

Zeitschrift: Bulletin de l'Association suisse des électriciens
Herausgeber: Association suisse des électriciens
Band: 28 (1937)
Heft: 14

Artikel: Rekuperations- oder Widerstandsbremmung im Betriebe einer elektrischen Adhäsionsbahn mittlerer Steigung?
Autor: Laternser, A.
DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-1058741>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. [Siehe Rechtliche Hinweise.](#)

Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. [Voir Informations légales.](#)

Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. [See Legal notice.](#)

Download PDF: 05.02.2025

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

ASSOCIATION SUISSE DES ÉLECTRICIENS

BULLETIN

RÉDACTION:
Secrétariat général de l'Association Suisse des Electriciens
et de l'Union des Centrales Suisses d'électricité, Zurich 8

ADMINISTRATION:
Zurich, Stauffacherquai 36 ♦ Téléphone 51.742
Chèques de postaux VIII 8481

Reproduction interdite sans l'assentiment de la rédaction et sans indication des sources

XXVIII^e Année

N^o 14

Vendredi, 9 Juillet 1937

Rekuperations- oder Widerstandsbremung im Betriebe einer elektrischen Adhäsionsbahn mittlerer Steigung?

Von A. Laternser, Zürich.

621.337.5 : 621.333.4

Für eine zu elektrifizierende schweizerische Nebenbahn werden die Verhältnisse bei Anwendung der Rekuperation sowohl technisch, als auch wirtschaftlich, untersucht. Es wird hiebei eine neue Einphasen-Wechselstrom-Rekuperationseinrichtung zur Diskussion gestellt.

L'auteur examine les conditions de récupération pour un chemin de fer secondaire suisse à électrifier, au point de vue technique et économique. Il expose à cette occasion une nouvelle installation de récupération pour courant alternatif monophasé.

Ob eine elektrische Bergbahn mittlerer bis höchster Steigung eine elektrische Bremse anwenden soll oder nicht, steht ausser jedem Zweifel. Alle Bergbahnen, ob sie als Zahnradbahn oder Adhäsionsbahn gebaut sind, besitzen zur erhöhten Sicherheit, zur Schonung des Rollmaterials und zur Vermeidung von Bremsstaub eine elektrische Bremse. Die besondere Frage aber, ob eine elektrische Adhäsionsbahn mittlerer Steigung Rekuperations- oder Widerstandsbremse zu Hilfe ziehen soll, wird sehr verschieden beurteilt. Es besteht aber Neigung, sie auf Grund technischer und nicht wirtschaftlicher Erwägungen mehrheitlich zugunsten der Widerstandsbremse, also der Ueberführung der Bremsenergie in Wärme zu lösen. Diese Frage soll hier im Hinblick auf die bevorstehende Elektrifizierung einer dazu schon längst reifen, schweizerischen Nebenbahn (Schweizerische Südostbahn; Linien: Rapperswil—Arth Goldau und Wädenswil—Einsiedeln) mit maximal 50 ‰ Steigung einer Betrachtung unterzogen werden, die dem wirtschaftlichen Moment ohne Beeinträchtigung gesunder technischer Grundsätze in allseitigem Interesse zum Rechte verhelfen soll.

Die Bahn muss die Energie zu einem festen Preis kaufen, was eine klare Situation ergibt. Sie wird an das Versorgungsnetz der Schweiz. Bundesbahnen (SBB) angeschlossen, wird also mit Einphasenwechselstrom von 15 kV, 16²/₃ Per./s betrieben. Damit ist ein Energieausgleich möglich, so dass Rückenergie unter allen Umständen Verwendung findet. Schon diese Umstände sprechen mindestens nicht gegen Rekuperation bei dieser Bahn.

Welches ist nun der Energiebedarf und welches sind die maximal möglichen Ersparnisse bei Energierückgewinnung? Die Energiebedarfsrechnung ist einfach. Sie fusst auf einem Fahrwiderstand von 5 kg/t bei einer Durchschnittsgeschwindigkeit von 50 km/h, auf der Gesamtlänge der Bahn von 55,4

km, auf der Gesamthöhendifferenz von 1422 m und auf der Zahl der vorhandenen Stationen (17). Es ist demnach:

Reibungsarbeit	110 800 · 5 =	554 000 mkg/t ~ 13,5 Wh/tkm = 18,1 %
Freiwerdende potentielle Energie	1000 · 1422 — 55 400 · 5 =	1 154 000 mkg/t ~ 28,0 Wh/tkm = 37,4 %
Freiwerdende kinet. Energie	(34 · 1000 · 1 · 36 ² /9,81 · 2 · 3,6 ²) 1,1 =	190 000 mkg/t ~ 4,6 Wh/tkm = 6,2 %
Rangieren, Leerfahrten, Materialzüge usw.	5% =	95 000 mkg/t ~ 2,4 Wh/tkm = 3,2 %
Gesamtarbeit an den Triebachsen	=	1 990 000 mkg/t ~ 48,5 Wh/tkm = 65,0 %
Verluste in Fahrdrat und Schiene	. . . . .	1,4 Wh/tkm = 2,0 %
Verluste in den Triebfahrzeugen	. . . . .	20,9 Wh/tkm = 28,0 %
Nebenbetriebe auf den Triebfahrzeugen	. . . . .	0,7 Wh/tkm = 1,0 %
Zugsheizung und Beleuchtung	. . . . .	3,0 Wh/tkm = 4,0 %
Gesamtenergie im Speisepunkt	. . . . .	74,5 Wh/tkm = 100 %
Sicherheitszuschlag	. . . . .	5,5 Wh/tkm = 7,4 %
Gesamtenergie im Speisepunkt mit Zuschlag	. . . . .	80,0 Wh/tkm

Der Sicherheitszuschlag berücksichtigt auch den Umstand, dass die verkehrsdichtere der beiden Strecken einen höheren spezifischen Energieverbrauch aufweist als das Mittel. Der so errechnete spezifische Energieverbrauch findet seine approximative Bestätigung durch eine Umrechnung der entsprechenden Energieverbrauchsziffer der Bern-Lötschberg-Simplonbahn (BLS), mitgeteilt durch L. Thormann¹⁾, die bei ungefähr gleicher Linienführung, aber mit 27 ‰ max. Steigung 47,4 Wh/tkm beträgt. Bei einem ebenfalls von Thormann¹⁾ für die BLS ermittelten Fahrwiderstand von 4,2 kg/t und der weiteren wohl zulässigen Annahme, dass der über Hub- und Reibungsarbeit hinausgehende Arbeitsbetrag bei der BLS doppelt so hoch ist als bei der in Frage stehenden Bahn, ergibt sich für diese abgeleitet:

$$47,4(50 + 5)1,09 / (27,0 + 4,2)1,18 = 77 \text{ Wh/tkm.}$$

¹⁾ Schweiz. Bauztg. Bd. 68 (1916), S. 9.

Ohne die Heranziehung der Energierückgewinnung müssten also bei der Energieübertragung in den Triebfahrzeugen, in elektrischen Widerständen in Radbandagen und Bremsklötzen vernichtet werden: $28 + 4,6 = 32,6$ Wh/tkm, d. h. 67 % der an den Triebachsen, bzw. 43,6 % der im Speisepunkt ohne Zuschlag aufgewendeten Energie.

Dies sind enorme Energiebeträge, deren 100 %ige Umsetzung in Wärme auf den Triebfahrzeugen keine leichte Aufgabe, ja schwierig durchzuführen ist und übrigens sogar das Gefühl des Nichtfachmanns berührt. Diese Energie musste einmal aufgewendet und deshalb auch bezahlt werden. Die Bahn ist ein Schulbeispiel für die Anwendung der Energierückgewinnung, hinsichtlich des Ausmasses der damit verbundenen Einsparung.

Um zu wissen, wieviel von diesen sonst als Verluste anzusprechenden Energiebeträgen rückgewonnen werden kann, muss der Wirkungsgrad der Energierückgewinnung bekannt sein. Wie im folgenden noch dargelegt wird, beträgt dieser Wirkungsgrad für sich allein etwa 65 %, ist also zufällig gleich gross wie der Wirkungsgrad für die elektrische Traktion ohne Rekuperation. Dieser wurde von Thormann ¹⁾ im Jahresmittel bis Speisepunkt für die BLS zu 65 % angegeben und wurde für unsere Energiebedarfsrechnung wie ersichtlich ebenfalls als zutreffend angenommen. Mit dem Rekuperationswirkungsgrad von 65 % kann man nun den Nettogewinn bei Anwendung der Rekuperation bei der betrachteten Bahn überblicken. Die an den Triebachsen frei werdenden 32,6 Wh/tkm erscheinen im Speisepunkt noch mit $32,6 \cdot 0,65 = 21,5$ Wh/tkm, was auf die sonst aufzuwendenden 74,5 Wh/tkm rund 30 % ausmacht. Im Speisepunkt sind demnach noch $74,5 - 21,5 = 53$ Wh/tkm aufzubringen.

Um mit Vergleichen zu sprechen: Müsste die elektrische Energie aus dem Ausland bezogen werden, so könnte mit dieser Einsparung gerade die Frankenabwertung ausgeglichen werden. Oder, die Bahn könnte bei gleichem Betriebsergebnis wie bei Nichtanwendung der Rekuperation, einen um 42 % höheren Energiepreis zahlen. Oder, ein Energiepreis von beispielsweise 8 Rp./kWh käme bei gleichem Betriebsergebnis mit Rekuperation effektiv nur auf 5,5 Rp. zu stehen.

Der Rekuperationswirkungsgrad hängt wesentlich ab von der Einrichtung für Einphasenwechselstrom-Rekuperation auf den Triebfahrzeugen. Da ja mit dieser ein Maximum von Ersparnis erzielt und die Einrichtung nicht nur als Sicherheits- und Schonbremse benützt werden soll, sind die Uebertragungsverluste bei Rekuperation klein zu halten. Sie sind klein, wenn ein Leistungsmaximum mit einem Stromminimum erzielt wird, wenn der Leistungsfaktor hoch liegt, also in der Nähe von 1.

Für Einphasenwechselstrom-Rekuperation ist bis heute besonders die praktische Einrichtung bekannt geworden, die vor 20 Jahren von der Maschinenfabrik Oerlikon entwickelt wurde und sich seither in etwa 100 schweizerischen Einphasen-Triebfahr-

zeugen besonders vom Betriebsstandpunkt aus als durchaus brauchbar erwiesen hat. Eine elektrische Verbesserung hat in dieser Zeit nicht stattgefunden.

Diese Einrichtung besteht in der Nebenschluss-erregung der Triebmotorfelder und der Kompensierung der phasenfalschen Erregung durch einen induktiven Widerstand im Ankerstromkreis. Eine weitere Erläuterung des Verfahrens erübrigt sich, weil es hinlänglich bekannt ist ²⁾. In Fig. 1 ist es in vereinfachter schematischer Form für 4 Motoren un-

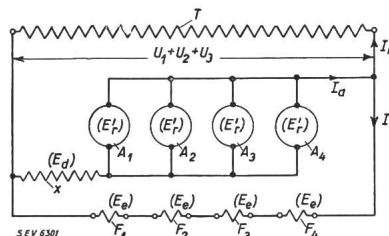


Fig. 1. Alte Nutzbremsschaltung («Oerlikon») für 4 Motoren.

ter Weglassung von Kompensations- und Hilfsfeldwicklung der Motoren sowie der Regulierung vergleichshalber dargestellt. Da die 4 Felder mit vollem Strom gerade die Vollastspannung aufbringen, können Anker- und Feldstromkreis an gleiche Spannung gelegt, also bei Sekundärregulierung auch mit denselben Steuerapparaten reguliert werden.

Dieses Rekuperationsverfahren ist, wie ersichtlich, schematisch sehr einfach, übersichtlich und auch einfach in der Handhabung. Es ist auch selbsterregungsfrei, stabil ³⁾. Der Leistungsfaktor lässt indessen zu wünschen übrig, und der künstliche Reaktanzaufwand ist erheblich. Die Folge sind entsprechend grosse Rekuperationsverluste, bzw. eine begrenzte Leistungsfähigkeit. An Versuchen, die Sachlage zu verbessern, hat es nicht gefehlt; ein Erfolg war ihnen nicht beschieden. Sie scheiterten meist an der Selbsterregung, die bei besserem Leistungsfaktor auftrat. Im Hinblick auf die betrachtete Bahn möge daher eine neue Rekuperationsschaltung für Einphasenwechselstrom zur Diskussion gestellt werden, die alle Eigenschaften zu besitzen scheint, die eine Rekuperationsschaltung aufweisen soll.

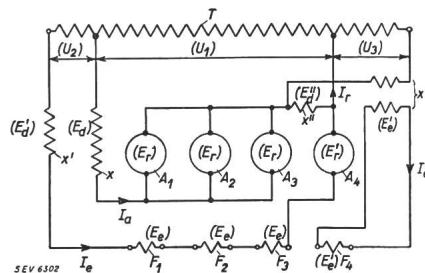


Fig. 2. Neue Nutzbremsschaltung (x' fällt weg, wenn x'' vorhanden).

Diese neue Schaltung ist für 4 Motoren in Fig. 2 in gleicher schematischer Form wie die Schaltung nach Fig. 1 dargestellt. Sie ist dadurch gekennzeichnet, dass bei einem Triebfahrzeug mit einer Mehrzahl von Triebmotoren für Rekuperationsbetrieb das Feld eines Motors (Primärmotor) vom

²⁾ Bull. SEV 1918, Nr. 10; Schweiz. Bauztg. Bd. 74 (1919), S. 84.

³⁾ Bull. SEV 1937, Nr. 10.

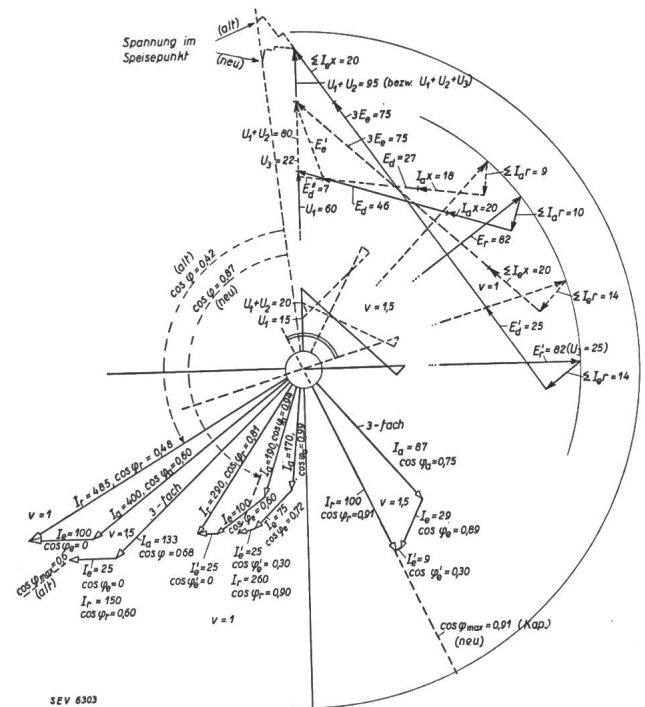
Reguliertransformator mit einer passenden Teilspannung fremd erregt wird, der Anker dieses Motors über die in Serie geschalteten Felder der übrigen Motoren (Sekundärmotoren) auf eine zweite Teilspannung des Reguliertransformators zurückarbeitet und die Anker der Sekundärmotoren über eine künstliche Reaktanz auf eine dritte Teilspannung des Reguliertransformators zurückarbeiten, wobei zur Verhinderung der Selbsterregung die elektrischen und magnetischen Verhältnisse der Anlage entsprechend der Stabilitätsbedingung

$$AnL_f M < R_e L_a + R_a L_e \quad \text{bzw.} \quad AnL_f \ddot{u} < R_e \ddot{u}^2 + R_a$$

gestaltet werden ⁴⁾. Abgesehen von der Möglichkeit starker Eisensättigung von Reguliertransformator und Primärmotor sowie von der Einschaltungsmöglichkeit von induktionslosem Widerstand in den Primärfeldstromkreis, wird der genannten Stabilitätsbedingung insbesondere entsprochen durch einen stark gesättigten Zwischentransformator X''' und durch eine Induktivität X'' , welche beide einzeln oder miteinander in Serie vor das Primärfeld gelegt werden. In der für einen Motor in Nebenschluss-Schaltung gültigen, aber für die betrachtete Anlage sinngemäss anzuwendenden Stabilitätsbedingung bedeuten: AnL_f den sogenannten elektromotorischen Widerstand des Ankers, d. h. das Verhältnis Rotations EMK zu Ankerstrom, L_f den Selbstinduktionskoeffizient des Motorfeldes, der an Stelle des Kraftflusses benützt wird, n die Motordrehzahl. A ist demzufolge eine Motorkonstante. M ist der Koeffizient der gegenseitigen Induktion für die transformatorische Verkettung des Ankers und des Feldes über den Reguliertransformator, \ddot{u} das entsprechende Windungszahlverhältnis. $R_a R_e$ sind die induktionslosen Widerstände des Anker- und Feldstromkreises, $L_a L_e$ die entsprechenden Selbstinduktionskoeffizienten.

Die neue Schaltung verbindet mit allen günstigen Fahreigenschaften der alten Schaltung einen einwandfreien Leistungsfaktor, einen wesentlich geringeren Aufwand an künstlicher Induktivität als wie bei der alten Schaltung, d. h. nur etwa 30 0/0, und schliesslich eine Bremskraftcharakteristik, die die Bremskraft mit der Geschwindigkeit stark anwachsen lässt, also grössere Betriebsstabilität aufweist. Die Folge des besseren Leistungsfaktors und des kleineren Reaktanzaufwandes sind wesentlich kleinere Rekuperationsverluste zwischen Speisepunkt und Triebachse. Die Begründung liegt im Vektordiagramm Fig. 3, dem ein fiktiver Triebmotor nach Vektordiagramm Fig. 4 nebst weiteren massgeblichen Charakteristiken nach Fig. 5 zugrunde liegen. Das Diagramm Fig. 3 berücksichtigt beide Schaltungen und vernachlässigt die Magneti-

sierungsströme. Es basiert auf Vollastspannung $U = 100\%$ für Motorbetrieb als Bezugsspannung für die verschiedenen Teilspannungen und auf einer max. Rotationsspannung im Rekuperationsbetrieb, die diejenige bei Motorbetrieb nicht übersteigt. Die Ströme sind auf Vollaststrom bei Motorbetrieb $I =$



dass die neue Schaltung ebenso wie die alte auf Stillstand zu bremsen gestattet, ebensowohl eine wirtschaftliche als eine Sicherheitsfrage.

Die künstliche Reaktanzleistung ist in alter Schaltung $U4I = 4UI$ und diejenige in neuer Schaltung

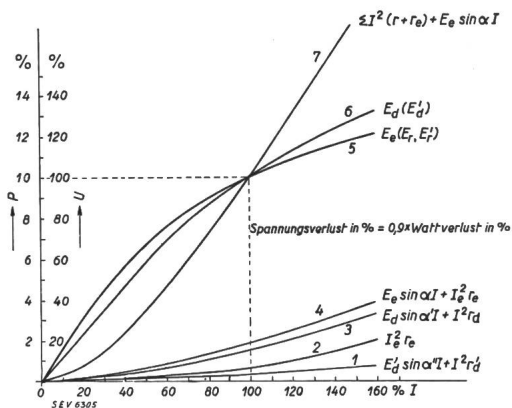


Fig. 5.

- Kennlinien für Motor und Drosselspulen.
- 1 Drosselspulenverluste (Spule x')
 - 2 Motorfeld-Kupferverluste.
 - 3 Drosselspulenverluste (Spule x)
 - 4 Motorfeldeisenverluste.
 - 5 Rotations-Feldspannung.
 - 6 Drosselspulenleistung.
 - 7 Motorverluste im Kurzschluss.

etwa $0,46U3I = 1,38UI$ also nur rund 30% der bisherigen für die alte Schaltung (Zwischentransformator unberücksichtigt). Der Zwischentransformator benötigt eine Leistung von etwa $0,22UI$, also etwa $1/20$ des Reaktanzaufwandes für die alte Schaltung oder eine Vergrößerung des Reaktanzaufwandes für die neue Schaltung um etwa 16%.

In Fig. 6 sind anhand der Charakteristiken Fig. 4 und 5 sowie der Vektordiagramme für eine mittlere Spannung die Kennlinien für die neue Schaltung herausgezeichnet. Diese sind sehr instruktiv und lassen den Verlauf des Leistungsfaktors sowie der Bremskraft für Primärmotor und Sekundärmotoren und ebenso aller 4 Motoren gut erkennen.

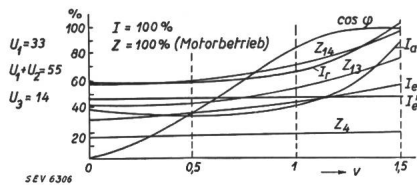


Fig. 6.

Kennlinien für neue Rekuperationsschaltung.

Es ist vielleicht noch besonders darauf hinzuweisen, dass bei alter Schaltung der Spannungsabfall Speisepunkt-Motoren in allen Fällen positiv ist, während bei neuer Schaltung, insbesondere bei kapazitiver Arbeitsweise, gleich wie bei Gleichstrom-Rekuperationsbetrieb ein umgekehrter Spannungsabfall eintreten kann. Dass das neue Verfahren neben einem induktiven Arbeitsgebiet bei höheren Geschwindigkeiten auch ein kapazitives aufweist, ist dem Diagramm Fig. 3 zu entnehmen. Die Kommutationsbedingungen für die Triebmotoren in Rekuperationsschaltung sind für die beiden Schaltungen

nicht verschieden (Feldstrom ca. 45 Grad dem Ankerstrom voreilend) und sind mit entsprechender Hilfsfeldschaltung zu befriedigen. Die genauere Betrachtung der Fig. 1 und 2 sowie des Diagramms Fig. 3 lässt erkennen, dass der Primärmotor unter ungefähr gleichen Bedingungen arbeitet wie die Motoren in alter Schaltung, nur dass in wirtschaftlicher Weise die drei Felder der Sekundärmotoren dem Primärmotor als künstliche Reaktanz dienen, während die Sekundärmotoren phasenrichtiger erregt werden als in alter Schaltung.

Daraus gehen die wirtschaftlichen und betriebstechnischen Vorteile der neuen Schaltung zur Genüge hervor. Der springende Punkt ist natürlich die Selbsterregung. Ohne Zwischentransformator X'' und ohne Dämpfungsinduktivität X' tritt von einem gewissen Punkt im kapazitiven Gebiet an Selbsterregung auf, weil der Primärmotor vom Fremdstrom generatorisch erregt werden kann. Der Wicklungsteil U_3 des Reguliertransformators wirkt im kapazitiven Arbeitsgebiet fremderregend. Schaltet man eine Dämpfungsinduktivität X'' vorzugsweise in den Sekundärankerstromkreis (mit einer Anzapfung an der Induktivität X kann dasselbe erreicht werden), so wird ein Teil des Fremdstromes über den Wicklungsteil U_3 abgedrängt und kann demzufolge den Fremdstrom, der in diesem Wicklungsteil transformatorisch entsteht, aufheben. Voraussetzung ist natürlich entsprechende Dimensionierung, so dass auch im induktiven Arbeitsgebiet die gleiche Wirkung stattfindet. Der stark gesättigte Zwischentransformator erschwert allgemein den Uebertritt des Fremdstromes in das Primärfeld.

Es ist nun noch der Rekuperationswirkungsgrad, der bereits mit 65% in der Energierechnung verwendet wurde, zu bestimmen. Zu diesem Zwecke wurde unter Verwendung der Charakteristiken des Motors die Verluste bei Vollast-Motorbetrieb und Rekuperations-Vollast und Minimallastbetrieb in der Beharrung tabellarisch ohne Berücksichtigung der Stillstandsbremung zusammengestellt (Tab. I). Der Zusammenstellung ist zu entnehmen, dass der Wirkungsgrad im ersten Fall ca. 76% und in den beiden andern Fällen 71,5 bzw. 23% beträgt.

Die Steigungen der Bahn verteilen sich folgendermassen: $0/00 : 12,3$ km, $2,5 \dots 6,5/00 : 3,84$ km, $8 \dots 25/00 : 11,4$ km, $28 \dots 50/00 : 28,22$ km. Auf $49 \dots 50/00$ trifft es allein 14,76 km. Der massgebende Wirkungsgrad für Rekuperation muss also weit über dem arithmetischen Mittel der Extreme liegen, also erheblich über 47%. Da zwischen Vollastwirkungsgrad und Wirkungsgrad im Jahresmittel mindestens das gleiche Verhältnis besteht wie bei Motorbetrieb, d. h. $76 : 69$, so wäre demnach auch bei Einbezug der freiwerdenden kinetischen Energie der Wirkungsgrad der Stromrückgewinnung im Jahresmittel mindestens $71,5 \cdot 69/76 = 65/00$.

Aus diesen Überlegungen geht hervor, dass sich die Anwendung der Rekuperation im vorliegenden konkreten Fall technisch und wirtschaftlich aufdrängt. Die neue Rekuperationseinrichtung tritt in

