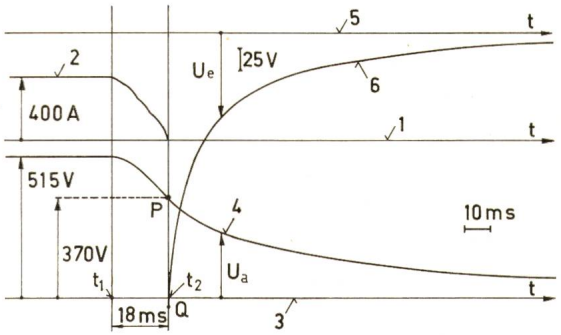


Fig. 12
Verlauf des Erregerflusses τ beim Abschalten des Erregerstromes i_e an einem 200 kW-Motor M
Erregerstrom i_e Kurve 2 mit Nullinie 1. Ankerspannung u_a Kurve 4 mit Nullinie 3. Erregerspannung u_e Kurve 6 mit Nullinie 5.
$u_{e\,max}$ = 310 V im Punkt Q

destens 14400 A fliessen. Fig. 14 zeigt deren Verlauf im Joch, in den Polen und im Anker, sie treiben weiterhin den Fluss über den Luftspalt.

Die Wirbelströme haben zur Folge, dass die magnetische Feldstärke H von Punkt zu Punkt innerhalb des Eisens verschieden ist. Bei eindimensionalen Problemen befolgt H(x,t) die partielle Differentialgleichung zweiter Ordnung vom parabolischen Typus

$$\frac{\partial\,H\,(x,t)}{\partial\,t} = \frac{\varrho}{p\,(H)}\cdot\frac{\partial^2\,H\,(x,t)}{\partial\,x^2}$$

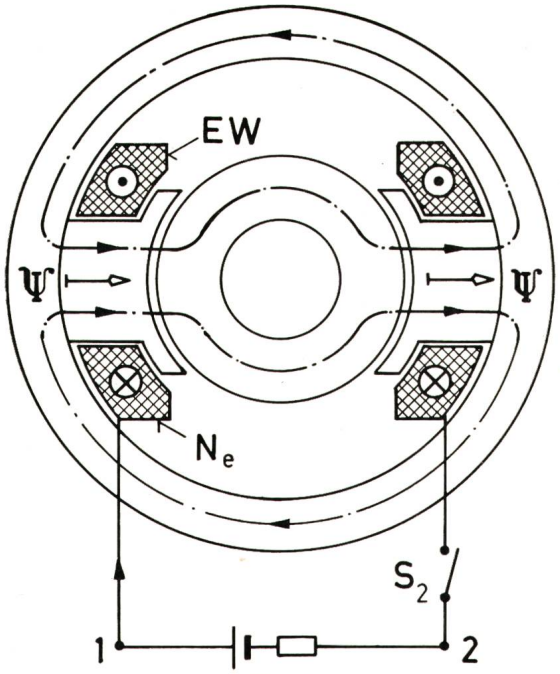


Fig. 13
Verlauf des Erregerflusses Ψ bei einer zweipoligen Gleichstrommaschine
Erregerwicklung EW mit N_e Windungen entsprechend Fig. 3a

wobei x die Raumkoordinate senkrecht zur Eisenwand ist. Zufolge der differentiellen Permeabilität p(H) des Eisens ist die obige Differentialgleichung zudem nichtlinear. Fig. 15 zeigt das zugehörige exakte Schaltbild, für die digitale Berechnung wurden $2 \cdot 20 = 40$ $\varrho - p(H)$ Elemente gewählt.
Die magnetische Energie dringt nun entsprechend dem Pointyngschen Vektor $[\vec{E} \cdot \vec{H}]$ von aussen in Form von Wanderwellen ins Eiseninnere ein, wie die Fig. 16a–b–c demonstrieren. Dabei ist angenommen, dass i_e nach Fig. 4c2 aus gleichgerichteten Sinushalbwellen

$$i_e(t) = I_e \cdot |\sin \omega t|$$

bestehe. In Fig. 16a steigt i_e von Null bis zum Maximum I_e an. Die Frequenz f beträgt 16⅔ Hz. Es sind die nach je 2 Millisekunden aufeinanderfolgenden Kurven von H(x,t) eingetragen. Man erkennt deutlich, wie die Wanderwellen mit einer Geschwindigkeit v von rechts nach links vordringen. In

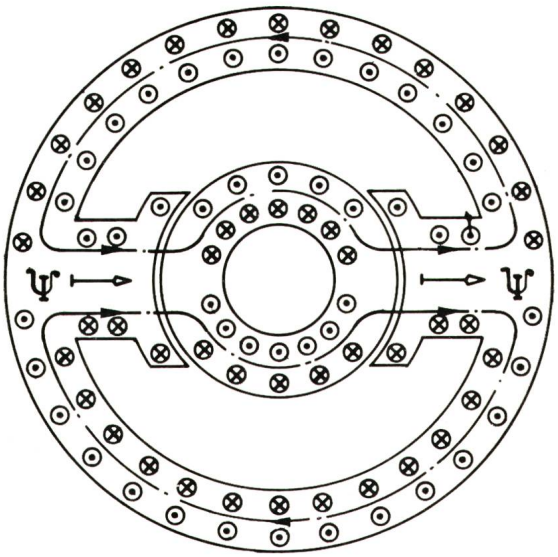


Fig. 14
Verlauf der Wirbelströme nach Abschalten des Erregerstromes

Fig. 16b fällt i_e von I_e bis Null ab, und in Fig. 16c sind beide Wellen überlagert. Man ersieht, dass in dem hier dargestellten stationären Gleichrichterbetrieb die Feldstärke H im Innern nur um 9 Teile schwankt, während sie aussen um 100 Teile variiert, was durch die Wirbelströme bedingt ist. Bei der digitalen Programmierung der obigen Differentialgleichung müssen numerische Instabilitäten vermieden werden. Fig. 17 zeigt eine digital berechnete äussere Kennlinie für einen stationären Erregerstrom nach Fig. 4c3 und Fig. 18 für einen transienten Einschaltstrom nach Fig. 4b. Unberücksichtigt blieb dabei die statische Hysterese, die durch das Umklappen der Blochwände bedingt ist, da diese zurzeit einer analytischen Formulierung nur schwer zugänglich ist.

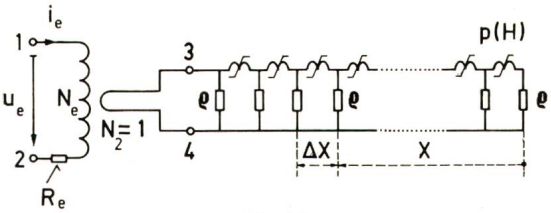


Fig. 15
Ersatzschaltbild für die Wirbelströme im Eisen
Erregerwicklung 1 – 2 mit N_e Windungen und sekundär $N_2 = 1$ Windung für die Wirbelströme. Spezifischer Widerstand ϱ und differentielle Permeabilität p(H) des Eisens

Aus den vorhergehenden Bildern ist ersichtlich geworden, dass selbst bei 16⅔ Hz und beim Abschalten von Gleichstrom der Skineffekt zu berücksichtigen ist. Bei sehr raschen Stromänderungen di_e/dt reagieren nur die äussersten Eisenschichten, die Feldstärke im Inneren ändert sich dabei kaum. Fig. 19 zeigt die statische Magnetisierungskurve K eines eisenhaltigen

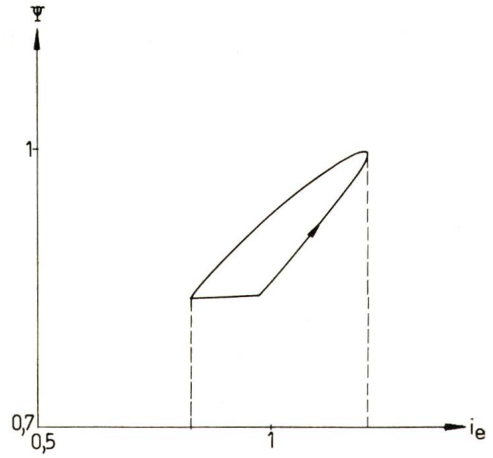


Fig. 16
Digital Berechnung der dynamischen Magnetisierungskennlinie bei stationärem Gleichrichterbetrieb entsprechend Fig. 8

magnetischen Kreises. Die Kurve 1 stellt die dynamische Kennlinie bei stationärem Wellenstrom dar. Die dynamische Kurve 2 erhält man bei sehr raschem Abschalten. Die Kurvenzüge 3–4–5 stellen dynamische Kennlinien bei sehr raschen Stromänderungen dar.

Resultate

Um den Erregerfluss beim fremderregten Motor möglichst rasch zu eliminieren, muss man den Erregerstrom i_e durch eine Wechselrichterschaltung schnellstens auf Null reduzieren

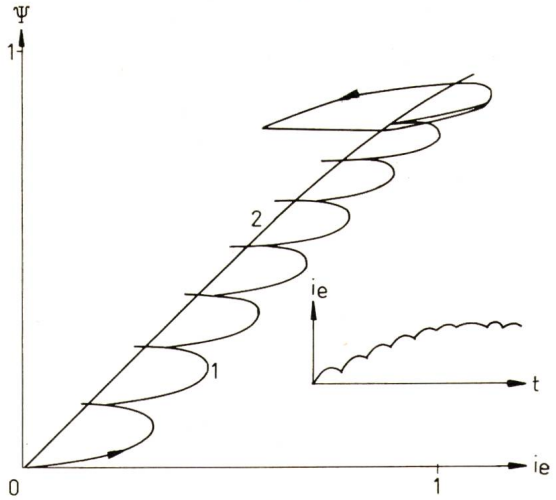


Fig. 17
Digitale Berechnung der dynamischen Magnetisierungskennlinie entsprechend den Fig. 4b und 6
Kurve 1: dynamisch; Kurve 2: statisch

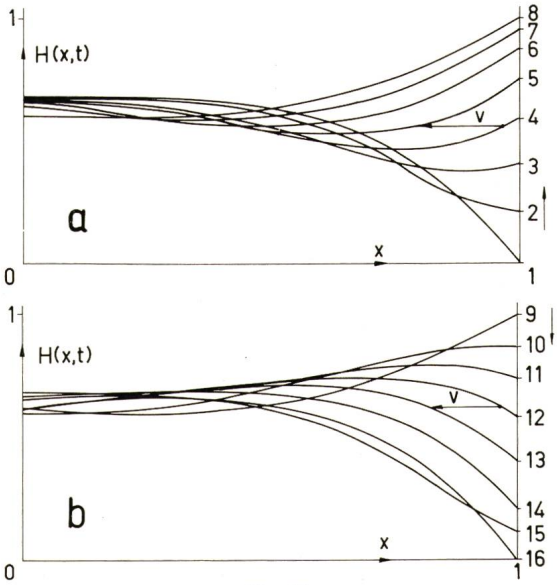


Fig. 18
Stationärer Verlauf der Wanderwellen der Wirbelströme im Eisen
Raumkoordinate x senkrecht zur Eisenoberfläche. Magnetische Feldstärke H(x, t) am Ort x zur Zeit t als Ordinate. Wanderungsgeschwindigkeit v. Aufeinanderfolgende Zustände nach je 2 ms
a die Feldstärke am Rande x = w steigt sinusförmig an von Null bis zum Scheitelwert
b die Randfeldstärke fällt vom Scheitelwert bis Null sinusförmig ab

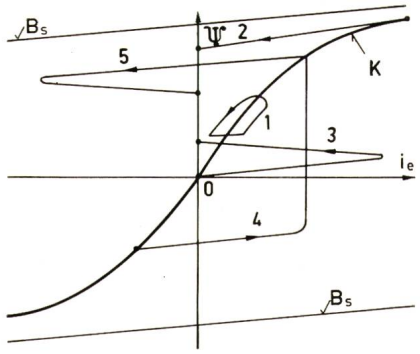


Fig. 19
Statische und dynamische Magnetisierungskennlinien bei einem eisenhaltigen magnetischen Kreis
Statische Kurve K. Dynamische Kurve 1 bei Gleichrichterbetrieb. Verlauf bei raschem Abschalten nach Kurve 2. Kurve 3 – 4 – 5 sehr rasche Stromänderungen

und hierauf durch einen Querthyristor (Ed. Gerecke) auf negative Werte umschalten. Zudem kann man eine ohmsche Gegenkopplung vom Ankerstrom i_a auf den Erregerstrom i_e vorsehen (H. Hintze). Die Wirkung dieser Massnahmen zeigt Fig. 20 beim Wegfall der Primärspannung und Fig. 21 beim Ausfall der Zündimpulse an den Ventilen 2 und 3 von Fig. 1.

Das grosse Hindernis beim schnellen Abschalten ist, wie wir gesehen haben, die in den Magnetfeldern steckende grosse

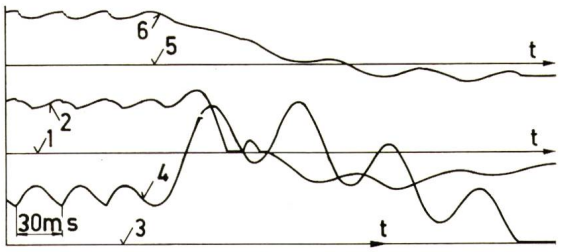


Fig. 20
Stromverlauf beim Zündimpuls-Ausfall während der Rekuperation
Erregerstrom 2 mit Nullinie 1. Ankerstrom 4 mit Nullinie 3. Ankerspannung 6 mit Nullinie 5

Energie. Als Magnetfelder kommen der Transformator T, die Glättungsdrosselspule L_d, das Ankerfeld (i_a) und das Erregerfeld Ψ in Frage. Man kann nun in bekannter Weise diese magnetische Energie dadurch entfernen, dass man sie sehr rasch in einen besonderen Kondensator entleert, was mit Thyristorschaltungen erreicht werden kann. Derartige Schaltungen sind besonders wirksam, wenn man den Kondensator negativ vorspannt, das ergibt den Faktor 2. Solche Schaltungen sind seit langem unter dem Namen «Elektronische Schalter» bekannt. Bei grossen Lokomotiven werden jedoch die benötigten Kondensatoren gross und teuer. Unter den oben

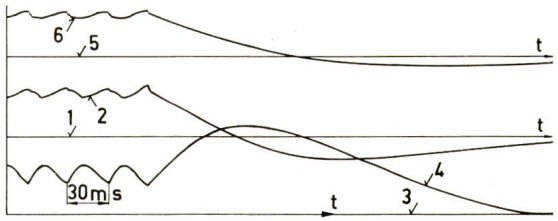


Fig. 21
Stromverlauf bei Ausfall der Hochspannung
Erregerstrom 2 mit Nullinie 1. Ankerstrom 4 mit Nullinie 3. Ankerspannung 6 mit Nullinie 5

erwähnten Feldern dürfte das Ankerfeld die kleinste Energie aufweisen, insbesondere wenn man den Motor mit einer Kompensationswicklung versieht. Ein Vorschlag von H. Hintze geht nun dahin, dass man beim fremderregten Motor nur dieses Feld mit dem elektronischen Schalter abschaltet.

Beim Seriemotor oder serie-fremderregten Motor bestehen weitere Möglichkeiten. Der nur fremderregte Motor hat den weiteren Vorteil, dass i_a und i_e nicht gleich sind, sondern beliebig, je nach Bedarf, automatisch geregelt werden können und die induktive Kopplung zwischen beiden Strömen gering ist.

Der Ersatz des massiven Eisens des Joches durch Dynamobleche wirft eine Reihe weiterer Probleme hinsichtlich der Wirbelströme und der Kommutation am Kollektor auf.

Der Traktionsmotor bei Speisung über Stromrichter und Gleichstromsteller

Von *J. Kuhlow*, Berlin

Zu dem Punkt «Kohlen- und Kollektorabnutzung» möchte ich einige ergänzende Ausführungen machen.

Sie beziehen sich einmal auf den Unterschied zwischen Betrieb im Prüffeld und dem im Fahrzeug, zum anderen auf die Begriffe «Kommutatorlaufleistung» und «spezifische Bürstenabnutzung», die üblicherweise als Beurteilungsmaßstab für die Betriebstüchtigkeit dienen, als Vergleichsmaßstab aber nicht ohne weiteres geeignet sind.

In Fig. 1 wird ein Prinzip-Schaubild der Beanspruchung des Kontaktes Bürste–Kommutator gezeigt. Es ist absichtlich grob schematisiert, um die wesentlichen Einflussgrössen besser herausheben zu können.

Die Beanspruchung selbst wird graphisch durch ein Diagramm dargestellt, dessen Ordinate die Höhe und dessen Abszisse die Häufigkeit — beide in logarithmischem Massstab — kennzeichnen. Der logarithmische Maßstab wurde gewählt, da in dem Prinzipschaubild Grössenordnungen miteinander verglichen werden sollen. Als Normalbeanspruchung wurde die bei Gleichstromspeisung im Prüffeld — d. h. im mechanisch stationären Betrieb — auftretende gewählt. Dieser Normalbeanspruchung überlagern sich in der Hauptsache 2 Zusatzbeanspruchungen:

Die eine ist bedingt durch die Art der Speisung und erhöht die Höhe der Beanspruchung um einen gewissen Prozentsatz. Die andere wird hervorgerufen durch Vorgänge zwischen Rad und Schiene, wie z. B. Gleisstösse oder Schlupfvorgänge, die zu Kippen oder Abheben der Bürste, d. h. zu Abschaltvorgängen führen können. Die Höhe dieser Zusatzbeanspruchung kann eine Grössenordnung über der Normalbeanspruchung liegen.

Die Unterschiede in der Beanspruchung des Kontaktes Bürste–Kommutator im stationären Betrieb infolge der Speisung durch Gleich-, Misch- oder Wechselstrom zeigt die obere waagerechte Zeile des Prinzipschaubildes. Sie entsprechen in ihrer Tendenz der der «Kommutationskarten», wie sie Herr Moser in seinem Referat behandelt. Wieweit der Einfluss von Kontaktstörungen bei Betrieb im Fahrzeug, wie sie durch die bereits erwähnten Gleisstösse und Schlupfvorgänge hervorgerufen werden, den Einfluss der Speisung überdeckt, hängt vom Gleiszustand und von der Art des Antriebs ab. Beide bestimmen die Häufigkeit dieser Zusatzbeanspruchung.

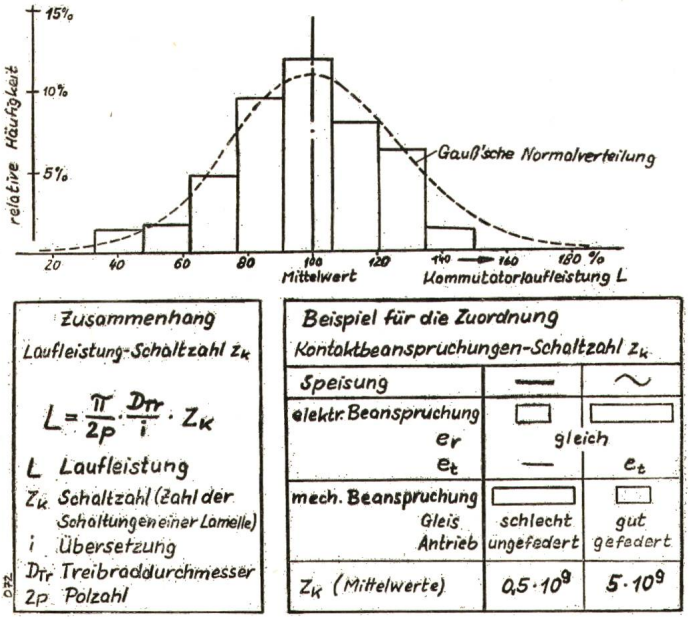


Fig. 1
Beanspruchung des Kontakts Bürste-Kommutator
Prinzip-Schaubild

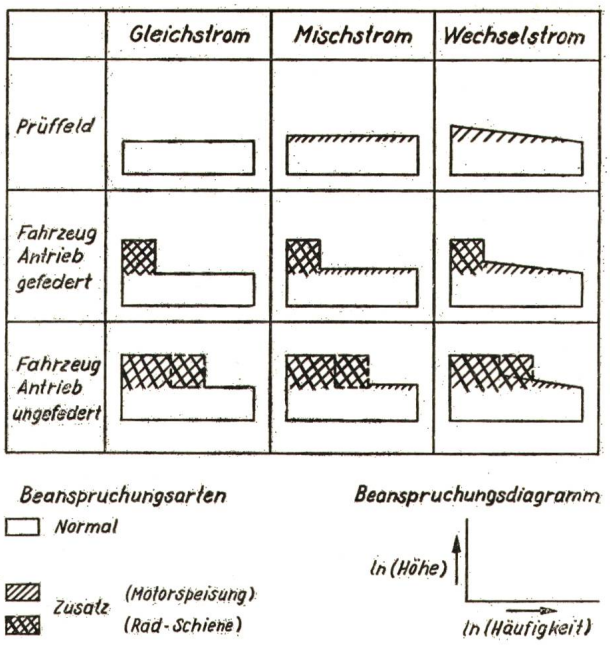


Fig. 2
Verschleiss des Kommutators
Statistische Verteilung der Laufleistung

Dadurch erklärt sich auch die oft beobachtete Tatsache, die auch Herr Moser in seinem Referat erwähnt hat, dass z. B. ein Wechselstrommotor, der einen gefederten Antrieb besitzt, einen geringeren Kontaktverschleiss hat als ein Gleichstrommotor mit ungünstigeren Antriebsverhältnissen.

Nach diesen grundsätzlichen Betrachtungen über die Beanspruchungen des Bürstenkontaktes nun einige Bemerkungen zum Kommutatorverschleiss.

Wie schon erwähnt, ist für den Betrieb die «Kommutatorlaufleistung», das ist der Zeitraum zwischen zwei Überholungen des Kommutators, eine wichtige Kenngrösse.

Zunächst einmal sei darauf hingewiesen, dass diese Kommutatorlaufleistung — gleichgültig welche Einflüsse für den Verschleiss in der Hauptsache massgebend sind — einer statischen Verteilung gehorcht (Fig. 2). Das bedeutet, dass man eine Beurteilung niemals auf Einzelwerte, sondern nur auf den Mittelwert abstützen kann.

Ein zweiter wichtiger Punkt ist, dass die Kommutatorlaufleistung bei gleicher Schalthäufigkeit einer Lamelle von Treibraddurchmesser und Übersetzung abhängig ist, wie die Gleichung in Fig. 2 zeigt. Will man also Motoren hinsichtlich des Kommutatorverschleisses miteinander vergleichen, so kann man nur die Zahl der Schaltungen pro Lamelle dazu heranziehen. Einen quantitativen Anhalt geben zwei Extremwerte:

Der eine mit $5 \cdot 10^9$ Schaltungen ist der Mittelwert einer Serie von 16⅔-Hz-Wechselstrommotoren eines Fahrzeuges mit einem vollabgefederten Antrieb. Der andere mit $0{,}5 \cdot 10^9$ Schaltungen — also eine Grössenordnung kleiner — ist der

Mittelwert einer Serie von Gleichstrommotoren eines Fahrzeugs mit ungefedertem Antrieb, das noch dazu auf sehr schlechten Gleisen läuft.

Gleiche Überlegungen — wie für die Kommutatorlaufleistung — gelten für die Bürstenabnutzung. Jedoch soll an dieser Stelle nicht weiter im einzelnen darauf eingegangen werden.

Thyristorstellglied zur Feldschwächung und zur Steuerung einer selbsterregten Widerstandsbremse

Von *J. Körber,* Mannheim

In den vorangegangenen Vorträgen wurde u. a. über die Spannungssteuerung mit Hilfe von Stromrichtern und deren Auswirkung auf die Fahrmotoren berichtet. Eine weitere Steuerungsbeeinflussung der Zugkraft ist mit Hilfe der Feldschwächung möglich.

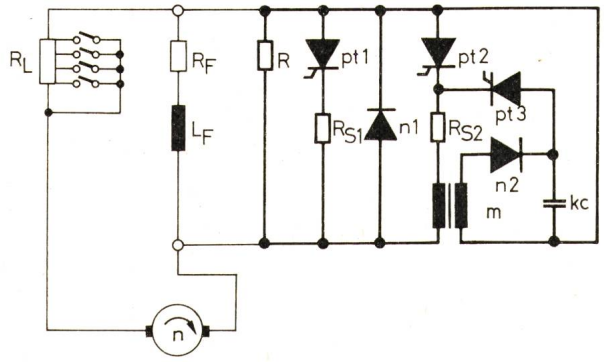


Fig. 1
Prinzipschaltung des Bremsstellers

In diesem Zusammenhang möchte ich Ihnen ein interessantes Anwendungsbeispiel vorstellen, das bei zwei Viersystem-Lokomotiven der DB zum Einsatz gelangt ist. Hier wird mit einem Thyristorstellglied das Feld beim Fahrbetrieb kontinuierlich geschwächt und beim Bremsbetrieb die Steuerung des Ankerstromes ermöglicht (Fig. 1 «Prinzipschaltung des Bremsstellers»). Im hier gezeigten Bild ist der Schaltzustand beim Bremsen angedeutet. Werden beim Bremsen die hier nicht dargestellten Motortrennschütze geschlossen, erregt sich die Maschine aufgrund der Remanenz bis

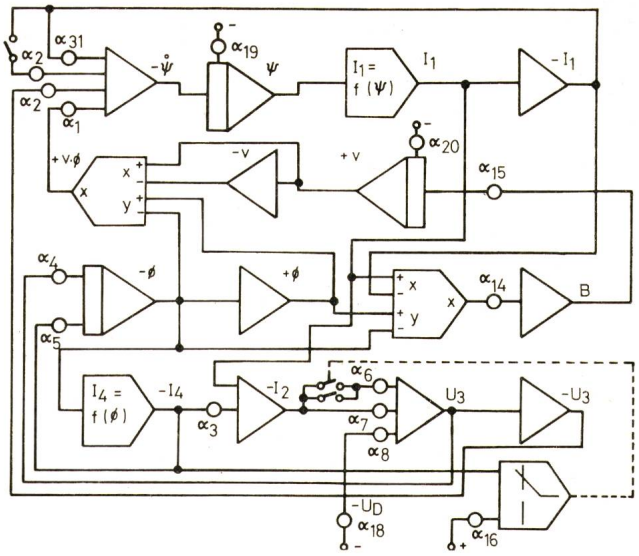


Fig. 3
Koppelplan des Bremsstellers

zu einem Wert, von dem an die Steuerung eingreifen kann — das ist bei ca. 100 A. Mit Hilfe der Thyristoren pt2 und pt3 kann der Feldstrom dann in gewünschtem Masse getaktet werden. Der Strom fliesst alternierend über die Shuntwiderstände R_{s1} und R_{s2}. Bei der realisierten Anlage ist ein Erregergrad zwischen 75 % und 30 % kontinuierlich einstellbar. Der Thyristor pt1 ist dabei dauernd geöffnet, er ist beim Bremsbetrieb nicht erforderlich, jedoch beim Fahren im Zusammenhang mit dem Bügelspringen. Ebenso ist die Diode n1 nur beim Fahrbetrieb und welligem Ankerstrom erforderlich.

Der Widerstandswert R_L wird während der Verzögerung des Fahrzeuges mit Hilfe von 5 Schützen in 10 Stufen bis zu Null verkleinert, so dass ein elektrisches Bremsen der Lokomotive fahrdrahtunabhängig bis zu kleinsten Geschwindigkeiten möglich wird. Das Bremskraftdiagramm für einen Motor zeigt Fig. 2 («Vereinfachtes B-v-Diagramm eines Motors»). Von den 10 genannten Widerstandsstufen sind nur die beiden grössten herausgegriffen, um das Bild nicht zu undeutlich zu machen.

Zwischen den Begrenzungslinien 10 und 10′ ist jeweils eine Steuerung nur mit Hilfe des Stellers möglich. Die Widerstandsstufe 9 wurde so gewählt, dass sich die Bereiche über-

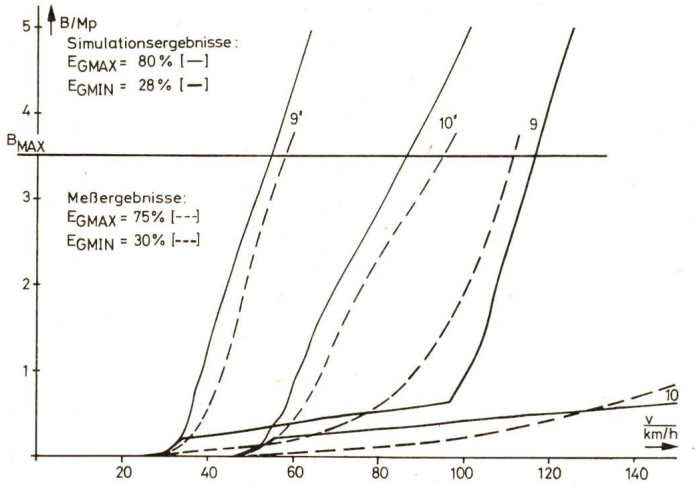


Fig. 2
Vereinfachtes B_v-Diagramm eines Motors

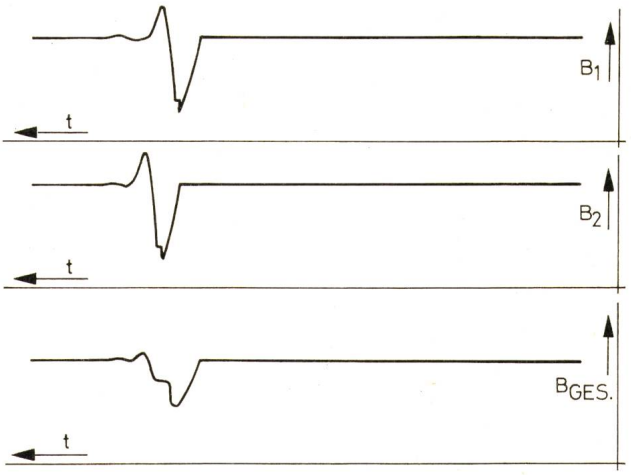


Fig. 4
Widerstandsumschaltung im Bremsbetrieb

lappen. Während der Überlappungsphase wird der Widerstand automatisch von 10 nach 9 weitergeschaltet. Der Erregergrad wird so nachgesteuert, dass nach dem Einlaufen in die neue niederohmigere Widerstandsstufe wieder die gewählte Bremskraft ansteht. Dieses Fortschalten geschieht selbsttätig bis zum Stillstand des Fahrzeuges.

Da bei der selbsterregten Bremsschaltung gerade beim Umschalten regelungstechnische Schwierigkeiten nicht auszuschliessen waren, wurde die gesamte Regelstrecke einschliesslich des Motors simuliert, den Koppelplan zeigt Fig. 3 («Koppelplan des Bremsstellers»). Da die Motoren versetzt, d. h. zeitlich nacheinander von einer Widerstandsstufe zur anderen umgeschaltet werden, ist der kurzzeitige Bremskrafteinbruch (ca. 0,6 sec) kaum spürbar. Fig. 4 («Widerstandsumschaltung im Bremsbetrieb») zeigt diesen Vorgang für 2 Motoren. Hier ist jeweils die Bremskraft eines einzelnen und die Summe beider Motoren während eines Simulationsschriebes festgehalten.

Auf der Lokomotive wurde es aufgrund des guten bremstechnischen Verhaltens möglich, von der Einzelumschaltung der Motoren auf eine gestaffelte Umschaltung von je zwei Motoren gleichzeitig überzugehen.

Abschliessend sollte nicht unerwähnt bleiben, dass gerade bei den Problemen der selbsterregten Bremse die Simulation es ermöglichte, mit wenigen Fahrten die Bremse optimal mit den richtigen Parameterwerten einzustellen. Ausserdem konnte die Steuerung und Regelung vorher an der simulierten Strecke erprobt werden, um die Inbetriebsetzungszeit noch um ein weiteres zu verkürzen.

2. Panel-Diskussion

über

Traktions- und Netztechnik; Betriebserfahrungen mit thyristorgespeicherten Triebfahrzeugen

E. Gierth, Deutsche Bundesbahn (DB), München:

1.1 Konstruktion der Triebfahrzeuge

Die sechsachsige Schnellzuglokomotive E 103 für Wechselstrom 15 kV, 16⅔ Hz, mit 7440 kW Dauerleistung, 200 km/h Höchstgeschwindigkeit und elektronischer Geschwindigkeitsregelung hat in Anlehnung an die Lokomotiven des 2. Typenprogramms der DB noch eine Amplituden-Fahrsteuerung mit Stufenschaltwerk und Thyristor-Lastschaltern. Die Steuerung der elektrischen Bremse mit 9800 kW Kurzzeitleistung erfolgt jedoch mit Rücksicht auf die Fahrdrahtunabhängigkeit leistungselektronisch über zwei statische Gleichstromumrichter mit Wechselstromzwischenkreis für die Regelung des Bremserregerstroms.

Bei den 1967 in Betrieb gesetzten vierachsigen Zweisystemlokomotiven E 181 für Wechselstrom 15 kV 16⅔ Hz und 25 kV 50 Hz und Viersystemlokomotiven E 184, zusätzlich für Gleichstrom 1,5 kV und 3 kV, mit 3100 kW Dauerleistung und 150 (160) km/h wird die Leistungselektronik für den Fahr- und Bremsbetrieb verwendet. Alle diese Lokomotiven besitzen im Wechselstrombetrieb die Anschnittsteuerung mit zwei Stromrichterbrücken in Folgeschaltung. Bei den E 184 Bauart BBC wird im Gleichstrombetrieb die konventionelle Schaltung benutzt. Bei den E 184 Bauart AEG sind im Gleichstrombetrieb je 2 Wechselrichtergruppen vorgeschaltet. Sie fahren auch unter Gleichstrom als reine Wechselstromlokomotiven. Alle Mehrsystemlokomotiven sind mit elektrischer Widerstandsbremse ausgerüstet bis auf zwei E 181, die elektrische Netzbremse (Nutzbremse) mit vollgesteuerten Stromrichtern erhielten.

Die ab 1970 ausgelieferten dreiteiligen S-Bahn-Triebzüge ET 420 für Wechselstrom 15 kV 16⅔ Hz mit 2400 kW Dauerleistung und 120 km/h sind mit je zwei Antriebsanlagen, bestehend aus einem Transformator und sechs Mischstrom-Fahrmotoren und mit Widerstandsbremse ausgerüstet. Die Motoren sind paarweise an die Folgeschaltung halbgesteuerter Strombrücken angeschlossen. Sie besitzen Reihenschlusserregung und eine über einen besonderen, vollgesteuerten Erreger-Stromrichter gespeiste Fremderregung.

1.2 *Eigenschaften der Thyristor-Triebfahrzeuge*

Bei der Anschnittsteuerung der Stromrichter werden alle konstruktiven und betrieblichen Vorteile ausgenutzt, die schon die mit Stufenschaltwerk gesteuerten Diodenstromrichter in Verbindung mit den Mischstrom-Fahrmotoren auszeichnen. Dies sind die Unabhängigkeit von der Netzfrequenz, der günstige Verlauf der Zugkraft-Geschwindigkeit-Kennlinie mit den hohen Zugkräften im unteren Geschwindigkeitsbereich und der Feldregelung im oberen Bereich, das pulsationsarme Drehmoment des Mischstrommotors gegenüber dem direktgespeisten Einphasen-Kommutatormotor und schliesslich der geringere Raumbedarf der Mischstrommotoren im Drehgestell. Ausserdem ermöglicht aber die Thyristorsteuerung eine völlig stufenlose Zugkraftkennlinie, eine wesentlich günstigere Ausnutzung der Adhäsion und damit eine Steigerung der Zugkraft bei gleichem Reibungsgewicht.

Diese Vorzüge bewogen die DB zur Konstruktion des vierteiligen Triebzuges ET 403 für 200 km/h und zur Planung einer Allzweck-Thyristorlokomotive, die imstande ist, mit ein und demselben Übersetzungsgetriebe TEE- und F-Züge mit 200 km/h und Güterzüge mit 2000 t Anhängelast bei 80 km/h und 5 ‰ Steigung zu befördern.

Nach den Ergebnissen unserer Messfahrten im Raum Kronach haben die Thyristor-Triebfahrzeuge grundsätzlich den gleichen Wirkungsgrad wie amplitudengesteuerte Wechselstrom- oder Diodenfahrzeuge. Neben den vielen, gewichtigen Vorteilen der Thyristorfahrzeuge haben sie jedoch den Nachteil, dass der Leistungsfaktor geringer ist als bei der Amplitudensteuerung. Im Schnitt liegen der Scheinstrom und damit die Scheinleistung der Grundwelle auf der Fahrleistungsseite etwa 12 % höher als bei konventionellen Wechselstromfahrzeugen.

2. *Auswirkung der Thyristorfahrzeuge auf die Bahnstromversorgung*

Ausserdem treten Stromoberschwingungen auf, von denen die 3. bis 9. Harmonische möglichst von den Generatoren der Kraftwerke ferngehalten werden sollen. Die Oberschwingungen höherer Ordnung sind für die Bahnstromversorgung praktisch bedeutungslos. Ihre Auswirkung auf die Fernmelde- und Signalanlagen wird an anderer Stelle behandelt.

Die Bahnstrom-Erzeugungsanlagen arbeiten durchschnittlich mit einem Leistungsfaktor von rund 0,86. Das entspricht einer mittleren Blindleistung von 60 Mvar bei 100 MW Wirkleistung. Eine 12 % höhere Scheinleistung bedeutet ein Absinken des Leistungsfaktors auf 0,77, wobei die Blindleistung von 60 Mvar auf 84 Mvar, also um 40 % ansteigt. Die Scheinleistung erhöht sich dabei von 116,6 MVA auf 130,6 MVA. Die Generatoren der Kraftwerke, die neben den Umformern den überwiegenden Teil der Zugförderungsenergie erzeugen, sind für einen Leistungsfaktor von 0,8 ausgelegt. Aus Gründen der Spannungsregelung und der unterschiedlichen Blindlastverteilung auf die Werke können sie nicht mit einem durchschnittlichen Leistungsfaktor unter 0,86 gefahren werden. Um dies sicherzustellen, ist beim Übergang zur Anschnittsteuerung eine Blindleistungskompensation von 23 bis 25 % notwendig. Hierfür kommen wegen der höheren Anlage- und Betriebskosten der rotierenden Phasenschieber nur Kondensatorbatterien in Betracht. Diese sollten reichlich ausgelegt werden, um zusätzlich noch die niederharmonischen Stromoberschwingungen der Thyristorfahrzeuge aufzunehmen. Ausserdem ist künftig mit der Einführung der Netzbremse (Nutzbremse) zu rechnen, die den Leistungsfaktor noch weiter absinken lässt.

2.2 *Wahl des Standortes der Kondensatorbatterie*

Als Standorte für die Kondensatorbatterie könnten die Kraftwerke, die 110 kV- oder die 15 kV-Seite der Unterwerke, die Bahnhöfe des Fahrleitungsnetzes sowie die Triebfahrzeuge selbst in Betracht kommen. Für die Aufstellung auf der 15 kV-Seite der Unterwerke spricht der Vorteil, dass das 110 kV-Netz und die Unterwerkstransformatoren von der zusätzlichen Blindleistung und dem erhöhten Scheinstrom entlastet werden und Überwachung und Unterhaltung leicht möglich sind. Bei einer Aufstellung auf den Bahnhöfen erhöhen sich die Anlage- und Unterhaltskosten durch die mehrfache Unterteilung in kleine Einheiten.

Beim Einbau auf den Triebfahrzeugen beträgt das Gewicht der Kondensatorbatterie beispielsweise von 760 kvar, etwa für ein Fahrzeug mit 3500 kW Stundenleistung, rund 2,5 t. Soweit dieses Mehrgewicht nicht zur Erzielung eines bestimmten Reibungsgewichts nützlich ist, entstehen dadurch unproduktive Transportleistungen. Bei Hochleistungslokomotiven und den Triebzügen der DB wäre es aus Raum- und Gewichtsgründen unzweckmässig oder sogar unmöglich, Kondensatorbatterien unterzubringen. Ausserdem muss die Summe der auf den Triebfahrzeugen einzubauenden Kondensatorleistungen ein Mehrfaches der im Unterwerk einzubauenden Kondensatorleistungen betragen, da hierbei der Gleichzeitigkeitsfaktor zu berücksichtigen ist. Bei diesem Einbau werden zwar der Fahrzeugtransformator und das Fahrleitungsnetz entlastet und die Oberwellen höherer Ordnung in diesem Netz wesentlich vermindert. Dagegen werden aber die Oberwellen niederer Ordnung wesentlich erhöht, wogegen aus der Sicht des Netzbetriebes Bedenken bestehen.

Für die optimale Aufstellung der Batterien kann nicht ohne weiteres eine allgemein gültige Lösung angegeben werden. Bei einem stark belasteten Streckennetz mit dichter Zugfolge ist die Aufstellung in den Unterwerken vorzuziehen. Für Strecken mit geringerem Verkehr kann die Kompensation auf der Lokomotive wirtschaftlicher sein.

D. W. Venemans, Nederlandse Spoorwegen (NS), Utrecht: Zur Feststellung des Einflusses der Steuerfrequenz auf das Motorverhalten wäre eine Reihe genauer Messungen in einem Labor nötig. Da es keine besonderen Probleme mit den bisher verwendeten Normalmotoren gibt, ist diese Untersuchung noch nicht angefangen. Wie erwähnt, sind während der Fahrt im Nahschnellverkehr (mittlerer Haltestellenabstand 4,8 km, Höchstgeschwindigkeit 140 km/h) keine deutlichen Unterschiede in der Motortemperatur gemessen worden (kleiner als 5 °C).

Betreffs der alten Motoren (Baujahr 1930) des Versuchstriebwagens haben wir festgestellt, dass die Kommutation im Bremsbetrieb mit geschwächtem Feld und einer Steuerfrequenz von 100 Hz deutlich viel schlechter ist als mit 200 Hz. Mit 200 Hz war die Kommutation im Bremsbetrieb mit Impulssteuerung fast ebenso gut als im Motorbetrieb mit voll ausgesteuerter Spannung, bei gleicher Geschwindigkeit und Feldschwächungsgrad (etwa 60% Feld).

M. Desponds, Schweiz. Bundesbahnen (SBB), Bern:

1. Einführung

Die Betriebserfahrungen der SBB in der Anwendung von Thyristoren in den Hauptstromkreisen von Lokomotiven betreffen eine Zweifrequenz-Rangierlokomotive des Bahnhofs Basel, welcher sowohl mit Einphasenstrom 25 000 V, 50 Hz wie mit Einphasenstrom 15 000 V, 16⅔ Hz elektrifiziert ist. Es handelt sich um eine der beiden Lokomotiven Ee3/3^{II} 16501-02, welche ursprünglich mit Niederspannungsstufenschalter und 2 Excitron-Gleichrichtern in Gegentaktschaltung ausgerüstet waren. Die Stundenleistung an der Fahrmotorwelle beträgt 520 kWh. 1966/67 wurden auf einer Lokomotive die Gleichrichtergefässe durch 2 Diodenblöcke ersetzt und die zweite mit einem gesteuerten Stromrichter ausgerüstet.

Das Prinzipschaltbild der Lokomotive nach dem Umbau geht aus der Figur 1 hervor. Der Transformator (7) besitzt 2 Sekundärwicklungen; die erste speist eine Diodenbrücke (27.1) und die zweite eine vollgesteuerte Thyristorbrücke (27.2). Der Regimeumschalter (16) besorgt die Spannungsanpassungen, welche durch den Zweifrequenzbetrieb der Lokomotive benötigt werden. Gleichstromseitig sind die beiden Brücken in Reihe geschaltet, so dass der Motor mit der Summe der durch die beiden Brücken gelieferten Spannungen versorgt wird. Die Diodenbrücke liefert eine feste, positive Gleichspannung; die Thyristorbrücke gibt im Wechselrichterbetrieb eine negative und im Gleichrichterbetrieb eine positive Spannung ab. Die gleichgerichtete Spannung kann somit zwischen Null und Maximalwert kontinuierlich variiert werden. Der Umbau bezweckte auch die praktische Erprobung einer elektrischen Nutzstrombremse mit folgender

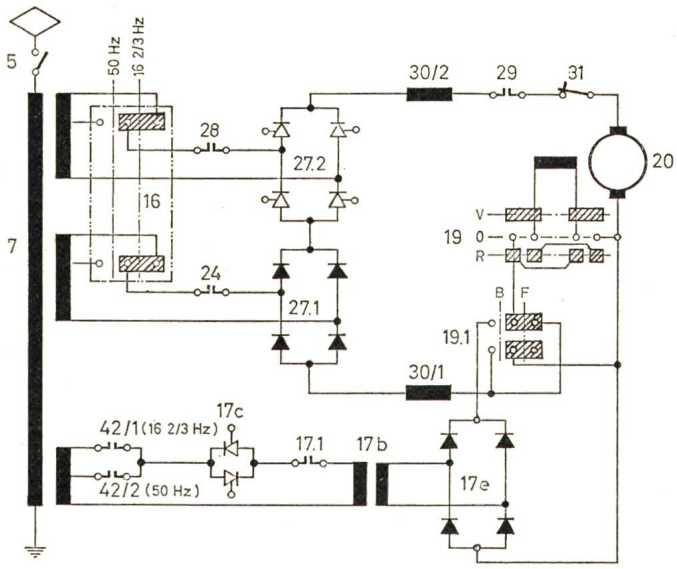


Fig. 1
Zweifrequenzlokomotive Ee 3/3″ 16 502
Prinzipschema der Hauptstromkreise
5 Hauptschalter; *7* Haupttransformator; *16* Betriebsartumschalter; *17 b* Bremserregertransformator; *17 c* Stellglied für Bremserregung; *17 e* Gleichrichter für Bremserregung; *17.1* Bremserregerschutz; *19* Wendeschalter; *19.1* Fahr-Bremsumschalter; *20* Fahrmotor; *24* Schütz für Gleichrichter; *27.1* Traktionsgleichrichter; *27.2* Traktions-Wechselrichter; *29* Trennschütz; *30* Glättungsdrosselspule; *31* Gleichstrom-Schnellschalter; *42* Schütz für Hilfsbetriebe

Funktionsweise: Die Diodenbrücke wird vom Transformator durch das Schütz 24 getrennt und der Fahrmotor von der Hilfsbetriebewicklung des Transformators über einen aus zwei antiparallel geschalteten Thyristoren bestehenden Stromsteller (17c), einen Anpassungstransformator (17b) und einen Gleichrichter, fremderregt. Wir bekommen somit die klassische Schaltung mit dem als Generator betriebenen Fahrmotor, welcher eine vollgesteuerte Thyristorbrücke im Wechselrichterbetrieb versorgt; die Dioden des ungesteuerten Gleichrichters werden im Freilauf betrieben. Im Fahrmotorstromkreis befindet sich noch ein Gleichstrom-Schnellschalter (31), welcher zum Schutz des Stromrichters beim Wechselrichterkippen vorgesehen ist; wir werden noch darauf zurückkommen. Die Steuerung der Lokomotive erfolgt stufenlos mit einem einzigen Hebel, dessen Winkelausschlag im Fahrbetrieb einen Fahrmotorstrom-Sollwert und im Bremsbetrieb einen Bremsmoment-Sollwert vorgibt.

2. Betriebserfahrungen

Die Anzahl der Kinderkrankheiten, die eliminiert werden mussten, war sehr gering. Auf Grund der mit ungesteuerten Gleichrichtern gemachten Erfahrungen wurden die Schutz- und Überwachungseinrichtungen so einfach wie möglich vorgesehen; trotzdem mussten in diesen Einrichtungen einige kleinere Anpassungen vorgenommen werden. Wir erwähnen im besondern Überspannungsableiter, die den mechanischen Beanspruchungen im Rangierdienst nicht gewachsen waren, sowie die schwierige Einstellung des Schnellschalters im Fahrmotorstromkreis.

Das Personal hat sich sehr schnell an die neue Steuerung angepasst und entdeckte bald ihren Bedienungskomfort in Form einer grossen Feinregulierung. Diese durch die absolut stufenlose Einstellung der Zug- und Bremskräfte gegebene Feinheit ist im Rangierdienst besonders wertvoll.

Versuchsweise wurde die Steuerung mit einem Umschalter versehen, welcher es erlaubte, im Fahrbetrieb mit dem Fahrschalter dem Fahrmotor entweder einen Spannungs- oder einen Stromsollwert vorzugeben. Im Rangierdienst hat sich die Stromregelung der Spannungsregelung überlegen gezeigt, weil letztere zu schnelle und brutale Anfahrten verursacht. Im Streckendienst hingegen weist die Spannungsregelung gewisse Vorteile für die Einstellung konstanter Geschwindigkeiten auf. Dem normalen Einsatz der Lokomotive entsprechend, wurde die Stromregelung definitiv gewählt.

Mit Rücksicht auf die grössere Motorstromwelligkeit bei Anschnittsteuerung wurde die Induktivität der Glättungsdrosselspule gegenüber ihrem ursprünglichen Wert bei Amplitudensteuerung vergrössert.

Trotz dieser Massnahme wurde auf der Thyristorlokomotive eine grössere Bürstenabnützung festgestellt. Diese Abnützung bleibt jedoch kleiner als bei Lokomotiven der gleichen Serie, welche mit Einphasen-Motoren ausgerüstet sind und im gleichen Dienste unter 2 Netzfrequenzen eingesetzt sind. Diese Feststellung betrifft Rangierlokomotiven; es wäre interessant zu erfahren, ob in dieser Beziehung ähnliche Verhältnisse auch bei Streckenfahrzeugen gemacht worden sind.

Interessante Erfahrungen wurden mit der elektrischen Nutzstrombremse gemacht. In bezug auf Dimensionierung hat der praktische Rangierdienst gezeigt, dass genügende Bremskräfte ausgeübt werden können, obschon die gewählte Schaltung nur ungefähr die halbe Nennspannung dem als Generator arbeitenden Fahrmotor entgegenzusetzen erlaubt.

Eine weitere Feststellung war, dass, trotz der kleinen Maximalgeschwindigkeit der Lokomotive (45 km/h), zahlreiche Stromabnehmersprünge oder Störungen in der Stromabnahme das «Wechselrichterkippen» verursachten. Darunter versteht man den durch eine Störung verursachten plötzlichen Übergang vom Wechselrichter- in Gleichrichterbetrieb, d. h. den Übergang von einer negativen Gleichspannung zu einer positiven Spannung. Dieser Polaritätswechsel der Gegenspannung verursacht einen Kurzschluss, welcher wegen der Zeitkonstante des Erregerstromkreises nach dem Auslösen des Hauptschalters weiterbesteht. Die schwache Wärmekapazität der Halbleiter erlaubt es auch nicht, den Kurzschlußstrom durch Öffnen des Trennschützes 29 zu unterbrechen, weil er eine Auslösezeit aufweist, die länger ist als jene Zeit, in welcher die kritische Schichttemperatur der Thyristoren erreicht wird. Aus diesem Grunde musste der Gleichstrom-Schnellschalter mit nur einigen ms Auslösezeit im Ankerstromkreis eingebaut werden. Das elektrische Verhalten dieses Schalters ist ausgezeichnet; leider ist seine Schaltzahl hoch und sein empfindlicher Schaltmechanismus braucht eine Wartung, die nicht vereinbar ist mit den langen Unterhaltsintervallen, wie sie die Anwendung von Thyristoren erlaubt.

Nutzbremsschaltungen mit Schnellschaltern im Motorstromkreis sind somit nicht zu empfehlen. Für die betreffende Lokomotive ist als Ersatz für den Schnellschalter eine elektronische Zwangslöscheinrichtung vorgesehen. Sie wird gegenwärtig montiert und wir können noch nicht über ihre Bewährung berichten. Die Thyristoren haben dieser Lokomotive eine grosse Zuverlässigkeit gegeben, welche nach Inbetriebsetzung dieser Zwangslöscheinrichtung voll zur Geltung kommen sollte.

L. Wretman, Statens Järnvägar (SJ), Stockholm: In dem geschriebenen Referat von Herrn Professor Meyer habe ich unter anderem gelesen, dass es eigentlich nur unter bestimmten besonderen Umständen motiviert ist, Wechselstrom-Triebfahrzeuge für niedrige Frequenzen als Stromrichter-Triebfahrzeuge auszuführen.

Trotzdem dass keine von diesen im Referat genannten speziellen Umständen für die Schwedischen Staatsbahnen vorliegen, haben die Schwedischen Staatsbahnen eine ziemlich grosse Anzahl von Thyristor-Triebfahrzeugen angeschafft. Ich werde deshalb über die Entwicklung bei uns und über unsere Standpunkte betreffs Thyristor-Triebfahrzeugen berichten.

Die Lage bei uns ist heute (1. November 1970) wie folgt:

Von insgesamt etwa 890 elektrischen Lokomotiven und etwa 180 elektrischen Triebwagen oder Triebwagenzügen sind 52 Lokomotiven und 94 Triebwagenzüge mit Thyristorstromrichtern ausgeführt.

Die Lokomotiven haben drei verschiedene Ausführungen, die mit Rc1, Rc2 und Rc3 bezeichnet sind (Fig. 1), aber von aussen gesehen vollkommen gleich sind.

Anzahl und Hauptdaten der Rc-Lokomotiven:

		Rc1	Rc2	Rc3
Anzahl		20	30	2
Achsfolge		Bo'Bo'	Bo'Bo'	Bo'Bo'
Gesamtgewicht	t	76,0	76,8	76,8
Stundenleistung	kW	3600	3600	3600
Höchstgeschwindigkeit	km/h	135	135	160
Grösste Zugkraft	Mp	28	28	24

Der Unterschied zwischen Rc1 und Rc2/Rc3 besteht darin, dass die Rc1-Lokomotiven mit 3 Thyristorbrücken in Reihe pro Fahrmotor ausgerüstet sind, während die Rc2- und Rc3-Lokomotiven nur 2 haben. Filter kommen in den Rc2- und Rc3-Lokomotiven vor (Fig. 2 und 3). Die Stromrichter in diesen beiden Lokomotivtypen sind ölgekühlt. Von den Rc3 bleiben noch 8 zu liefern und von den Rc2 sind noch 20 bestellt.

Die Triebwagenzüge mit der Typenbezeichnung X1 haben alle dieselbe Ausführung mit folgenden Hauptdaten (Fig. 4):

Achsfolge		Bo'Bo'+2'2'
Gesamtgewicht	t	78
Adhäsionsgewicht	t	48
Stundenleistung	kW	1120
Höchstgeschwindigkeit	km/h	120
Grösste Zugkraft	Mp	10,5

Fig. 1
Thyristorlokomotive Baureihe Rc 2 der SJ

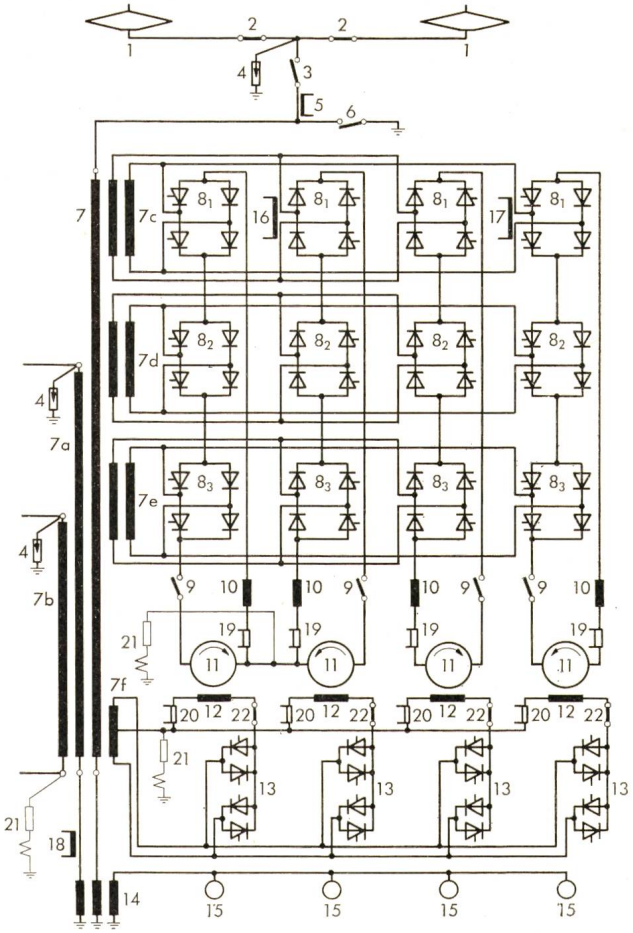


Fig. 2
Vereinfachtes Schaltbild der SJ-Lokomotive Rc 1

Von diesen Triebfahrzeugen bleiben noch 6 zu liefern.

Im folgenden werde ich mich nicht speziell mit den Triebwagen befassen, da diese in elektrischer Hinsicht praktisch vollkommen mit den Rc1-Lokomotiven übereinstimmen.

Nun komme ich zu der Frage, warum die Schwedischen Staatsbahnen so viele Thyristorfahrzeuge angeschafft haben.

Meine Antwort wird ein bisschen historisch.

Als SJ in den Jahren 1963—1964 die Bestellung von neuen elektrischen Lokomotiven vorbereitete, waren 6 im Jahre 1962 gelieferte BoBo-Lokomotiven Grundtypen für zukünftige Universallokomotiven. Davon waren 2 als Dioden-Lokomotiven ausgeführt und die übrigen als Wechselstrom-Lokomotiven mit Direktmotoren. Angebote auf sowohl Wechselstrom-Lokomotiven als auch auf Dioden-Lokomotiven wurden angefordert. Die technische Entwicklung auf dem Gebiet der Silizium-Halbleiter hatte aber so rasche Fortschritte gemacht, dass die Möglichkeiten Thyristoren anstatt Dioden zu verwenden in Reichweite lagen. Das Interesse an Thyristorfahrzeugen wurde bei den Traktionstechnikern sehr gross, und bei der ersten Bestellung von 20 Lokomotiven im Jahre 1964 wurden 5 in Thyristorausführung und 15 in Diodenausführung gewählt. Die Bestellung wurde später darin geändert, nur Thyristorlokomotiven zu umfassen. Dazu trugen die positiven Betriebserfahrungen einer für Thyristorbetrieb umgebauten Dioden-Lokomotive bei, die während des Sommers 1965 im Betrieb eingesetzt wurde.

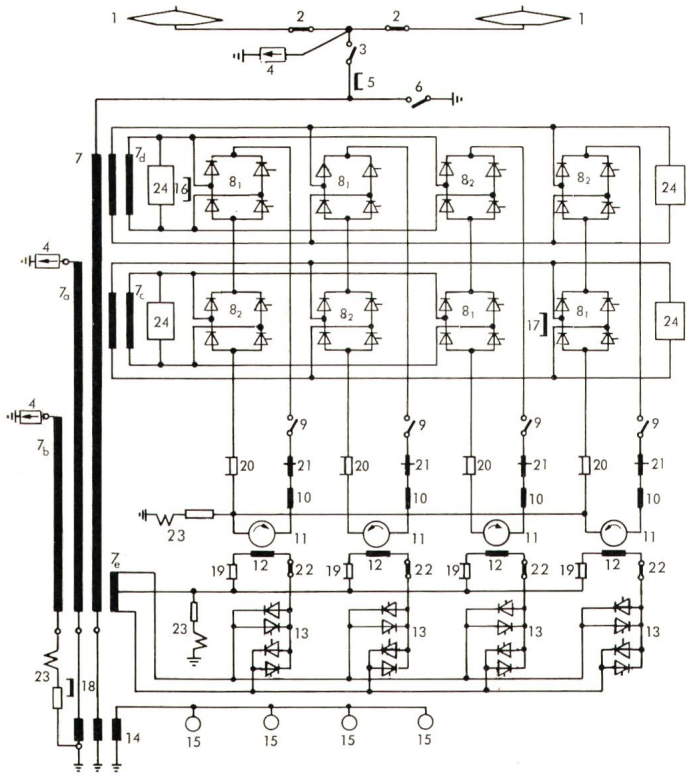


Fig. 3
Vereinfachtes Schaltbild der SJ-Lokomotiven Rc 2 und Rc 3

Die Alternative zu den Dioden- oder Thyristor-Lokomotiven mit einer totalen Stundenleistung von 3600 kW war eine Wechselstrom-Lokomotive mit im Prinzip gleichem Aufbau und einer Leistung von ca. 3300—3400 kW.

Folgende Vor- und Nachteile eines Thyristorfahrzeuges im Vergleich mit einem konventionellen Wechselstromfahrzeug wurden erwogen, bevor ein Beschluss über Anschaffung von Thyristor-Lokomotiven gefasst wurde. Betreffend die Vorteile sollte ich hinzufügen, dass die Zusammenstellung bei diesem Zeitpunkt ganz natürlich nicht auf Betriebserfahrungen basiert werden konnte, sondern mehr als eine Übersicht der Forderungen, Wünsche und Erwartungen zu betrachten war.

Fig. 4
Thyristor-Triebwagenzug Baureihe XI der SJ

Vorteile

1. Stufenlose Steuerung — bessere Adhäsionsausnutzung, erhöhter Komfort.

2. Individuelle Motorsteuerung — besser Adhäsionsausnutzung durch Kompensation der Achsentlastung.

3. Geringere Schleudergefahr durch Verwendung von fremderregten Fahrmotoren (mit günstigerer Charakteristik).

4. Höhere Zugkraft bei höheren Geschwindigkeiten durch Feldschwächung.

5. Einbau grösserer Motorleistung in gegebenem Umfang und gegebenem Gewicht — im letztgenannten Fall unter der Voraussetzung, dass Stromrichter und Glättungsdrosseln Spielraum hierfür geben.

6. Verminderung der Wartungskosten durch Verwendung statischer Komponenten anstatt konventionelle Ausrüstung, die grösseren Unterhaltungsaufwand fordern.

7. Weniger Betriebsstörungen.

8. Steuersystem, das Voraussetzungen für zukünftige Automatisierung bietet — in erster Etappe vereinfachte Fahrweise.

9. Günstigere Preisentwicklung für Halbleiter und elektronische Komponenten als für konventionelle Lokgeräte.

Nachteile

1. Schlechter Leistungsfaktor.

2. Gefahr für Störungen in Signal- und Fernmeldeanlagen usw.

3. Erhöhter Komplikationsgrad, der die Lokalisierung von Fehlern und Betriebsstörungen erschweren kann, wenigstens während der ersten Jahre nach Inbetriebsetzung eines neuen Lokomotivtypes.

Darüber hinaus kann als ein unsicherer Faktor die Lebensdauer der Halbleiterelemente im traktionären Milieu genannt werden.

Die Nachteile in Form von niedrigem Leistungsfaktor und Gefahr für Störungen in Signal- und Fernmeldeanlagen waren frühzeitig bekannt. Eine Untersuchung betreffend diese Störungen, die auf zugänglichem theoretischem Material basiert war, hat gezeigt, dass keine grössere Gefahr für Störungen in den Signalanlagen vorliegt, und dass Störungen in den Fernmeldeanlagen mit eventuellen Filtern gemeistert werden können. Mein Kollege wird morgen betreffend Störungen in verschiedenen Schwachstromanlagen informieren. Es war aber klar, dass der Leistungsfaktor bei einer Thyristor-Lokomotive wesentlich schlechter als bei einer Wechselstrom-Lokomotive würde und dass dies grosse Einwirkung auf unsere Energieversorgungsanlagen haben würde.

Eine Untersuchung unter Leitung unserer Entwicklungsabteilung konnte ganz deutlich zeigen, dass die Thyristorsteuerung nicht wirtschaftlich sein könnte zufolge des niedrigen Leistungsfaktors. Messungen u. a. auf unserer Probelokomotive zeigten, dass die Störungen in den Fernsprechanlagen grösser waren als die vorgesehenen und dass die Kosten für Entstörungsausrüstung auf die Wirtschaftlichkeit ungünstig einwirken könnten.

Eine Voraussetzung für Neuanschaffung von Thyristor-Lokomotiven war also die Einführung von Phasenkompensierungsvorrichtungen. Eine Untersuchung der Möglichkeit,

diese im Umformerwerk oder im Fahrleitungsnetz anzuordnen ergab ein negatives Ergebnis in wirtschaftlicher Hinsicht. Es war deshalb notwendig, die Alternativlösung mit Kondensatorbatterien in den Lokomotiven zu wählen. Mit Rücksicht auf die Bedeutung der Störungen in den Fernmeldeanlagen wurde beschlossen, dass man Filter, die auch Kondensatoren enthalten, einbauen sollte.

Durch diesen Einbau von Filtern und Phasenkompensierung in den Lokomotiven wurden die negativen Faktoren zum grössten Teil ausgeglichen. Mit Rücksicht auf die Verbesserung des Leistungsfaktors im niedrigen Geschwindigkeitsbereich konnte die Anzahl in Serie geschaltene Thyristorbrücken von 3 auf 2 für jeden Fahrmotor verringert werden und dadurch auch der Gesamtpreis für die Lokomotiven. In den danach vorgenommenen wirtschaftlichen Beurteilungen kam eine Reihe ganz neue Betrachtungen hinzu.

Wenn es darum geht, die Energieversorgungsprobleme zu begrenzen, kann man auch andere Faktoren als nur den Leistungsfaktor berücksichtigen. Der Wirkungsgrad hat auch Bedeutung in diesem Zusammenhang. Elektrische Verluste in verschiedenen Komponenten mussten auch berücksichtigt werden.

Die Grösse des Leistungsfaktors bei verschiedenen Geschwindigkeiten ist auch nicht das einzige Motiv bei einer wirtschaftlichen Beurteilung der Eigenschaften einer Lokomotive. Es ist auch sehr wichtig, den Anteil im gesamten Fahrverlauf festzustellen, während welchem die Lokomotive innerhalb eines Geschwindigkeitsintervalles mit niedrigem oder hohem Leistungsfaktor arbeitet. Es zeigte sich auch bei näheren Untersuchungen, dass die Dimensionierung eines Filters ganz verschiedene Ergebnisse gab, abhängig von, ob das Schwergewicht auf Phasenkompensierung oder Störungsbegrenzung gelegt wurde. Die Rc2-Lokomotiven sind mit 2 Filtern ausgerüstet, einem Fernsprechstörfilter und einem Rundfunkstörfilter. Die Gesamtleistung ist etwa 770 kvar.

Damit alle Dimensionierungsfragen in einer richtigen wirtschaftlichen Weise für die zukünftigen Lokomotiven, in erster Linie die Rc2 und Rc3, behandelt werden konnten, wurde ein Beschluss gefasst über eine Optimierungsberechnung mit Lokgewicht, Lokleistung und Übersetzungsverhältnis als gegebenen Parametern.

Das wirtschaftliche Kalkül, das parallel zu und nach der Optimierungsberechnung ausgeführt wurde, hat ergeben, dass die Thyristor-Lokomotiven im Vergleich mit gleichzeitig offerierten Wechselstrom-Lokomotiven mit etwas niedrigerer Leistung für schwedische Verhältnisse und mit unserer Beurteilung der eingehenden Faktoren in wirtschaftlicher Hinsicht günstiger sind.

Folgende Faktoren sind in unseren wirtschaftlichen Kalkülen inbegriffen:

Positive Faktoren (Minderkosten)
- Höhere Betriebssicherheit
- Weniger Unterhaltungskosten
- Höhere Zugkraft
- Geringerer Energieverbrauch
- Automatische Steuerung

Negative Faktoren (Mehrkosten)
- Höherer Lokpreis
- Massnahmen gegen Signal- und Telestörungen

Anknüpfend an die früher genannten Vorteile, Erwartungen und Nachteile der Thyristor-Lokomotiven und an die Faktoren, die in den wirtschaftlichen Kalkülen inbegriffen sind, fragt man sich nun, welche Erfahrungen wir haben oder wie das wirtschaftliche Ergebnis geworden ist.

Die Vorteile infolge stufenloser Steuerung, individueller Motorsteuerung, geringerer Schleudergefahr und höherer Zugkraft bei höheren Geschhindigkeiten durch Feldschwächung haben zu erhöhter Adhäsionsausnutzung beigetragen und damit zu höherer Anhängelast und/oder Verkürzungen der Fahrzeit. Die wirtschaftlichen Vorteile hieraus kommen uns zweifellos zugute. Wir rechnen mit einer verbesserten Adhäsionsausnützung von 15—20 %.

Die Möglichkeiten einer zukünftigen Automatisierung der Zugführung sind zweifellos viel grösser bei Anwendung von Thyristor-Lokomotiven als was möglich wäre bei Anwendung von konventionellen Wechselstrom-Lokomotiven.

Die Preisentwicklung für Halbleiter- und Elektronik-Komponenten ist bisher günstig gewesen und dürfte in der Zukunft günstiger werden, womit jedoch nicht gesagt ist, dass die Preise aller Komponenten heute besonders niedrig sind.

Durch Berechnungen mit Hilfe einer Datenbearbeitungsanlage haben wir feststellen können, dass die Gesamtenergiekosten bei Verwendung von Thyristor-Lokomotiven geringer sind trotz schlechterem Leistungsfaktor.

Betreffs der Wartungskosten können wir das wirtschaftliche Ergebnis mit wünschenswerter Präzision leider nicht angeben, weil dieses von Kinderkrankheiten und Störungen anormalen Umfanges während des Anfangsstadiums und vom Arbeitseinsatz des Herstellers während der Garantiezeit in verschiedenen Richtungen beeinflusst wurde. Die Wartungskosten schliessen auch nicht Kosten für Wartungsarbeiten in den Ausbesserungswerken ein.

Ein Vergleich zwischen Wartungskosten für einige verschiedene und in diesem Zusammenhang interessante Loktypen hat ergeben, dass sowohl die Kosten pro Fahrzeugkilometer als die Kosten pro Bruttotonnenkilometer für die Thyristor-Lokomotiven weniger als 50 % der entsprechenden Kosten für die billigsten Wechselstrom-Lokomotiven betrugen. Ich möchte hier betonen, dass die Kosten für die Thyristor-Lokomotiven langsichtig wahrscheinlich höher sein werden (Anteil im Ausbesserungswerk), jedoch nicht die Wartungskosten für den elektrischen Teil.

Betreffs Zugänglichkeit, Ausnützung und zurückgelegter Kilometer pro Monat kann ich mich kurz fassen und sagen, dass die Thyristor-Lokomotiven in der Statistik zurzeit den ersten und zweiten Platz betreffend die Zugänglichkeit und Ausnützung und den dritten Platz betreffend die Kilometerzahl pro Monat belegen. Die ersten Plätze werden im letzten Fall von zwei verschiedenen Wechselstrom-Lokomotiven gehalten, die nur im Schnellzugdienst eingesetzt sind.

Was die Betriebsstörungen betrifft können wir heute festlegen, dass unser Ziel für alle Thyristor-Lokomotiven noch nicht erreicht ist. Während der letzten Monate war die Anzahl Störungen pro Million Lokkilometer ungefähr dieselbe für die Rc1-Lokomotiven wie für die Wechselstrom-Lokomotiven, mit denen der Vergleich gemacht wurde, als die Bestellung der ersten 20 Thyristor-Lokomotiven geplant wurde, weil die Rc2-Lokomotiven unser Ziel erreicht haben, d. h.

etwa 5 Betriebsstörungen pro eine Million Lok-km. Betriebsstörungen sind bei uns als solche definiert, die eine Verspätung (Mehrverspätung) von mindestens 15 Minuten verursachen oder den Einsatz einer Hilfslokomotive benötigen.

Ich möchte noch hinzufügen, dass wir eine erneute Wirtschaftsberechnung durchgeführt haben, bei der die Unsicherheit in der Beurteilung der Wartungskosten und der noch hohen Betriebsstörungskosten beachtet wurden. Auch diese Berechnung ergab ein positives Ergebnis für den Thyristorbetrieb.

Zuletzt möchte ich einige Fehler und Funktionsstörungsursachen, die bei den Thyristor-Lokomotiven aufgetreten sind, erwähnen, ebenso die Massnahmen, um die Störungen zu eliminieren. Fehler und Störungen können selbstverständlich in allen Anlagen und Apparaten auftreten. Ich werde mich doch nur darauf beschränken, die Störungen in den Stromrichtern und im Regelsystem zu erwähnen, die oft aufgetreten sind. Die meisten Punkte gelten für die ersten Lokomotiven (Rc1).

1. Stromrichter, Halbleiter:
   1.1 Ausfall von Dioden wegen Überspannungen von aussen und aus dem Fahrzeug.
   Diese Störungen sind mit neuen Ventilableitern eliminiert, die nach strengeren Forderungen erzeugt sind.
   1.2 Ausfall von Thyristoren wegen Überbelastung infolge Falschzündungen einzelner Thyristoren in Parallelschaltung. Die Ursachen dieser Störungen sind am häufigsten Überspannungen in den Steuerstromkreisen oder Defekte (Kurzschlüsse) der Stromverteilungsdrosseln.
   Folgende Massnahmen wurden ergriffen: Die Verteilungsdrosseln sind ausgetauscht oder umisoliert und Entstördioden sind in kritischen Punkten des Steuerstromsystems montiert worden.
   1.3 Durchgebrannte Sicherungen im Feldstromrichter wegen zu schneller Aussteuerung des Stromrichters bei Änderung der Fahrrichtung (Kurzschlüsse im Stromrichter).
   Verzögerungseinrichtungen für Aussteuerung des Stromrichters bei Fahrtrichtungsänderungen werden eingeführt.
2. Die elektronische Regelausrüstung:
   2.1 Unterbrechungen in verschiedenen Regelstromkreisen wegen schlechter Lötverbindungen.
   Das Lötverfahren ist verbessert, unter anderem wird Lötmaschine für Schaltkarten verwendet.
   2.2 Beeinflussung von Starkstromkabeln dadurch, dass erforderliche Abstände zwischen Kabeln verschiedener Systeme nicht immer eingehalten werden können. Die Kabel in den Regelkreisen sind effektiver abgeschirmt und in einigen Fällen wurde die Kabelverlegung geändert.
   2.3 Ausfall von einzelnen Komponenten in der Elektronik auf Grund unzureichenden Vermögens, den Beanspruchungen in einem elektrischen Fahrzeug zu entsprechen.
   Die elektronischen Komponenten müssen teilweise genauer gewählt werden mit Rücksicht auf das traktionäre Milieu.
   2.4 Unterbrechungen zwischen Schaltkarten und Anschlussplatten. Plattierte Kontakte wurden durch Stiftkontakte und Kabelschuhanschlüsse ersetzt.

Im letzten Abschnitt habe ich nur über Fehler und Funktionsstörungen gesprochen, und im Gegensatz dazu will ich festlegen, dass wir in traktionstechnischer Hinsicht mit den Thyristor-Lokomotiven sehr zufrieden sind.

R. Boileau, Soc. Nationale des Chemins de Fer Français (SNCF), Paris:

A. Die Anwendung der Leistungsthyristoren auf den Einphasen-Wechselstrom-Triebfahrzeugen

1. Die Versuchsanwendungen

Die SNCF hat auf gewissen Fahrzeugen von Serieherstellungen die versuchsweise Anwendung von Leistungsthyristoren unternommen. Diese werden nachstehend kurz erwähnt.

1.1 Verwendung der asymmetrischen Brücken

1.1.1 Triebwagen Z.6004 von 560 kW. Diese erste Anwendung geht auf das Jahr 1963 zurück. Die verwendeten Thyristoren sind vom Typ AEG-BTY 23 ausgelegt für 700 V Spitzenspannung und 100 A mittlerem Strom.

1.1.2 Triebwagen Z.6008 von 775 kW. Der Triebwagen besitzt einen einzigen Motor (Einmotordrehgestell), der durch vier asymmetrische Brücken gespeist wird. Die Brücken sind in Reihe geschaltet und werden beim Anfahren sukzessive entriegelt. Die ursprünglichen Alsthom-Thyristoren hatten eine Spitzenspannung von 600 V und einen mittleren Strom von 150 A. In der Folge wurden sie ersetzt durch Alsthom-Thyristoren ATS NC (1200 V — 150 A).

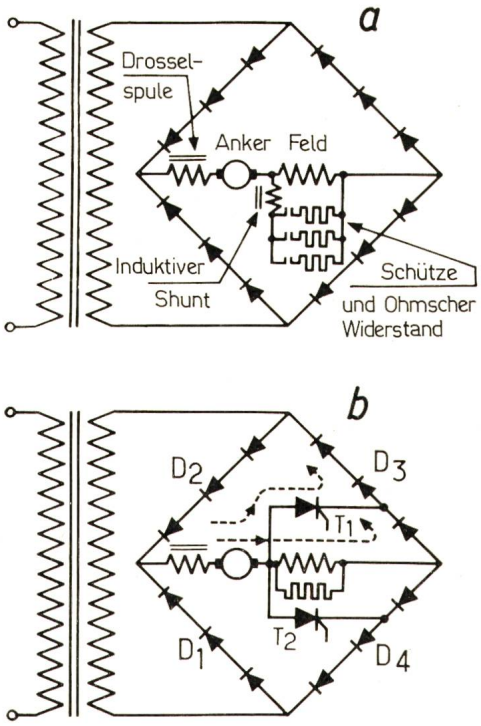


Fig. 1
Ausbildung der Feldschwächung
a mit der klassischen Methode: abgestufte Feldschwächung
b mit Thyristoren: kontinuierliche Feldschwächung

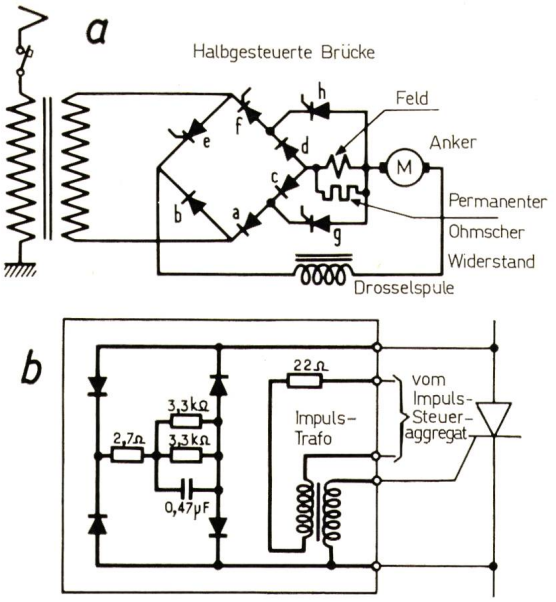


Fig. 2
Leistungsschema der Triebwagenzüge Z 6150 bis 6185

a Hauptschema
b Schema eines Impuls-Transformators / R–C Glied zum individuellen Schutz jedes Thyristors
Ausbildung der Brückenglieder:
Dioden NT 251, 1600 V, Scheitelwert, 250 A, Mittelwert:
a und *b:* 5 Ketten parallel – 3 Dioden in Serie pro Kette
c: 5 Dioden parallel
d: 4 Dioden parallel
Thyristoren TT 2100, 1000 V, Scheitelwert, 150 A, Mittelwert:
e und *f* (Spannungsregulierung): 4 Ketten parallel – 5 Thyristoren in Serie pro Kette
g und *h* (Feldschwächung): 3 Thyristoren parallel

1.1.3 Triebwagen Z.8002 von 1050 kW. Dieser Triebwagen besitzt eine Niederspannungssteuerung über Stufenhüpfer und Diodenbrücken, ergänzt durch eine asymmetrische Gleichrichterbrücke, welche zwischen den einzelnen Fahrstufen eine progressive Spannungsänderung zulässt. Die verwendeten Thyristoren sind vom Typ AEG T 95/600 (600 V Spitze, 95 A mittel).

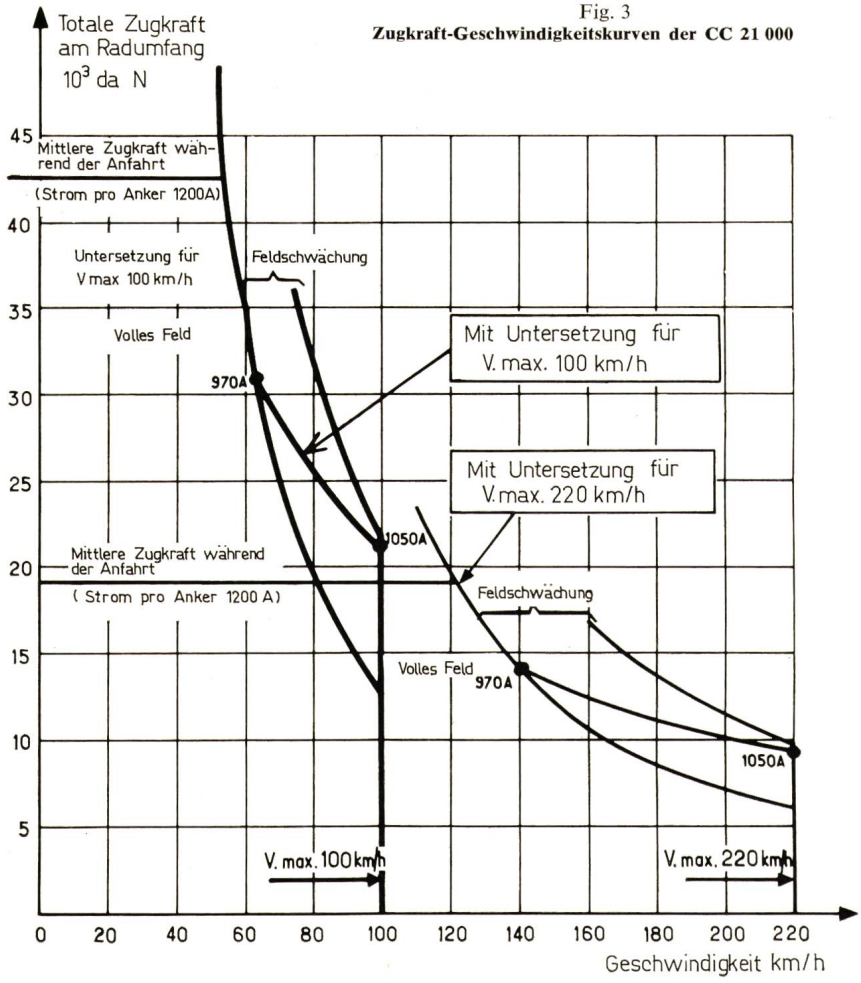
1.2 Die Anwendungen symmetrischer Brücken

1.2.1 Lokomotive BB 20006 von 1200 kW Bremsleistung. Diese Lokomotive erhielt Ende 1964 eine elektrische Rekuperationsbremsausrüstung, bestehend aus zwei symmetrischen, als Wandler arbeitende Brücken (wobei jeder Wandler mit je 2 Rotoren verbunden ist), sowie einem push-pull Thyristorgleichrichter zur Regulierung der Nebenschlusserregung der Triebmotoren. Die verwendeten Thyristoren sind vom Typ SW TSW 70 (600 V Spitze, 70 A mittel).

1.2.2 Lokomotive BB 16685 von 2580 kW. Diese mit Doppelgeschwindigkeits-Einmotordrehgestellen ausgerüstete Lokomotive hat 1966 zwei symmetrische Brücken (je eine pro Triebmotor) erhalten. Die Brücken gestatten eine progressive Regulierung der Triebmotorspannung im Fahrbetrieb. Im Rekuperationsbremsbetrieb arbeiten die Brücken als Wechselrichter. Die verwendeten Thyristoren sind von Alsthom, ihr Typ ist ATS 12, NC 1 (1200 V Spitze, 150 A mittel).

1.2.3 Triebwagen Z 8001 von 1050 kW. Die zwei Triebmotoren sind parallel geschaltet und durch eine einzige Brücke gespeist. Diese besteht aus Siemens-Scheibenthyristoren für 900 V Spitze und 550 A mittel. Die Betätigungseinrichtungen der Gitter erlauben die Arbeitsweise entweder als symmetrische oder als asymmetrische Brücke zu wählen; die Thyristoren deren Zündung nicht verzögert wird, verhalten sich dann wie Dioden.

Fig. 3
Zugkraft-Geschwindigkeitskurven der CC 21 000



1.3 Vorrichtung zur kontinuierlichen Regulierung der Feldschwächung

Diese, auf Triebwagen Z. 6009 mit Erfolg ausprobierte Vorrichtung wurde für die gegenwärtig im Bau befindlichen Triebwagen der Serie Z. 6121–6185 vorgesehen. Fig. 1 zeigt die Wirkungsweise der kontinuierlichen Feldschwächung: Die Thyristoren T1 und T2 werden während dem Stromdurchgang der Dioden D1–D3, bzw. D2–D4 erregt. Die Regulierung der Feldschwächung ergibt sich durch die Veränderung des Zündwinkels der Thyristoren.

2. Die Anwendung bei den neuen Fahrzeugserien

2.1 Vorortstriebwagen Z. 6121–6181

Diese Triebwagen besitzen ein Einmotordrehgestell mit einem 615 kW Triebmotor, der im Dauerbetrieb 780 A bei 850 V aufnimmt.

Bei den Triebwagen Z. 6121–6149 erfolgt die Spannungsregulierung auf klassische Art durch

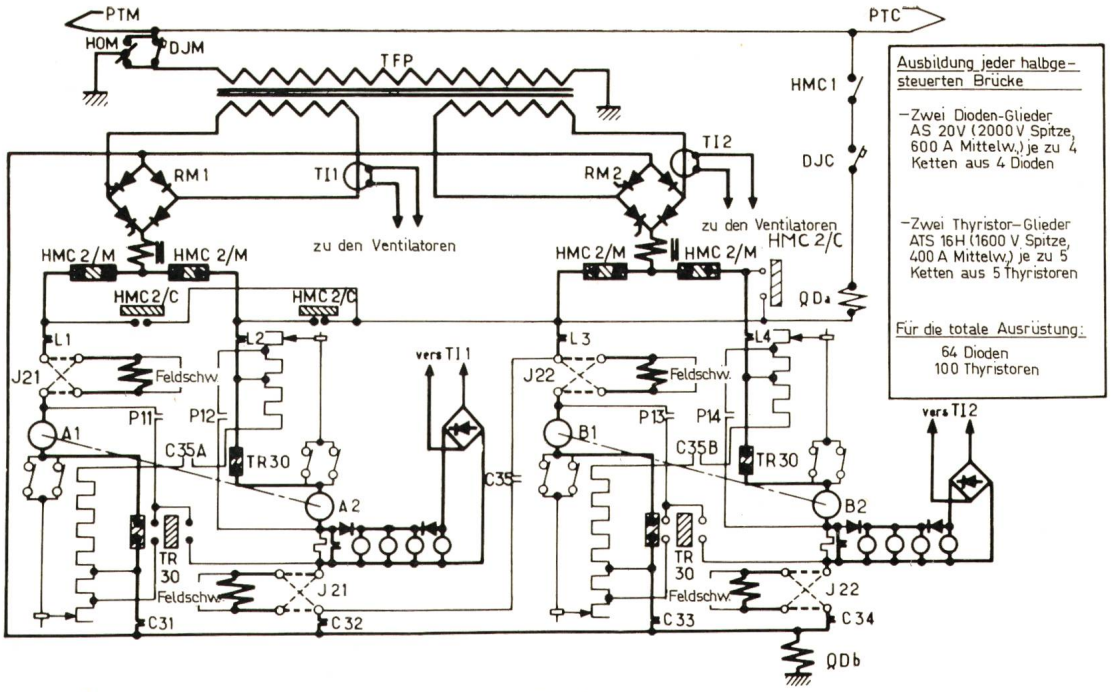


Fig. 4
Leistungsschema einer CC 21 000

DJM Einphasen-Hauptschalter; TFP Haupttransformator; RM1/RM2 Hauptstromrichter; HMC1 Trennschalter; DJC Gleichstrom-Schnellschalter; HMC2 Umschalter Einphasen-Gleichstrom
Die stark gezeichneten Linien entsprechen der Einphasen-Traktion (Fahren beim Einphasenbetrieb)

Stufenschalter; die Feldschwächung des Motors geschieht auf kontinuierliche Art durch die bereits erwähnte Vorrichtung mit Thyristoren. Jeder Shuntzweig besteht aus zwei parallel geschalteten Thyristoren der Type Alsthom ATS 5H (500 V Spitze, 400 A mittel). Die Triebwagen Z. 6150 bis 6185 besitzen eine Spannungsregulierung durch asymmetrische Thyristorbrücke und eine kontinuierliche Feldschwächung durch Thyristoren wie in Fig. 2 dargestellt.

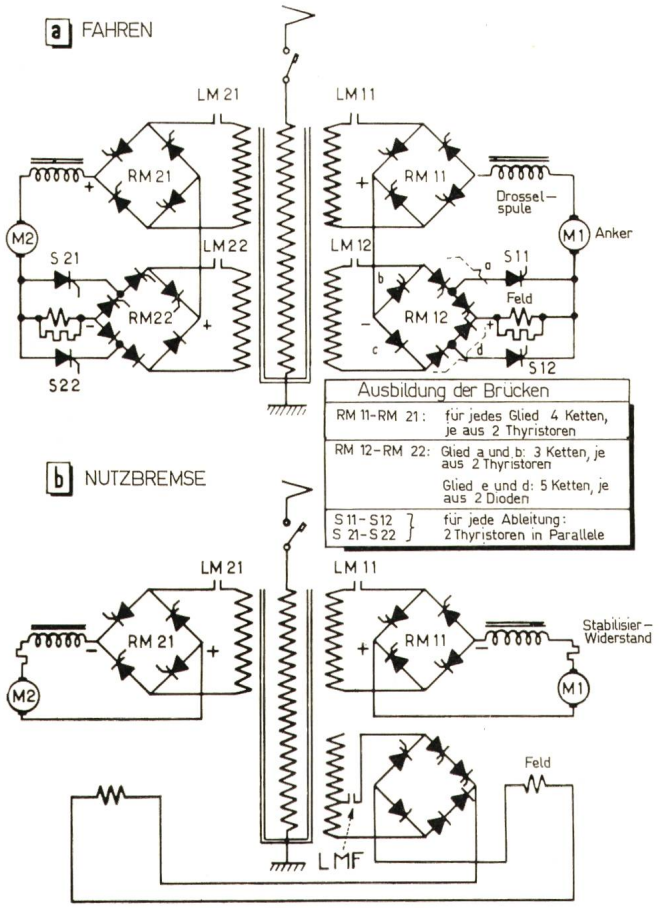


Fig. 5
Starkstrom Prinzipschema einer BB 15 000

Die Triebwagen Z. 6150 bis 6185 besitzen eine Spannungsregulierung durch asymmetrische Thyristorbrücke und eine kontinuierliche Feldschwächung durch Thyristoren wie in Fig. 2 dargestellt.

Die auf dem Dach montierten Halbleiter und die natürliche Kühlung entsprechen folgenden Bestimmungen:

Dioden: SILEC NT 251, 1600 V Spitze — 250 A mittel
Thyristoren: SILEC TT 2100, 1000 V Spitze — 150 A mittel

Alle Triebwagen sind ungeachtet ihrer Ausrüstung untereinander kuppelbar; sie besitzen alle eine automatische gesteuerte Geschwindigkeitsregulierung mit Geschwindigkeitsbegrenzung auf den vorgeschriebenen Wert.

2.2 Zweistromlokomotiven CC 21001–21002

Diese Lokomotiven mit einer Leistung von 5900 kW besitzen zwei Doppelgeschwindigkeits-Einmotordrehgestelle (100 und 200 km/h) (Fig. 3).

Jedes Drehgestell ist mit einem selbstventilierten Tandemmotor versehen, deren zwei parallel geschaltete Rotoren über eine asymmetrische Brücke mit Einphasenwechselstrom gespeist werden (Fig. 4). Im Gleichstrombetrieb nimmt jeder Rotor 1050 A bei 1500 V auf. Alle Halbleiter sind vom Scheiben-Typ und entsprechen folgenden Daten: Alsthom, Typ AS 20 V, 2000 V Spitze, 600 A mittel. Thyristoren: Alsthom Typ ATS 16 H, 1600 V Spitze, 400 A mittel.

2.3 Einphasen-Wechselstromlokomotiven BB 15 000

Diese Lokomotiven, mit einer Leistung von 4650 kW, deren erste Einheit sich gegenwärtig im Bau befindet, werden mit zwei Einmotorendrehgestellen für eine maximale Geschwindigkeit von 180 km/h ausgerüstet.

Jedes Drehgestell besitzt einen selbstventilierten, durch zwei Gleichrichterbrücken gespeisten Motor (Fig. 5). Die Brücken,

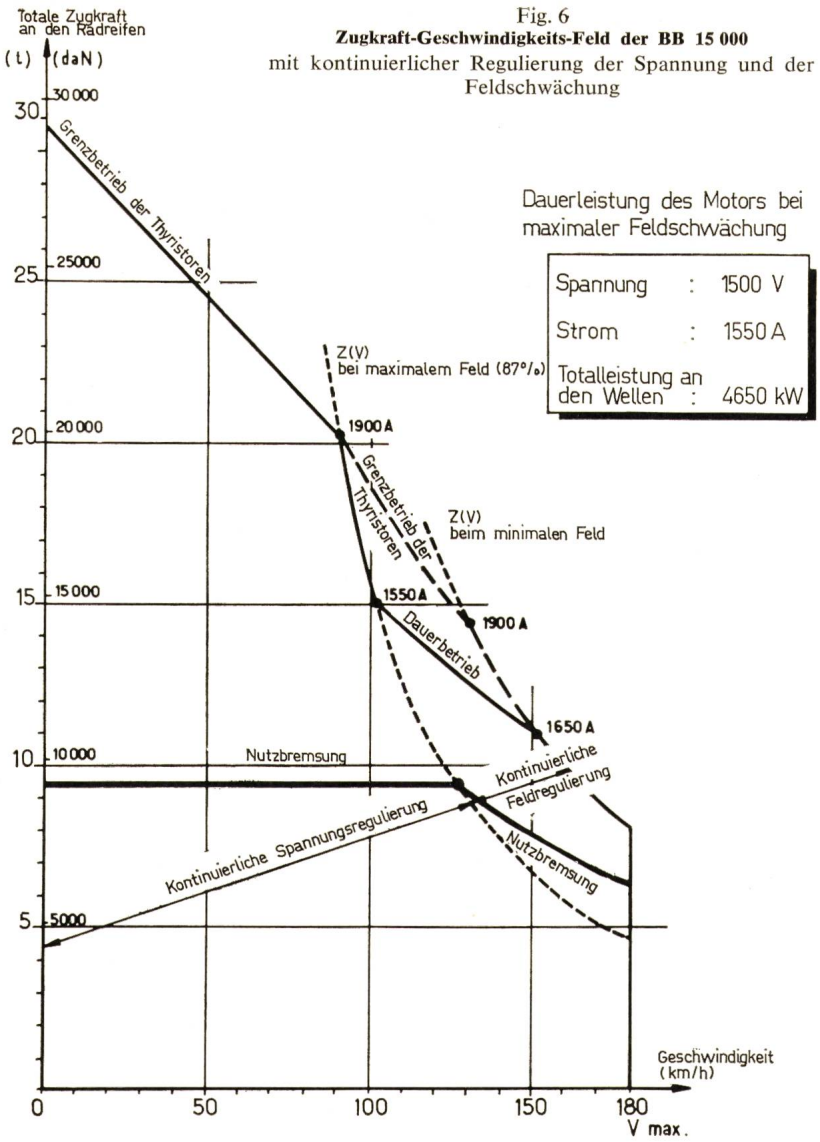


Fig. 6
Zugkraft-Geschwindigkeits-Feld der BB 15 000
mit kontinuierlicher Regulierung der Spannung und der Feldschwächung

eine symmetrische und eine asymmetrische sind in Reihe geschaltet und werden bei Anfahrten nacheinander entriegelt. Die kontinuierlich regulierbare Feldschwächung wird durch Thyristoren bewerkstelligt. Im Dauerbetrieb nimmt jeder Motor 1500 A bei 1500 V auf (Fig. 6).

Die Rekuperationsbremsung erfolgt unter Verwendung der symmetrischen Brücken als Wandler, wogegen eine der asymmetrischen Brücken die Fremderregung der Rotoren übernimmt.

Die Halbleiter, alle in Scheiben-Ausführung, wiesen folgende Daten auf:

Dioden: Westinghouse, Typ 982 ZM, 1600 V Spitze — 550 A mittel.

Thyristoren: Westinghouse, Typ 282 ZM, 1600 V Spitze — 550 A mittel.

Die Steuerung der Lokomotive erfolgt automatisch. Der Führer stellt auf dem Steuerrad lediglich die Zugkraft und die gewünschte Geschwindigkeit ein.

3. Ergebnisse der verschiedenen Ausführungen

3.1 Verhalten im Betrieb

Alle erwähnten Ausrüstungen haben nach gewissen anfänglichen Einstellungen vollauf befriedigt und sind noch alle im Betrieb.

3.2 Steigerung der Thyristorleistungen

Es sei hier nur kurz darauf hingewiesen, dass die erste Anwendung im Jahre 1963 36 Dioden und 48 Thyristoren für eine Leistung von 560 kW benötigte, wogegen die 1969 in Betrieb genommenen CC 21001/21002 für eine Leistung von 5900 kW 64 Dioden und 100 Thyristoren besitzen.

3.3 Leistungsfaktor

Wie aus Fig. 7a hervorgeht, wird der Leistungsfaktor bei der Spannungsregulierung durch Thyristoren gegenüber der Regulierung mit Stufenschalter verschlechtert. Um diesem Nachteil abzuhelfen, ist es durch Inkaufnahme einer Komplikation der Ausrüstung möglich, sich mehreren in Reihe geschalteten Brücken zu bedienen, wie wir dies auf dem Triebwagen Z. 6008 vorgenommen haben. Macht man jedoch weiten Gebrauch der Feldschwächung, wie es bei der SNCF üblich ist, so befindet sich die Spannungsregulierzone durch Thyristoren ausserhalb der normalen Reisegeschwindigkeiten der Fahrzeuge (Fig. 7b). Es ist somit möglich, die Regulierung durch eine oder zwei Brücken vorzunehmen.

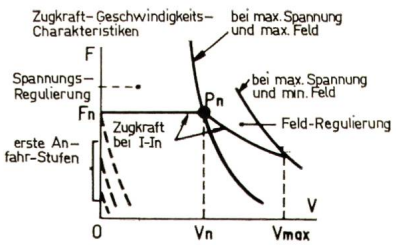
3.4 Oberwellen

Das Problem der Oberwellen ist äusserst komplex und die praktischen Resultate stimmen nicht immer mit den errechneten, theoretischen Werten überein. Wir erwähnen hier lediglich die auf dem Prüfstand vorgenommenen Versuche mit der BB Lokomotive 16685. Diese Versuche bestanden im wesentlichen in der Ermittlung des absoluten Wertes des primären Oberwellenstromes im Laufe einer Anfahrt bei konstantem Strom und unter Verwendung der folgenden drei Regulierarten: Hochspannungsstufenschalter, symmetrische Brücke und asymmetrische Brücke. Die registrierten, maximalen Werte sind in Fig. 8 wiedergegeben. Aus ihr geht hervor, dass die asymmetrischen und die symmetrischen Schaltungen sozusagen gleiche Resultate ergeben, mit Ausnahme der dritten Oberwelle, die bei der asymmetrischen Schaltung gegenüber der symmetrischen Schaltung beinahe den doppelten Wert annimmt. Die Oberwellen gerader Ordnungen, die theoretisch nicht erscheinen sollten, waren bei diesem Versuch praktisch auch nicht bemerkbar (nur ca. 1 % des Wertes der nächstliegenden Oberwellen ungerader Ordnung). Dies bedingt jedoch eine einwandfreie Symmetrie der Thyristorzündung in den positiven und negativen Strombereichen. Wir erachten es hiefür als eine Grundbedingung, dass der Symmetriefehler 1 Grad nicht übersteigen darf. Bei gewissen Ausrüstungen, bei welchen diese Bedingung nicht erfüllt war, wurden Oberwellen gerader Ordnung gemessen, deren Amplitude 30 % bis 50 % derjenigen der nächstgelegenen Oberwellen ungerader Ordnung entsprach.

3.5 Torsteuerung

Die Torimpulse müssen eine genügende Leistung aufweisen. Die Erfahrung hat erwiesen, dass die zuverlässigste Vorrichtung hiezu darin besteht, eine (während dem Nulldurch-

gang der Wechselspannung aufgebaute) Kapazität in die Primärwicklungen der Impulstransformatoren zu entladen. Auf diese Weise ergeben sich Impulse von ca. 200 µs.



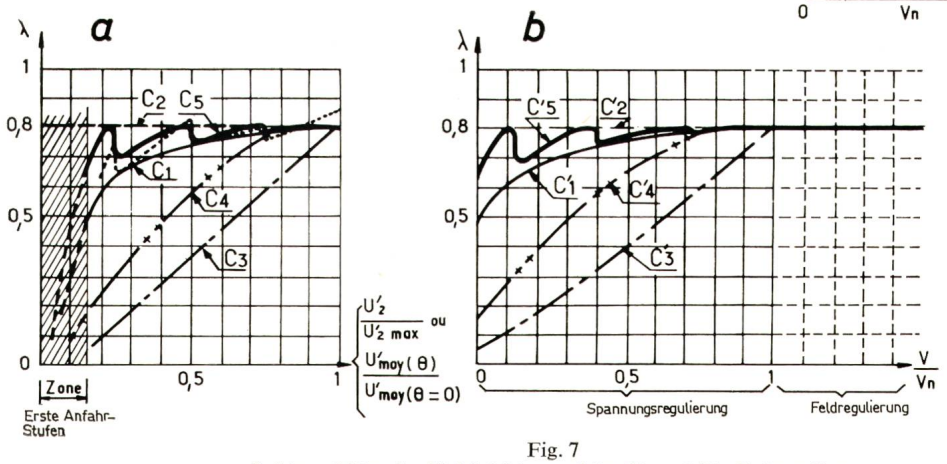


Fig. 7
Leistungsfaktor der Gleichrichter- und der Stromrichter-Lokomotiven

$$\lambda = \frac{P}{S} = \frac{U \text{ mittel. nI Motor}}{U_1 \quad I_1} = \frac{U \text{ mittel. nI Motor}}{U_2 \quad I_2}$$

Beim Nennstrom der Motoren:
a in Funktion der Leerlaufspannung bei verschiedenen Stufen oder beim Äquivalent in Winkelregelung
b in Funktion der Geschwindigkeit

Einfacher Gleichrichter mit Stufenschalter { Gerade C2 und C'2 mit Niederspannungs-Regulierung — — — Kurven C1 und C'1 mit Hochspannungs-Regulierung ———

Vollgesteuerter Stromrichter: Gerade C3 und Kurve C'3 — - —
Halbgesteuerter Stromrichter: Kurven C4 und C'4 — + + —
Stromrichter mit 4 halbgesteuerten Brücken in Serie: Kurven C5 und C'5 ———

(aufgenommene Kurven auf dem Triebwagen Z 6008)

Um störenden Einflüssen vorzubeugen und die Verkabelung zu erleichtern, sind die Impulstransformatoren in unmittelbarer Nähe der zu steuernden Thyristoren aufzustellen.

Es ist ausserdem angezeigt, einen Spannungsabfalldetektor vorzusehen, der bei sinkender Netzspannung die Impulsgebervorrichtung kurzschliesst, bevor die Impulse zu schwach oder unregelmässig ausfallen. Diese Massnahme soll vermeiden, dass die Thyristoren auf unzuverlässige Art zünden, was zu Überlastung der am raschesten zündenden Ketten führen kann.

Schliesslich sei noch darauf hingewiesen, dass die als Phasenreferenz dienende Spannung zwecks möglichst genauer Einhaltung der Sinusform einwandfrei filtriert werden muss (Fig. 9).

3.6 Ultrarapide Schutzvorrichtung

Eine elektronische Stromkontrollvorrichtung in Verbindung mit einem thyristorgesteuerten äusserst empfindlichen und unter neutralem Gas wirkenden Lamellenrelais (Reedrelais) bewirkt die Blockierung der Brücke nach dem der festgelegten Stromschwelle folgenden Nulldurchgang der Wechselspannung (Fig. 10).

Es liegt auf der Hand, dass dieser Schutz bei Rekuperationsbremsung nicht wirksam sein kann, da die Unterdrückung der Zündimpulse augenblicklich das «Kippen» des Wechselrichters bewirkt.

3.7 Unstabilität der asymmetrischen Brücke

Fig. 11 erklärt diese Erscheinung.

Am Ende des Nulldurchganges der Wechselspannung, d.h. während der Leitdauer des Thyristors Th 1 und der Diode D1 (Fig. 11a), nimmt die durch den Thyristor Th1 abgegebene Stromstärke ab und die elektromotorische Kraft der Glättungsdrosselspule ruft die Stromführung in der Diode D2 her-

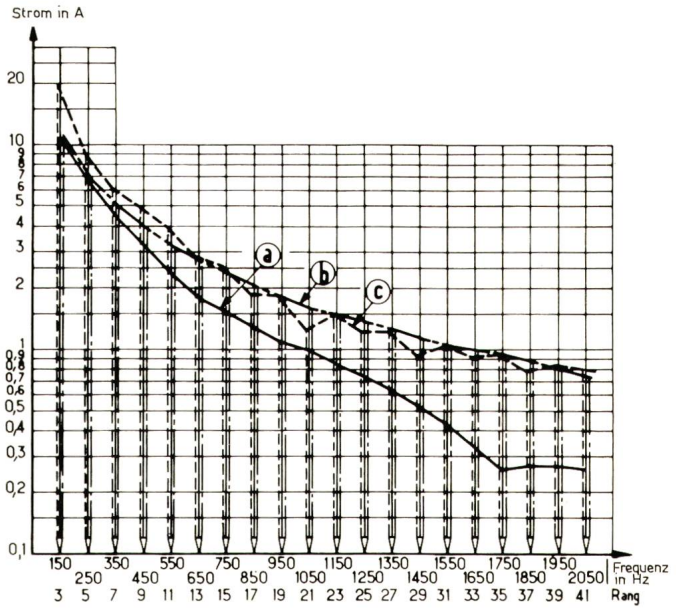


Fig. 8
Messungen auf dem Versuchsstand von Vitry mit der Lokomotive BB 16 685
(mit einer einzigen der zwei Gleichrichter-Motor-Gruppen im Betrieb)
a Stufenregulierung; *b* Vollsteuerung; *c* Halbsteuerung
Die *Maximalwerte* der Oberwellenströme wurden während dem Anfahren gemessen und zwar mit etwa konstantem Motorstrom (zwischen 900 und 1000 A, d. h. mit ¾ des Nennstromes von 1250 A)
Transformer-Übersetzung $U_1/U_2 = 15{,}9$

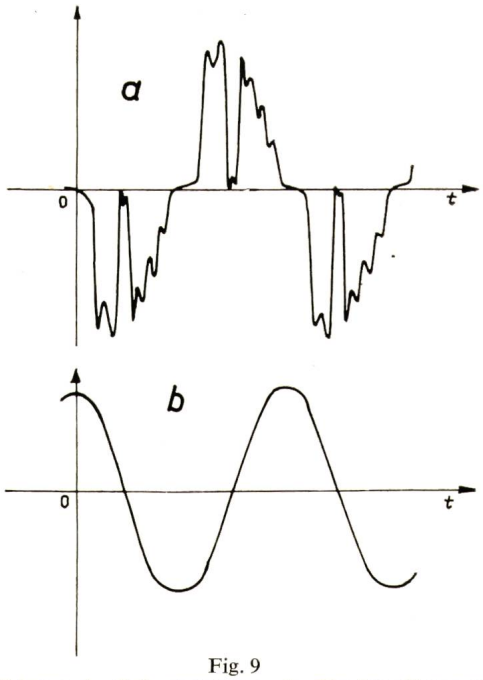


Fig. 9
Filtrierung der Referenzspannung der Thyristor-Steuerung
a Klemmenspannung der tertiären Wicklung des Transformers (Speisung der Hilfsbetriebe)
b filtrierte Spannung zur Steuerung der Thyristoren

vor (Leerlaufwirkung). Daraus ergibt sich eine Umschaltung des Stromes von Th1 auf D2 (Fig. 11b). Während der Dauer dieser Umschaltung ist die Spannung zwischen den Punkten A und B praktisch gleich Null. Die Induktionsspannung $1 \frac{di}{dt}$ des Transformators und seine elektromotorische Kraft gleichen sich aus (Fig. 11c).

Erfolgt die Zündimpulsion des Thyristors Th2 zwischen den Punkten M und P, so kann der Thyristor nicht zünden, da seine Klemmen in diesem Moment spannungslos sind.

Die Verschiebung des Zündimpulses, zwecks Verstärkung der gleichgerichteten Spannung, bewirkt solange einen Span-

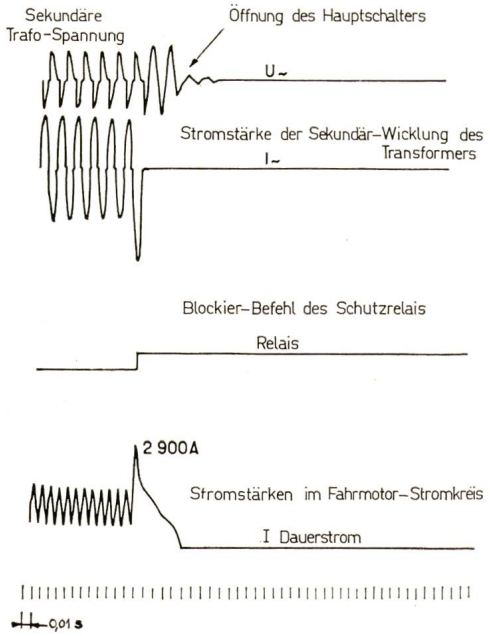


Fig. 10
Ultraschnellschutz des Fahrkreises durch Blockierung der Thyristoren

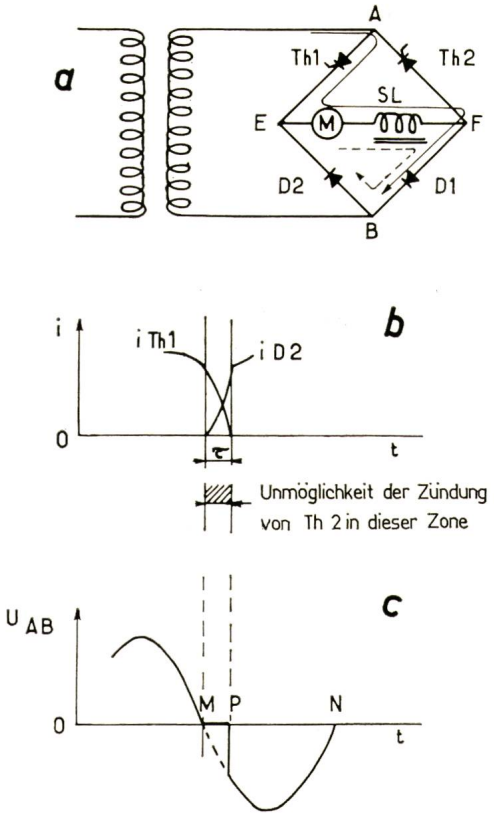


Fig. 11
Labilitäts-Gefahr der asymmetrischen Steuerung
(für kleine Zündwinkel)
a Schema der asymmetrischen Brücke
Weg des Motorstromes: —— während der Leitung von Th 1 und D 1; - - - während der Leerlaufperiode
b Strom im blockierten Thyristor und in der am Anfang leitenden Diode
c sekundäre Spannung

nungsanstieg, bis die Thyristor-Diodenumschaltung stattfindet. Die mittlere, gleichgerichtete Spannung fällt somit auf ihren halben Nominalwert.

Um diesem Nachteil entgegenzutreten, muss die Zündimpulsabgabe folgende Bedingungen erfüllen:

Zwischen den Punkten A und B muss eine genügend hohe Spannung herrschen. Das Spannungsbild muss dem Zündsatz über einen Potentialtransformator übermittelt werden, wobei der Potentialtransformator an den Klemmen des Haupttransformators angeschlossen ist.

3.8 Stromkreise mit sehr grossen Zeitkonstanten

Speist eine gesteuerte Brücke einen stark induktiven Stromkreis (z.B. Triebmotorerregerwicklungen) mit sehr

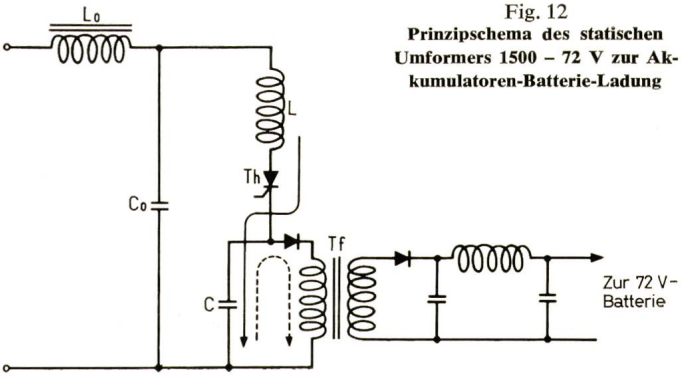


Fig. 12
Prinzipschema des statischen Umformers 1500 – 72 V zur Akkumulatoren-Batterie-Ladung

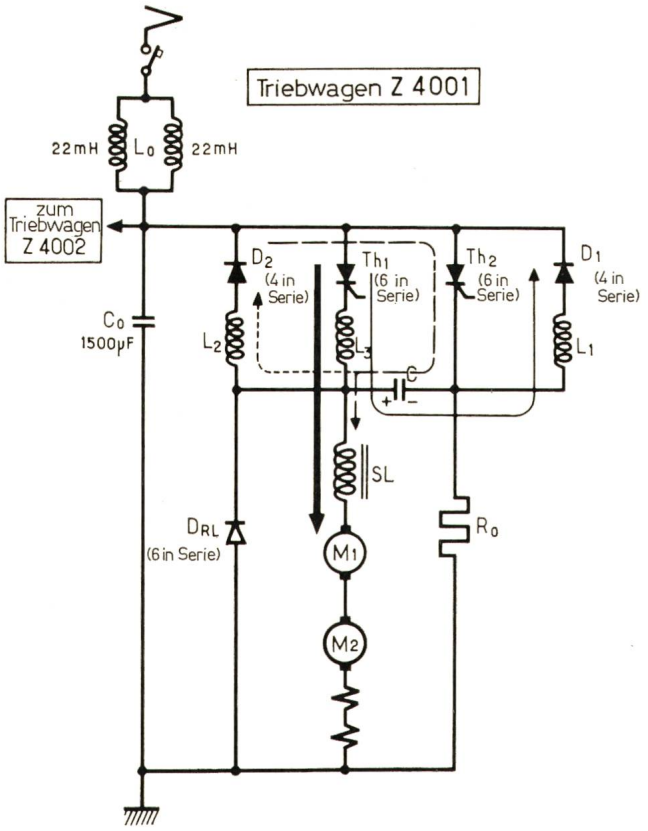


Fig. 13
Prinzipschema der Triebwagen Z 4001–4002
Thyristortyp Th 1: 229 Z – 250 A mittel. – 1000 V Spitze ("Scheibenthyristor CDSW)
Thyristortyp Th 2: 228 Z – 175 A mittel. – 1000 V Spitze ("Scheibenthyristor CDSW)
Diodentyp D_{RL}:NT 253 – 250 A mittel. – 2000 V Spitze ("Einschraubtyp Silec)
Diodentyp D 1 – D 2: 12C 140 – 200 A mittel. – 1400 V ("Einschraubtyp SW)

kleinem Zündwinkel, so kann es vorkommen, dass die Zündimpulsion verschwindet, bevor der Thyristorhaltestrom den gewünschten Wert erreicht hat.

Um diesem Umstand vorzubeugen, genügt es, die Brücke bei den niedrigen Spannungen entweder über einen angemessenen Widerstand oder anhand eines RC-Stromkreises zu laden.

3.9 Arbeitsweise des Schnellschalters bei symmetrischer Brücke

Bei niedrigen Werten der gleichgerichteten Spannung (bei Anfahrten) ist die primäre Stromstärke gegenüber der Spannung praktisch um 90° verschoben. Beim Öffnen des Hochspannungschnellschalters fällt bei maximaler Spannung der Strom auf Null ab. In Anbetracht aber der rechteckigen Form der Intensität, bleibt der Lichtbogen zwischen den Schaltkontakten bestehen. Um diesen Nachteil zu umgehen und gesetztenfalls, dass die Speisung der Haltespule des Hochspannungsschnellschalters aussetzt, müssen die Steuerkreise des Thyristors blockiert werden können.

3.10 Schleuderschutz

Auf allen unseren neuesten Thyristor-Triebfahrzeugen wird das Schleudern behoben durch eine verzögerte Zündung der den schleudernden Motor speisenden Thyristoren. Die Rückkehr zur ursprünglichen Einstellung erfolgt allmählich nach vollständig abgebautem Schleudern der Räder.

B. Die Anwendung der Thyristoren auf Gleichstrom-Triebfahrzeugen

1. Statische Umformer Gleichstrom — Gleichstrom für Hilfsbetriebsstromkreise

1.1 Alsthom Umformer 1500 V — 72 V für Batterieladung

Bei uns sind statische Umformer von 2–3 kW im Betrieb. Fig. 12 zeigt die verschiedenen Prinzipschemas. Es handelt sich hier um Einheiten mit konstanter Leitdauer und variabler Impulsfrequenz.

Der 20 kW-Umformer der Lokomotiven CC 21 000 und 6500 (61 Einheiten), welcher mit den früheren eine gewisse Ähnlichkeit aufweist (insbesonders bezüglich der Anwesenheit eines Transformators), arbeitet jedoch mit konstanter Frequenz und variabler Leitdauer. Er dient der Batterieladung unter 30 V und 72 V und der Triebmotorerregung bei Widerstandsbremsung.

1.2 Jeumont-Schneider-Chopper Leistung 15 kW für die Steuerung von Motor-Ventilatorgruppen

Dieser Chopper ist ein Vorbild des weiter unten aufgeführten Leistungschoppers der Z 4001–4002.

2. Die Experimental-Leistungs-Chopper

Wir haben noch keine Fahrzeuge serienhaft mit Chopper ausgerüstet. Auf umgebauten Triebfahrzeugen erproben wir jedoch verschiedene, uns von den Herstellern unterbreitete Vorschläge.

2.1 Die Jeumont-Schneider-Chopper der Triebwagen Z 4001–4002

Jeder dieser Triebwagen mit einer Leistung von 375 kW erhielt einen Chopper für konstante Frequenz von 250 Hz, dessen Prinzipschema aus Fig. 13 ersichtlich ist.

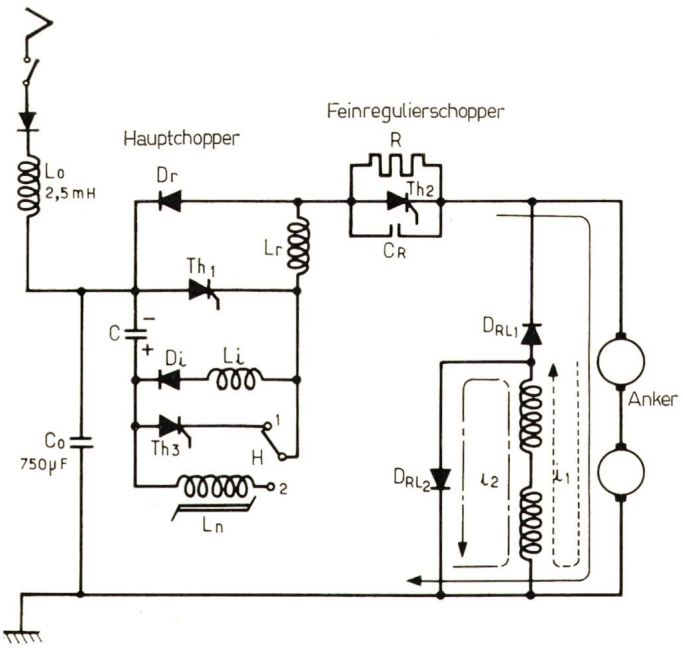


Fig. 14
Prinzipschema des «Choppers» des Triebwagens Z 4203
Umschalter H auf Stellung 1: Betrieb mit konstanter Frequenz
Umschalter H auf Stellung 2: Betrieb mit variabler Frequenz (in diesem Fall wird der Feinregulier-«Chopper» vom Schutz C_R kurzgeschlossen)

Vorerst wurden die beiden Triebwagen einzeln ausprobiert. Heute sind sie zu einer einzigen, untrennbaren Einheit verkuppelt. Diese Einheit besitzt einen gemeinsamen Eingangsfilter für beide zueinander im Gegentakt arbeitenden Ausrüstungen. Der Chopper einer dieser Triebwagen wurde sowohl im Widerstandsbremsbetrieb wie auch im Rekuperationsbetrieb ausprobiert.

2.2 BBC-CEM-Chopper des Triebwagens Z 4203

Dieser Chopper von 450 kW Leistung, dessen Prinzipschema in Fig. 14 wiedergegeben ist, speist die zwei Triebmotoren eines gleichen Drehgestells.

Er kann auf zwei verschiedene, unten angeführte Arten arbeiten:

— *bei variabler Frequenz von 30 bis 1500 Hz,*
mit konstanter Leitdauer, womit eine korrekte, während der Leitdauer des Hauptthyristors erfolgende Ladung des Löschkondensators garantiert wird.

— *bei einer Frequenz von 600 Hz,*
mit Einstellmöglichkeit, die es anhand einer gegenüber dem Hauptchopper verspäteten Zündung gestattet, ebenfalls niedrige Spannungen zu erreichen, wobei der Hauptthyristor trotzdem über eine genügend lange Leitdauer verfügt, um die volle Ladung der Löschkapazität zu garantieren.

Überdies besitzt dieser Chopper noch folgende Besonderheiten:

— Die Stromentnahme am gemeinsamen Punkt der Diode Dr und die Induktivität verhindert die Entstehung der auf die Triebmotoren übertragene Spannungsspitze beim Löschen der Hauptthyristoren, d.h. im Moment wo sich die Löschkapazitätsspannung und die Linienspannung addieren.

— Die Statorverbindungen bewirken automatisch die Feldschwächung.

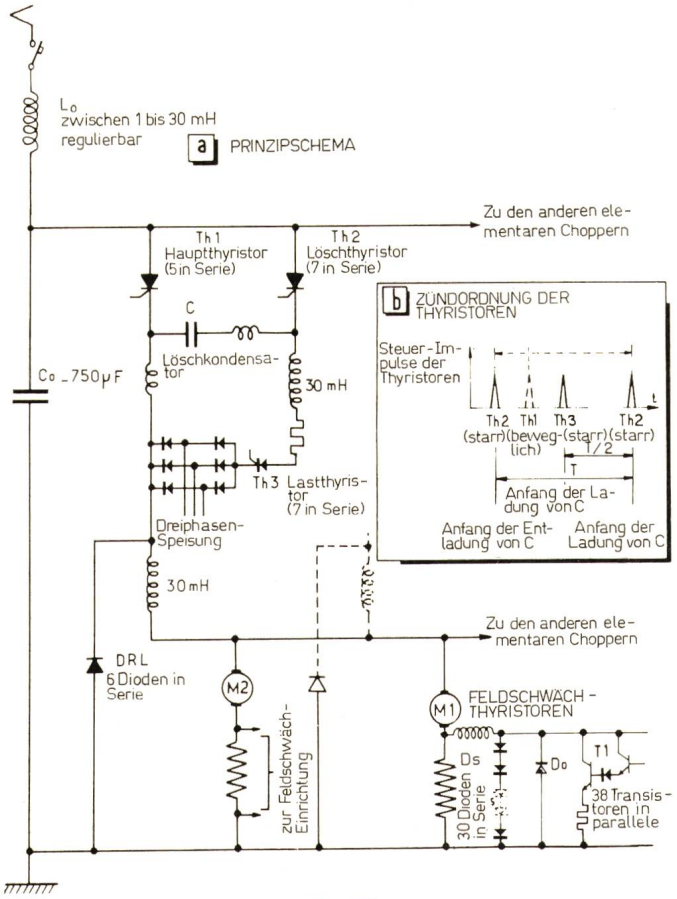


Fig. 15
Schema eines elementaren «Choppers» der BB 17
Typ der Thyristoren der Ketten Th 1 – Th 2 – Th 3: Scheibentyp 273 Z (CDSW) – 1000 V Spitze – 200 A mittel.;
Typ der Leerlaufdioden DRL: ST8 Hz (SILEC). 1600 V, Scheitelwert, 160 A im Mittel

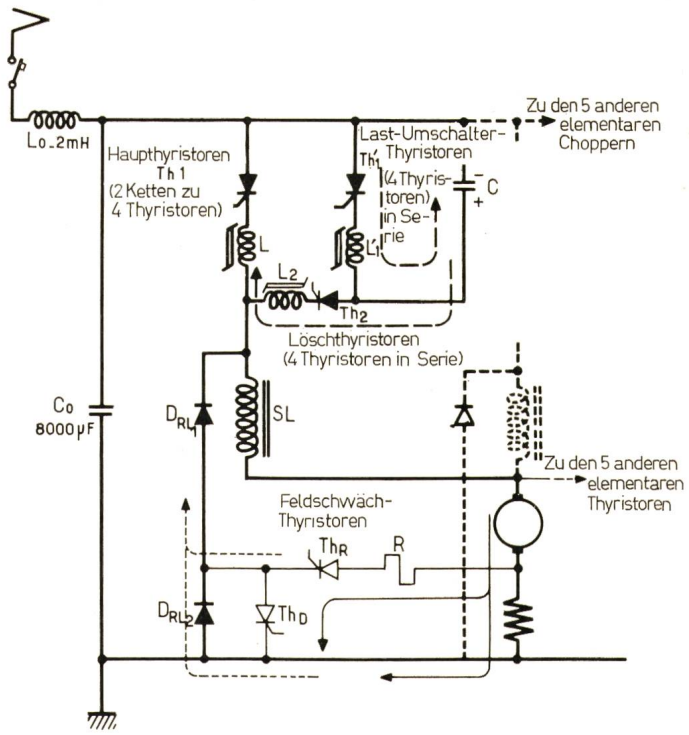


Fig. 16
Mehrphasen «Chopper» für 4400 kW
Schema eines elementaren «Choppers»
Typ der «flachen Thyristoren» 229 Z – 250 A im Mittel – 1000 V

2.3 Oerlikon-Chopper der Lokomotive BB 17

Die komplette Ausrüstung umfasst zwei Mehrphasen-Chopper, wovon jeder aus sechs Chopperelementen besteht. Das Prinzipschema ist aus Fig. 15 ersichtlich. Jeder Mehrphasen-Chopper speist die beiden Triebmotoren eines gleichen Drehgestells. Jedes Chopperelement arbeitet mit einer konstanten Frequenz von 500 Hz. Aufladung der Löschkapazität erfolgt aus einer besonderen Stromquelle.

2.4 Jeumont-Schneider-Chopper von 4400 kW

In absehbarer Zeit wird ein Mehrphasen-Chopper von 4400 kW in den Kasten einer ausrangierten Lokomotive eingebaut werden. Dieser aus sechs Chopperelementen bestehende, schematisch in Fig. 16 dargestellte Chopper soll dazu dienen, eine andere Gleichstromlokomotive mit variabler Spannung zu speisen. Mit dieser Komposition sollen weitgehende Versuchsfahrten im Streckenbetrieb unternommen werden.

Jeder Einzelchopper arbeitet mit einer konstanten Frequenz von 300 Hz. Es besteht jedoch die Möglichkeit, beim Anfahrtsbeginn den Chopper mit untergeordneten Frequenzen zu betreiben.

Die Motorfeldschwächung kann ebenfalls anhand von Thyristoren erreicht werden. In diesem Fall erfolgt die Zündung während der Leitdauer der Hauptthyristoren. In den Versuchswerkstätten von Vitry hat eine, aus drei Chopperelementen bestehende Einheit von 2200 kW bereits sehr befriedigende und aufschlussreiche Resultate ergeben.

3. Resultate

Wie bereits erwähnt, sind wir gegenwärtig noch in der Entwicklungsphase, und es wäre verfrüht, jetzt schon definitive Schlüsse ziehen zu wollen. Die ersten Resultate sind nichtsdestoweniger sehr befriedigend, und wir gewärtigen noch eine reiche Belehrung durch die Streckenversuche mit dem 4400 kW Chopper, insbesonders was die bestmögliche Bemessung des Eingangsfilters, die Beeinflussung durch die variable Impedanz der Fahrleitung, die Wahl der Arbeitsfrequenz, die Schutzmassnahmen usw. anbelangt.

3. Diskussionsbeitrag

zu den Referaten 4...6

Kompensationsanlagen zum Ausgleich des erhöhten Blindleistungsbedarfes anschnittgesteuerter elektrischer Triebfahrzeuge

Von *H. H. Schäfer,* Frankfurt/M

Für die konventionellen Wechselstrom-Triebfahrzeuge haben wir bei der Deutschen Bundesbahn eingehende Messungen über den Leistungsfaktor mit Hilfe unserer Messwagen oder durch Einsatz von genauen Wirk- und Blindleistungszählern in den Unterwerken durchgeführt. Dabei haben wir für Lokomotiven im Streckendienst einen Leistungsfaktor von 0,945 und für Lokomotiven mit Wendezügen im Nahverkehrseinsatz einen Leistungsfaktor von 0,9 ermittelt. Der Leistungsfaktor an den Generatorklemmen der Kraftwerke der Bahnstromversorgung liegt jedoch tiefer, und zwar im Mittel bei 0,85 bis 0,86, wobei die Verschlechterung im wesentlichen durch die Durchgangsreaktanz der Kraftwerks- und Unterwerksumspanner bedingt ist. Will man den Leistungsfaktor an den Generatorklemmen auch beim Einsatz von Thyristor-Triebfahrzeugen beibehalten, so ist eine Kompensation ihres erhöhten Blindleistungsbedarfs erforderlich. In Anwendung auf die Münchener S-Bahn, in deren Netz anschnittgesteuerte Triebwagen eingesetzt werden, ergibt sich bei einem Ausbauzustand mit rund 60 MW S-Bahn-Last in der Hauptverkehrszeit nach den bisherigen Ermittlungen eine notwendige Kompensationsleistung von 14 Mvar,

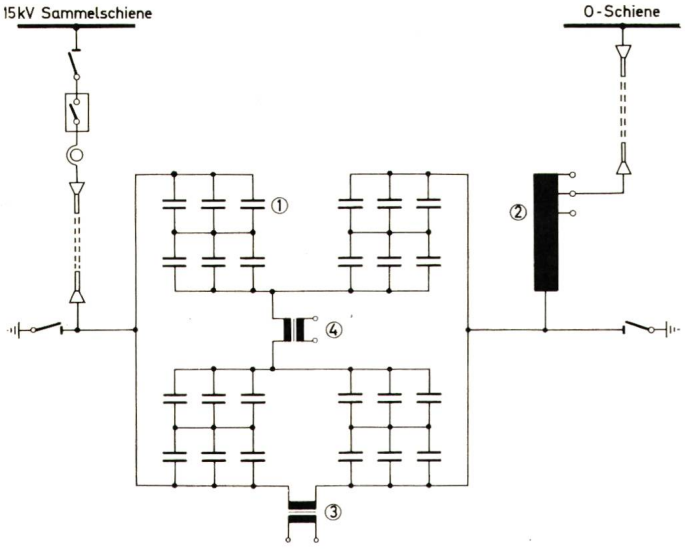


Fig. 1
Übersichtsschaltplan der 3,5 Mvar Kompensationsanlage eines S-Bahn-Unterwerkes
① Kondensatorbatterie etwa 110 µF; ② Drosselspule etwa 140 mH; ③ Entladungswandler; ④ Symetrieüberwachung

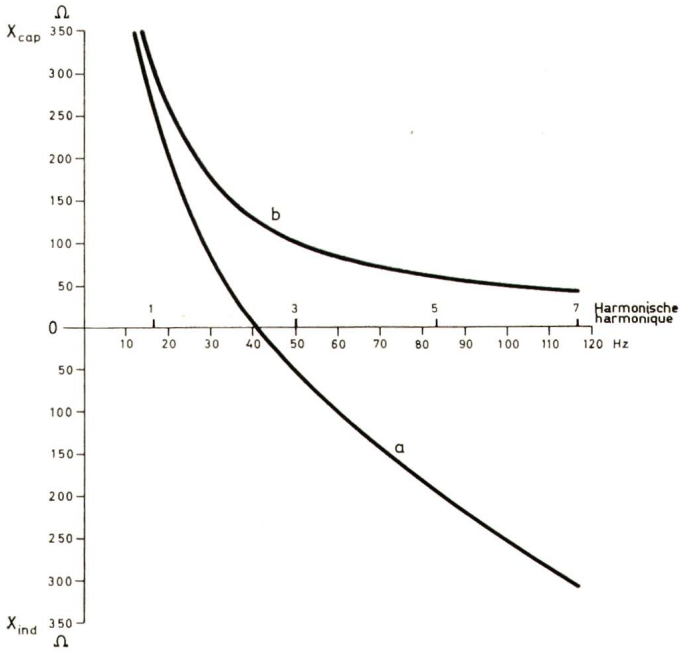


Fig. 2
Wechselstromwiderstand der Kompensationsanlage
a Kondensator mit Drosselspule
b Kondensator ohne Drosselspule

die in Form von vier je für sich betriebsfähigen Anlagen von 3,5 Mvar in den Unterwerken München Ost und München-Pasing installiert wird. Fig. 1 zeigt das Schaltbild einer solchen Anlage. Wesentlich ist dabei, dass der Batterie eine Drosselspule vorgeschaltet ist. Diese soll Stromstösse von den Kondensatoren beim Einschalten und bei Kurzschlüssen im Fahrleitungsnetz fernhalten. Ferner soll sie einen induktiven Wechselstromwiderstand der Kompensationsanlage für alle Oberschwingungen einschliesslich der Dritten Harmonischen sicherstellen. Die Eigenfrequenz ist dementsprechend auf rund 40 Hz eingestellt, wie Fig. 2 zeigt. Die zeitlich etwas zuzurückliegende Erprobung einer Kompensationsanlage von rund 40 Hz eingestellt, wie Fig. 2 zeigt. Die zeitlich etwas zurückliegende Erprobung einer Kompensationsanlage von 1000 kvar im Unterwerk Steinbach a. W. hat gezeigt, dass dabei Schwierigkeiten im Betrieb oder Schäden an den ortsfesten Anlagen und den Triebfahrzeugen nicht eingetreten sind. Im Beeinflussungsbereich wirkte sich die Kompensationsanlage nicht merkbar aus.

Der Einsatz einer geringen Zahl von Thyristor-Fahrzeugen in einem grossen elektrischen Streckennetz erfordert selbstverständlich keine besonderen Massnahmen im Bereich der Stromversorgung. Wenn an den Einsatz einer grossen Zahl von Streckenlokomotiven mit Anschnittsteuerung ge-

dacht wird, ist zu bedenken, dass Streckenlokomotiven im Durchschnitt nur mit etwa einem Drittel ihrer Nennlast betrieben werden. Ihr Blindstromverhalten im Teillastbereich sollte daher für die Ermittlung der Kompensationsleistung sehr sorgfältig untersucht werden.

Beanspruchung von Kondensatoren in Kompensationsanlagen durch Oberschwingungen

Kondensatoren können zusätzlich zum Grundschwingungsstrom in erheblichem Umfang Oberschwingungsströme aufnehmen, ohne sich zu stark zu erwärmen. Bei Kompensationsanlagen für anschnittgesteuerte Triebfahrzeuge spielt diese Frage daher keine besondere Rolle.

Beeinträchtigung der Zählergenauigkeit durch Anwendung der Anschnittsteuerung

Die Genauigkeit von Wechselstrominduktionszählern für Wirk- und Blindarbeit wird durch hohen Oberschwingungsgehalt des Stromes und der Spannung beeinträchtigt. Das wurde durch Beobachtungen im praktischen Betrieb und durch Messungen im Labor festgestellt. Je nach Art der Verzerrung treten zum Teil erhebliche Plus- und Minus-Fehler auf. Eine genaue Klärung dieses Problems sollte für die 50-Hz- und 16⅔-Hz-Technik baldmöglichst in Angriff genommen werden.

Beeinflussung von Signalanlagen durch die konventionelle Wechselstromtraktion

Als im Jahre 1957 im Bereich der DB ein Unterwerk grösserer Leistung mit seinen Rückleitungskabeln an einen sehr kleinen einschienig isolierten Bahnhof mit 100 Hz Gleisstromkreisen angeschlossen wurde, trat Rotausleuchtung der Signalanlagen ein, obwohl nur konventionelle Triebfahrzeuge verkehrten. Nach Umstellung des Bahnhofs auf zweischienige Isolierung trat keine Beeinflussung mehr auf.

4. Panel-Diskussion

über
Betriebserfahrungen über Rückwirkungen von Thyristor-Fahrzeugen auf Signal- und Fernmeldekreise

R. Buckel, Deutsche Bundesbahn (DB), München: Thyristorgesteuerte Lokomotiven sind im 16⅔-Hz-Netz der DB seit dem Jahre 1967 in betriebsmässigem Einsatz. Die Lokomotiven haben eine Leistung von rund 3200 kW, die Fahrströme sind bis zu 450 A gross, die höchsten Störströme betragen ungefähr 3 A.

Zur Zeit befinden sich 4 Zweisystemlokomotiven (181) und 5 Viersystemlokomotiven (184) im Betrieb. Sie sind hauptsächlich im grenzüberschreitenden Verkehr eingesetzt. Die längsten im 16⅔-Hz-Netz regelmässig gefahrenen Verbindungen erreichen etwa 200 km.

Der neue S-Bahn-Triebwagen 420 fährt im Probebetrieb seit etwa einem dreiviertel Jahr. Die Stromaufnahme einer Wageneinheit (Kurzzug) beträgt beim Beschleunigen kurzzeitig maximal 350 A, der Störstrom 3...3,5 A. Es werden bis zu 3 Einheiten gekuppelt (Langzug), wobei der Gesamtstörstrom auf etwa 7,5 A ansteigt.

Störende Geräuschspannungen in Fernsprechleitungen, die unmittelbar an der Bahnstrecke liegen, sind noch nie beobachtet worden. Allerdings ist dabei zu berücksichtigen, dass an der überwiegenden Mehrzahl der Strecken, auf denen die oben erwähnten Lokomotiven verkehren, moderne Streckenfernmeldekabel meist mit Aluminiummantel und Stahlbewehrung, also mit ausgezeichnetem Reduktionsfaktor, verlegt sind.

Das Fahren eines Langzuges 420 war verschiedentlich bei einzelnen, nicht gut symmetrischen Sprechverbindungen in älteren Bleimantelkabeln als leises, aber noch nicht störendes Geräusch (EMK 1...2 mV) zu hören. Überraschend günstig sind die Ergebnisse in dicht bebauten Stadtgebieten, wo bereits in einigen 10 m Abstand der Fernsprechleitungen von der Bahnstrecke die Oberschwingungsbeeinflussung sehr stark abnimmt und in 50 bis 100 m Abstand im allgemeinen unbedeutend sein wird. Dennoch haben wir uns für das S-Bahn-Netz München entschlossen, für alle diejenigen Fernsprechverbindungen des öffentlichen Verkehrs der Deutschen Bundespost, in denen Schutzmassnahmen gegen den Einfluss der Grundschwingung wegen Funktionsstörungen notwendig sind, den «Aktiven Reduktionsschutz» vorzusehen, der auch gegen Oberschwingungen schützt. So ist noch genügend Reserve vorhanden, wenn im Endausbau die Netzspannung unter dem Einfluss der hohen Stromrichterlast stark verzerrt werden sollte.

Störungen von Trägerfrequenzverbindungen waren noch nicht festzustellen. Dies trifft ebenso für den Rundfunk- und Fernsehbereich zu, obwohl die Intensiverprobung der Triebwagen 420 in fast pausenlosem Einsatz an einer dicht bebauten Vorortstrecke stattfindet.

Die Rückwirkung der Anschnittsteuerung auf das überlagerte 110-kV-Speisenetz ist bei dem augenblicklichen Verkehr vernachlässigbar, sie kann aber später von gewisser Bedeutung werden. Wir haben festgestellt, dass die Oberschwingungen aus dem Fahrleitungsnetz nur wenig gedämpft in das 110-kV-Bahnstromnetz übertragen werden. Eine kapazitive Geräuschbeeinflussung von Fernsprechfreileitungen, die in nächster Nähe dieser Hochspannungsleitungen verlaufen, ist bei einer Zunahme der Störspannung nicht ausgeschlossen. Glücklicherweise nimmt die Zahl der Fernsprechfreileitungen immer mehr ab. Wir haben z. B. für ein Gebiet, das sich weit über den S-Bahn-Bereich Münchens bis zu den nächsten Kraftwerken erstreckt, ermittelt, dass keine Näherungen mehr bestehen, in denen Störungen zu erwarten wären, selbst wenn die Störspannung der 110-kV-Leitung um ein Vielfaches ansteigen würde.

Die mit 100 Hz betriebenen *Gleisstromkreise* mit ein- und zweischieniger Isolierung wurden durch den Betrieb der anschnittgesteuerten Lokomotiven noch in keinem Fall gestört. Störungen im Probeeinsatz eines Langzuges 420, die sich jedoch nach der sicheren Seite auswirkten, gingen überwiegend zu Lasten der Grundschwingung und lassen sich durch Änderung der Schaltungen am Gleis und durch Massnahmen am Fahrzeug beherrschen.

Gelegentliche Fahrten auf Strecken mit Linienleiterbetrieb verliefen störungsfrei. Weitere Untersuchungen sind aber hier noch nötig.

D. W. Venemans, Nederlandse Spoorwegen (NS), Utrecht:

Das speisende Drehstromnetz

Es ist bekannt, dass die Gleichrichter in den Unterwerken Oberwellen im Drehstromnetz erzeugen. Die Wichtigsten haben eine ungerade Ordnungszahl. In der Vergangenheit, als von Impulssteuerung noch gar nicht die Rede war, haben diese Oberwellen, bei der Einführung von Rundsteueranlagen mit Tonfrequenzen namentlich auf schwachen Netzen, Probleme gegeben. Im allgemeinen, wenn die installierte Leistung etwa 1 % der örtlichen Kurzschlussleistung nicht übertrifft, wird jetzt der Einfluss der Oberwellen für zulässig gehalten.

Wie beschrieben haben Berechnungen ausgewiesen, dass die besonderen Oberschwingungen infolge der Impulssteuerung immer um eine Grössenordnung kleiner sind, als die Oberwellen der konventionellen Gleichstrombelastung.

Die Stromrückleitungskreise

Es sei noch erwähnt, dass vor einigen Jahren die Verwendung tonfrequenter Gleisstromkreise (Audiofrequency Overlay Track Circuits) erwogen wurde. Messungen haben jedoch gezeigt, dass dieses System von einer Impulssteuerungsanlage derart beeinflusst wurde, dass die Wirkung nicht zuverlässig war. Auch aus anderen Gründen wurde dieses System aufgegeben.

Störung von Hochfrequenzverbindungen

Die Resultate der letzten Messungen des Störspannungsniveaus im Hochfrequenzgebiet sind jetzt bekannt. Während der Impulssteuerungsanfahrt, also bis etwa 60 km/h, ist die Funkstörung von der gleichen Grösse als ohne Impulssteuerung bei höheren Geschwindigkeiten durch das Bügelspringen verursacht wird.

S. Svensson, Statens Järnvägar (SJ) Stockholm:

1. Einleitung

Als das Elektrifizierungssystem der Schwedischen Staatsbahnen am Anfang dieses Jahrhunderts ausgestaltet wurde, wurden umfassende theoretische und praktische Untersuchungen über Störungsprobleme durchgeführt. Der hohe Bodenwiderstand im grössten Teil Schwedens vergrössert die Induktionsspannungen in den Fernmeldeleitungen längs der Eisenbahnstrecken und bringt mit sich, dass auch Leitungen in verhältnismässig grossen Abständen von der Bahn beeinflusst werden. Durch Verwendung von Saugtransformatoren und Rückleitung könnten doch die Induktionsspannungen bis auf mässige Werte reduziert werden. Wenn nur Lokomotiven und Triebwagen mit Einphasenserienkommutatormotoren für 16⅔ Hz Wechselstrom verwendet wurden, waren die Oberwellenamplituden im Fahrleitungsstrom verhältnismässig gering.

2. Störungsmessungen für verschiedene Typen von Thyristor-Fahrzeugen

Im Sommer 1964 wurde bei der SJ eine Ermittlung über die Rückwirkungen der Thyristor-Lokomotiven auf Signal- und Fernmeldeanlagen durchgeführt. Die SJ hatten damals keine Thyristor-Lokomotiven, Störungen von zwei schwedischen Lokomotiven mit Silizium-Dioden waren jedoch gemessen worden, und knappe ausländische Angaben über gemessene Störungen von Thyristor-Fahrzeugen waren vorhanden. Auf Grund dieser Messergebnisse und berechneter Störpegel, hielt man es für möglich, eine beschränkte Zahl von Thyristor-Lokomotiven anzuschaffen. Auf einigen Bahnhöfen befindliche alte Signal-Gleisstromkreise für 50 Hz mussten jedoch geändert werden. Man berechnete auch, gewisse Fernmeldeleitungen in der Nähe der Eisenbahnstrekken, in erster Linie Freileitungen, ändern zu müssen. Um die Massnahmen auf den Fernmeldeleitungen begrenzen zu können, wurde die Möglichkeit vorgesehen, die Lokomotiven mit Fernmelde-Störfilter auszurüsten. Störungsmessungen auf einem Triebwagen und einer Lokomotive, die für Thyristorsteuerung umgebaut waren, gingen dem Beschluss der SJ, Thyristor-Lokomotiven zu kaufen, voraus.

Die erste Thyristor-Lokomotive Rc1 wurde Anfang des Jahres 1967 geliefert, und im Herbst desselben Jahres fing die Lieferung der Triebwagen X 1 mit Thyristorsteuerung für den Stockholmer Vorortsverkehr an. Anfang des Jahres 1969 wurde die erste Lokomotive Rc2 mit Störfilter gelie-

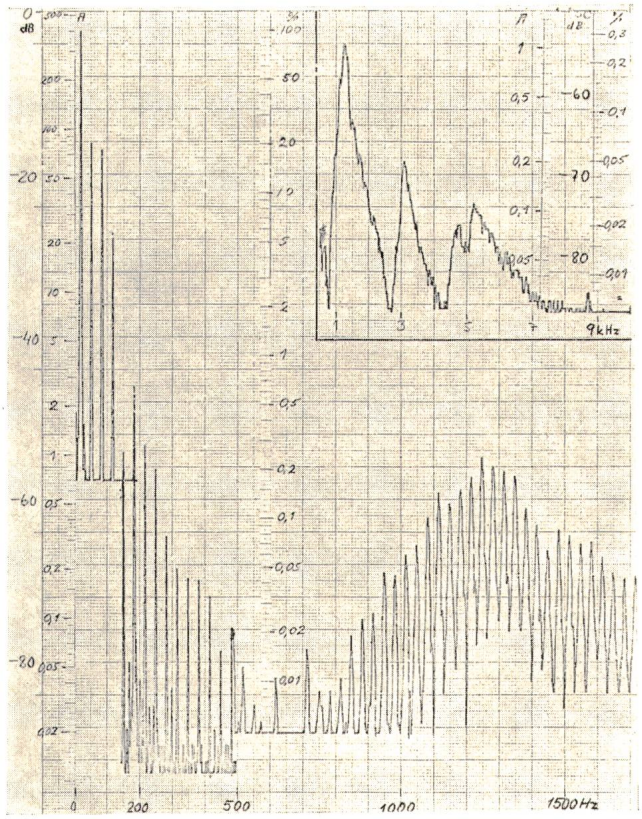


Fig. 1
Frequenzanalyse des Fahrstromes bei Beschleunigungsfahrt mit Thyristorlokomotive Rc 2
Geschwindigkeit 40 km/h

fert, der auch einen verbesserten Leistungsfaktor mit sich brachte.

Umfassende Messungen von Oberwellenamplituden, Störstrom und Rückwirkungen auf Signal- und Fernmeldeanlagen sind bei Messfahrten mit den neuen Lokomotiven und Triebwagen durchgeführt worden. Neue Messmethoden sind entwickelt, und bessere Messgeräte angeschafft worden. Die Zeit zwischen den Messperioden ist im allgemeinen nicht genug gewesen für eine vollständige Auswertung der Ergebnisse der früheren Messungen.

Fig. 1 zeigt eine Frequenzanalyse des Fahrdrahtstromes bei Beschleunigungsfahrt mit Rc2-Lokomotive. Der Strom ist auf Daten-Tonbandgerät auf drei Kanälen aufgenommen worden. Auf zwei der Kanäle ist der Frequenzbereich mit Hochpassfilter beschränkt worden, um eine Registrierung der niedrigen Amplituden bei hohen Frequenzen zu ermöglichen. Die Analyse ist mit der Bandbreite von 1,5 Hz für den Frequenzbereich 0–500 Hz, 6 Hz für 500 bis 1700 Hz und 30 Hz für 500–10 000 Hz durchgeführt worden.

3. Rückwirkungen auf Signalanlagen

Längs Bahnstrecken und in kleinen Bahnhöfen werden bei den SJ mit Gleichstrom gespeiste Gleisstromkreise mit einschieniger Isolierung verwendet. Auf diesen Gleisstromkreisen sind keine Rückwirkungen von den Thyristor-Lokomotiven beobachtet worden.

In grossen Bahnhöfen verwendet man 75 Hz Wechselstrom-Gleisstromkreise mit einschieniger Isolierung und zweiphasigen Gleisrelais. Diese Gleisrelais vibrieren mit der Unterschieds-Frequenz von etwa 8 Hz zwischen der 5. Oberwelle des Stromes der Thyristor-Lokomotiven, 83⅓ Hz und der Gleisstromkreisfrequenz von 75 Hz, sowohl wenn der Gleisstromkreis frei ist, als auch wenn er mit Fahrzeugen belegt ist. In einigen Fällen hat dies verursacht, dass der Gleisstromkreis kurzdauernd fälschlicherweise bei freiem Gleis als belegt gemeldet worden ist. Mit dazu hat wahrscheinlich beigetragen, dass in den in die beiden Enden des Gleisstromkreis eingeschalteten Transformatoren eine magnetische Sättigung entstanden war. Die Vibrationen bringen auch mit sich, dass das Gleisrelais unnormal abgenutzt wird.

Fig. 2
Maximalwerte der Harmonischen der Spannung in einem Gleisstromkreis bei Messfahrten mit verschiedenen Typen von Lokomotiven

—— ungeradzahlige Oberschwingungen
– – – geradzahlige Oberschwingungen

○ Rc 1
△ Rc 2 (–||–)
▭ Rb 2

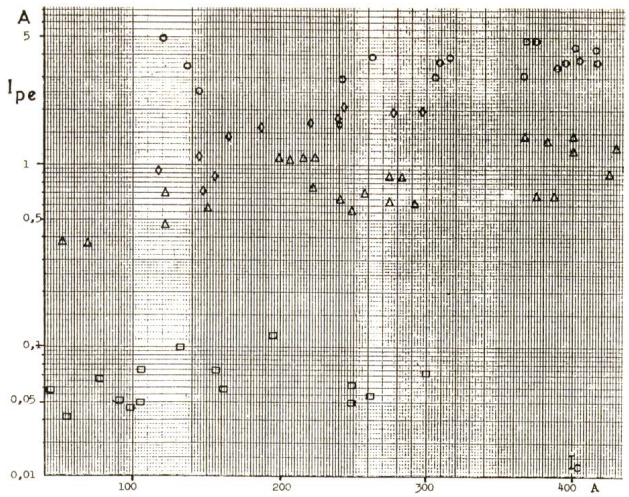


Fig. 3
Störstrom für verschiedene Lokomotiven

△ Rc2 2 as/ 4
□ Rb2
○ Rc1 3 as/ 4
◇ Rb1

Mit Rücksicht auf die Thyristorstörungen haben die SJ beschlossen, in Gleichstrom-Gleisstromkreise allmählich überzugehen.

Fig. 2 zeigt Maximalwerte der Harmonischen der Spannung eines Gleisstromkreises von 625 m Länge bei Messfahrten mit verschiedenen Typen von Lokomotiven. Die Spannung wurde in dem einen Ende des Gleisstromkreises mit Tonbandgerät registriert, wenn das andere Ende kurzgeschlossen war.

4. Rückwirkungen auf Fernmeldeanlagen

Der bewertete Störstrom ist in der Rückleitung für verschiedene Typen von Lokomotiven und bei verschiedenen Geschwindigkeiten gemessen worden. Fig. 3 zeigt die gemessenen Werte des Störstromes als Funktion des Fahrstromes. Wie aus dem Diagramm hervorgeht, bringt die Thyristorsteuerung viel höhere Werte des Störstromes mit sich als die Lokomotive Rb1 mit Wechselstrommotoren.

Durch das Saugtransformatorensystem, das auf dem Hauptteil des schwedischen elektrifizierten Eisenbahnnetzes verwendet wird, werden die Induktionsspannungen reduziert, weil der Rückstrom auf dem grössten Teil der Speisestrecke in der Rückleitung fliesst. Die Induktion erfolgt hauptsächlich auf der Strecke zwischen der Lokomotive und der Verbindung Rückleitung-Schiene des betreffenden Saugtransformatorenabschnittes. Die Länge dieser Strecke variiert also während der Fahrt der Lokomotive und beträgt maximal etwa 3 km.

Wenn mehrere Züge sich auf der Speisestrecke befinden, erfolgt die Induktion – wenigstens für die Grundwelle – von dem Strom jeder Lokomotive nur auf ihrem Saugtransfor-

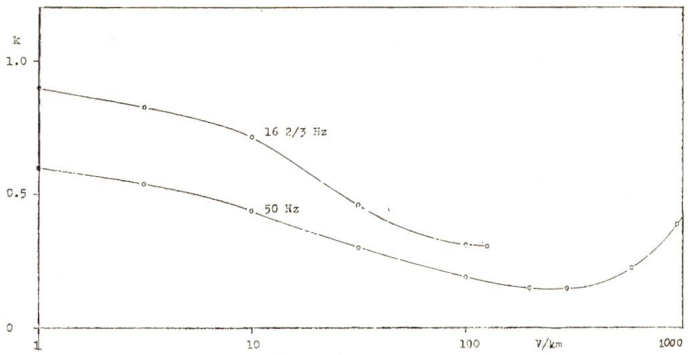


Fig. 4
Reduktionsfaktor für Fernmeldekabel bei 16⅔ und 50 Hz als Funktion der Feldstärke

matorenabschnitt. Für die von den Lokomotiven erzeugten Oberschwingungen werden die Verhältnisse bei mehreren Zügen mehr kompliziert, besonders wenn ein Störfilter die Impedanz der Lokomotive für höhere Frequenzen vermindert.

Längs der Meßstrecke haben die SJ ein Fernmeldekabel, das etwa 1,9 m von der Gleismitte liegt. Das Kabel hat Bleimantel und ist mit zwei Stählbändern armiert worden. Fig. 4 zeigt den bei 16⅔ Hz und 50 Hz gemessenen Reduktionsfaktor als Funktion der Feldstärke. Fig. 5 zeigt den Reduktionsfaktor als Funktion der Frequenz bei einer Feldstärke von 1 V/km und einer gleichzeitig angebrachten Feldstärke von 16⅔ Hz, 10 bzw. 50 V/km.

Aus Fig. 6 ist die Geräuschlängs-EMK in einer Kabelleitung zu ersehen. Nach den CCITT-Vorschriften darf die Geräusch-EMK zwischen den Anschlussklemmen eines Teilnehmerapparates nicht 1 mV überschreiten. Der Empfindlichkeitsfaktor der Leitung, d. h.

$$\frac{\text{Geräusch-EMK}}{\text{Geräuschlängs-EMK}}$$

ist von der Symmetrie gegen Erde abhängig. CCITT hat keine Werte des Empfindlichkeitsfaktors vorgeschrieben. In den alten Fernmeldekabeln der SJ (das Kabel längs der Meßstrecke wurde um 1925 ausgelegt) variiert der Empfindlichkeitsfaktor im allgemeinen für verschiedene Leitungen zwischen 0,1 und 1 %. Wenn man Anlage 6 und den Empfindlichkeitsfaktor von 1 % zum Ausgangspunkt nimmt, findet man, dass der Grenzwert der CCITT für die Lokomotive Rc1 und teilweise auch für Rc2 überschritten wird.

Längs aller elektrifizierten Bahnstrecken haben die SJ ein Fernmeldekabel im Bahndamm. Auf einigen Strecken ist das

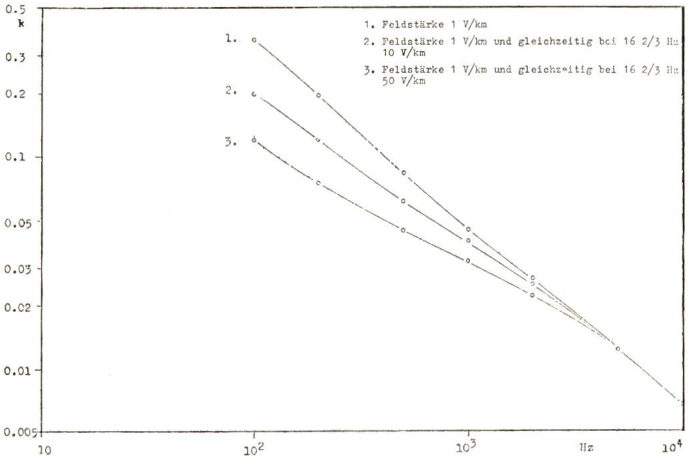


Fig. 5
Reduktionsfaktor für Fernmeldekabel als Funktion der Frequenz

Fernmeldekabel für die SJ und die Fernmeldeverwaltung gemeinsam. Viele von diesen Kabeln wurden vor dreissig bis fünfzig Jahren ausgelegt. Die Leitungssymmetrie hat sich im Laufe der Jahre durch dielektrische Alterung, Unterhaltungsarbeiten und Änderungen des Kabels verschlechtert. Die hohen Werte des Empfindlichkeitsfaktors haben bei den niedrigen Geräuschpegeln, die die Lokomotiven mit Wechselstrommotoren gegeben haben, keine lästigen Geräusche mit sich gebracht. Auf den Strecken, die gegenwärtig mit Thyristorlokomotiven befahren werden, ist es notwendig, die Fernmeldekabel bis zu einem gewissen Grade auszugleichen.

Die Fernmeldeverwaltung hat auf einigen Strecken Freileitungen oder Kunststoffkabel ohne Metallmantel verhält-

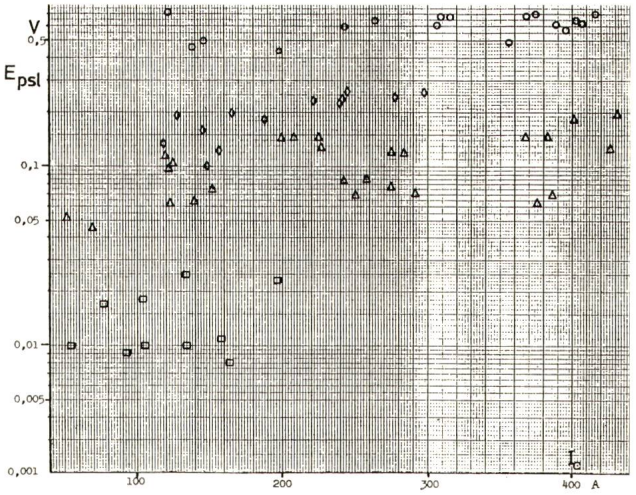


Fig. 6
Geräusch-Längs-EMK in einer Fernsprechkabelleitung mit armiertem Bleimantel

Bezeichnungen siehe Fig. 3

nismässig nahe den elektrifizierten Bahnlinien gebaut. Der Mindestabstand ist mit Rücksicht auf die Länge der Fernmeldeleitungen bestimmt worden, und man ist dann von dem Geräuschpegel ausgegangen, den die Lokomotiven mit Wechselstrommotoren erfahrungsmässig gegeben haben. Die Leitungen, die den Störungen durch Thyristorlokomotiven ausgesetzt sind, müssen bis auf grösseren Abstand von der Bahn versetzt oder auch durch Kabel ersetzt werden.

Die Arbeit an der Ausbesserung des Ausgleiches der Fernmeldekabel und die Änderungen der Freileitungen sind gegenwärtig im Gange. Die Kosten der Massnahmen wurden schon bei der Wahl der Thyristorlokomotiven berücksichtigt. Je nachdem mehr Fahrzeuge mit Thyristorsteuerung eingesetzt werden, wird es eine dringlichere Sache werden, die Rückwirkungen zu beschränken.

M. Kieffer, Soc. Nationale des Chemins de Fer Français (SNCF), Paris:

1. Umfang des Studienprogrammes

Die Abteilung für feste Anlagen der SNCF benützte die Inbetriebsetzung der ersten Thyristor-Triebfahrzeuge, um ihre Auswirkungen auf die Signal- und Übermittlungsanlagen zu messen.

Für diese Versuche standen folgende Triebfahrzeuge zur Verfügung:

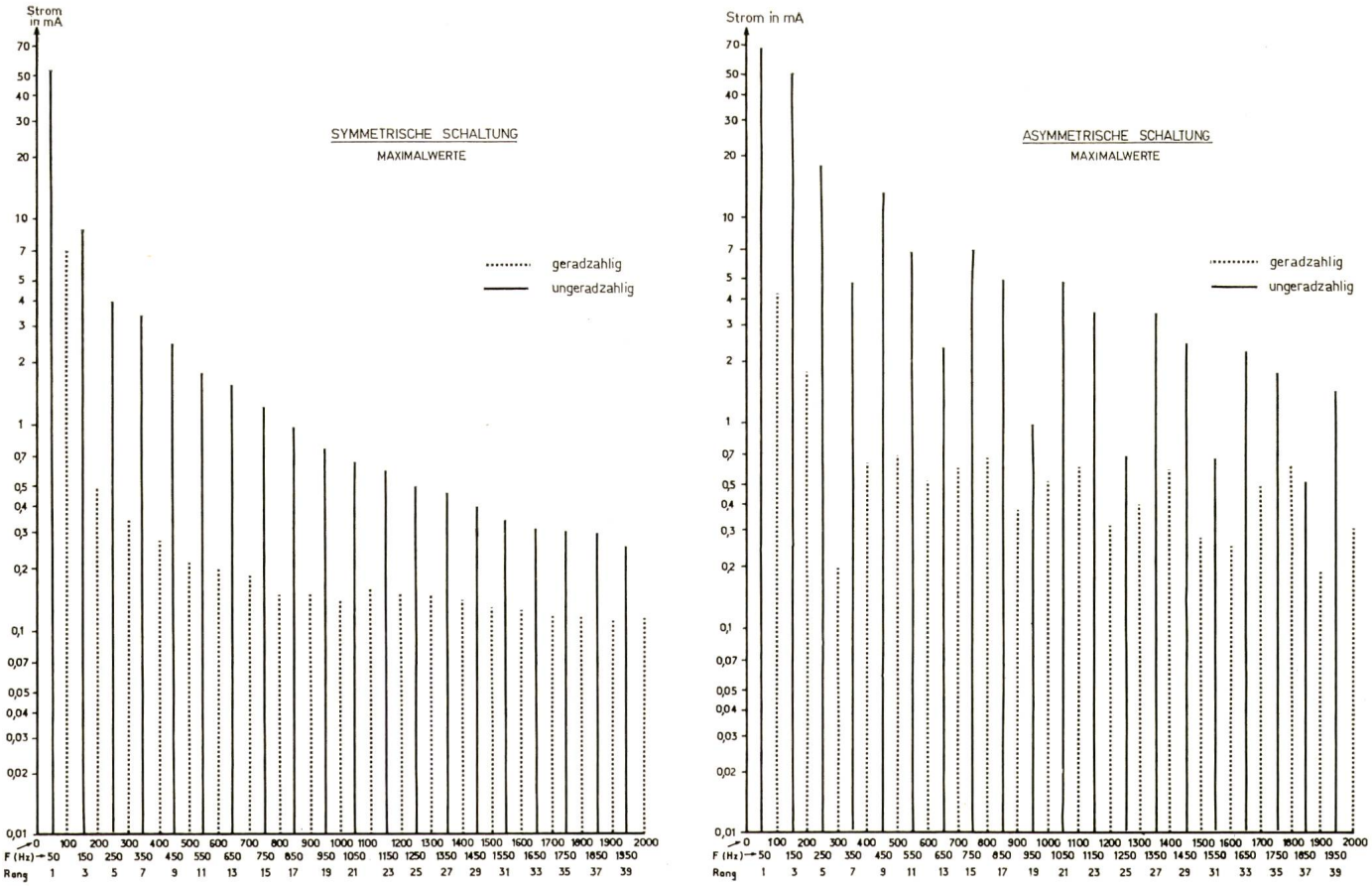


Fig. 1
Triebwagen Z 8001 mit 900 kW
Versuche auf dem Prüfstand

— Triebwagen mit 600 und 900 kW Leistung
— eine Lokomotive des Typs BB mit 2500 kW Leistung
— eine Lokomotive des Typs CC mit 5500 kW Leistung

Vor den Messfahrten auf der Strecke wurden wenn immer möglich Versuche auf dem Lokomotivversuchsstand VITRY-sur-SEINE durchgeführt. Es zeigte sich, dass die erhaltenen Resultate im allgemeinen gut übereinstimmen, wobei aber die Streckenversuche öfters kleinere Werte ergaben als die Messungen auf dem Prüfstand.

Es ist jedoch wesentlich, dass die Versuche auf der Strecke ein viel weiter gespanntes Forschungsprogramm ermöglichen als Prüfstandversuche.

Die durchgeführten Messungen dienten hauptsächlich zur Bestimmung des

— Frequenz-Spektrums der Fahrleitungsspannung und des Stromes in Nähe des Speisepunktes, auf der Lokomotive sowie in den Schienen,

zur Untersuchung der Beeinflussung der Signalanlagen,

zur Messung der Rauschspannung in Fernmeldekabeln,

zur Messung des elektrischen Feldes in der Nähe der Fahrleitung.

2. Untersuchung der Harmonischen des Stromes — Frequenzspektren

2.1 Messmethode

In allen Fällen wurde die zu analysierende Spannung, bzw. Strom, während den Messfahrten auf Magnetband aufgezeichnet. Das Thyristor-Triebfahrzeug befand sich immer allein auf dem Geleise, wobei der Streckenabschnitt durch eine einzige Unterstation gespeist wurde.

Die Auswertung dieser Bänder erlaubte es, für jede Harmonische den Maximalwert festzulegen.

Auf diese Art wurden die Spektren der Fig. 1, 2 und 3 gewonnen. Es handelt sich dabei um die maximal möglichen Werte einer Harmonischen und nicht um Momentanwerte für einen bestimmten Ort und eine bestimmte Zeit der betrachteten Grösse.

2.2 Resultate

Beim Betrachten der Figuren können folgende Bemerkungen gemacht werden:

Fig. 1 (0 bis 2 kHz). Der Versuch wurde mit einem Triebwagen des Typs Z8 001 auf dem Versuchsstand durchgeführt. Die bei symmetrischer und asymmetrischer Schaltung erhaltenen Spektren sind ähnlich. In der asymmetrischen Schaltung treten die geradzahligen Harmonischen stärker auf als in der symmetrischen.

Fig. 2 (0 bis 2 kHz). Streckenversuch mit einer Lokomotive CC21 002.

Die bei niedrigen Frequenzen gegenüber den ungeradzahligen Harmonischen wesentlich kleineren Werte der geradzahligen Harmonischen erreichen bei Frequenzen über 1500 Hz ebenfalls die Grösse der ungeradzahligen Harmonischen.

Fig. 3 (5 bis 100 kHz). Die beiden dargestellten Kurven wurden im Versuchsstand und auf der Linie gemessen. Die kleineren Werte traten bei den Messungen auf der Strecke auf. Es ist bemerkenswert, dass bei der verwendeten Lokomotive (BB 16 685) zwischen 25 und 30 kHz ein Resonanz-Phänomen auftritt.

3. Äquivalenter Störstrom (Ipe)

Bei jedem Versuch wurde neben der Aufzeichnung der Spannung und der Ströme der äquivalente Störstrom gemäss der vom CCITT vorgeschriebenen Methode bestimmt. Es stellte sich dabei heraus, dass der äquivalente Störstrom

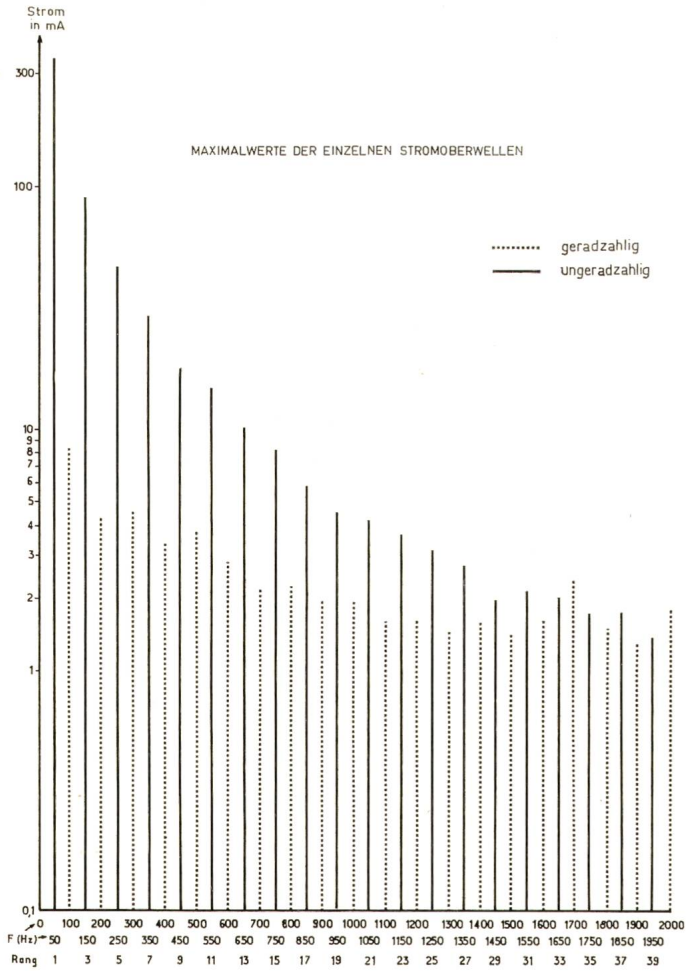


Fig. 2
Frequenzanalyse des Primärstromes der Lokomotive CC 21002 (von 50 Hz bis 2000 Hz)
Maximalwerte der einzelnen Stromoberwellen

Ipe einer Thyristorlokomotive das 3- bis 4fache derjenigen einer Diodenlokomotive gleicher Leistung beträgt. Wenn die Leistung vergrössert wird, wächst ebenfalls Ipe bis zum 6- bis 8 fachen Wert einer Diodenlokomotive an.
Die Resultate sind in Fig. 4 zusammengefasst.

4. Beeinflussung der Signalkreise

4.1

Die SNCF verwendet für die elektrische Zugförderung entweder Gleichstrom mit einer Spannung von 1500 V oder Einphasenwechselstrom mit einer Spannung von 25 kV und einer Frequenz von 50 Hz.

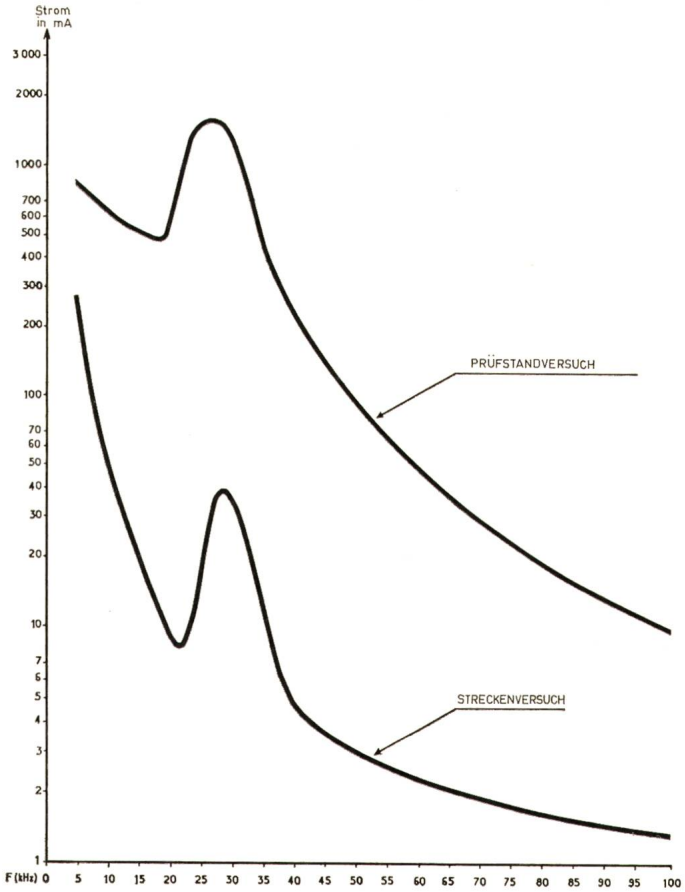


Fig. 3
Frequenzanalyse des Primärstromes der Lokomotive BB 16 685 (5 kHz bis 100 kHz)

Für die Gleichstromkreise führte der Fortschritt der Technik zur Anwendung höherer Frequenzen. Durch die allgemeine Einführung des verschweissten Geleises auf allen Hauptlinien mussten Gleisstromkreistypen angewandt werden, die ohne Isolierstösse auskommen, was die Verwendung von Frequenzen über 1000 Hz bedingt.

Die vorangegangenen Betrachtungen zeigen, dass bei der SNCF eine grosse Anzahl verschiedener Gleisstromtypen vorhanden ist. Die Frequenzen sind so gewählt, dass sie ausserhalb der ungeradzahligen Harmonischen von 50 Hz lagen, was zur Zeit der klassischen Lokomotive vollkommen genügte.

Relative Werte von Ipe für Thyristor-und Diodenlokomotiven				
Lokomotivtyp	Diodenlokomotive BB 25 500 P = 2 500 kW	Thyristorlokomotive BB 16 685 P = 2 500 kW		Thyristorlokomotive CC 21 002 P = 5 500 kW
		Symmetrische Schaltung	Asymmetrische Schaltung	Asymmetrische Schaltung
Relativer Wert von Ipe	1	3	4	6 bis 8 je nach Leistung
		bei mittlerer Leistung		
		4	4	
		bei voller Leistung		

Fig. 4

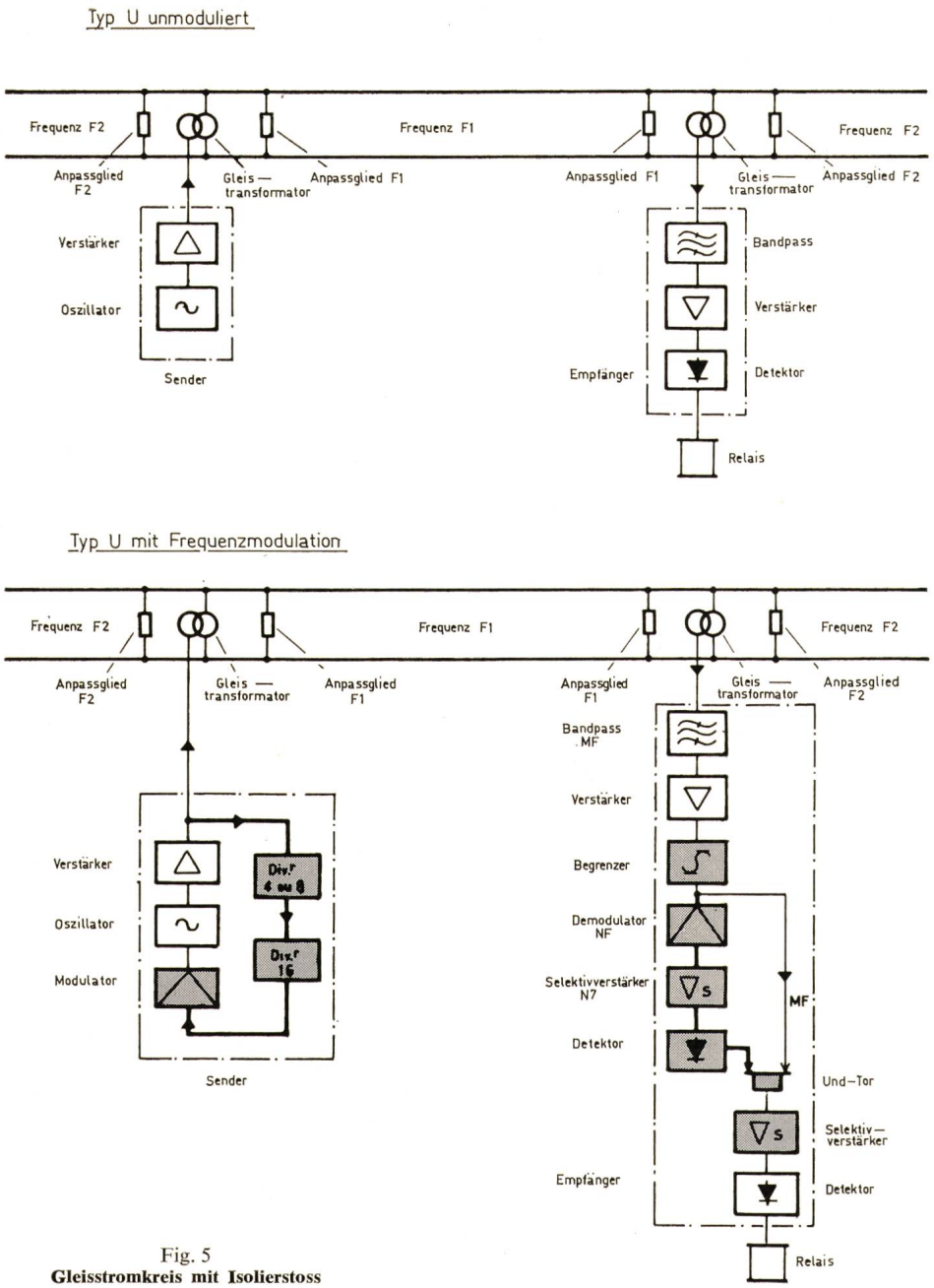


Fig. 5
Gleisstromkreis mit Isolierstoss

Durch das Erscheinen der Thyristorlokomotive, deren Spektrum viele höhere Harmonische und nicht selten auch geradzahlige Harmonische enthält, ist die Wahrscheinlichkeit der Beeinflussung der bestehenden Gleisstromkreise sehr gross.

Aus den durchgeführten Versuchen im Labor und am Geleise selbst können vorläufig für die hauptsächlichsten Gleisstromkreistypen folgende Folgerungen gezogen werden:

4.2 Gleisstromkreis ohne Isolierstoss «Typ U»

Dieser Gleisstromkreistyp wird hauptsächlich bei verschweissten Geleisen angewandt und arbeitet mit Frequenzen von 1800—2600 Hz. Er ist sowohl auf Gleichstrom- als auch auf Wechselstromstrecken anwendbar.

Es scheint, dass bei normalen Gleisverhältnissen keine Beeinflussungen zu befürchten sind.

In gewissen Fällen kann ein Wiederaufziehen des Relais festgestellt werden, wenn das Geleise eine Unregelmässigkeit enthält. Die Beeinflussung kann dabei durch ein Fahrzeug auf dem betreffenden Geleise oder sogar durch ein Fahrzeug auf dem Nachbargeleise hervorgerufen werden.

Wenn dieses Risiko durch praktische Versuche bestätigt wird, können diese Gleisstromkreise modifiziert werden, indem die reine Frequenz durch eine modulierte Frequenz ersetzt wird (praktisch zwischen ± 10 bis 20 Hz).

Fig. 5 zeigt das Schaltbild dieser Gleichstromkreise vor und nach einer eventuellen Modifizierung.

4.3 Andere Gleisstromkreise ohne Isolation

Die andern durch die SNCF verwendeten Gleisstromkreise sind noch nicht sehr verbreitet. Auf eingleisigen Strecken ist jedoch keine Beeinflussung zu befürchten, da sich der Überwachungsstrom in den beiden Schienen in Gegenphase befindet. Auf doppelspurigen Geleisen wäre eine Beeinflussung durch Induktion möglich. Die bisher durchgeführten Versuche erlauben es noch nicht, das reelle Risiko abzuschätzen. Dieses müsste eventuell in Zukunft durch weitere Versuche abgeklärt werden.

4.4 Gleisstromkreise mit Spannungspulsung

Auf diesen meist kurzen Gleisstromkreisen konnte keine Beeinflussung festgestellt werden.

4.5 Andere Gleisstromkreise

Die anderen Gleisstromkreis-Typen scheinen nicht beeinflusst zu werden, da ihre Frequenzen ausserhalb den Harmonischen von 50 Hz (unter Berücksichtigung der Toleranz der letzteren) liegen oder ihre Länge nur kurz ist (z. B. Überwachungskreise bei Niveauübergängen.)

5. Einfluss auf die Fernmeldekabel

5.1 Kabeltyp

Die Messungen wurden an einem Kabel, Typ P33 A2, mit papierisolierten Leitern durchgeführt.

Das Kabel ist in einer Entfernung von ungefähr 12 m von der nächsten Schiene in einer Tiefe von ungefähr 0,8 m verlegt.

Bei der Verlegung wurden die Ungleichheiten durch «Auskreuzen» abgeglichen.

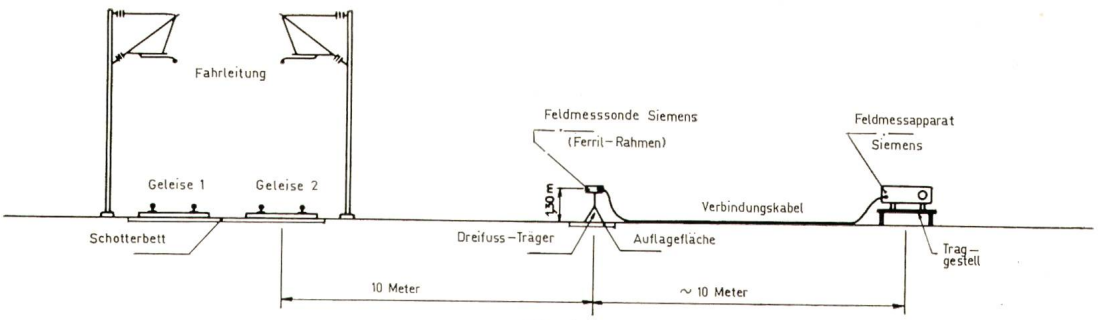


Fig. 6
Messung des elektrischen Feldes
Die Messungen wurden immer in der Mitte zwischen zwei Fahrleitungsmasten durchgeführt

5.2 Ergebnisse

Die Messungen wurden auf NF- und HF-Kreisen von 28 km Länge durchgeführt.

Der Vergleich der psophometrischen Spannung einer klassischen (Dioden) Lokomotive mit derjenigen einer Thyristorlokomotive zeigt für letztere einen etwa 3- bis 4mal höheren Wert.

An einem Vergleichskreis mit einem Sensibilitätsfaktor von $6 \cdot 10^{-5}$ wurden für eine Lokomotive des Typs 16 685 mit 2500 kW eine psophometrische Spannung von 0,200 mV und mit einer Lokomotive des Typs 21 002 mit einer Leistung von 5500 kW eine solche von 0,400 mV.

6. Einfluss auf die drahtlose Übertragung

6.1 Messbedingungen

Das elektrische Feld wurde in einem Frequenzband von 150 kHz bis 3 MHz mit einem Messgerät SIEMENS gemäss C.I.S.P.R. durchgeführt. Fig. 6 zeigt die Messbedingungen.

6.2 Ergebnisse

Die durchgeführten Messungen lassen folgende Schlüsse zu:

— Die Amplitude der Störspannungen nimmt mit zunehmender Frequenz schnell ab; über 3 MHz ist sie sehr schwach.

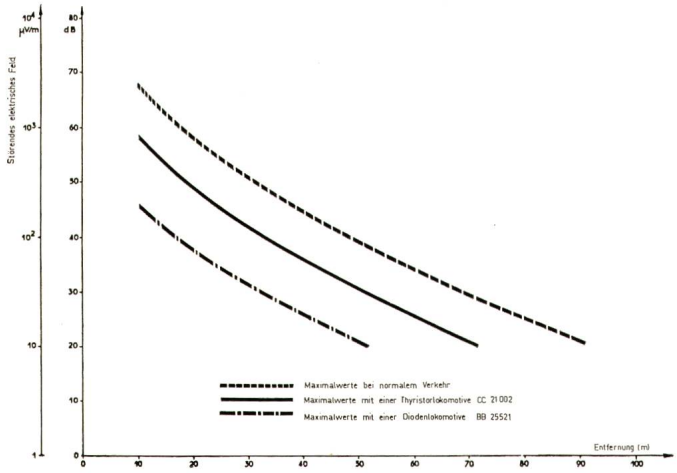


Fig. 7
Beeinflussendes elektrisches Feld
ausgedrückt in µV/m und dB (0 dB – 1 µV/m)
Feldkuven in Abhängigkeit der Entfernung für das Frequenzband 150 bis 250 kHz

— Im Frequenzband von 150 bis 250 kHz wurden im Abstand von 10 m vom nächstliegenden Geleise maximale Feldstärken von 1 m V/m gemessen. In 50 m Distanz fällt sie auf 40 µV/m.

(Abschwächung ungef. 30 dB.)

Es muss aber bemerkt werden, dass diese Werte für eine Thyristor-Lokomotive 4 mal grösser sind als bei einer Diodenlokomotive, obwohl sie die bei Normalbetrieb statistisch gefundenen Werte nicht erreichen.

7. Schlussforderungen

Aus allen vorerwähnten von der SNCF durchgeführten Versuchen können folgende Schlussfolgerungen abgeleitet werden:

Fig. 7 zeigt die Veränderung des elektrischen Feldes in Funktion der Distanz vom Geleise für normalen Verkehr, für eine Diodenlokomotive und für eine Thyristorlokomotive.

— Die Inbetriebsetzung von Thyristortriebfahrzeug-Prototypen ergab in den benachbarten Einrichtungen grössere Beeinflussungen, als sie von älteren Triebfahrzeugen erzeugt werden.

— Bis heute erreichten diese Beeinflussungen keine gefährliche Grösse. Es müssen jedoch gewisse Vorbehalte angebracht werden, da bisher alle Messungen nur mit einem einzigen Prototyp durchgeführt werden.

Bei gleichzeitigem Einsatz mehrer Lokomotiven auf dem gleichen Abschnitt müssten neue Messungen durchgeführt werden.

— Die Frequenzmodulation bei einigen Gleisstromkreistypen erlaubt eine einfache und sichere Lösung.

— Die Messungen auf den Fernmeldekabeln wurden auf abgeglichenen Kabeln von guter Qualität durchgeführt. Auch diese Messungen müssen mit Vorsicht interpretiert werden, da andere Kabel schlechtere Charakteristiken aufweisen könnten als die Gemessenen.

— Alle obenangeführten Messungen betreffen nur Einphasen-Wechselstromlinien.

Die SNCF hat ebenfalls begonnen, die Beeinflussung durch Lokomotiven mit Gleichstromsteller zu studieren, jedoch ist es noch verfrüht, hier Schlussfolgerungen zu ziehen.

5. Diskussionsbeiträge

zu den Referaten 7...11

Diskussionsbeitrag

von *H. Meister,* Bern

In der Schweiz ist die Zahl der Ingenieure, die sich aktiv mit den Problemen der Beeinflussung von Fernmeldeanlagen durch die Energieversorgung befassen, verschwindend klein. Diese im Ausland oft mit Verwunderung registrierte Tatsache kommt vor allem daher, dass sich bis vor kurzem fast ausschliesslich die PTT mit Beeinflussungsproblemen auseinandersetzte. Der Kreis der Interessenten wuchs jedoch proportional zur Zahl der unangenehmen Überraschungen, die man da und dort erlebte.

Nach einer ersten Phase anlässlich der Bahnelektrifizierung vor etwa 50 Jahren wurde die PTT vor ungefähr zwei Jahrzehnten erneut zu erhöhter Aktivität auf dem Beeinflussungsgebiet gezwungen, als die starre Sternpunktserdung der Hochspannungsleitungen eingeführt wurde. Erschwerte Verhältnisse entstanden auch durch die wachsenden Traktions- und Kurzschlußströme der Bahnen, die in Einzelfällen bereits im Normalbetrieb bis 400 V Längsspannung in Fernkabeln induzierten.

Demgegenüber bereiteten uns die Geräuschstörungen wesentlich kleinere Sorgen. Doch unsere Erfahrungen mit Gleichstrombahnen, deren Sechsphasengleichrichter bei besondern Verhältnissen unzulässige Geräuschspannungen in Fernmeldeanlagen verursachten, veranlassten uns, die Auswirkungen der Phasenanschnittsteuerung in 50 Hz-Verteilnetzen zu untersuchen. Wir erkannten aber bald, dass wir nicht die ersten Leidtragenden eines erhöhten Oberwellenanteils sein werden. Unser Hinweis führte dann auch dazu, dass sich die Kommission für Netzkommandofragen des VSE dieses Problems annahm und entsprechende Empfehlungen verfasste.

Anders ist die Situation bei der Beeinflussung von Fernmeldeanlagen durch Triebfahrzeuge mit Phasenanschnittsteuerung. Im Gegensatz zu Dreiphasen-Hochspannungsnetzen ist es bei Bahnen unvermeidlich, dass auch im Normalfall ein beträchtlicher Teil des Rückstromes durch die Erde fliesst. Da die Eindringtiefe des Stromes in die verhältnismässig schlecht leitende Erde sehr gross ist, entsteht eine Schleife von beträchtlicher virtueller Breite, die auch in ziemlich weit entfernten Fernmeldeleitungen beträchtliche Längsspannungen induziert. Wir waren daher froh, als sich

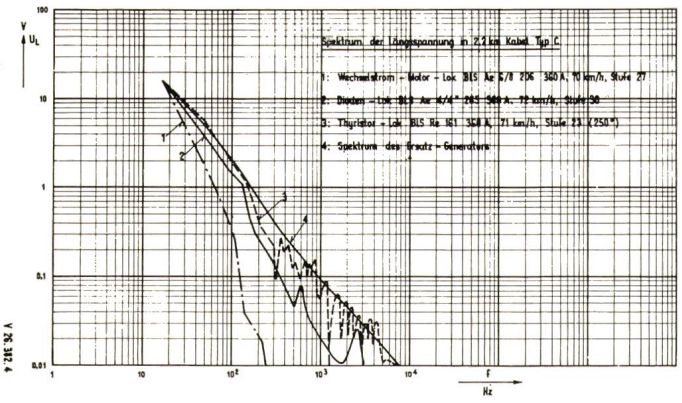


Fig. 1

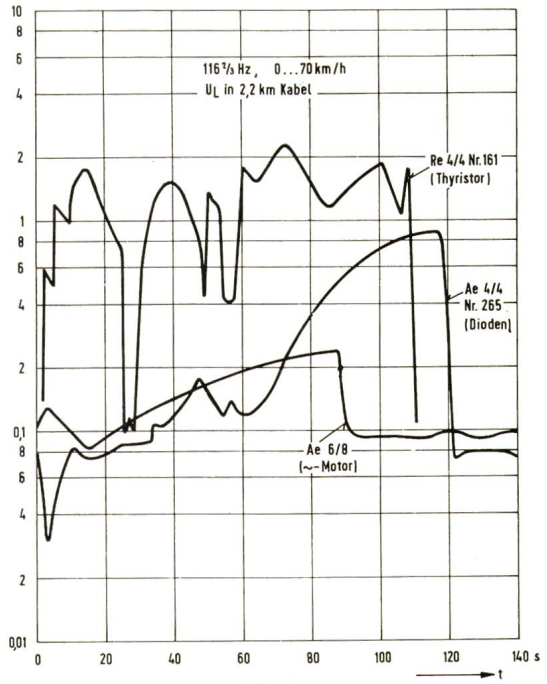


Fig. 2

Gelegenheit bot, mit der BLS zusammen die Probleme zu untersuchen. Ich danke auch den Veranstaltern, dass sie einem der Beteiligten an den schweizerischen Beeinflussungsversuchen ermöglichen, als Diskussionsredner einige Rosinen aus den umfangreichen Messergebnissen darzubieten.

Vorher möchte ich aber noch zu einigen Fragen, die in den Vorträgen behandelt wurden, meine Ansicht äussern:

Die Widerstandskopplung zwischen Gleis und Kabel fällt bei Kabellängen von wenigstens einigen km kaum mehr in Betracht, die Einkopplung ist praktisch rein induktiv. Zur Berechnung der Längsspannung ist es nicht zulässig, nur vom Kreis Fahrdraht-Schiene auszugehen, der Rückstrom durch Erde ist von primärer Bedeutung, die Randeffekte beim Unterwerk und beim Triebfahrzeug erstrecken sich nur über kurze Längen. Die grundlegenden Arbeiten über induktive Beeinflussung stammen aus den Zwanzigerjahren und sind noch heute voll gültig. Die Vorausberechnungen stimmen recht gut für Anlagen, die elektrisch kurz sind gegen die Wellenlänge. Diese Bedingung ist in schweizerischen Grössenverhältnissen immer erfüllt für $16^2/_3$ und 50 Hz, im Bereich des Oberwellenspektrums aber nur ausnahmsweise.

Betriebserdungen sind bei Fernmeldestromkreisen durchaus zulässig, sie bilden die Voraussetzung einer wirtschaftlichen Realisierung von Teilnehmeranschlüssen an Zentralen. Bedingung ist jedoch, dass nicht nur das Kabel, sondern auch die Ausrüstungen gegen Erde einen hohen Grad von Impedanzsymmetrie aufweisen. Sobald geerdete Adern im Bündel vorhanden sind, nützt allerdings der Schirm zwischen Bündel und Mantel nicht mehr viel. Das ist aber auch der Fall, wenn einzelne Adern unterwegs in andere Kabel abgespleisst werden.

Der Erdunsymmetrieabgleich eines Kabels bringt eine wesentliche Verringerung der Querspannungen. Da jedes

Spulenfeld für sich abgeglichen werden muss, spielt der wechselnde Standort der Lokomotive keine Rolle.

Nun einige willkürlich gewählten Ergebnisse der Untersuchungen auf der BLS-Strecke:

Fig. 1 zeigt das Spektrum der Längsspannung in einem Kabel bei drei verschiedenen Lokomotivtypen bei gleicher Geschwindigkeit und gleicher Leistung. Diese Spektren entsprechen praktisch ebenfalls den entsprechenden Spektren des Fahrdrahtstromes. Die vierte Kurve zeigt das Spektrum eines auf Grund dieser Messergebnisse entwickelten Ersatzgenerators, der dazu dient, Störungen durch Thyristorlokomotiven in Fernmeldestromkreisen zu simulieren.

Das Spektrum ist stark abhängig vom Steuerwinkel. Der Vergleich der Spannung der 7. Harmonischen (116 2/3 Hz) in der Längsspannung eines Kabels bei der Anfahrt dreier Lokomotivtypen dürfte vor allem die Spezialisten für Zugssicherungsanlagen interessieren. Die bei einer Diodenlokomotive nur bei hoher Belastung auftretende Spannung wird bei der Thyristorlokomotive während des ganzen Anfahrvorgangs um einen Faktor 2...3 überschritten (Fig. 2).

Noch zwei Kurvenblätter zum Thema Kabelaufbau:

Fig. 3 zeigt die Frequenzabhängigkeit des Reduktionsfaktors einiger Kabeltypen. Besonders günstig ist der Reduktionsfaktor von Kabeln mit geschichtetem Aufbau, wie sie in vervollkommneter Form auch für blitzgeschützte Anlagen verwendet werden. Das Kabel mit einer Band- (C) und doppelter Flachdrahtarmierung (FF) verringert die Spannung bereits bei 500 Hz auf weniger als 1 %. Noch besser ist ein eiserner Kabelkanal mit impedanzarmen Stossverbindern, bei dem sich der Skineffekt äusserst günstig auswirkt.

Bei 16 2/3 Hz ist der Reduktionsfaktor spannungsabhängig. Zur Angabe eines Reduktionsfaktors gehört daher unbedingt die Frequenz und die Höhe der Spannung im Kreis Kabel-Erde (Fig. 4).

Die wirtschaftlichste Lösung für Kabel mit kleinem (also günstigem) Reduktionsfaktor bietet zweifellos der Aluminiummantel.

Das Ergebnis der gemeinsam mit der BLS und der Abteilung Fernwirksysteme der BBC durchgeführten Untersuchungen lässt sich wie folgt zusammenfassen:

a) Bei bestehenden Streckenkabeln von Bahnen wird in den meisten Fällen ein Erdkapazitätsausgleich nötig sein.
b) Neue Streckenkabel müssen zur Beherrschung der 16 2/3 Hz-Komponente mit einem derart guten Reduktionsfaktor gebaut werden, dass Störungen durch Triebfahrzeuge mit Phasenanschnittsteuerung weitgehend verhütet werden. Trotzdem ist ein Erdkapazitätsausgleich empfehlenswert.
c) An Kabelanlagen der PTT werden wegen des grössern Abstandes vermutlich nur in Einzelfällen Störungen auftreten, es fehlen aber zur abschliessenden Beantwortung dieser Frage noch die Erfahrungen.
d) Freileitungen und Kabel ohne gutleitenden Metallschirm werden etliche Probleme bringen, wenn sie auf längere Strecken in kleinem Abstand von der Bahn liegen.

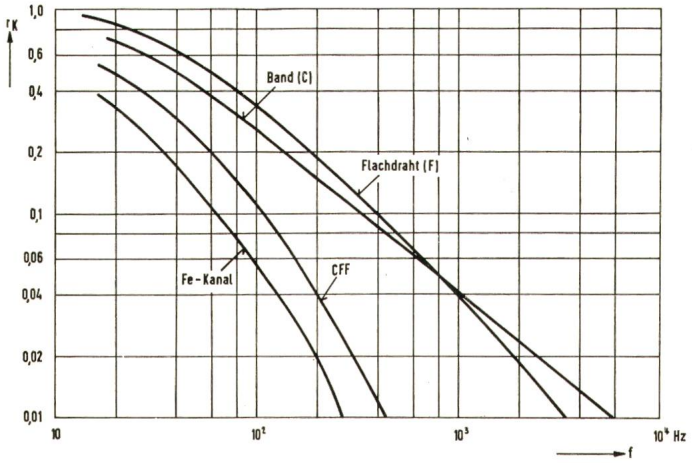


Fig. 3

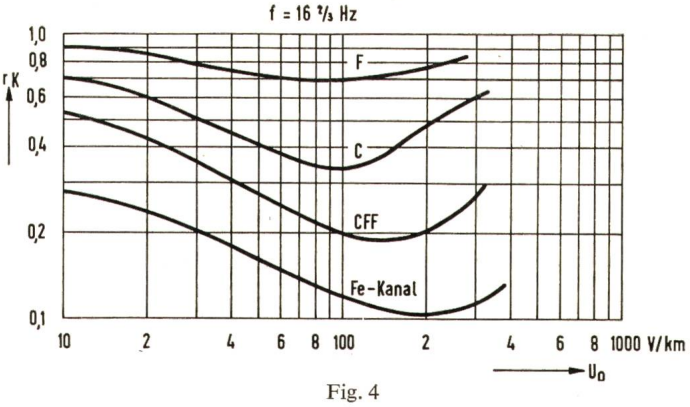


Fig. 4

Die Fernmeldeleute haben keinen Grund, besonders glücklich über die Einführung der Phasenanschnittsteuerung zu sein. Vergleicht man aber die Situation mit der Elektrifizierung der Bahnen vor 50 Jahren, so scheinen die Beeinflussungsprobleme doch kein ausreichendes Argument gegen die Einführung der neuen Traktionsart zu sein. Es ist wünschenswert, möglichst bald in einem räumlich begrenzten Gebiet Erfahrungen sammeln zu können. Nur so ist es möglich, den Traktionsspezialisten den für eine Wirtschaftlichkeitsberechnung nötigen Aufwand für Schutzmassnahmen an Fernmeldeanlagen anzugeben.

Diskussionsbeitrag

von *B. Capol*, Brugg

Gestatten Sie mir, dass ich zur Frage des Mantelschutzfaktors kurz aus der Sicht des Kabelfabrikanten Stellung nehme!

Der Redutionsfaktor des Kabelmantels ist definitionsgemäss das Verhältnis der induzierten Spannung in einer durch einen metallischen Mantel geschützten Ader zur induzierten Spannung in einer ungeschützten Ader (z.B. in einem Kabel mit Kunststoffmantel).

$$r_K = \frac{U_{ia}\ \text{geschützt}}{U_{ia}\ \text{ungeschützt}}$$

oder mit den entsprechenden Impedanzen ausgedrückt

$$r_K = \frac{R_M}{R_M + j\omega\,(L_{ME} + L_A)}$$

R_M = Ohmscher Widerstand des Mantelstromkreises
L_{ME} = Induktivität der Schleife Kabelmantel–Erde
L_A = Induktivität der Armierung

Durch den Kabelhersteller können die Grössen R_M und L_A in gewissen Grenzen frei gewählt werden.

Durch Erniedrigung des Mantelwiderstandes einerseits und vor allem durch Erhöhung der Mantelinduktivität anderseits kann der Reduktionsfaktor gesenkt werden.

Der Mantelwiderstand kann gesenkt werden durch Verwendung eines leitfähigeren Mantelmetalls, z.B. Aluminium

bzw. Kupfer anstelle von Blei, oder durch Verwendung von Alu- bzw. Cu-Beiläufen unter dem Bleimantel.

Ist die Impedanz $\omega (L_{ME} + L_A)$ gegenüber R_M klein, so wird eine Erniedrigung des ohmschen Mantelwiderstandes nur einen bescheidenen Einfluss auf die Verkleinerung des Reduktionsfaktors ausüben.

Wird dagegen $\omega (L_{ME} + L_A) \gg R_M$, so kann die Formel für den Reduktionsfaktor angenähert mit

$$r_K \approx \frac{R_M}{\omega (L_{ME} + L_A)}$$

angeschrieben werden.

Die Induktivität der Schleife Kabelmantel–Erde ergibt sich aus der für die praktische Rechnung genügend genauen Formel

$$L_{ME} \cong \frac{\mu \cdot l}{2\pi} \left(\ln \frac{2\delta}{d_M} + \frac{1}{4} \right)$$

$$\mu = \mu_r \cdot 1{,}256 \cdot 10^{-8} \frac{Vs}{Acm}$$

d_M = Manteldurchmesser

$$\delta = \frac{1 \cdot 85}{\sqrt{\mu \cdot \lambda_B \cdot \omega}} \quad \Bigg| = \text{fiktiver Durchmesser des Ersatz-Erdrückleiters}$$

λ_B = Bodenleitfähigkeit in µs/cm

Die Induktivität der Eisenarmierung pro Längeneinheit rechnet sich nach der Formel

$$L_A' \approx \frac{\mu \cdot \sin \alpha \cdot Fw'}{\pi (d_K + d_A)}$$

α = Drallwinkel der Eisenbänder
F = totaler Eisenquerschnitt
w = Windungszahl pro Längeneinheit
d_K = Kabeldurchmesser unter der Armierung
d_A = totale Dicke der Eisenarmierung

Die massivste Senkung des Reduktionsfaktors ist durch Erhöhung der Induktivität zu erreichen d.h. durch Verwendung einer Eisenarmierung mit einem hohen Eisenquerschnitt von hoher Permeabilität, die dem magnetischen Fluss einen möglichst kreisförmigen Schluss um das Kabel erlaubt ($\alpha \rightarrow 90^0$).

Durch eine optimale Kombination von R_M und L_A kann praktisch ein Reduktionsfaktor erreicht werden, der bei 50 Hz in der Grössenordnung 10^{-2} bis 10^{-3} liegt und mit zunehmender Frequenz rasch gegen Null absinkt.

Entsprechende Kurven über den Verlauf des Reduktionsfaktors in Abhängigkeit der Frequenz wurden Ihnen für bestimmte Kabelaufbauten im vorausgehenden Votum von Herrn Meister gezeigt.

Zusammenfassend darf festgestellt werden, dass die Kabelfabrikanten in der Lage sind, den Reduktionsfaktor der Telefon- und Signalkabel weitgehend nach Mass einzustellen und so ihren Beitrag zur Bekämpfung der störenden Beeinflussungen zu leisten.

Allerdings, dies muss leider gesagt sein, sind diese Massnahmen nur an Kabeln möglich, die nicht schon verlegt sind!

Hoch- und Niederfrequenzvorgänge bei Thyristoranlagen

Von *Ed. Gerecke,* Zürich

Der Zündvorgang

Beim Zünden des in Fig. 1 dargestellten Thyristors gibt man auf die Steuerelektrode einen steilen Impuls, wodurch

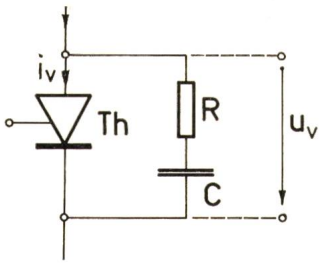


Fig. 1
Beschalteter Thyristor
Thyristor Th mit Ventilspannung u_v; Ventilstrom i_v und Beschaltungskreis R–C

die zwischen Anode und Kathode vorhandene Ventilspannung u_0 nach Fig. 2a in etwa einer Mikrosekunde zusammenbricht. In dem Oszillogramm Fig. 2b betragen sowohl die Verzögerungszeit t_v wie die Abfallzeit t_a je 0,5 µs. Durch Beschaltungsglieder R–C (Fig. 1) kann das Zünden beschleunigt werden. Es bildet sich zwischen Anode und Kathode durch Townsend-Ionisierung ein feiner Kanal, der sich erhitzt und sich sehr rasch radial ausdehnt. Die Stromanstiegsgeschwindigkeit di_v/dt darf jedoch eine bestimmte Grenze, z.B. 500 A/µs, nicht übersteigen, ansonst das Silizium schmilzt. Der Zündvorgang beim Quecksilberdampfgleichrichter und bei einer Funkenstrecke in Luft geht genau gleich vor sich, das Umkippen von einer schwachen Vorentladung in ein gut leitendes Plasma erfolgt in etwa 1 µs, wobei Spannungsschwankungen von rund 1000 V/µs auftreten. Dabei springt das Potential u_0 der Anode auf nahezu Null ab, wodurch benachbarte Anlageteile wie eine *Stimmgabel* angestossen werden und in ihrer *Eigenfrequenz* schwingen, deren Amplitude allmählich entsprechend der Kreisdämpfung abklingt.

Dieser Vorgang wurde bereits um das Jahr 1900 unter dem Namen «*Löschfunkensender*» (Fig. 3) zur Erzeugung von gedämpften Radiowellen verwendet, daher die Namen «Rundfunk» und «Telefunken». Die «Funk»-beeinflussungen durch Thyristoren gehen genau nach diesem Schema vor sich,

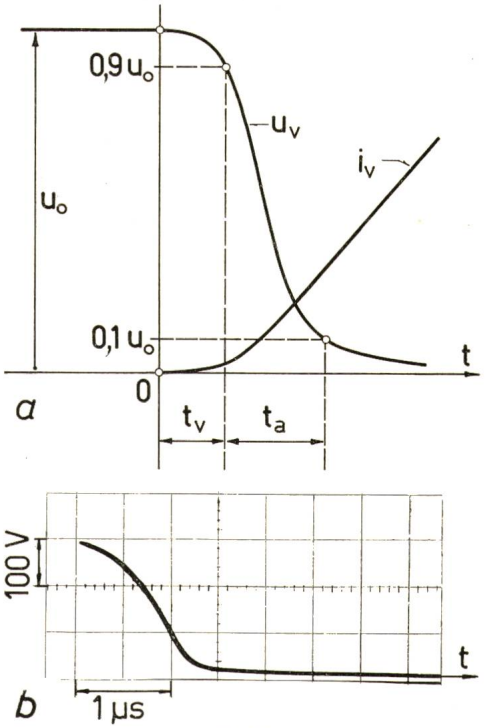


Fig. 2
Zündvorgang beim Thyristor
a Ventilspannung u_v und Ventilstrom i_v als Funktionen der Zeit. Verzögerungszeit t_v und Anfallzeit t_a
b Oszillogramm von u_v

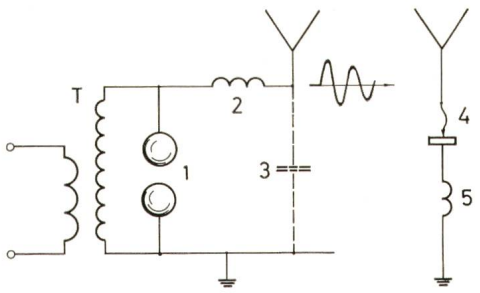


Fig. 3
Löschfunkensender
Transformator T mit Funkenstrecke 1, Induktivität 2 und Kapazität 3 der Antenne. Kristalldetektor 4 und Kopfhörer 5 im Empfangskreis

wobei benachbarte Metallteile sowie die Fahrleitung als Sendeantenne wirken.

Der Löschvorgang

Bei sehr raschem Löschen des Ventilstromes (Fig. 4), was beim Wechselrichter und beim Steller vorkommt, nimmt der Ventilstrom i_v ungefähr linear von einem Anfangswert i_0 bis Null ab, worauf der negative Nachstrom i_n so lange fliesst, bis alle elektrischen Stromträger im Halbleiter «aufgebraucht» sind. Dann «staut» sich der Strom i_n am Ventil, er nimmt dann rasch ab, oft in Form einer Schwingung, wobei die zuvor vom Strom i_v durchflossenen Induktivitäten Eigenschwingungen mit benachbarten Kapazitäten durchführen können. Die Frequenz dieser «Löschschwingungen» ist im Allgemeinen verschieden von denjenigen der «Zündschwingungen». Der Löschvorgang und die Entionisierung des Plasmas gehen beim Thyristor, beim Quecksilberdampfventil, bei der Luftfunkenstrecke und bei Leistungsschaltern sehr ähnlich vor sich, die Zeit zur Wiederverfestigung oder die «Freiwerdezeit» kann einige bis einige Hundert Mikrosekunden betragen.

In Fig. 4 ist die Stromabnahmegeschwindigkeit di_v/dt gleich 200 A/µs, während sie in Fig. 5d nur 8400 A/s beträgt. Letzteres zeigt jedoch eine interessante Erscheinung. Diesem Versuch liegt die Einwegschaltung Fig. 5a mit einer Diode zugrunde. Fig. 5b zeigt den Ventilstrom i_v sowie den Spannungssprung δu beim Erlöschen und Bild 5c die zugehörigen Oszillogramme. Dort ist beim Spannungssprung δu eine ganz kleine Schwingung gerade noch sichtbar, sie ist sehr stark zeitgedehnt in Fig. 5d aufgelöst. Man erkennt, dass die maximale negative Ventilspannung $u_{v\,max} = 520$ V beträgt und damit $10{,}2 \cdot \delta u$ von Fig. 5a. Man sieht also, wie schwierig das Oszillographieren bei Thyristoren ist! Wegen der Nichtlinearität des Ventils steigt die Frequenz des Schwingkreises

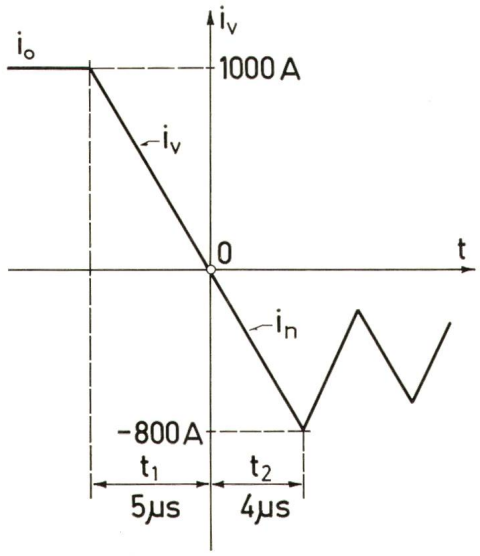


Fig. 4
Löschvorgang beim Thyristor
Beispiel eines sehr raschen Löschens des Ventilstromes i_v in 5 µs und anschliessender (negativer) Nachstrom i_n mit Eigenschwingungen

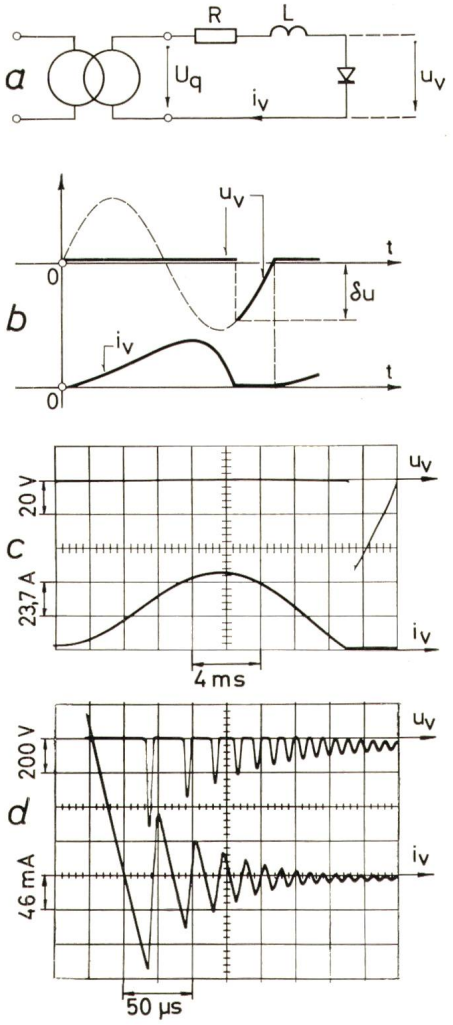


Fig. 5
Trägerstauschwingung beim Löschen des Stromes in einer Siliziumdiode
a Einwegschaltung. $U_{q\,eff} = 48$ V; $R = 21{,}7$ mΩ; $L = 7{,}45$ mH (Luft); $f = 50$ Hz
b Ventilstrom i_v und und Ventilspannung u_v. Sprung δu der Ventilspannung beim Löschen
c Oszillogramm von i_v und u_v bei der Ablenkfrequenz von 50 Hz. Stromflussdauer = 305° ≙ 17 ms; Sprungspannung $\delta u = 51$ V; Stromänderungsgeschwindigkeit beim Löschen $= di_v/dt = 8400$ As^{-1}.
d i_v und u_v im Mikrosekundengebiet. $i_{\sim\,max} = 0{,}128$ A; $u_{v\,max} = 520$ V $= 10{,}2\,\delta u$.
Frequenz der nichtlinearen Stromschwingung von 28 auf 128 kHz ansteigend

von 28 auf 128 kHz an. Die Beschaltung der Halbleiterventile mit R–C-Gliedern nach Fig. 1 bezweckt eine starke Reduktion von $u_{v\,max}$.

Sowohl beim Zünden wie auch beim Löschen von Thyristoren treten also *Eigenschwingungen* auf. Sie kommen auch beim Ausschalten von Leistungsschaltern vor. Man nennt sie dort die «*wiederkehrende Spannung*», worüber bereits grosse Versuchsreihen durchgeführt wurden. Der Unterschied besteht eigentlich darin, dass die Schalter nur gelegentlich,

Thyristoranlagen dagegen 33- oder 300mal pro Sekunde geschaltet werden!

Radioversuche an einer Quecksilberdampfgleichrichteranlage

Fig. 6 zeigt das Schema der von den Sécheronwerken in Genf 1950 zusammen mit der PTT durchgeführten und im CIGRE-Bericht 1952/314 [1] ausführlich beschriebenen Versuche.

Fig. 7a stellt die im Eingangskreis des Marineempfängers der PTT auftretende, exponentiell gedämpfte Sinusschwingung von 400 kHz dar. In Fig. 7b ist ein Kathodenstrahloszillograph mit der Gleichrichteranlage lose, über einen kleinen Kondensator gekoppelt oder nur an ein Stück Draht angeschlossen. Bei 50 Hz Kippfrequenz zeigen sich je 6 senkrechte Striche beim Zünden und beim Löschen. Wer schon in einem Stromrichterlabor gearbeitet hat, kennt dieses Bild zur Genüge, es entsteht bereits dann, wenn man in die Eingangsbuchse des K. O. ein kurzes Stück Draht einführt.

Die Fig. 7c und 7d zeigen die Spannung am Lautsprecher bei Gittersteuerung und bei 50 Hz bzw. 300 Hz Kippfrequenz. Bei letzterer fallen alle 6 *Zünd-* und alle 6 *Löschspitzen* je über-

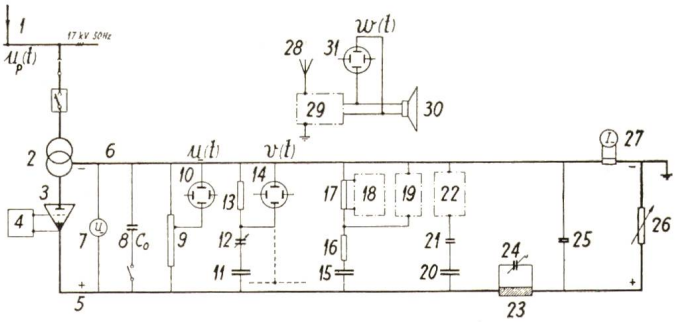


Fig. 6
Quecksilberdampfgleichrichteranlage zur Untersuchung der Hochfrequenzvorgänge [1]
Starkstromteile 1–2–3–4–5–6 und Wasserwiderstand 26 mit R ≧ 0,6 Ω; 11–15–20 grosse Kapazitäten, 12–21 kleine Kopplungskondensatoren. K. O. 14 mit Spannung v(t) bei loser Kopplung oder mit Antenne; Pos. 18 und 22 Noise Meter, Ferris, der PTT; kleinerer Batterieempfänger 28–29–30 mit Spannung w(t) am K. O. an Lautsprecherklemmen; Pos. 19 Ultrasonic Analyzer, Panoramique Radio Inc. N. Y. CIGRE [1]

einander, letztere sind rund zehnmal kleiner als die Zündspitzen. Im Lautsprecher hört man dabei einen reinen Ton von 300 Hz. Ferner wurde dabei die Empfängerfrequenz von 550 kHz in 6 Stufen bis 1600 kHz gesteigert, wobei die Höhe der Spitzen abnimmt. Das Resultat einer Frequenzanalyse zeigen die Fig. 7e (0...200 kHz) und 7f (100...300 kHz). Es erscheinen alle Frequenzen, da es sich um mit 300 Hz repetitiv wiederholte Einschaltvorgänge handelt. Ein flaches Maximum bei 135 kHz dürfte mit dem Transformator zusammen hängen.

Radioversuche an einer Thyristoranlage

Im früheren Institut des Autors (Institut für Automatik und Industrielle Elektronik) an der ETHZ wurde 1966 die in Fig. 8 dargestellte Versuchsanlage gebaut. Einzelheiten entnehme man der Legende. Die Einbrüche der Spannung am Eingang M4 der Thyristorbrücke zeigen die Fig. 9a–b. Dabei ist der Gleichstrom *gelückt*. Wie reagiert nun der Marineempfänger der PTT? Fig. 10a zeigt die im Empfangskreis angeregte exponentiell gedämpfte Sinusschwingung und Fig. 10b die im Zwischenfrequenzkreis ZF auftretende *speerförmige Hüllkurve*. Diese entsteht dadurch, dass dieser Kreis periodisch angeschlagen wird, er facht sich hierauf mit einer grossen Zeitkonstante an und klingt dann wieder gedämpft ab. Diese speerförmigen Kurven sind nochmals in Fig. 10c

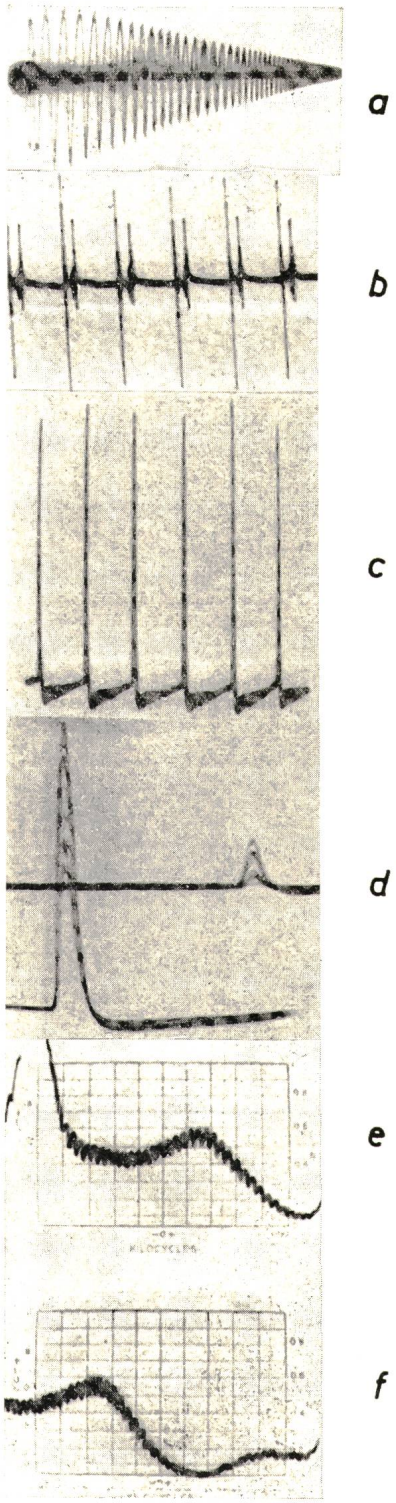


Fig. 7
Oszillogramme der HF- und NF-Vorgänge bei der Anlage nach Fig. 6
a Spannung v(t) über Antenne an K. O. 14; Empfängerfrequenz 400 kHz; exponentielle Zeitablenkung; CIGRE [1] Fig. 65
b Spannung v(t) wie bei (7a); Zeitablenkung 50 Hz; CIGRE Fig. 79
c Spannung w(t) am Lautsprecher Pos. 30–31; Zeitablenkung 50 Hz; Zündspitzen, Empfangsfrequenz 550 kHz; CIGRE Fig. 106
d Wie c, jedoch Zeitablenkung 300 Hz; Empfängerfrequenz in 6 Stufen steigend von 550...1600 kHz, wobei die Amplitude w(t) auf die Hälfte abnimmt; CIGRE Fig. 107
e Frequenzanalyse 0...200 kHz, Maximum bei 135 kHz; CIGRE Fig. 74
f Wie e bei 100...300 kHz; CIGRE Fig. 75

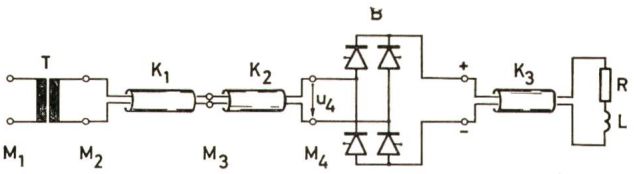


Fig. 8
Versuchsaufbau zur Untersuchung von HF-Schwingungen bei Thyristoren [3]
Transformator T – 380/290 V – 15 kVA – 50 Hz
Kunststoffkabel K_1 – 17 m – 2×50 mm²
Kunststoffkabel K_2 – 15 m – 3×35 mm²
Bleimantelkabel K_3 – 25 m 2×50 mm²
Brücke B mit 4 Thyristoren AEG T5 DN – 50 A – 1200 V
Belastung R–L. M1...M4 Meßstellen mit K. O. Spannung u_4

bei 50 Hz Kippfrequenz aufgenommen und das darunter angeordnete Fig. 10d gibt die am *Lautsprecher* auftretende niederfrequente Spannung wieder. Diese Zacken treten genau synchron mit den Spannungseinbrüchen von Fig. 9a auf.

Die Fig. 11a...11d wurden bei *ungelücktem* Gleichstrom aufgenommen. Man erkennt in Fig. 11b deutlich die Überlappungszeit ü. Zudem trat in der negativen Halbwelle fälschlicherweise eine verspätete Zündung auf. Die Fig. 11c und 11d geben diese Verhältnisse sehr klar auf der ZF- und NF-Seite wieder.

Aus Fig. 12a ersieht man, dass der Spannungseinbruch auf der Primärseite des Transformators viel kleiner ist als auf der Sekundärseite.

Fig. 12b zeigt die zugehörige Schwingung an der Meßstelle M3 zwischen den beiden Kabeln K_1 und K_2 im Mikrosekundengebiet.

Wie hängen nun diese Vorgänge mit der *Eingangsfrequenz* des *Empfängers* zusammen? Die bei 6,45 MHz und bei 787 kHz aufgenommenen Fig. 13a bzw. 13b zeigen nur eine geringfügige Differenz.

Es sei noch darauf hingewiesen, dass die Spannungssprünge am Lautsprecher immer die gleiche Polarität aufweisen, trotzdem die Spannungseinbrüche wechselstromseitig nach Fig. 9a positiv und negativ sind.

Will man feststellen, wieviele Lokomotiven gleichzeitig an einem Fahrdraht laufen, so kann man dies samt den Steuerwinkeln am Lautsprecher eines kleinen Batterieempfängers sehen!

Aus den Fig. 14a und 14b kann man ableiten, dass

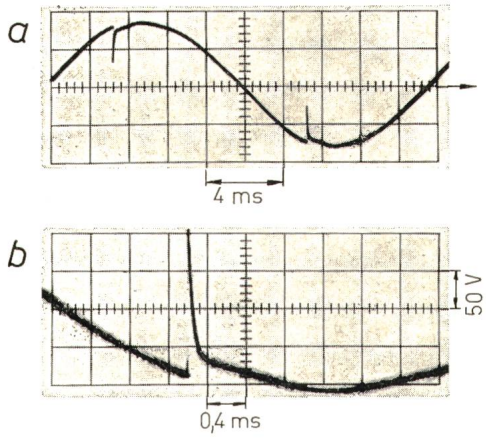


Fig. 9
Verlauf der Wechselspannung u_4 bei gelücktem Strom [3]
a Anlage ohne Transformator T; 220 V_{eff}; R = 4,4 Ω; L = 0; α = 60°
b Zeit gedehnt

sowohl bei gelücktem wie bei ungelücktem Gleichstrom der *Spannungssprung* Δu beim Zünden durch

$$\Delta u = C \cdot \sin \alpha$$

gegeben ist. Die Breite des Impulses von Fig. 14b ist gleich der Überlappungszeit ü. Die obige Formel gilt nun auch angenähert für die maximalen Amplituden U_{ZF} der speerförmigen Kurven im Zwischenfrequenzbereich und ebenso für die Zacken U_{NF} am Lautsprecher, wie Fig. 15 zeigt. Fig. 16 bestätigt ferner die *Proportionalität* zwischen U_{ZF} und U_{NF} einerseits und ΔU andererseits.

Fig. 17 widerspricht dem scheinbar. Das rührt jedoch davon her, dass bei konstanter Quellenspannung und konstanten Werten R–L der Last (Fig. 8) oberhalb α = 46° der Gleichstrom gelückt und unterhalb ungelückt ist und dass zugleich der in den Fig. 11a...d dargestellte Zündfehler auftritt.

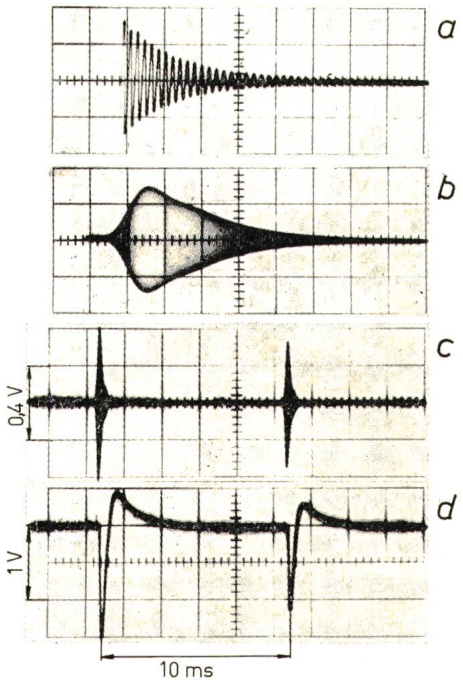


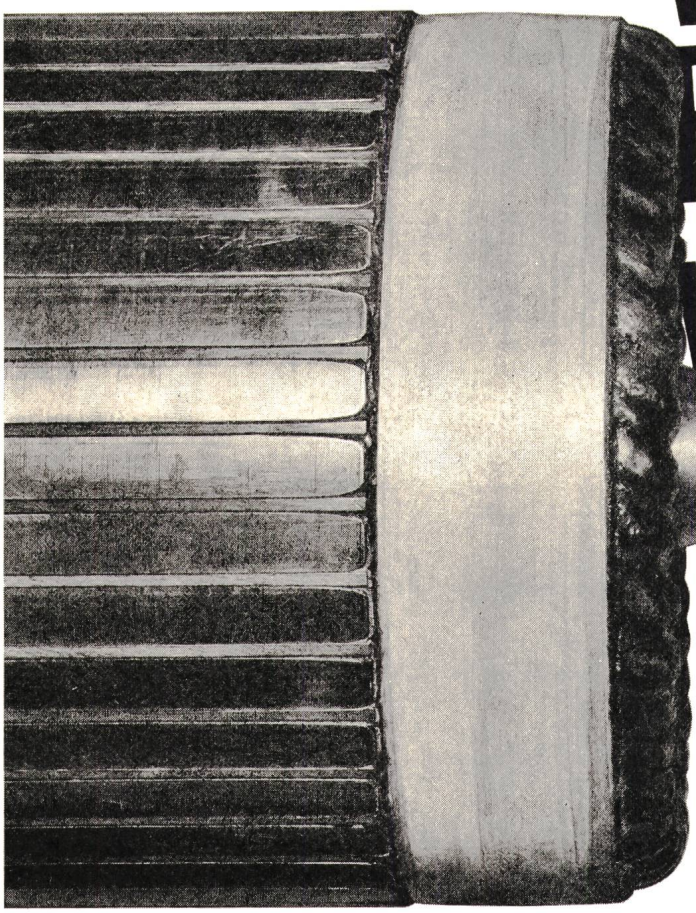
Fig. 10
HF- und ZF-Oszillogramme
a exponentiell gedämpfte HF-Schwingung am Eingang des Empfangskreises [2]
b Hüllkurve der Schwingung u_{ZF} am Zwischenfrequenzkreis ZF [2]
c Oszillogramm u_{ZF} am Zwischenfrequenzkreis; α = 36°; Empfänger auf 120 kHz eingestellt; R = 5,35 Ω; L = 10,9 mH; gelückter Strom; Zwischenfrequenz 465 kHz; [3]
d Oszillogramm der Lautsprecherspannung u_{NF}; Daten wie bei 10c [3]

Es wurde nun versucht, die Anlage Fig. 8 derart zu *entstören,* dass andere, in der Nähe arbeitende Gruppen nicht mehr beeinflusst wurden. Dies gelang durch den Einbau eines R–L-Kreises (R = 50Ω, L = 6,8 μF) bei M2 sowie von Kapazitäten C_1, C_2, C_3 bei M2, M4 und gleichstromseitig wobei alle C-Werte aus je 4 Kondensatoren

$$C_k = 1{,}5\ \mu F + 0{,}25\ \mu F + 0{,}05\ \mu F + 2\ nF$$

aufgebaut wurden, um die Eigeninduktivität möglichst klein zu halten. Dadurch wurde die Spannung U_{ZF} auf 1 % von Fig. 15 reduziert, die sinusförmige Abhängigkeit von α blieb jedoch erhalten.

Für α = 0 tritt keine Zündspannungsspitze Δu auf, bei *Diodenlokomotiven* ist daher nur die Sprungspannung δu beim Löschen (Fig. 5b) massgebend. Die Wirkungen von δu sind jedoch viel kleiner als von Δu.



Wenn Sie Res-i-Glas wirklich noch nicht kennen –

so ist das unsere Schuld!

Diese Unterlassung möchten wir schnellstens gutmachen. Darum offerieren wir Ihnen jetzt kostenlos ausführliche Unterlagen mit Muster und Berechnungstabelle für die Praxis. Sie erhalten die Res-i-Glas-Dokumentation gegen Einsendung dieses Inserates oder einer Postkarte mit Ihrer Adresse. Sie werden dann auch erfahren, dass Res-i-Glas-Bandagierung hilft, Zeit und Kosten zu sparen, zusätzliche Sicherheit bietet, elektrische Vorteile und erstklassige thermische Eigenschaften aufweist (Klasse H 180 °C).

Und noch etwas – das nicht in der Dokumentation steht:

- Res-i-Glas hat sich seit mehr als 10 Jahren in Amerika und Europa bewährt.
- Unsere beste Referenz: Die namhaften Firmen der Elektroindustrie Europas verwenden Res-i-Glas.

MICAFIL AG, CH-8048 Zürich, Postfach (Telefon 62 52 00)

TUS

erschliesst neue Möglichkeiten für die wirtschaftliche Übermittlung von Informationen

Das tonfrequente Übertragungs-System TUS 35 von Autophon benützt für die Übermittlung von Informationen bestehende Telephonleitungen der PTT, ohne den Telephonverkehr zu beeinträchtigen. Dieser Übertragungsweg wird dauernd kontrolliert. Das System vermag mehrere Meldungen zu codieren, zu übertragen und dem richtigen Empfänger zuzuleiten.

TUS übermittelt sicher und schnell:

Alarmmeldungen
Messwerte
Zustandskontrollen
Füllstandsanzeigen usw.

durch Mehrfachausnützung von Telephonleitungen

(das heisst:
einen wesentlichen Teil einer TUS-Anlage besitzen Sie schon!)

Das tonfrequente Übertragungs-System bietet zweckmässige und wirtschaftliche Lösungen für Probleme wie
- zentrale Überwachung entfernter Objekte
- automatische Übertragung von Meldungen verschiedenen Inhalts
- Aufbietung von Pikettpersonal oder Feuerwehren
- Übertragung von Fernwirkbefehlen, mit Rückmeldung
- Kontrolle von Fabrikationsprozessen, Laborversuchen, Klimaanlagen, usw.

Es gibt TUS-Anlagen für alle Bedürfnisse:
- einfacher Kanal zwischen zwei Punkten, oder
- Grossanlagen mit Unterzentralen und mehreren Auswertestellen
- Codierzusätze für die Kennzeichnung verschiedener Meldungen, automatische Wahl der zuständigen Überwachungsstelle
- Wechselbetrieb in beiden Richtungen
- automatische Kontrolle der Übertragungsleitungen
- Übertragungsgeschwindigkeit 50 bits/s

Verschiedene Kriterien von verschiedenen Orten an verschiedene Adressaten — automatisch über Telephonleitungen:
mit TUS von

AUTOPHON

Autophon AG

8059 Zürich	Lessingstrasse 1–3	051 36 73 30
9001 St. Gallen	Teufenerstrasse 11	071 23 35 33
4000 Basel	Schneidergasse 24	061 25 97 39
3000 Bern	Belpstrasse 14	031 25 44 44
6005 Luzern	Unterlachenstrasse 5	041 44 84 55

Téléphonie SA

1006 Lausanne	9, Chemin des Délices	021 26 93 93
1951 Sion	54, rue de Lausanne	027 2 57 57
1227 Genf	25, route des Acacias	022 42 43 50

Fabrikation, Entwicklungsabteilung und Laboratorien in Solothurn

Es wäre interessant, die in den Fig. 10b, 11c, 11d, 13a und 13b dargestellten Oszillogramme *analytisch* zu berechnen und damit deren Abhängigkeit von den Parametern des Radioempfängers klar zu stellen.

Die Vorgänge auf der Fahrdrahtleitung

Fig. 18a zeigt ein vereinfachtes Schaltbild, wobei gleichstromseitig nur 1 Thyristor angenommen wurde. Nimmt man das Windungsübersetzungsverhältnis des Lokomotivtransformators LT zu $N_1 : N_2 = 10$ an und lässt man zu, dass das Ersatzschema des Transformators LT auch hier zuständig sei, so gelangt man zu Fig. 18b, wobei die auf die Primärseite übertragene Motorspannung zu $10 \cdot 1200$ V $= 12000$ V einzusetzen ist. Bei Zünden des Thyristors entsteht bei $\alpha = 60^0$ eine Sprungspannung $\Delta u = 15000 \cdot \sqrt{2} \cdot \sin 60^0 - 12000 = 6000$ V, welcher sich nach Fig. 18c längs der Fahrleitung

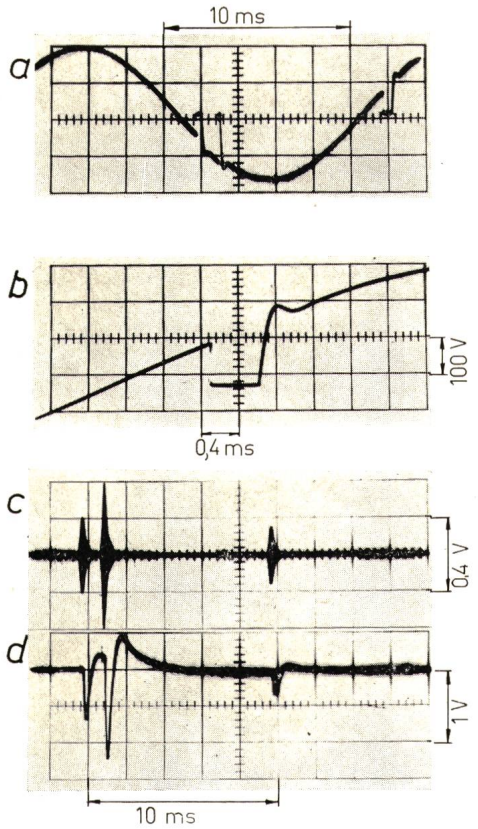


Fig. 11
Verlauf der Wechselspannung bei ungelücktem Gleichstrom
Mit Transformator T; 290 V_{eff}; $\alpha = 18^0$; R = 5,12 Ω; L = 14,5 mH; Meßstelle M4 [3]
a 3 Spannungseinbrüche
b 1 Spannungseinbruch gedehnt
c Zwischenfrequenzspannung u_{ZF}; Empfangsfrequenz 120 kHz; Daten wie Fig. 11a
d Spannung am Lautsprecher u_{NF}

als *Wanderwelle* mit ungefähr Lichtgeschwindigkeit v_0 fortpflanzt. Das Absinken des Potentials u (x, t) an der Stelle x hat einen Strom i (x, t) zur Folge, der bei einem angenommenen Wellenwiderstand von 600 Ω zu

$$i = \frac{600\ \text{V}}{600\ \Omega} = 10\ \text{A}$$

geschätzt werden kann. Die Laufzeit T längs einer $L_0 = 30$ km langen Fahrdrahtleitung beträgt T = 100 µs. Die Wanderwelle wird am Transformator TU des Unterwerkes teilweise reflektiert, kommt zurück zu LT, wird dort wieder reflektiert

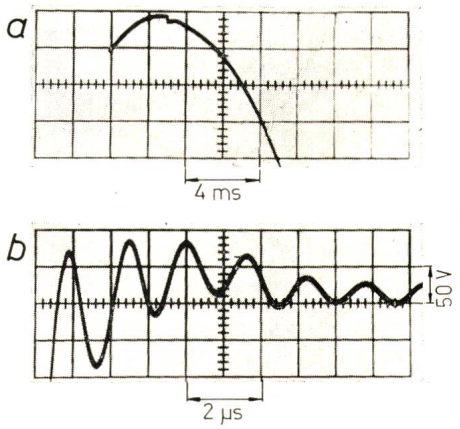


Fig. 12
a Phasenspannung auf der Primärseite des Transformators Meßstelle M1; $\alpha = 63^0$; R = 4,84 Ω; L = 44,3 mH [3]
b Kabelschwingung Meßstelle M3; $\alpha = 70^0$ [3]

usw., wodurch der Strom treppenförmig ansteigt. Die Länge l_0 der Front (Fig. 18c) ist bei einer zum Zünden des Thyristors nach Bild 2a benötigten Zeit $t_v + t_a = 1$ µs gleich $l_0 = 300$ m und daher im Allgemeinen kleiner als die Länge von Fernmelde- oder Signalleitungen FM (Fig. 18a–b).

Der obige Spannungssprung Δu kann auf benachbarte Rundfunkempfänger einwirken, während zudem der Strom i (x, t) auf Leitungen und Kabelmänteln FM Spannungen induziert. Der obigen Rechnung haftet jedoch ein grosser Fehler an, indem für Vorgänge im Mikrosekundengebiet das Transformatoreisen nicht mitkommt, das Windungsübersetzungsverhältnis also nicht massgebend ist und die Übertragung *kapazitiv* erfolgt. Diese hängt von der Anordung der Wicklungen unter sich und gegenüber dem Eisen und allfälligen Schirmteilen ab. Der von α abhängige und oben zu i = 10 A geschätzte Strom dürfte daher kleiner sein.

Der Berechnung der Wanderwellen liegt die *partielle Differentialgleichung* zweiter Ordnung vom hyperbolischen Typus:

$$lc \cdot \frac{\delta^2 u}{\delta t^2} + (rc + lg)\frac{\delta u}{\delta t} + rgu = \frac{\delta^2 u}{\delta x^2}$$

zugrunde. Da nun die Schienen nicht aus Kupfer, sondern

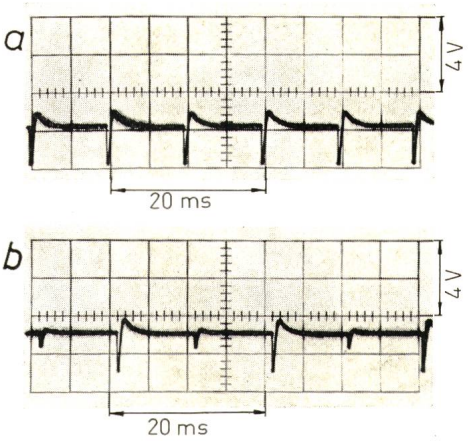


Fig. 13
Lautsprecherspannung u_{NF} [3]
$\alpha = 90^0$; Empfangsfrequenz 6,45 MHz
$\alpha = 90^0$; Empfangsfrequenz 787 kHz

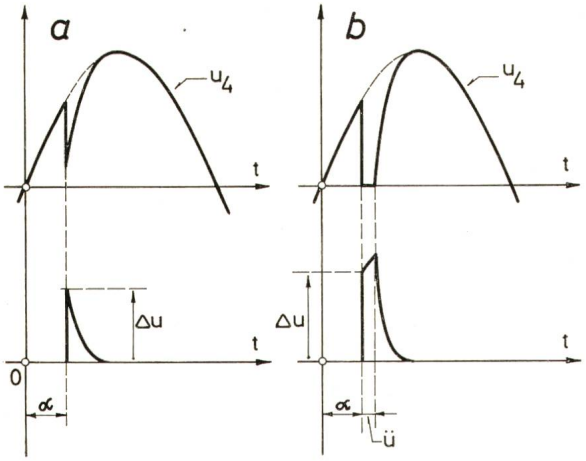


Fig. 14
Spannungseinbrüche bei gelücktem (a) und ungelücktem (b) Betrieb
Spannungssprung Δu bei Zünden; Überlappungszeit ü

aus Eisen bestehen, hängen r und l im Zeitbereich wegen dem Skineffekt von der Stromvariation di/dt

$$r = r\left(\frac{di}{dt}\right)$$

$$l = l\left(\frac{di}{dt}\right)$$

ab, weshalb bei der Lösung der obigen Gleichung selbst bei Anwendung von digitalen Computern enorme rechnerische Schwierigkeiten entstehen. Es empfiehlt sich daher zunächst die experimentelle Abklärung der Vorgänge vom Thyristor bis zur Fernmeldeleitung FM, wobei *Thyristorfachleute,* sowie *Stoßspannungs-* und *Fernmeldespezialisten* zusammen arbeiten müssen. Die kapazitive Kopplung im Transformator geht allmählich in eine induktive über, welche man üblicherweise der Berechnung der NF-Vorgänge zugrunde legt. Es liegen hier interessante, erst teilweise gelöste Probleme für die Zusammenarbeit von mehreren Hochschulinstituten vor.

Beim Zünden und Löschen der Thyristoren können zufolge der Spannungssprünge Δu bzw. δu mittel- und niederfrequente Oszillationen entstehen, wie dies die Oszillogramme der Figuren 11 und 13–1–2 in der Arbeit von R. Buckel zeigen. An der Fahrleitung von Gleichstrombahnen mit Gleichrichterspeisung kann man bei 50 Hz Kippfrequenz nach dem Löschen der Dioden kleine Oszillationen der wiederkehrenden Spannung am Ende der Überlappungszeit nach Fig. 19a feststellen. Bei Thyristoranlagen können auf der Wechselseite kleine Schwingungen sowohl durch Δu als auch δu (Fig. 19b) vorkommen. Wirksame Entstörungsmassnahmen setzen die Kenntnis dieser Elementarvorgänge voraus. Bei der Berechnung dieser mittelfrequenten Vorgänge muss man das gesamte Netzwerk von der Spannungsquelle bis zum Motor als Spannungsteiler betrachten.

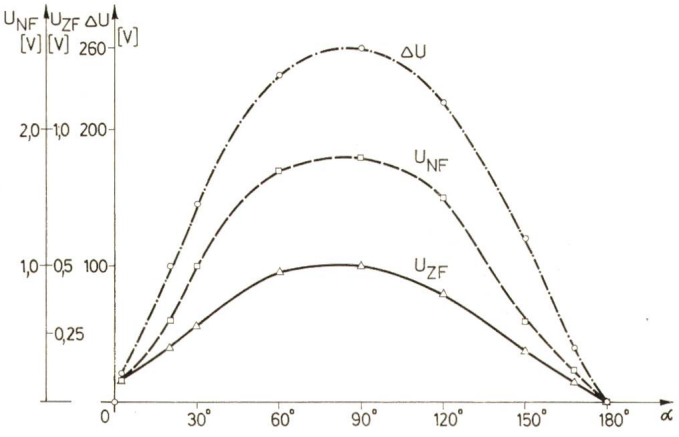


Fig. 15
Spannungssprung ΔU, Zwischenfrequenzspannung U_{ZF} und Niederfrequenzspannung U_{NF} in Funktion des Steuerwinkels α
Empfangsfrequenz 120 kHz; R = 5,65Ω; L = 0

Niederfrequente Vorgänge

Zur Berechnung der niederfrequenten Vorgänge bei einer thyristorgesteuerten Lokomotive bei 16⅔ Hz wurde in einer,

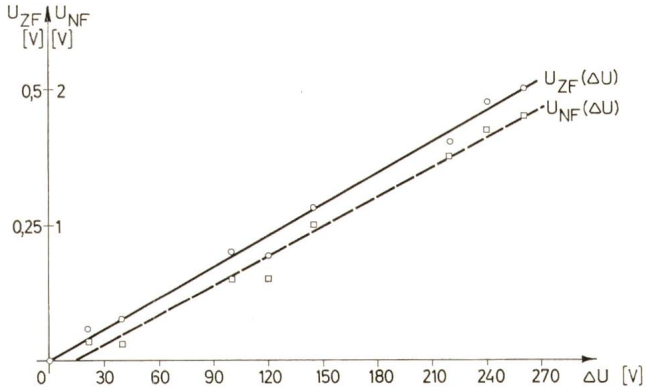


Fig. 16
Proportionalität zwischen ΔU, U_{ZF} und U_{NF} [3]
Daten wie bei Fig. 15

an der ETH 1968 durchgeführten Studienarbeit das Schaltbild 20 vorausgesetzt. Sowohl die Widerstände R_1, R_2, R_d wie auch die Steuerinduktivitäten L_1, L_2 sowie die nichtlineare Glättungsdrosselspule L_d wurden in die Berechnungen einbezogen, was den Einsatz des *digitalen Computers* CDC 6500 an der

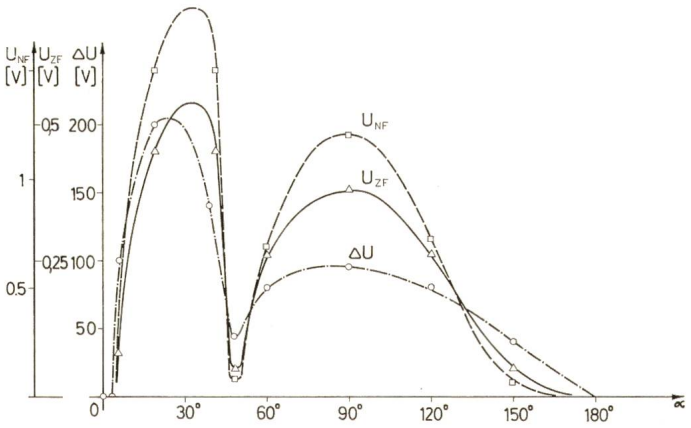


Fig. 17
ΔU, U_{ZF} und U_{NF} in Funktion von α [3]
Empfangsfrequenz 1238 kHz; R = 5,12 Ω; L = 14,55 mH; bis α = 48° ungelückter, oberhalb gelückter Betrieb

ETHZ erforderte. Die Berechnungen sind möglichst wirklichkeitsgetreu durchgeführt worden, nur der Magnetisierungsstrom des Transformators wurde vernachlässigt. Die Daten entnehme man der Legende.

Fig. 21 zeigt den *Einschaltvorgang* bei α = 0. Da die aufeinanderfolgenden Stromhalbwellen ungleich gross sind, beobachtet man scheinbar auf der Gleichstromseite auch ungerade und auf der Wechselstromseite auch gerade Harmonische.

Dazu ist zu sagen, dass die Zerlegung nach Fourier ja nur für stationäre Zustände gilt. Für nichtstationäre Vorgänge muss man das Fourier-*Integral* verwenden, das alle Frequenzen von 0...∞ enthält.

Die Fig. 22 und 23 zeigen für den *stationären Zustand* bei der vollgesteuerten Brücke B2V für $\alpha = 60^0$ die Quellenspannung u_1, die Gleichspannung u_d, den Gleichstrom i_d, den Sekundärstrom i_2 des Transformators, den Primärstrom i_1 (ohne Magnetisierungsstrom), dessen Grundharmonische i_{h1} mit der Phasenverschiebung $\varphi_1 = 65{,}3^0$ und den Verzerrungsstrom

$$i_{vz} = i_1 - i_{h1}$$

Die äusseren *Kennlinienfelder,* also die Verbraucherspannung U_i (Fig. 20) in Funktion des Gleichstromes I_d und mit dem Steuerwinkel α als Parameter, sind in den Fig. 24 a/b dargestellt. Sie weichen leicht ab von den für $L_d = \infty$ ermittelten idealen Kennlinien. Die Fig. 25 a/b zeigen die *Ortskurven des Zeigers* der *ersten Harmonischen* I_{h1} des Netzstromes mit

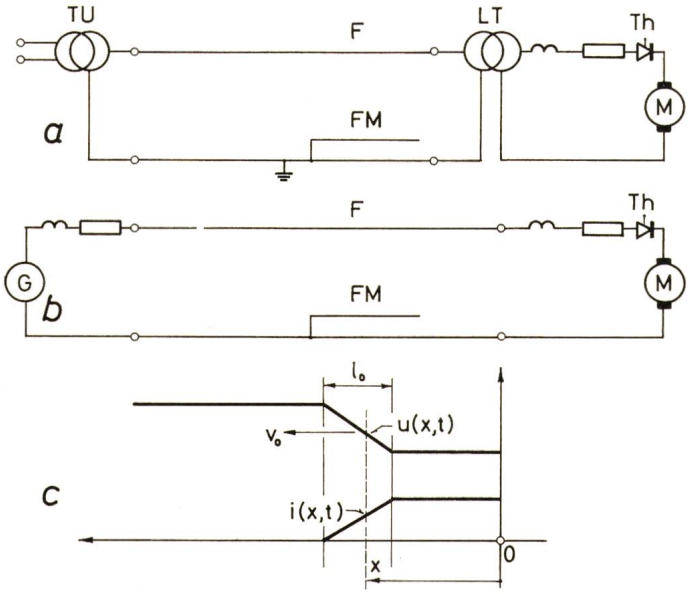


Fig. 18
Wanderwellen längs der Fahrleitung

a Fahrleitung F der Länge L_0 mit Transformator TU im Unterwerk und Lokomotivtransformator LT mit Übersetzungsverhältnis 10 : 1; Motor M mit 1200 V Spannung; Thyristor Th; Fernmelde- oder Signalleitung FM
b Ersatzschaltbild für die Oberspannungsseite 15 kV
c Potentialverteilung längs F; Spannung u(x, t) an der Stelle x zur Zeit t. Strom i(x, t); Frontlänge e_0; Wandergeschwindigkeit v_0

Id und α als Parametern. Diese Kurven weichen zum Teil beträchtlich ab von den in Fig. 6 des Vortrages von Prof. Dr. Zwicky dargestellten idealen Kreisen. Unterhalb der Grenze G in 24 a/b liegt das Gebiet der *gelückten* Gleichströme. Es ist umso schmäler, je mehr die differentielle Induktivität L_d der eisenhaltigen Glättungsdrossel L_d nach Fig. 20 mit abnehmendem Gleichstrom i_d zunimmt. Sämtliche der hier beschriebenen Belastungsfälle wurden mit variablem L_d durchgerechnet.

Für den nach Fig. 29 definierten *Wellenstrom* I_w

$$I_w = 0{,}5\,(i_{d\,max} - i_{d\,min})$$

erhält man in Funktion des Gleichstromes I_d den in den Fig. 26 a/b dargestellten, mit dem Computer ermittelten Verlauf, wobei der Zündwinkel α als Parameter gewählt wurde. Für B2V liegt das Maximum von I_w bei $\alpha = 90^0$, für B2H bei

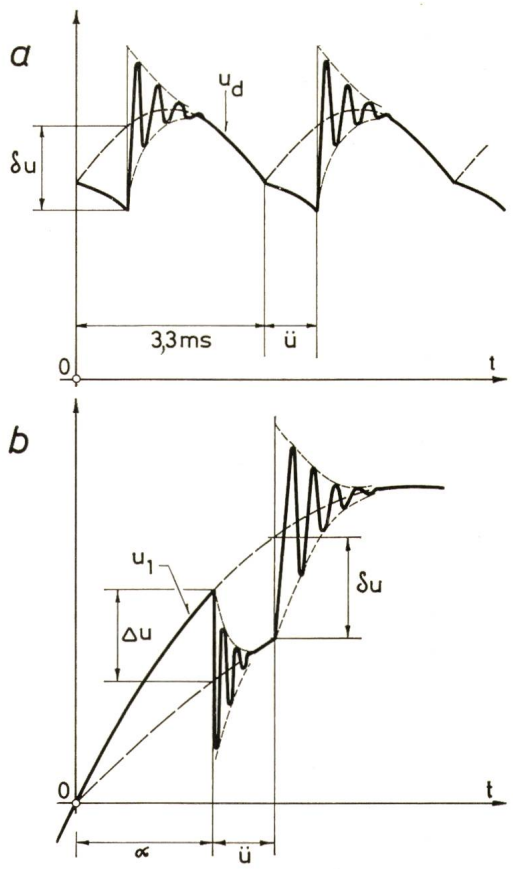


Fig. 19
Eigenschwingungen an Leitungen

a Strassenbahnfahrleitung; Eigenschwingung durch den Spannungssprung δu beim Löschen
b Wechselstromfahrleitung; Spannungssprünge Δu und δu beim Zünden und Löschen und dadurch angeregte Eigenschwingung

$\alpha = 60^0$. Durch die Reihenschaltung von 2 oder 3 oder 4 Gleichrichtern kann man den resultierenden Wellenstrom stark reduzieren. Auch solche kompliziertere Fälle können mit dem Computer genau durchgerechnet werden.

Nun wurden vermittels des Unterprogrammes «*Fast Fourier Transform*» der ETHZ vom Strom i_1 die Grundwelle I_{h1} und die *Oberwellenströme* I_{hr} von der Ordnung r = 3 bis r = 240 durchgerechnet, sie sind in Bild 27 bis r = 81 dargestellt. Sie nehmen relativ langsam ab, nur wie

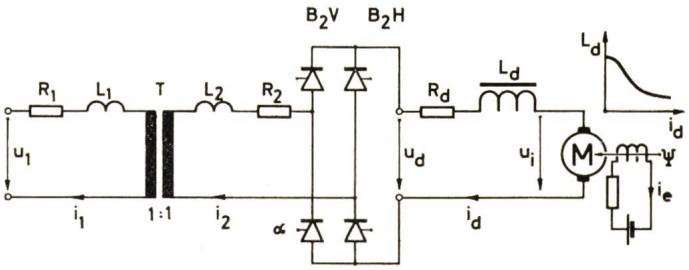


Fig. 20
Schaltbild einer Stromrichteranlage für elektrische Traktion

Transformator T; Voll- oder halbgesteuerte Brücke B2V bzw. B2H. Eisenhaltige Glättungsdrossel L_d; Bahnmotor M mit Erregerstrom i_e und Erregerfluss Ψ; Gleichspannung u_d und Gleichstrom i_d; Sekundärstrom i_2
Primärstrom i_1; Quellenspannung $u_q = u_1$; Daten:
U_q = 1000 V Scheitelwert; Nenngleichstrom I_{dN} = 1000 A; Übersetzungsverhältnis 1 : 1 von T
$R_1 + R_2$ = 14,87 mΩ; $L_1 + L_2$ = 0,4775 mH
R_d = 38,20 m; L_{dN} = 9,062 mH
$L_d(I_d = 0) = 3L_{dN}$; f = 16⅔ Hz [5]

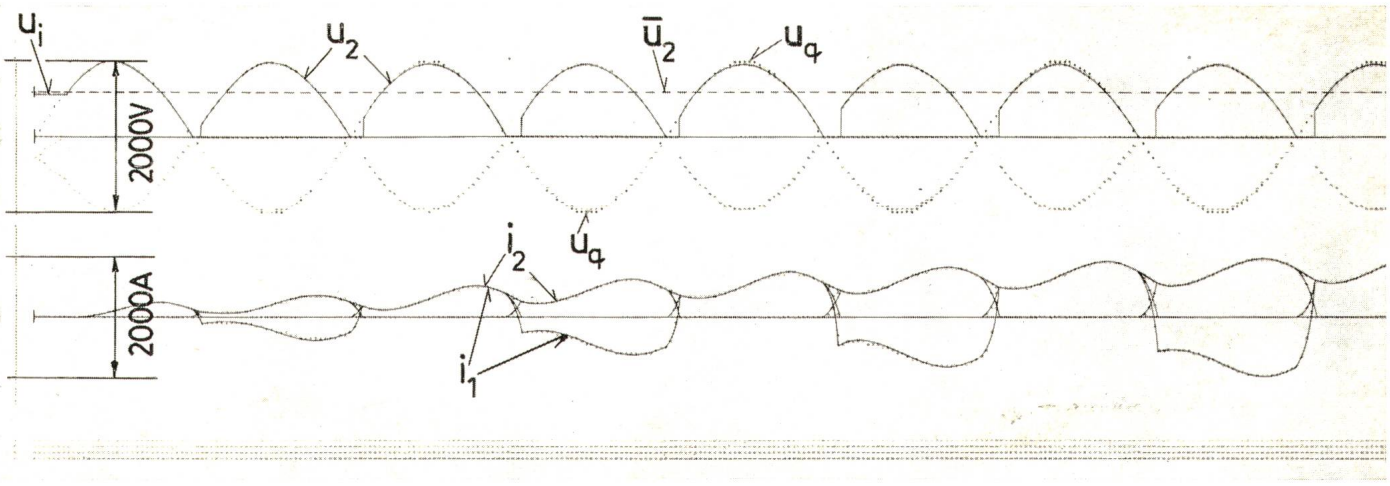


Fig. 21
Einschaltvorgang bei der Diodenbrücke
$U_i = 554$ V; $\alpha = 0$; $u_2 \triangleq u_d$; $i_2 \triangleq i_d$ [5]

$$I_{hr} \sim \frac{c}{r}$$

Darauf wurden die beiden Arten von psophometrischen Strömen nach C.C.I.T.[6], nämlich

$$I_{sr\,1} = \frac{p_f}{p_{800}} \cdot I_{hr}$$

und $p_f = 1$ für $f = 800$ Hz und $f = 1200$ Hz

$$I_{sr\,2} = \frac{f}{800} \cdot \frac{p_f}{p_{800}} \cdot I_{hr}$$

berechnet, wobei p_f das «Gewicht des Gehöres» darstellt. $I_{sr\,1}$ hat ein flaches Maximum bei 450 Hz und $I_{sr\,2}$ bei 750 Hz.

Die totalen relativen Störströme betrugen nach der Formel

$I_s = I^2_{sr}$

$I_{s\,1} = 0{,}0555$

$I_{s\,2} = 0{,}442$

wobei zu bemerken ist, dass die höheren Harmonischen r noch einen beachtlichen Beitrag liefern. Die Amplitude der relativen Grundharmonischen ergab sich dabei zu $I_{h\,1} = 1{,}5958$ bei $\alpha = 60^0$. Die absoluten Werte der Ströme betragen (Fig. 22 und 23):

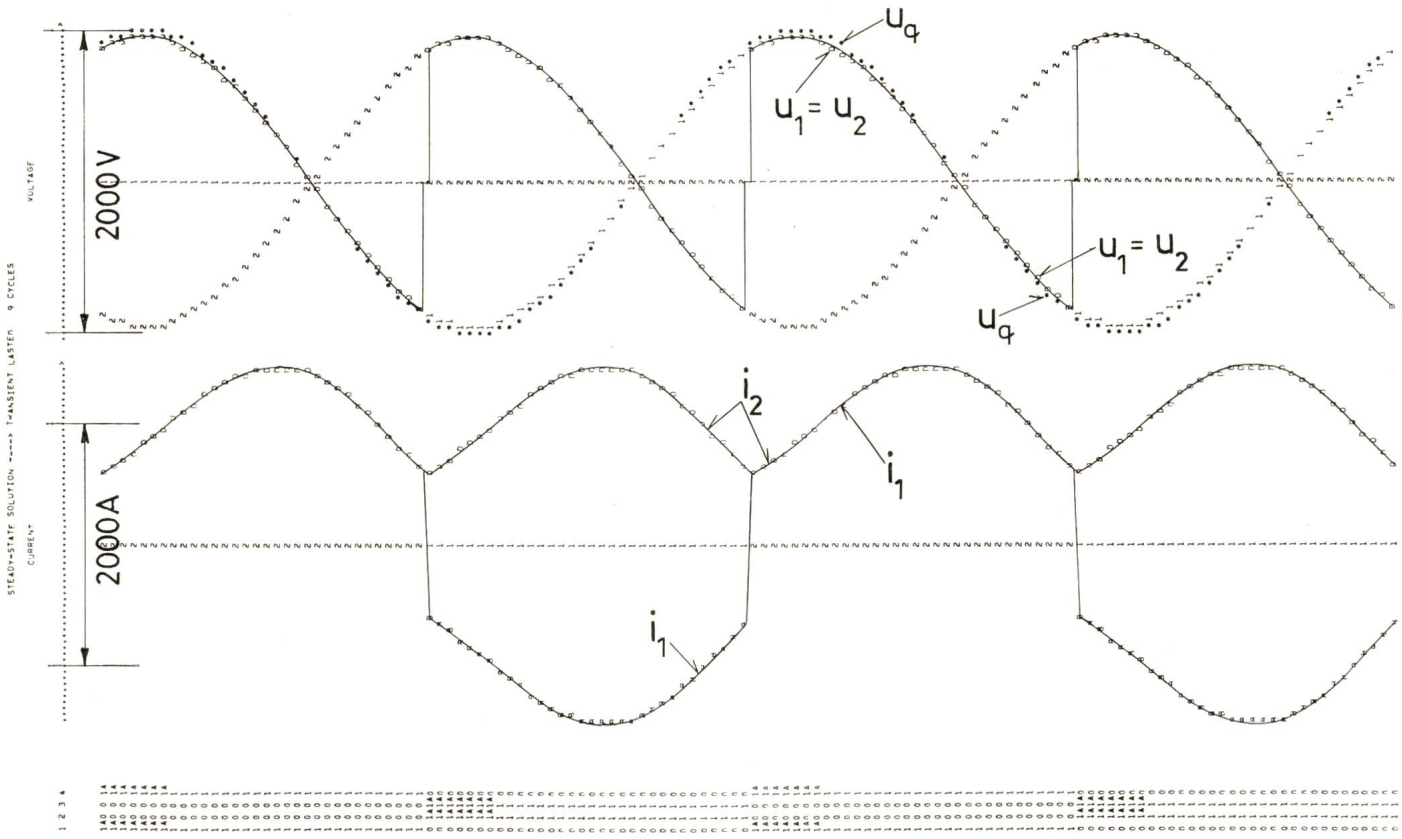


Fig. 22
Stationärer Zustand bei Steuerung
BV2; $\alpha = 60$; $U_i = 234$ V; $u_2 \triangleq u_d$; $i_2 \triangleq i_d$ [5]

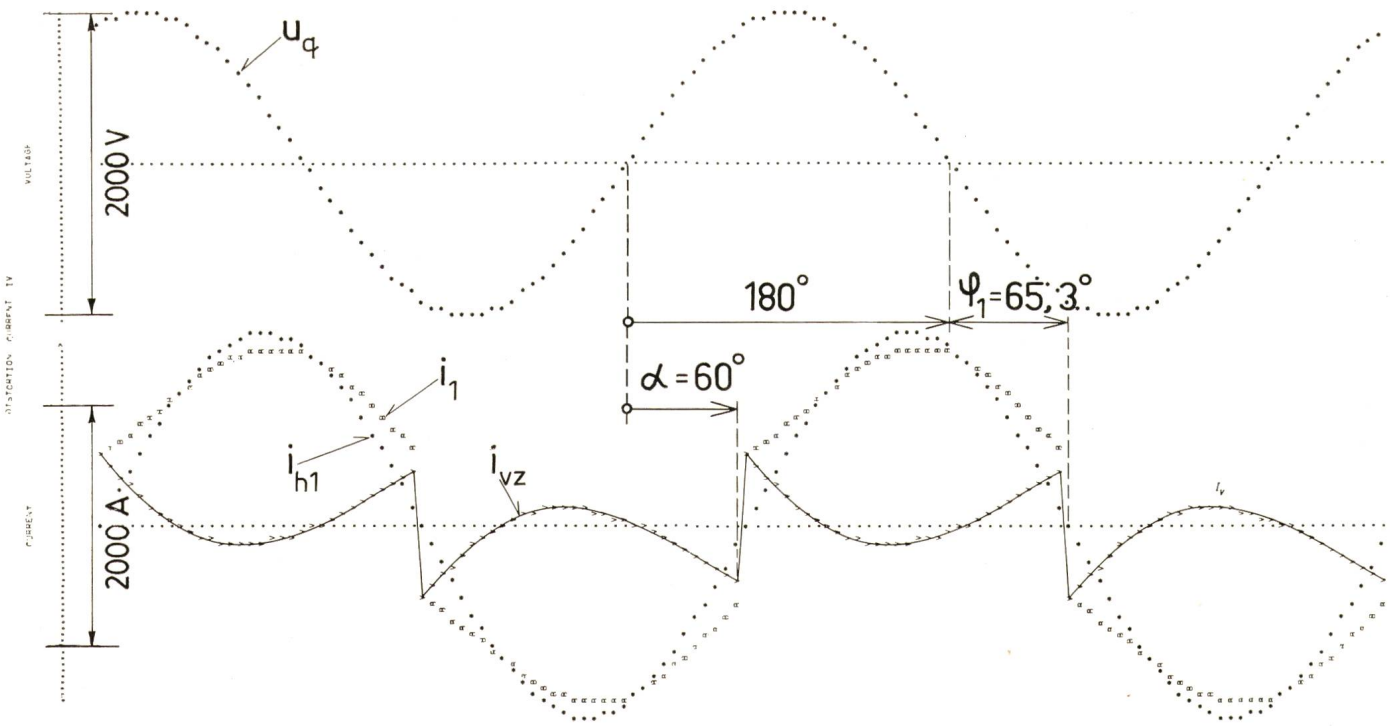


Fig. 23
Verzerrungsstrom i_{vz} wechselstromseitig
Wie Fig. 22; Grundwelle i_{h1} von i_1; Phasenverschiebung $\varphi_1 = 65{,}3^0$; $i_{vz} = i_1 - ih_1$ [5]

$i_{d\,max} = 1473$ A
$i_{d\,min} = 603$ A
$I_w = 435$ A
$I_d = 1119$ A
$I_{dN} = 1000$ A = Nennstrom

$$\frac{I_w}{I_d} = \frac{435}{1119} = 38{,}9\ \%$$

$I_{w1} = i_{2\,max} - I_d = 354$ A

$I_{w2} = I_d - i_{2\,min} = 516$ A

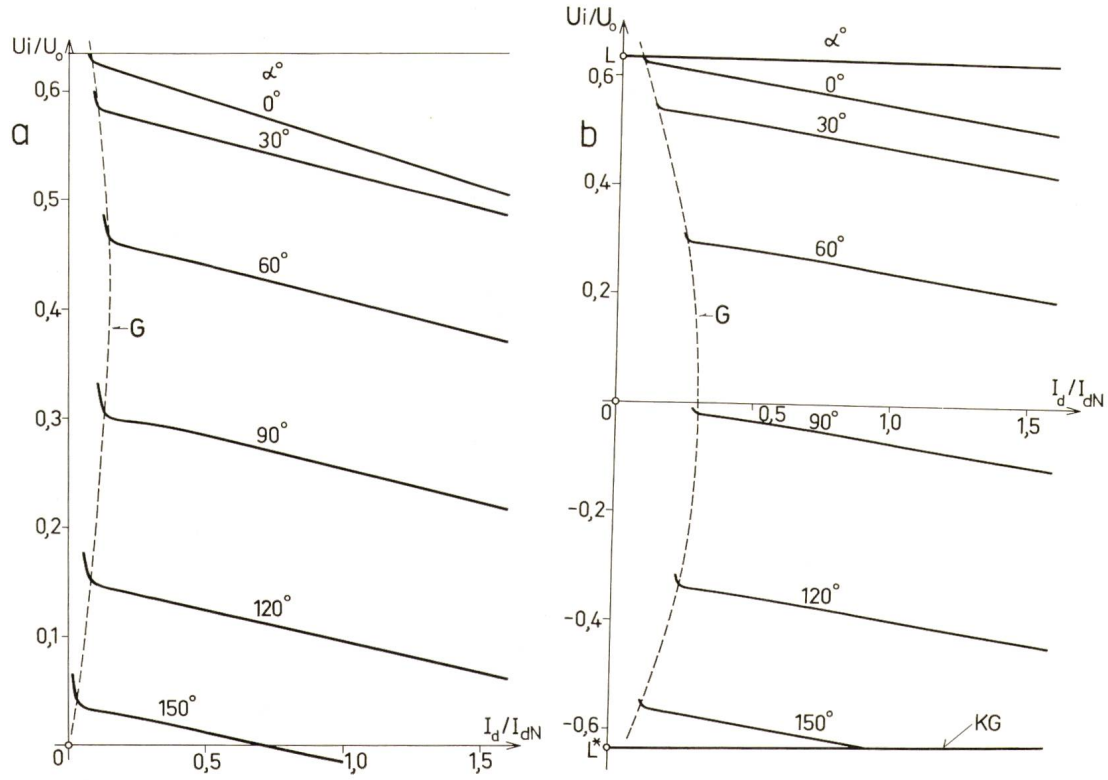


Fig. 24
Äusseres Kennlinienfeld für die Schaltungen B2V und B2H
a für B2V
b für B2H
Abszisse: relativer Gleichstrom I_d/I_{dN}; Nenngleichstrom I_{dN}; Ordinate: relative induzierte Motorspannung U_i/U_0 (Fig. 20); Leerlaufscheitelspannung U_0; mit dem Computer errechnete Kennlinien für α = konstant; Grenze G des gelückten Gleichstromes [5]. Daten von Fig. 20

Wechselstrom $I_{h1\,max} = 1595{,}8$ A, Scheitelwert

$$\frac{I_{s1}}{I_{h1}} = 3{,}46\,\% \qquad \frac{I_{s2}}{I_{h1}} = 2{,}77\,\%$$

Es handelt sich hier absichtlich um einen Fall mit grosser Stromwelligkeit (vollgesteuerte Brücke bei $\alpha = 60^0$). Es ist heute durchaus möglich, mit dem Computer in einer Stunde Hunderte von Belastungsfällen durchzurechnen und dadurch die Abhängigkeit der psophometrischen Ströme von α und I_d zu ermitteln. Es wäre nun sehr interessant, den Zusammenhang obiger Berechnungen mit den in Fig. 10 des Berichtes von R. Buckel dargestellten Störströmen näher zu untersuchen.

In den Tabellen I und II sind für die Brücken B2H sowie B2V für eine Auswahl von Belastungsfällen die Wellenströme

$$I_{w1} = i_{d\,max} - I_d$$
$$I_{w2} = I_d - i_{d\,min}$$
$$I_w = 0{,}5\,[I_{w1} + I_{w2}]$$

sowie die psophometrischen Ströme I_{s1} eingetragen. Letztere steigen rasch mit I_d und mit α an. Die Zahlenwerte beziehen sich auf die in der Legende von Fig. 20 angegebenen Daten. Mit Ausnahme von zwei Fällen wurden Belastungspunkte in der Nähe des Nennstromes I_{dN} gewählt, sie liegen auf den zugehörigen Kurven der Fig. 24 a/b und 25 a/b.

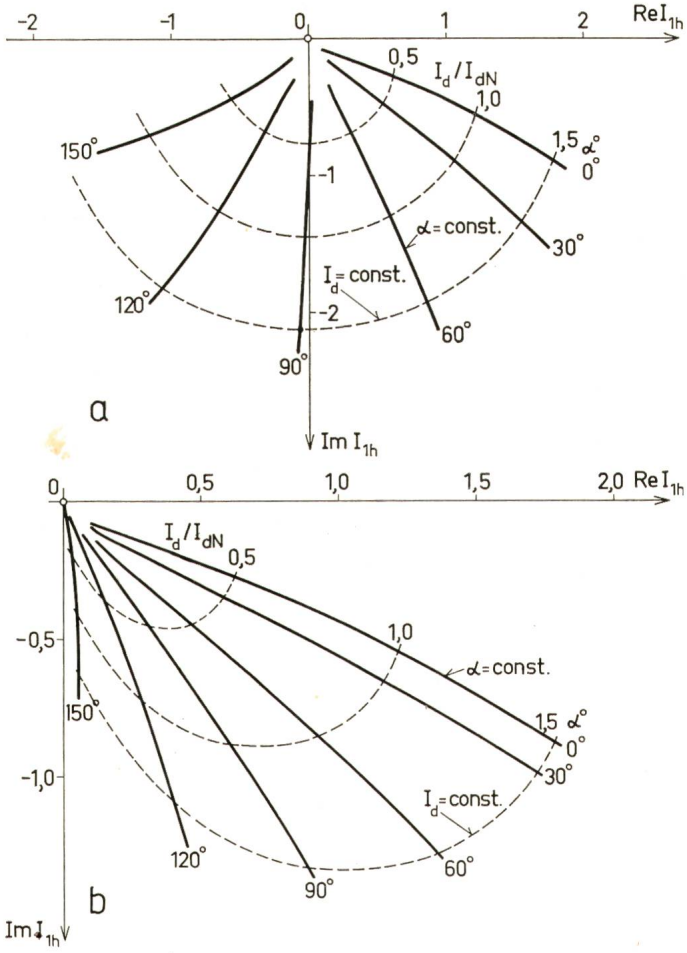


Fig. 25
Ortskurven des Zeigers I_{h1} der Grundwelle des Primärstromes $i_1 = i_2$
a für B2V
b für B2H
Kurvenschaar für α = konstant und I_d = konstant [5].
Daten von Fig. 20

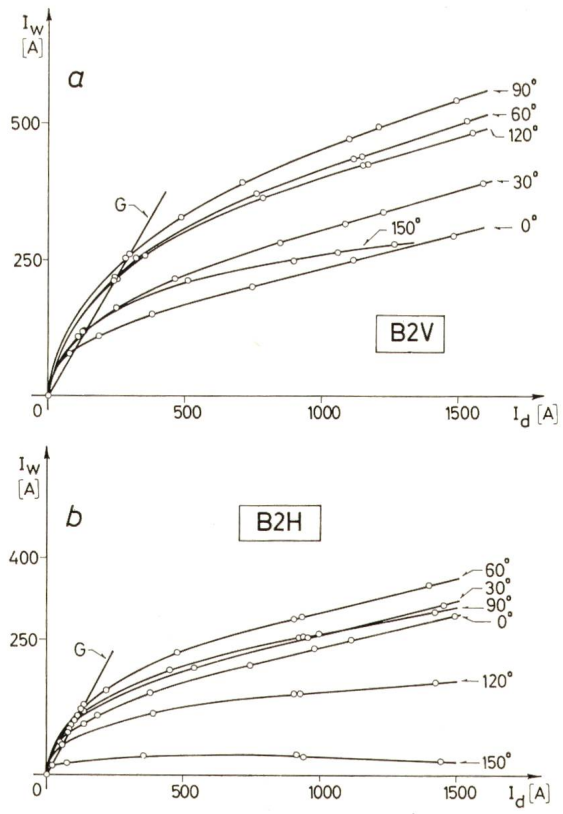


Fig. 26
Verlauf des Wellenstromes I_w in Funktion des Gleichstromes I_d und für konstanten Steuerwinkel α
a für B2V
b für B2H
I_w nach Fig. 29; Computerresultate nach Daten von Fig. 20; Grenze G für die gelückten Gleichströme

Von Gleichrichterströmen induktiv übertragene Störspannungen

Die vom *Gleichstrom* i_d (Fig. 28a) transformatorisch induzierte Spannung

$$v(t) = L \cdot \frac{di_d}{dt}$$

Tabelle I

α	0°	0°	30°	60°	90°	120°	150°	Grad
U_i	633	554	528	414	257	100	—13	V
U_d	636	592	565	450	294	137	24	V
I_d	76	981	954	902	926	930	940	A
I_{w1}	82	231	238	252		141	32,9	A
I_{w2}	76	238	269	323		163	34,8	A
I_w	79	234	254	287	253	152	33,8	A
I_{h1}	124	1308	1273	1140	1000	724	394	A
I_{s1}	4,90	17,7	37,0	39,9		46,8	33,2	A
$\frac{I_{s1}}{I_w}$	6,20	7,56	14,3	13,9		15,4	98	%
$\frac{I_{s1}}{I_{h1}}$	3,95	1,35	2,91	3,50		6,48	8,42	%
φ_1	38,6	24,3	29,6	43,0	55,7	68,5	82,7	Grad

Tabelle II

α	30	60	60	90	120	150	Grad
U_i	467	310	234	—84	—403	—635	V
U_d	507	316	276	—41	—360	—595	V
I_d	1084	244	1119	1208	1150	1056	A
I_{w1}	282	192	362	394	351	256	A
I_{w2}	349	244	515	594	496	272	A
I_w	315	218	435	494	423	264	A
I_{h1}	1496	397,6	1596	1733	1628	1427	A
I_{s1}	37,5	0,683	55,5	60,9	54,8	25,3	A
$\frac{I_{s1}}{I_w}$	11,9	3,13	12,8	12,3	12,9	9,58	%
$\frac{I_{s1}}{I_{h1}}$	2,52	0,172	3,46	3,51	3,36	1,77	%
φ_1	40,2	66,3	65,3	91,2	118,5	148,7	Grad

verläuft nach Fig. 28 d/e *sägezahnförmig* mit Spannungssprüngen Δv. Hat man nun einen auf 108⅓ Hz abgestimmten guten Schwingkreis, so würde man zunächst annehmen, dass von der Frequenz 33⅓ Hz her keine Beeinflussung eintrete (Fig. 28b). Da jedoch der RLC-Kreis wegen der Spannungssprünge in v (t) periodisch wie ein Schlaginstrument «angeschlagen» wird, so entsteht der von P. Wegmann mit dem Analogrechner des ARZ der ETHZ ermittelte Strom i (t) (Fig. 25 e/f). Die Eigenfrequenz von 108⅓ Hz tritt umso stärker in Erscheinung, je höher die Qualität Q des Kreises ist.

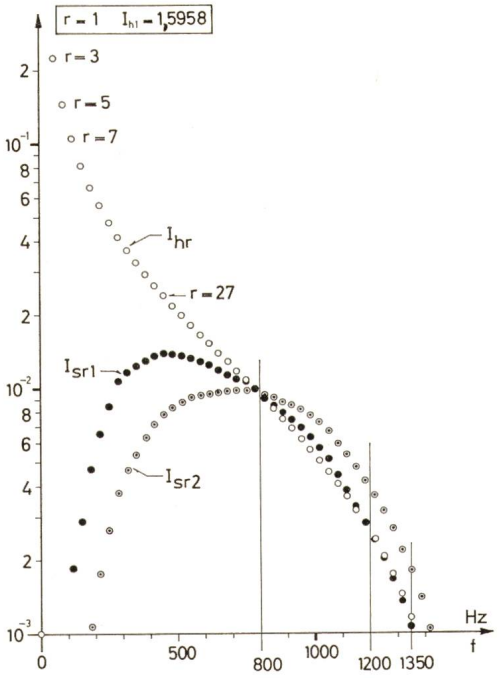


Fig. 27
Psophometrische Ströme
Abszisse: Frequenz f = 16⅔ Hz; Ordnungszahl r der Oberharmonischen; Amplitude I_{hr} der Oberharmonischen und zugehörige psophometrische Ströme I_{sr1} sowie I_{sr2}; Computerresultate nach Daten von Fig. 20 [5]

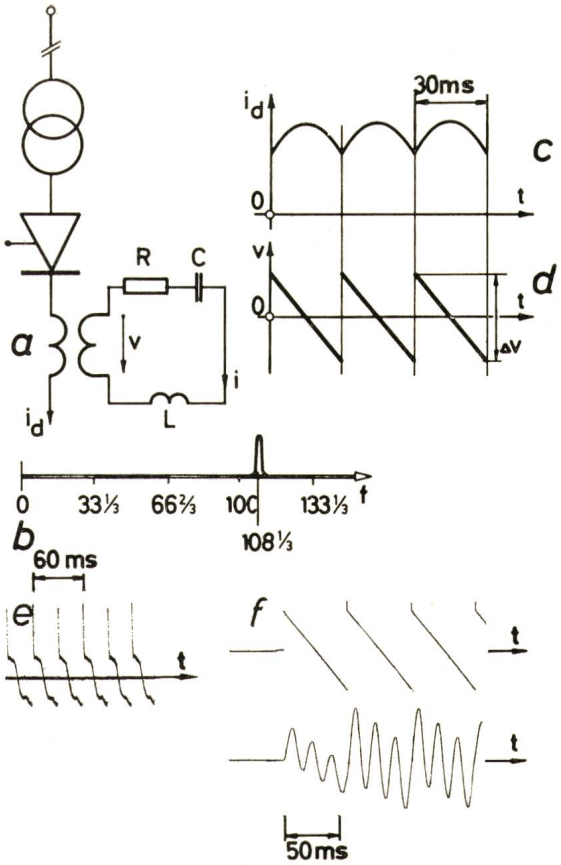


Fig. 28
Vom Gleichstrom i_d induzierte Spannungen v(t) und Ströme i(t)
a Schema der induktiven Kopplung mit einem R–L–C-Kreis
b vielfache der Frequenz von 33⅓ Hz und Resonanzkurve bei 108⅓ Hz
c gewellter Gleichstrom i_d
d von i_d induzierte sägezahnähnliche Spannung v(t) mit dem Spannungssprung Δv
e von Lichtstrahloszillographen aufgezeichnete Spannung v(t)
f Sägezahnspannung v(t) und im Resonanzkreis fliessender Strom i(t); mit Analogrechner von P. Wegman im ARZ/ETHZ ermittelt

Die vom *Wechselstrom* i_2 (Fig. 29) transformatorisch induzierte Spannung

$$v(t) = L \cdot \frac{di_2}{dt}$$

zeigt hohe induzierte *Spannungsspitzen* Δv von der Breite ü der Überlappungszeit. Diese Spitzenspannungen können näherungsweise als Diracstösse aufgefasst werden, es gilt

$$\Delta v = C \cdot \sin \alpha$$

In der übrigen Zeit verläuft v (t) flach sinusförmig. Diese Spannungsspitzen rühren davon her, dass der Lokomotivtransformator während der Überlappungszeit ü kurzgeschlossen ist und daher der Wechselstrom kurzschlussartig ansteigt. Man vergleiche Fig. 29 mit der Fig. 14 des Berichtes von R. Buckel. Die dort dargestellten Spitzenspannungen entsprechen genau den Spannungssprüngen Δv von Fig. 29. Wie R. Buckel betont, ist es sehr wichtig, bei allen Beeinflussungsfragen den äusserst nützlichen Kathodenstrahloszillographen einzusetzen, wobei jedoch für einwandfreie Messungen sehr viel Sorgfalt aufzuwenden ist. So sind garantiert induktionsfreie Shunts und abgeschirmte spannungsführende Kabel unbedingt nötig.

Zusammenfassung

Thyristoren, Quecksilberdampfventile, Funkenstrecken und Leistungsschalter verhalten sich ganz ähnlich. Sie können er-

setzt gedacht werden durch kupferne Schaltmesser, die periodisch eingelegt und herausgezogen werden. Das bedingt in den Anlageteilen dauernd Einschalt- und Ausschaltvorgänge. Für die Art der Beeinflussungen sind nur diese Anlageteile und nicht die Thyristoren massgebend. HF-Vorgänge treten beim Zünden und weniger stark beim Löschen auf, sie können längs der Fahrleitung Wanderwellen erzeugen. Durch die beim Zünden und beim Löschen auftretenden Spannungssprünge

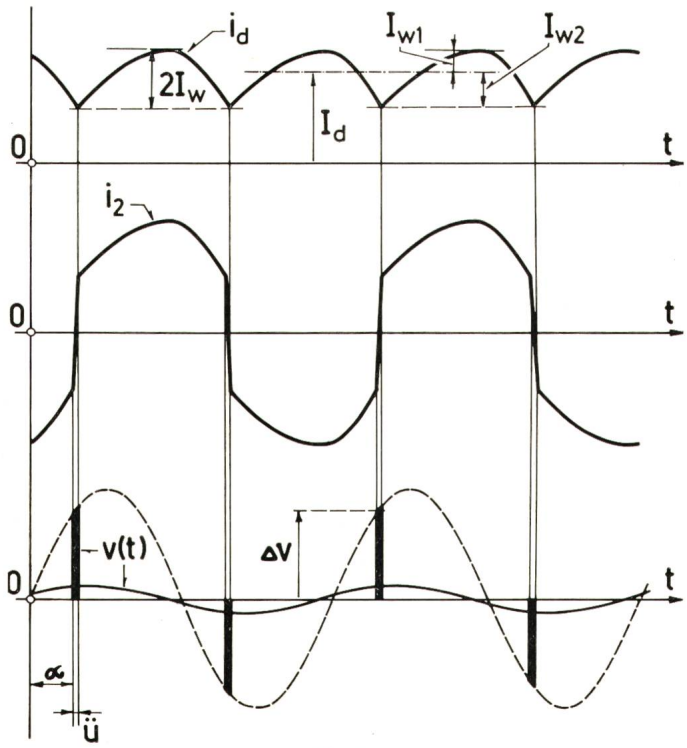


Fig. 29
Vom Wechselstrom i_1 induzierte Spannung v(t)
Oben: Wellenstrom $2I_w$ mit den Komponenten I_{w1} sowie I_{w2}
Mitte: Wechselströme $i_1 = i_2$
Unten: Induzierte Spannung v(t) mit «Diracstössen» Δv. Steuerwinkel und Überlappungswinkel ü

Δu bzw. δu können Anlageteile in ihrer Eigenfrequenz angeregt werden, wie dies bei Schaltvorgängen von der «wiederkehrenden» Spannung bekannt ist. In mit Gleichstrom und dem Wechselstrom induktiv gekoppelten Kreisen können Spannungssprünge und Spannungsspitzen Δv induziert werden.

Das Studium von wirksamen Gegenmassnahmen sollte sich auf die hier geschilderten Elementarvorgänge stützen und durch die Zusammenarbeit mehrerer Hochschulinstitute und den Bahnen gefördert werden. Insbesondere seien folgende Fragestellungen angeführt:

1. Übertragung der HF-Vorgänge vom Thyristor über den Lokomotivtransformator auf die Fahrleitung.
2. Untersuchung der Wirkung der in der Fahrleitung zirkulierenden Wanderwellen auf Fernmelde- und Signalanlagen.
3. Übergang der HF-Vorgänge in Funkempfängern vom Eingang bis zum Lautsprecher.
4. Übertragung der NF-Vorgänge von der Fahrleitung auf FM-Anlagen und Studium der dabei induzierten Spitzenspannungen Δv.
5. Studium der durch die Spannungssprünge Δu und δu bewirkten Eigenschwingungen in Anlageteilen.

Es wäre sehr wertvoll, wenn einige quantitativ genau definierte Fälle sowohl experimentell als auch numerisch durchgearbeitet würden, es wären dies sozusagen «Oasen» in der täglichen Wirrnis der praktisch auftretenden Fälle, in denen man sich orientieren könnte.

Leistungsthyristoren auf elektrischen Triebfahrzeugen
Beeinflussungen; Erfahrungen in London

Von *G. A. Meier,* Zürich

Nachdem ich festgestellt habe, dass leider aus England keine Vertreter der Bahnverwaltungen erschienen sind, möchte ich doch die Gelegenheit benutzen und aufgrund meiner Kenntnisse über Schwierigkeiten mit Prototyp-Fahrzeugen kurz und improvisiert aus London zu berichten.

Aus den Referaten konnten wir vernehmen, dass der Gleichstrom-Chopperzug weniger Schwierigkeiten hinsichtlich Beeinflussungen mit sich bringt als die Thyristor-Lokomotive mit Phasen-Anschnittschaltung.

Bei aller Wertschätzung der guten Eigenschaften einer Chopper-Steuerung scheint wegen den möglichen Rückwirkungen auf Signal-, Sicherungs- und Fernmeldeanlagen doch einige Vorsicht am Platz. Man könnte das vielleicht auch so formulieren:

Der hochgezüchtete moderne Mr. Chopper begibt sich leider leicht in die schlechte Gesellschaft von falschen Polizisten. Diese falschen Polizisten stellen dann in absolut unzulässiger Weise rote Verbot-Signale auf grün, d. h. auf freie Fahrt um. Das ist mit den beiden Prototyp-Zügen der Londoner Untergrundbahn vorgekommen, allerdings ohne dass ein Unglück passiert ist.

Aufgrund der guten Erfahrungen in Holland haben die englischen Chopper-Spezialisten der AEI-English Electric in Zusammenarbeit mit den Ingenieuren der Londoner Verkehrsbetriebe zwei Prototyp-Chopper-Züge hergestellt. Jeder Chopper-Zug besteht aus vier Wagen. Bei dem einen Prototyp-Zug wurde die Ausrüstung im Wageninnern herausgenommen und durch eine offene Chopper-Prototyp-Ausrüstung ersetzt, damit man versuchslokalmässig Zugang zu allen Teilen hat und die messtechnischen Anschlüsse gut herstellen kann. Beim zweiten Chopper-Zug erfolgte ein bahnmässiger Einbau entsprechend Triebwagenzügen. Alle Probefahrten ergaben gute Resultate, die Choppertechnik funktionierte ausgezeichnet und die Züge zeichneten sich durch ihre ruckfreien Anfahrten aus. Man freute sich darüber, machte bereits Kostenrechnungen und kalkulierte, was man alles mit der Choppertechnik einsparen könnte:

Die Londoner Verkehrsbetriebe geben rund 7 Millionen £ für elektrische Energie aus, davon werden etwa 6 Millionen £ für Traktionszwecke benötigt. Beim Anfahren mit Choppertechnik, auf das ganze Netz ausgedehnt, ergäben sich Stromeinsparungen von mindestens ½ Million £ im Jahr, d. h. rund 5 Millionen Franken. Ersparnisse mit der Choppertechnik auf die Bremstechnik ausgedehnt, ergeben bei den Bremsklötzen allein, ebenfalls ausgedehnt auf den ganzen Betrieb, mögliche Einsparungen von 250 000 £ im Jahr, d. h. rund 2,5 Millionen Schweizer Franken.

Hinsichtlich den Rückwirkungen schien die Ausgangslage in London besonders günstig. Das Traktionsnetz ist nämlich unabhängig vom Signalnetz. Der Betrieb der U-Bahn erfolgt mit vier Schienen, nämlich zwei Fahrschienen und zwei Stromschienen. Diese Stromschienen erlauben eine isolierte und kanalisierte Rückleitung der Rückströme. Die negative Schiene ist 150 V unter Erdpotential und die positive Strom-

schiene 450 V über Erdpotential. Die Fahrspannung ist historisch bedingt rund 600 V bzw. 630 V, um genauer zu sein. Wie bereits erwähnt, erfolgten die Fahrten im Depotareal vom Ruislip einwandfrei. Sobald jedoch die Prototyp-Züge in das Netz hinausfuhren, beobachtete man, dass die Signale unrichtigerweise von rot auf grün schalteten. Selbstverständlich hat man vorher schon theoretische Untersuchungen über allfällige mögliche Beeinflussungen gemacht. Aufgrund dieser Erfahrungen wurden genaue Untersuchungen und Messungen durchgeführt. Es wurde abgeklärt, ob sich störende Einwirkungen aufgrund kapazitiver oder induktiver Kupplung ergeben.

Bei meinem Besuch war der Stand so, dass man zum Schluss kam, dass durch Induktion des zerhackten Chopperstromes in den Stromschienen, Störströme in den Gleisschienen erzeugt werden, welche die Signaleinrichtungen beeinflussten. Man fand einen störenden Wellenstrom in der Grössenordnung von 30 A auf Seite der Stromschienen. Auf Seite der Signaleinrichtungen war der Störstrom natürlich viel kleiner. Man dachte sich, dass dieser Strom, der nur etwa $^1/_{100}$ des normalen Fahrstromes ausmacht, keine Beeinflussungen mit sich bringen sollte. Die Fahrströme sind normalerweise in der Grössenordnung von 1000 A pro Zug mit Spitzenwerten von etwa 3000 A während einer Zeitdauer von ca. 5 Sekunden. Seither wurden die Untersuchungen weitergeführt. Ich befürchte, dass zur Bewältigung des Problems unter Umständen grosse Kosten in der Anpassung eines bestehenden Netzes nötig werden könnten. Viel einfacher ist es natürlich, den Schwierigkeiten zu begegnen, wenn man beim Bau einer neuen Linie oder beispielsweise wie in Zürich beim Bau einer neuen Bahn, Massnahmen treffen kann, um Rückwirkungen von Anfang an fernzuhalten. Auf alle Fälle ist es interessant, wenn wir die weiteren Entwicklungen auch bei der Londoner Untergrundbahn aufmerksam verfolgen.

Nach den soeben aus London erhaltenen Mitteilungen werden die Bemühungen zur Beseitigung der Interferenzen immer noch fortgesetzt. Anlässlich des gleichzeitigen Besuches der British Transport Staff College in der Schweiz erfuhren wir jedoch zusätzlich, dass die Signalingenieure von London Transport zuversichtlich sind und in absehbarer Zeit und mit vernünftigem Aufwand in der Lage sein werden, das einwandfreie und zuverlässige Funktionieren der Signalanlagen auch bei Fahrten mit Chopper-gesteuerten Zügen zu gewährleisten.

Ergänzungen zum Beitrag: «Beeinflussung von Eisenbahnsicherungsanlagen schweizerischer Bauart durch Stromrichtertraktion»

Von *E. Hofstetter,* Wallisellen

Die Charakterisierung von Störungsquellen kann nach den Informationen dieser Tagung gemäss Fig. 1 ergänzt werden. Als Kurven a) und b) sind darin die aus Fig. 1 des Referates bereits bekannten Oberwellenanteile für die BLS-Gleichrichtermaschine und für den ungünstigsten Fall der BLS-Thyristor-Lokomotive angegeben. Als zusätzliche Werte sind auf dem gleichen Diagramm als Kurve c) die Minimal- und als Kurve d) die Maximalwerte der DB-Thyristormaschine gemäss Fig. 7 des Referates Buckel eingetragen. Als Kurve e) schliesslich ist der maximale Oberwellengehalt

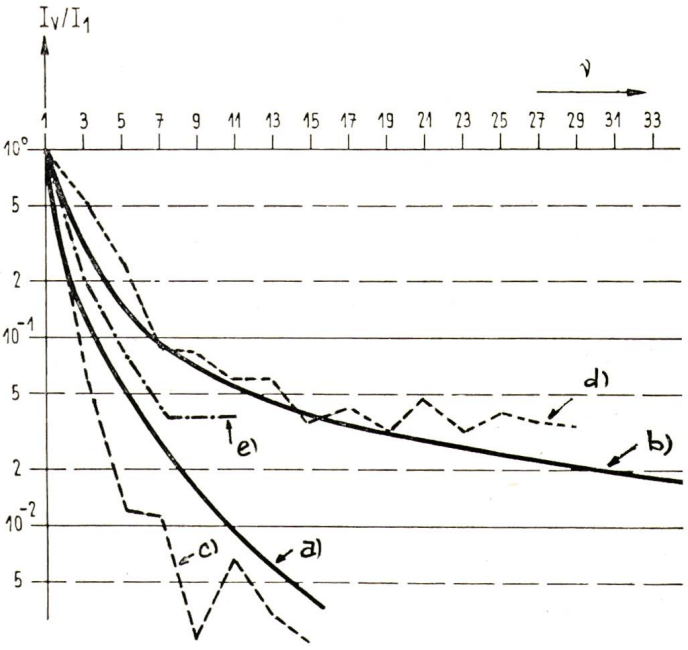


Fig. 1
Relativer Oberwellengehalt des Fahrdrahtstromes
a BLS-Gleichrichtermaschine; *b* BLS-Thyristormaschine, Maximalwerte; *c* DB-Thyristormaschine, Minimalwerte; *d* DB-Thyristormaschine, Maximalwerte; *e* Vorschlag Germanier-Hintze, Maximalwerte

der günstigsten Schaltung gemäss Referat Germanier-Hintze vermerkt.

Der Vergleich der verschiedenen Störungsquellen gibt für die Maximalwerte der BLS- und der DB-Maschine im Bereich der 7. bis zur 19. Oberwelle eine recht gute Übereinstimmung. Interessanterweise liegt der Minimalwert der DB-Thyristormaschine für die 5. bis 11. Oberwelle bis eine halbe Grössenordnung tiefer als für die BLS-Gleichrichterlokomotive. Der Vorschlag Germanier-Hintze ergibt rund 3mal kleinere Maximaloberwellen als die DB- oder BLS-Maschine.

Das Diagramm der Fig. 1 illustriert, dass beträchtliche Unterschiede des relativen Oberwellengehaltes für verschiedene Fahrzeugtypen auftreten können. Eine klare Charakterisierung der Störungsquelle ist für eine Beurteilung der Beeinflussungserscheinungen daher unerlässlich.

Eine Verbesserung des Oberwellengehaltes um den Faktor 3 mag als etwas bescheiden erscheinen. Der Aufwand für die Beherrschung der Störbeeinflussungen ist aber nicht strom-, sondern leistungsabhängig, so dass ein Unterschied von $3^2 \cong 10$ doch ein beachtenswertes Resultat darstellt.

Im Hinblick auf die Beeinflussungserscheinungen sollte eine vollständige Spezifikation von Thyristor-Triebfahrzeugen nicht nur die üblichen Daten der mechanischen und elektrischen Eigenschaften, sondern auch die Angaben des maximalen und des minimalen Fahrdraht-Oberwellenstromes enthalten. Diese Information über das Oberwellenspektrum des Stromes scheint wertvoller zu sein, als die Angabe eines psophometrisch bewerteten Traktionsstromes, da die psophometrische Bewertung dem Übertragungs-Frequenzgang zwischen Traktionsstrom und beeinflusstem System (induktive, kapazitive oder direkte Übertragung, Frequenzabhängigkeit allfälliger Schutzfaktoren) angepasst sein muss.

Über die Verzerrung der Fahrdrahtspannung bei einem umfassenden Thyristorbetrieb liegen noch keine praktischen Erfahrungen vor. Will man aus Einzelresultaten auf den ge-

nannten Vollausbau schliessen, so muss man die Netzbelastung berücksichtigen, die in der Schweiz auf Gebirgsstrekken besonders hoch ist. Allerdings ist schon die Ansicht vertreten worden, dass sich die Rückwirkungen einer Vielzahl von Thyristorlokomotiven statistisch überlagern werden, so dass schliesslich wieder annähernd eine sinusförmige Fahrdrahtspannung erreicht würde.

Eine stark verzerrte Kurvenform der Fahrdrahtspannung könnte übrigens auch das ordnungsgemässe Funktionieren der Thyristorsteuerung des Fahrzeuges beeinträchtigen. Im Referat Kelley-Foley ist ein entsprechender Hinweis enthalten, und zwar dahingehend, dass keine gegenseitige Beeinflussung der Fahrzeuge auftrat. Bei höherem Oberwellengehalt könnte das Resultat aber auch anders ausfallen.

Auf eine interessante, wenn auch nicht sehr angenehme Eigenschaft bei der Beeinflussung der Gleisstromkreise kann anhand der Oszillogramme der Fig. 2 hingewiesen werden. Diese Aufnahmen stellen die Empfangsspannung vor dem Filter an einem 2 km langen, zweischienig isolierten Abschnitt dar. Oszillogramm a) zeigt den Zustand ohne Belegung des Abschnittes bei geringem Störpegel, nämlich die kodierte 125-Hz-Nutzsignalspannung mit der 8 Perioden langen Pause gemäss der Gleisspannung U_G aus Fig. 5 des Referates. Bei belegtem Abschnitt ergibt sich eine Empfangsspannung beispielsweise nach Oszillogramm b), eine 16⅔-Hz-Wechselspannung mit bedeutendem Oberwellenanteil. Oszillogramm c) gibt den Zustand bei freiem Gleis kurz nach Belegungsende wieder, und zwar als Überlagerung der Nutzsignal- und Störspannungen nach a) und b). Mit zunehmendem Abstand des Zuges von der Empfangsstelle verschwindet die Grundwelle der Störspannung ziemlich rasch, während der Oberwellenanteil viel länger erhalten bleibt. Oszillogramm d) gilt für einen derartigen Fall: Die Grundwelle der Traktion ist dort praktisch verschwunden, die Oberwellen sind dagegen beinahe unverändert erhalten geblieben.

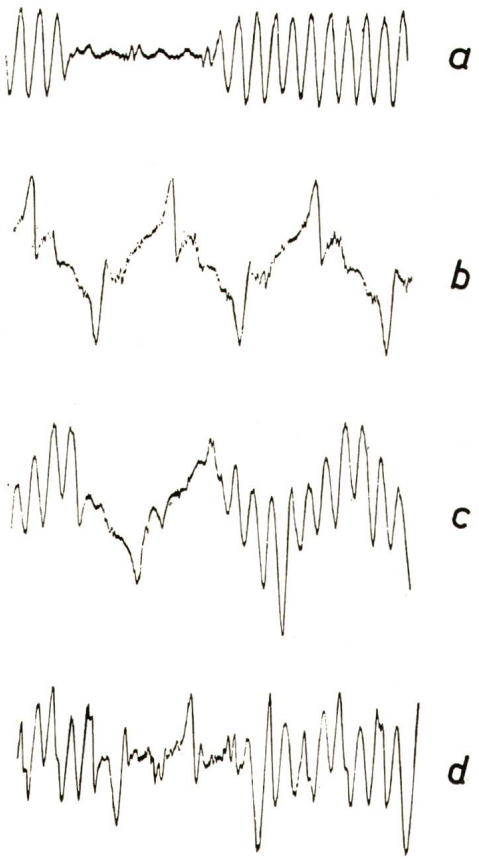


Fig. 2
Empfangsspannung an 2 km langem Abschnitt vor Filter
a bei freiem Abschnitt mit geringem Störpegel; *b* bei belegtem Abschnitt; *c* bei freiem Abschnitt kurz nach Belegungsende; *e* bei freiem Abschnitt und weiter entferntem Zug

Ohne auf die physikalischen Gründe für diese Erscheinung einzugehen, muss festgestellt werden, dass der Ausdehnungsbereich der Störbeeinflussung längs des Gleises für die Oberwellen viel grösser ist als für die Grundwelle.

Dieser Tagung ist ein ganzer Katalog von Abwehrmassnahmen gegen Störbeeinflussungen vorgelegt worden, der sicher viele technisch realisierbare und wirkungsvolle Vorkehren enthält. Es dürften aber darüber keine Meinungsverschiedenheiten bestehen, dass der Aufwand für die Anpassung der Fernmelde- und Signalanlagen an den veränderten Charakter von Traktionsstrom und -spannung sehr gross sein wird. Mindestens in der Schweiz ist für derartige Anpassungsarbeiten ein zusätzliches Hindernis zu beachten, indem das Fachpersonal für solche Arbeiten kaum in kurzer Frist zu finden oder von andern Arbeiten frei zu bekommen ist.

Diskussionsbeitrag

von *R. Schüle,* Bern

Es gibt in der Schweiz neben Eisenbahnen auch eine grosse Zahl von Luft- und Standseilbahnen, die sich teilweise in unmittelbarer Nähe von Eisenbahnanlagen befinden. Diese Seilbahnen werden heute zum grossen Teil von den Kabinen oder Wagen aus ferngesteuert.

Um diese Fernsteuerungen zu realisieren, verwendet man Gleichstrom-, Tonfrequenz- oder Hochfrequenzanlagen. Bei Pendelbahnen können diese Fernsteuersignale über die Zugseile in die Antriebsstation übertragen werden, wo sie durch Stromabnehmer oder induktive Ankopplung abgenommen werden. Bei Standseilbahnen wäre es auch möglich, die Signale induktiv auf die geerdeten Schienen zu übertragen. Es kann auch von der Möglichkeit der Funkübertragung für die Fernsteuersignale Gebrauch gemacht werden.

Aus seilbahntechnischen Gründen müssen bei allen Seilbahnen sämtliche über die Stützen geführten Seile, Telephonleiter usw. überwacht werden, und zwar gegeneinander, gegen Unterbruch und gegen Erdschluss. Von dieser Vorschrift ausgenommen sind nur die Tragseile bei Pendelbahnen und die Förderseile bei Umlaufbahnen. Dafür müssen diese Seile geerdet werden. Aus diesen Gründen muss die Erdverbindung in diese Überwachungskreise mit einbezogen werden.

Ich möchte nun die Frage stellen, ob irgendwelche Feststellungen gemacht wurden, die auf eine Beeinflussung solcher Überwachungs- und Fernsteuerungsanlagen von Luft- und Standseilbahnen durch Thyristorlokomotiven schliessen lassen?

Der vorgebrachte Einwand, dass das Eidg. Amt für Verkehr selber Messungen bei einer Luftseilbahn durchgeführt habe, ist nicht richtig.

Während der Versuche der Rhätischen Bahn auf der Strecke Chur–Domat/Ems mit der Thyristorlokomotive Nr. 161 der BLS hat das Eidg. Amt für Verkehr lediglich am Bahntelephon einer Luftseilbahn Hörproben durchgeführt. Die Talstation dieser Luftseilbahn, die nicht mit einer Fernsteuerungsanlage ausgerüstet ist, befindet sich etwa

500 m südlich des Bahnhofs Chur und verläuft in einem Winkel von ca. 75° zur Bahnlinie.

Am Bahntelephon der Luftseilbahn konnten Geräusche, die auf die Fahrten der Thyristorlokomotive, vor allem aber auf das Anfahren derselben, zurückzuführen waren, deutlich gehört werden. Es wurden aber keine Messungen durchgeführt, aus denen man schliessen könnte, ob sich diese Geräusche bei einer Luft- oder Standseilbahn als Störung auswirken könnten. (Hier muss am Ausdruck Störung festgehalten werden, denn um eine solche würde es sich ohne Zweifel handeln.) Die Betriebssicherheit einer Seilbahn würde durch eine solche Störung in erheblichem Ausmass beeinträchtigt.

Die von mir gestellte Frage ist also weiterhin unbeantwortet. Das Problem muss aber vor dem Einsatz von Thyristorlokomotiven in der Schweiz gelöst werden, damit die Betriebssicherheit der Luft- und Standseilbahnen voll gewährleistet bleibt.

Diskussionsbeitrag

von *H. Wüger,* Zürich

Einleitend möchte ich festhalten, dass die Tagung mit grosser Deutlichkeit gezeigt hat, dass Thyristoren für den Bahnbetrieb grosse Vorteile haben können. Betrachtet man die Dinge unvoreingenommen, so kann man mit grosser Wahrscheinlichkeit erwarten, dass mit der Zeit auch in den Netzen der Allgemeinversorgung Anschnittsteuerungen zur Anwendung kommen werden, so etwa für Aufzüge, für Hebezüge, für Werkzeugmaschinen und vielleicht auch für Produktionsstrassen. Aber auch das, was in den Netzen der Bahnen vor sich geht, interessiert die Werkleute. Daher erlaube ich mir, die Zusammenhänge in Erinnerung zu rufen und einige Fragen zu stellen.

Wenn man von Beeinflussungen durch Thyristoren spricht, muss man zwei Erscheinungen auseinanderhalten, nämlich:

1. die induktiven;
2. die direkten, durch die Phasenschnitte bedingten Verzerrungen der Sinuskurven der Ströme und Spannungen.

Vom Standpunkt der Allgemeinversorgung aus kann man zudem drei verschiedene Einbauorte der Thyristoren unterscheiden (Tab. I), nämlich:

a) *Bahnnetze ohne galvanische oder magnetische Verkettung* mit dem Netz der Allgemeinversorgung;

Tabelle I

Einbauort der Thyristorsteuerung	Beispiel	Beeinflussung induktiv	Beeinflussung direkt
Bahnnetze ohne galvanische oder magnetische Verkettung mit Netz der Allgemeinversorgung	SBB	Ja	—
Bahnnetze mit galvanischer oder magnetischer Verkettung mit dem Netz der Allgemeinversorgung	50-Hz-Bahnen Gleichstrom-Bahnen Trolleybusse	Ja	Ja
Im Netz der Allgemeinversorgung	Aufzüge grosse Werkzeugmaschinen	—	Ja

b) *Bahnnetze mit galvanischer oder magnetischer Verkettung* mit dem Netz der Allgemeinversorgung;

c) *Im Netz* der Allgemeinversorgung.

In der Kolonne 2 der Tabelle sind Beispiele angegeben und in den Kolonnen 3 und 4 ist bemerkt, welche Beeinflussungsarten dabei in Betracht fallen.

Als mögliche induktive Beeinflussungen können genannt werden:

1. Störende Einflüsse auf Telephon, Telegraph, Telex, Radio und Fernsehen;
2. Störende Einflüsse auf leitungsgerichtete HF-Kanäle der Elektrizitätswerke für Telephon, Fernmessung und Fernsteuerungen (kHz- bis MHz-Bereich);
3. Störende Einflüsse auf die mit Tonfrequenzen arbeitenden Netzkommandoanlagen (Rundsteuerungen) für Ein- und Ausschaltung von Strassenbeleuchtungen, Heisswasserspeichern, Heizungen, Tarifumschaltungen sowie auch für Feuerwehralarme und anderes mehr (ca. 180...2400 Hz).

Die als Folge der Verzerrung der Spannungskurve möglichen direkten Beeinflussungen sind wesentlich zahlreicher.

1. Verfälschung der Anzeigen von Messinstrumenten und Zählern;
2. Helligkeitsschwankungen von Leuchtstofflampen und Röntgenröhren;
3. Funktionsstörungen an Radio- und Fernsehgeräten sowie an Computern, die bekanntlich besonders empfindlich auf die Kurvenform sind;
4. Entstehung von Geräuschen in Motoren, Transformatoren und Apparaten;
5. Verstimmung von Erdschluss-Löschspulen;
6. Entstehung zusätzlicher Verluste in Induktivitäten und Kapazitäten (z. B. Kondensatorenbatterien zur cos-φ-Verbesserung, Störschutzkondensatoren);
7. Auch störende Einflüsse auf die mit Tonfrequenzen arbeitenden Netzkommandoanlagen (Rundsteuerungen) liegen im Bereich des Möglichen.

Ich nehme ohne weiteres an und hoffe es, dass nicht alle der genannten Beeinflussungsmöglichkeiten so stark seien, dass sie spürbar oder gar störend sind. Aber es wäre sicher interessant, von den anwesenden Fachleuten Hinweise zu bekommen, wo Vorsicht am Platze ist. Vielleicht kann auch bereits über Erfahrungen berichtet werden.

Ich hoffe, dass die heutige Tagung den Anstoss dazu gebe, dass sich auch in der Schweiz Vertreter der Wissenschaft, der Industrie, der PTT, der Bahnen und der Werke gemeinsam an die Abklärung der Fragen machen. Denn auch beim besten Willen ist keine der interessierten Gruppen imstande, die nötigen Untersuchungen allein durchzuführen.

Schaltungen von Wechselstrom-Thyristorfahrzeugen und ihre Auswirkungen

Von *H. Hintze,* Genf

In einem vorhergehenden Diskussionsbeitrag wurde ein Vergleich angestellt zwischen Lösungen von sehr wenig in Serie geschalteten Thyristorbrücken und sehr vielen in Serie geschalteten Brücken, wobei letzteres erreicht wird durch stufenweises Zuschalten von Brückenteilen mit Schützen *ohne* Schaltbeanspruchung bzw. mit Trennern. Eine vierstufige Schaltung solcher Art lässt sich dabei auch ohne mechanische Schaltelemente realisieren. «Vierstufige Schal-

tung» heisst dabei, dass das Fahrzeug von aussen her gesehen einem Fahrzeug mit vier in Serie geschalteten Brücken gleichkommt, ohne aber den entsprechenden Aufwand an Halbleiterelementen zu benötigen. Auf Netzen, wo keine Beeinflussungsgefahr besteht, sind selbstverständlich möglichst einfache Schaltungen zu suchen. Der Leistungsfaktor kann dabei durch Filterelemente auf den Lokomotiven oder in den Unterwerken verbessert werden. Auf Lokomotiven untergebrachte Filter, die ein gewisses Gewicht nicht überschreiten dürfen, sind aber unwirksam oder sogar schädlich gegenüber Oberwellen relativ tiefer Frequenz. Dabei wird z. B an die Signalfrequenzen von ca. 100 Hz bis ca. 150 Hz bei 16⅔-Hz-Bahnen gedacht. Auf Netzen, bei welchen eine relativ grosse Beeinflussungsgefahr in diesem sehr tiefen Frequenzbereich besteht, muss man auch vom Triebfahrzeugbau her Lösungen suchen, welche diese Gefahr beschränken, welche aber auf den Triebfahrzeugen relativ aufwendige Schaltungen benötigen, vielleicht sogar die Verwendung von schwach beanspruchten mechanischen Schaltelementen, obwohl sich der Ingenieur das Idealbild einer Thyristorlokomotive sicher anders vorstellt. Diese Schaltungen erlauben aber das Einführen der Thyristortechnik mit *allen* traktionstechnischen Vorteilen auf Bahnnetzen, die heute als oberwellenempfindlich bekannt sind. Triebfahrzeuge mit einfachen Schaltungen (eine oder zwei Brücken in Serie) können auf diesen Netzen erst eingeführt werden, nachdem wesentliche Modifikationen im Signalwesen durchgeführt wurden.

Abschliessend soll noch erwähnt werden, dass es Bahnnetze gibt, bei denen die Beeinflussungsgefahr durch Thyristorlokomotiven schon heute relativ gering ist. Z. B. sind Strecken mit Gleichstromblock relativ unempfindlich. Da die Signalfrequenzen des öftern direkt aus dem Landesnetz abgeleitet werden durch Synchron/Synchron-Umformer, so sind logischerweise auch jene Strecken bevorteilt, deren 16⅔-Hz-Netz durch starre Umformer (Synchron/Synchron) gespeist wird. Es sind aber auch Möglichkeiten in die Hand des Lokomotivbauers gegeben, die Beeinflussungsgefahr auf oberwellenempfindlichen Netzen in erträglichem Rahmen zu halten.

6. Zusammenfassung und Konsequenzen

Von *E. Meyer*, Bern

Es steht erst eine geringe *Anzahl* von Thyristor-Triebfahrzeugen im Betrieb. Am grössten ist ihr Anteil am gesamten elektrischen Triebfahrzeugpark in Schweden, wo er gegenwärtig etwa 17 % beträgt. Auf Grund der bereits erteilten Aufträge und der umfangreichen Studien über die Anwendung von Thyristoren auf elektrischen Triebfahrzeugen ist zu erwarten, dass die Zahl der Thyristor-Triebfahrzeuge in den nächsten Jahren stark anwachsen wird.

Die zahlreichen *Vorteile,* welche Thyristor-Triebfahrzeuge gegenüber Triebfahrzeugen konventioneller Bauart besitzen, sind unbestritten. Verschiedene Auffassungen bestehen lediglich über die Rangfolge dieser Vorteile.

Bei der Zugförderung mit *Wechselstrom 50 Hz* ist die Verwendung von Dioden-Gleichrichtern schon vor längerer Zeit zur Regel geworden. Hier kann die zunehmende Verwendung von Thyristoren anstelle von Lichtbogen-Stromrichtern und Halbleiterdioden als weiterer Fortschritt gewertet werden.

Bei Bahnen, *die mit Wechselstrom einer besonderen niedrigen Frequenz* (16⅔ oder 25 Hz) elektrifiziert sind, wird die Anwendung von ungesteuerten Gleichrichtern nur in Sonderfällen als vorteilhaft erachtet. Die Anwendung von Thyristoren ist jedoch auch in diesem Fall sehr aussichtsreich.

Parallel zur Entwicklung des Thyristor-Triebfahrzeugs für Wechselstrom geht bei *Gleichstrombahnen* die Einführung des Thyristors für die Puls- oder Choppersteuerung. Die durch die Anwendung des Thyristors erzielbaren Vorteile sind hier etwas anderer Art, aber nicht weniger gross als bei Triebfahrzeugen für Wechselstrom. Die Impulsbreitensteuerung wird der Impulsfrequenzsteuerung in der Regel vorgezogen. Der Vorteil liegt dabei darin, dass die konstante Pulsfrequenz so gewählt werden kann, dass die vorhandenen Sicherungsanlagen durch die niederfrequenten Oberwellen des Fahrleitungsstroms möglichst wenig oder gar nicht gestört werden. In den meisten Fällen ist indessen mit einer einzigen Frequenz nicht auszukommen, so dass häufig bei kleinen Impulsbreiten eine niedrigere oder bei grossen Impulsbreiten eine höhere Frequenz gewählt werden muss.

Der Thyristor ermöglicht sowohl bei Wechsel- wie bei Gleichstrom die Anwendung der *elektrischen Nutzbremsung.* Diese stellt jedoch zahlreiche neue Probleme, für welche eine voll befriedigende Lösung noch gefunden werden muss. Zu diesem Zweck stehen verschiedene Arten von Nutzbremsschaltungen auf mehreren Versuchstriebfahrzeugen, sowohl bei Gleich- als auch bei Wechselstrom, gegenwärtig in Erprobung. Bis zur genügenden Abklärung dieser Probleme werden Thyristor-Triebfahrzeuge entweder ohne elektrische Bremse oder mit einer elektrischen Widerstandsbremse gebaut. Die *Betriebssicherheit und Störungsanfälligkeit* von Thyristor-Triebfahrzeugen haben bereits einen befriedigenden und mit den Triebfahrzeugen konventioneller Bauart vergleichbaren Stand erreicht. Über die *Unterhaltskosten* liegen infolge der noch zu kurzen Betriebszeit noch keine allgemein gültigen Vergleichsdaten vor.

Bei Wechselstrombahnen erfordert der grössere *Blindstromverbrauch* der Thyristor-Triebfahrzeuge besondere Massnahmen. Auf den Triebfahrzeugen selbst muss durch die Wahl entsprechender Schaltungen (halbgesteuerte Brükken, Folgeschaltung) der Blindstrom-Mehrverbrauch nach Möglichkeit klein gehalten werden. Wenn die Triebfahrzeuge mit Entstörfiltern ausgerüstet sind, lassen sich deren Kondensatoren zur Blindstromlieferung heranziehen. Andernfalls wird eine zentrale Blindstromerzeugung in den Un-

terwerken mit Hilfe von besonderen Kondensatorbatterien in Betracht gezogen.

Die durch Thyristor-Triebfahrzeuge verursachten *Beeinflussungen* im speisenden Netz und in den umliegenden Signal-, Sicherungs- und Fernmeldeanlagen waren in letzter Zeit Gegenstand umfangreicher Forschungen, Messungen und Versuche. Sie können heute jedoch noch nicht als abgeschlossen betrachtet werden. Es ist unbestritten, dass, bei gleicher Triebfahrzeugleistung, die Beeinflussungen eines Thyristor-Triebfahrzeugs bedeutend grösser sind als diejenigen eines Dioden-Triebfahrzeugs und diese wieder ein Mehrfaches von denen eines Triebfahrzeugs mit Wechselstrommotoren. Um ein Bild von der Grössenordnung dieses Verhältnisses zu erhalten, kann als vorläufiges und sehr angenähertes Ergebnis bisheriger Messungen angegeben werden, dass der für die Beeinflussung der Fernmeldeanlagen massgebende Störstrom eines Thyristor-Triebfahrzeugs unter vergleichbaren Verhältnissen im grossen Durchschnitt etwa das Fünffache desjenigen eines Dioden-Triebfahrzeugs und das Dreissigfache von dem eines Triebfahrzeugs mit Wechselstrommotoren beträgt. Diese Beeinflussungen können an ihrem Entstehungsort, d. h. auf den Triebfahrzeugen, durch Wahl geeigneter Schaltungen und passender Aussteuerungsgrade und Pulsfrequenzen wohl vermindert, jedoch nicht völlig beseitigt werden. Gewisse Änderungen an den *gestörten Anlagen* im Sinne einer Verminderung ihrer Störempfindlichkeit sind daher nicht zu umgehen. Worin diese Änderungen bestehen können, ist schon weitgehend abgeklärt. Ihre rasche und vollumfängliche Durchführung scheitert aber an der grossen Ausdehnung der gestörten Anlagen und an den nicht unerheblichen Kosten.

Die Anwendung von Thyristoren auf elektrischen Triebfahrzeugen stellt in jeder Hinsicht ein *Optimierungsproblem* dar. Es handelt sich dabei z. B. um die

Optimierung der Triebfahrzeugleistungen pro Gewichtseinheit
Optimierung des Wirk- und Blindstromverbrauchs
Optimierung der Störbeeinflussung der Anlagen
Optimierung der Investitions- und Unterhaltskosten.

Dabei darf natürlich das Triebfahrzeug nicht für sich allein betrachtet werden. In diese Optimierung müssen auch die Anlagen der Energieversorgung vom Fahrdraht über das Unterwerk bis zum Generator im Kraftwerk, die Anlagen für die Rückleitung des Stroms vom Triebfahrzeug in das speisende Unterwerk, die einer Störbeeinflussung unterworfenen Signal- und Sicherungsanlagen und die beeinflussten Anlagen der Nachrichten- und Informationsübertragung einbezogen werden.

Wiederholung des Programmes der

Diskussionstagung

über

Leistungs-Thyristoren auf elektrischen Triebfahrzeugen

vom 3. und 4. November 1970 in Zürich

Begrüssung: Direktor *R. Richard,* Lausanne, Präsident des SEV

Einleitung: Direktor Dr. sc. techn. *G. Weber,* Zug, Tagungspräsident

1. **Was erwarten die Bahnen von der Anwendung von Thyristoren auf ihren Triebfahrzeugen?**

Referent: Prof. Dr. sc. techn. *E. Meyer,* Chef des Zugförderungs- und Werkstättedienstes, Generaldirektion der Schweizerischen Bundesbahnen, Bern

2. **Schaltungstechnik der gesteuerten Traktionsstromrichter am Wechsel- und Gleichspannungsfahrdraht**

Referent: *H.J. Bossi,* Chef der Abteilung für Stromrichtertechnik, AG Brown, Boveri & Cie, Baden

3. **Der Traktionsmotor bei Speisung über Stromrichter und Gleichstromsteller**

Referent: *R. Moser,* Chef der Konstruktionsabteilung Mittlere Motoren Traktion (MMT) der AG Brown, Boveri & Cie., Oerlikon

Diskussion über die Referate 1, 2, 3

4. **Thyristor-Gleichstromtraktion; Probleme und Erfahrungen der NS**

Referent: *D. W. Venemans,* N.V. Nederlands Spoorwegen (NS), Forschungs- und Planungsdirektion, Utrecht (Niederlande)

5. **Thyristor-Triebfahrzeuge der Penn Central Railroad Co; Probleme und Erfahrungen**

Referent: *W. E. Kelley,* Chief Electrical Engineer, Penn Central Railroad Co, Philadelphia, PA; USA

6. **Détermination du circuit de puissance des véhicules-moteurs à thyristors alimentés en courant alternatif**

Referent: *R. Germanier,* Sous-directeur, chef de la division Traction, S.A. des Ateliers de Sécheron, Genève

Panel-Diskussion: Traktions- und Netztechnik, Betriebserfahrungen mit thyristorgespeisten Triebfahrzeugen

Teilnehmer: Je ein Vertreter der Bahnverwaltungen DB, NS, SBB, SJ, SNCF

Diskussion über die Referate 4, 5, 6 und Panel

7. **Theoretische Grundlagen der Beeinflussung von Schwachstromkreisen durch thyristorgespeiste Triebfahrzeuge**

Referent: Prof. Dr. sc. techn. *R. Zwicky,* Vorsteher des Institutes für industrielle Elektronik an der Eidg. Technischen Hochschule Zürich

8. **Die Rückwirkung von thyristorgespeisten Triebfahrzeugen für Gleich- und Wechselstrom auf Signal- und Fernmeldeanlagen**

Referent: *R. Buckel,* Bundesbahndirektor, Dezernent 71 des Bundesbahn-Zentralamtes München

9. **Rückwirkungen von thyristorgespeisten Fahrzeugen; Erfahrungen aus Messungen in der Schweiz**

Referent: *U. Baechler,* Gruppenchef in der Abteilung Bahntechnik, AG Brown, Boveri & Cie., Baden

10. **Folgerungen für den Betrieb von Signal- und Fernmeldeanlagen**

Referent: *W. Leitenberger,* Bundesbahnoberrat, Dezernent 66 des Bundesbahn-Zentralamtes München

11. **Beeinflussung von Eisenbahn-Sicherungsanlagen schweizerischer Bauart durch thyristorgespeiste Triebfahrzeuge**

Referent: *E. Hofstetter,* Vize-Direktor der Integra AG, Wallisellen

Panel-Diskussion: Betriebserfahrungen über Rückwirkungen von Thyristor-Fahrzeugen auf Signal- und Fernmeldekreise

Teilnehmer: Je ein Vertreter der Bahnverwaltungen DB, NS, SBB, SJ, SNCF

Diskussion über die Referate 7...11 und Panel

12. **Zusammenfassung und Konsequenzen**

Referent: Prof. Dr. sc. techn. *E. Meyer,* Chef des Zugförderungs- und Werkstättedienstes, Generaldirektion der Schweizerischen Bundesbahnen, Bern

178 KB

Warum ist das Haftmasse-Kabel aus Brugg so interessant?

Konstant hohe elektrische Festigkeit gegen Dauer- und Stossbeanspruchung.

—

Keine Wartung der Endverschlüsse.

—

Bis −5 °C verlegbar.

—

Für jede Spannung bis 20 kV geeignet.

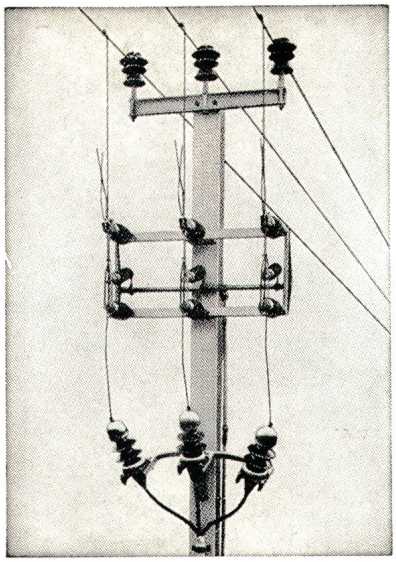
—

Darum ist das Haftmasse-Kabel aus Brugg, ein Papierbleikabel mit Non Draining Compound - Imprägnierung, interessant. So interessant, dass Sie das NDC-Kabel näher kennenlernen sollten. Unsere technischen Berater stehen Ihnen zur Verfügung.

BRUGG

Kabelwerke Brugg AG
5200 Brugg, 056-41 11 51

Dr. Juchli



Sectionneur de dérivation 24 kV, 400 A.

Alpha
Nidau

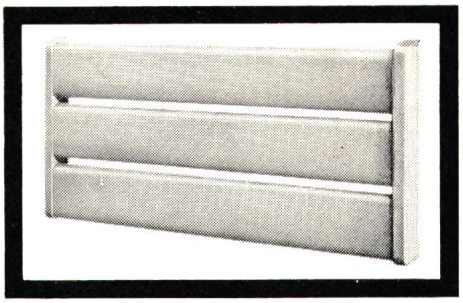
Connaissez-vous le
sectionneur aérien de dérivation
(voir figure) et nos autres
sectionneurs aériens?

Nous livrons ces appareils et vous conseillons volontiers.

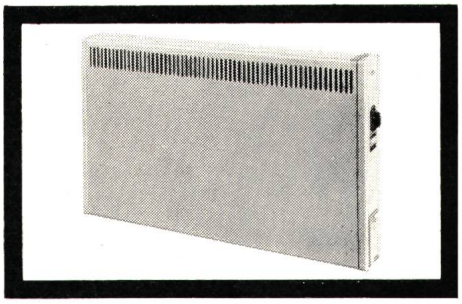
Alpha S.A. Nidau

2560 Nidau (Bienne) Téléphone (032) 2 46 92.

Accum

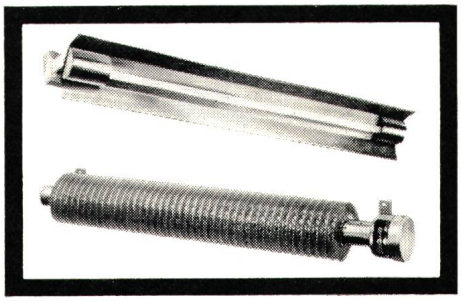


Accum AG
051 - 78 64 52
8625
Gossau ZH



Elektrische Raum-heizungen für

Ferienhäuser
Büros
Kirchen
Schulhäuser
Kindergärten
Berghotels
Bergbahn-Stationen
Sportanlagen
Kraftwerke
Garagen
Säle
Terrassen
Eisenbahnwagen
Lokomotiven
Tram, Trolleybus
Wartehallen usw.



Feller-Lichtregler

Helligkeit nach Wunsch

für Glühlampen von 40 bis 440 Watt

an Stelle eines gewöhnlichen Schalters einbaubar
mit SEV-Sicherheitszeichen
radioentstört

Erhöhter Bedienungskomfort: Ein Druck auf den Regulierknopf bewirkt das sofortige Ein- oder Ausschalten in jeder Reglerstellung

Adolf Feller AG CH-8810 Horgen Telefon (051) 82 16 11

Feller