

**Zeitschrift:** Bulletin des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins  
**Herausgeber:** Schweizerischer Elektrotechnischer Verein ; Verband Schweizerischer Elektrizitätswerke  
**Band:** 46 (1955)  
**Heft:** 1

**Artikel:** Der Versuchsbetrieb auf der Höllentalbahn im Schwarzwald mit Einphasenwechselstrom von 50 Hz  
**Autor:** Degen, A.  
**DOI:** <https://doi.org/10.5169/seals-1060904>

### **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:** 13.01.2026

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

Druckknopfes zwangsweise der richtige Fernreguliergeber auf den gewünschten Empfänger geschaltet wird (Fig. 15).

Ein Partner meldet von Mettlen aus die für ihn wichtigen Schalterstellungen in seinen Lastverteilerraum. Für die detaillierte Beschreibung der Fernregulierung sei auf den Aufsatz von W. Hauser, Olten, «Leistungsregulierung in Mettlen» im Bulletin SEV Bd. 45(1954), Nr. 12, S. 483, verwiesen.

### 11. Schalterprüfstand der Forschungskommission des SEV und VSE für Hochspannungsfragen (FKH)

In der Station Mettlen wird ein Schalterprüfstand für die FKH ausgebaut, der gestattet, Schalter von 150 und 220 kV Nennspannung direkt im Netz und Schalter anderer Spannung (bis 380 kV) unter Zwischenschaltung von Transformatoren (die aber vorläufig noch nicht zur Aufstellung kommen) zu prüfen, sowohl im Abschalten von Kurzschlüssen, als auch leerlaufender Transformatoren und Leitungen.

Als Messeinrichtungen werden die Kathodenstrahloszillographen, die im Messwagen der FKH eingebaut sind, verwendet.

### 12. Leitungsmasten

Die Masten der an die Station angeschlossenen Leitungen sind nach verschiedenen Systemen gebaut: Gittermasten mit Tannenbaumanordnung der Leiter, Rohrmasten und Gittermasten mit Flachanordnung der Leiter und ausbetonierte Rohrmasten [siehe Vögeli, R.: Die 380-kV-Freileitung. Bull. SEV Bd. 44(1953), Nr. 4, S. 141...145] mit Donauanordnung der Leiter.

Mit der Projektierung und Bauleitung der Station Mettlen war die Motor-Columbus A.-G. für elektrische Unternehmungen in Baden (Schweiz) betraut.

Die vorstehenden Ausführungen können keine eingehende Beschreibung der Station Mettlen geben, sondern sollen nur allgemeine Angaben über die Anlage unter Hervorhebung einiger Besonderheiten darstellen.

Adresse des Autors:

H. Schiller, Oberingenieur der Motor-Columbus A.-G., Baden (AG).

## Der Versuchsbetrieb auf der Höllentalbahn im Schwarzwald mit Einphasenwechselstrom von 50 Hz

Von A. Degen, Basel

621.331.3.025.1(434.6)

Der Versuchsbetrieb auf der Höllentalbahn mit seinen speziellen Verhältnissen wird beschrieben. Es wird gezeigt, warum von den seinerzeit gebauten vier Lokomotivtypen sich nur diejenige mit Kommutatormotoren für 50 Hz durchsetzen konnte.

Après une description de service d'essai sur la ligne du Höllental, dans la Forêt-Noire, dont les conditions sont très spéciales, l'auteur montre pourquoi le type à moteurs à collecteurs pour 50 Hz a été le seul des quatre types de locomotives qui ait pu s'imposer.

### Geschichtliches

Am 23. Mai 1887 wurde das erste Teilstück der normalspurigen Höllentalbahn von Freiburg im Breisgau nach dem Städtchen Neustadt im Schwarzwald eröffnet. Die Fortsetzung bis Donaueschingen mit Anschluss an die Schwarzwaldbahn folgte erst 14 Jahre später am 14. August 1901. Von diesem Zeitpunkt an kann die bisherige Nebenbahn als

Hauptlinie angesprochen werden; sie weist heute einen ansehnlichen Verkehr mit durchgehenden Eilzügen in beiden Richtungen auf. Die Überwindung des grossen Höhenunterschiedes im engen Höllental bereitete den Erbauern der Bahn grosse Schwierigkeiten, weshalb man auf der rund sieben Kilometer langen Steilrampe Hirschsprung-Hinterzarten zur Zahnstange griff. Sie wurde bis 1901 unter Verwendung besonderer Zahnradlokomotiven sowohl bei den Berg- als auch bei den Talfahrten benützt. Von diesem Zeitpunkte an beschränkte man sich auf die Bergfahrten allein, während die Talfahrten im reinen Adhäsionsbetrieb erfolgten. Mit der Indienstnahme schwerer Tenderlokomotiven mit 5 Triebachsen im Jahre 1933 konnte der unwirtschaftliche und hemmende Zahnradbetrieb auf der Rampe mit 55 % Steigung aufgegeben und die Zahnstange gänzlich ausgebaut werden.

### Die elektrische Zugförderung in Baden

Die früheren badischen Staatsbahnen hatten bereits vor dem Ersten Weltkrieg ihr Interesse für die elektrische Zugförderung bekundet, indem sie auf der Wiesen- und auf der Wehralbahn (Normalspur, rund 47 km) versuchsweise zum elektrischen Betrieb mit Einphasenwechselstrom von 15 000 V Fahrdratspannung und 15 Hz (später auf 16⅔ Hz erhöht) übergingen. Der Ausbruch des ersten Welt-

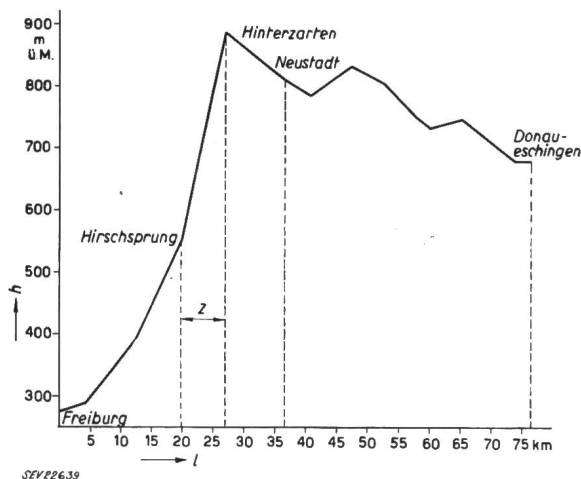


Fig. 1  
Vereinfachtes Längenprofil der Strecke  
Freiburg-Donaueschingen  
Z ehemalige Zahnstangenstrecke

krieges und der Zusammenbruch Deutschlands im Jahre 1918 mit seinen weitgehenden politischen Umwälzungen verhinderten den weiteren Ausbau der elektrischen Bahnen in Baden, trotzdem im Land zahlreiche Wasserkräfte vorhanden waren, die den Übergang zur weissen Kohle in grösserem Ausmasse gestattet hätten. Es wurde deshalb in Baden allgemein begrüsst, als die massgebenden Instanzen im Frühjahr 1933 beschlossen, die Höllentalbahn von Freiburg nach Neustadt und die Dreiseenbahn von Titisee nach Seeburg mit einer Gesamtlänge von rund 56 km zu elektrifizieren. Da die Verwendung von Einphasenwechselstrom mit  $16\frac{2}{3}$  Hz aus wirtschaftlichen Gründen ausschied, wurde beschlossen, die Elektrifikation als Versuch mit 50 Hz durchzuführen.

Die elektrische Zugförderung mit Einphasenwechselstrom von  $16\frac{2}{3}$  Hz hatte sich im damaligen Zeitpunkt in verschiedenen Ländern Europas (Schweiz, Deutschland, Österreich, Schweden und Norwegen) auch unter den schwierigsten Verhältnissen durchaus bewährt. Die direkte Eingliederung der Energieversorgung von Bahnen in das allgemeine Landesnetz unter Umgehung des Gleichstromes bietet grosse wirtschaftliche Vorteile, wie den Wegfall besonderer Kraft- und Unterwerke sowie von Verteilanlagen mit niedriger Frequenz. Da der Anteil der elektrifizierten Strecken in Deutschland im Jahre 1933 noch ziemlich klein war, hatte man alles Interesse daran, diese Frage durch einen gross angelegten Versuch abzuklären.

### Die vorbereitenden baulichen Änderungen

Um die Fahrgeschwindigkeiten der Züge erhöhen und damit auch die Ausnützung der fast ausschliesslich einspurigen Strecken steigern zu können, vergrösserte man teilweise die Krümmungsradien sowohl auf der freien Strecke, als auch bei den Ein- und den Ausfahrten der Bahnhöfe. In den Tunneln mussten die Geleise um durchschnittlich 20 cm gesenkt werden, damit die Fahrleitungen eingebaut werden konnten. Strassen- und Signalbrücken mussten gehoben werden, während die Eisenkonstruktion bei drei Brücken eine Verschiebung erfuhr. Diese vorbereitenden baulichen Arbeiten benötigten rund  $1\frac{1}{2}$  Jahre Zeit. Diese verhältnismässig lange Bauzeit lässt sich durch zwei Umstände erklären. Einmal liegt mehr als die Hälfte der zu elektrifizierenden 56 km Streckenlänge auf Meereshöhen von mehr als 800 m, was eine mehrmonatige Arbeitseinstellung im Winter zur Folge hatte. Dazu musste tagsüber der Betrieb der Höllentalbahn uneingeschränkt aufrecht erhalten werden, was sich auf den Gang der Bauarbeiten hemmend auswirkte.

### Die Fahrleitungen

Für die Ausführung waren in erster Linie die «Dienstvorschriften der Deutschen Reichsbahn für die Ausführung und die Festigkeitsberechnung von Wechselstrombahnen mit 15 kV Nennspannung» massgebend, soweit nicht das neue System und die auf 20 kV erhöhte Fahrdrachtspannung Änderungen

erforderten. Mit wenigen Ausnahmen konnten für den Bau genormte Einzelteile verwendet werden. Die ursprünglich in Aussicht genommene Aufstellung von Holzmasten (Waldreichtum des Schwarzwaldes) musste fallen gelassen werden, da sich diese Lösung gegenüber Masten aus Eisen sowohl wirtschaftlich als auch technisch als ungünstiger erwies. Die wichtigsten Daten der Fahrleitungen gehen aus Tabelle I hervor.

Die wichtigsten Daten der Fahrleitungen

Tabelle I

Strecke	Streckenlänge km	Totale Geleise- länge km	Mit Fahr- leitungen ausgerüste- te Geleise km	Fahrleitungs- masten	
				Zahl	Gewicht inkl. Ausleger t
Freiburg-Neustadt	36,4	65,59	64,14	1326	976,2
Titisee-Seeburg	19,2	26,08	26,01	542	277,9
Total . . . . .	55,6	91,67	90,15	1868	1254,1

Alle Eisenteile der Masten wurden genietet. Es wurde je ein doppelter Grund- und ein doppelter Deckanstrich aufgetragen, wobei eine möglichst gute Anpassung an das Landschaftsbild angestrebt wurde. Die bisherige Bauart als Kettenfahrleitung gemäss den bestehenden Vorschriften wurde beibehalten, wobei nur auf die höhere Spannung von 20 kV der Fahrleitung Rücksicht genommen werden musste. Der Fahrdracht liegt im allgemeinen 6,25 m über Schienenoberkante; einzig in den Loretto- und Sternwaldtunneln bei Freiburg beträgt diese Distanz nur etwa 5,20 m. Wegen der um 5 kV höheren Fahrdrachtspannung gegenüber Einphasenwechselstrom mit  $16\frac{2}{3}$  Hz wurde der Abstand der unter Spannung stehenden Teile gegenüber Erde von 300 auf 400 mm erhöht; von dieser Vorschrift wurde nur ausnahmsweise abgegangen.

Wegen der knappen Profile der Tunnel konnte die Fahrleitung dort nicht mit der üblichen Höhe von 6,25 m über der Schienenoberkante aufgehängt werden. Eine Absenkung der Tunnel zur Erzielung der nötigen Höhe schied wegen der grossen Kosten aus. Ferner zeigte es sich, dass die Tunnel auf der Höhe des Fahrdrachtes nicht breit genug waren, als dass man auf den Lokomotiven die normalen Stromabnehmer der Deutschen Reichsbahn mit einer Breite von 2100 mm hätte verwenden können, da sonst die erforderlichen Isolationsabstände, insbesondere auch bei Berücksichtigung des teilweisen Betriebes mit Dampflokomotiven, gefehlt hätten. Die Lokomotiven der Höllental- und der Dreiseenbahn erhielten deshalb schmalere Stromabnehmer mit nur 1300 mm Breite. Ihr Gleitstück am Fahrdracht misst 950 mm gegenüber 1300 mm bei der Normalausführung. Auch die Zickzackführung musste gegenüber der Normalausführung von  $\pm 500$  mm auf  $\pm 200$  mm reduziert werden, was eine Vermehrung der Fahrleitungsmasten zur Folge hatte. Ihre gegenseitige Entfernung beträgt in der Geraden rund 50 m gegenüber rund 75 m bei der Einheitsfahrleitung. Diese Sonderstellung wird die Höllentalbahn gegebenenfalls später mit der Schwarzwaldbahn, mit der sie in Donaueschingen zusammen- trifft, teilen, sofern diese ebenfalls zur weissen Kohle

übergehen wird. Es handelt sich hierbei um ein Netz von ungefähr 300 km Streckenlänge, das auch in betrieblicher Hinsicht eine Sonderstellung einnimmt (Gebirgsbahnen).

Auf der Höllentalbahn wurden total 93,22 km Fahrdrabt und auf der Dreiseenbahn total 29,73 km verlegt. Für die Hauptgeleise wählte man einen Querschnitt von 100 mm<sup>2</sup>, für die Nebengeleise von 80 mm<sup>2</sup>. Im Hinblick auf den vorgesehenen gemischten Betrieb wurde der Fahrdrabt aus Kupfer und das Trageisil aus Bronze gewählt. Versuchsweise wurde zwischen Himmelreich und Hirschsprung in ein Abspannfeld von 1337 m Länge ein Fahrdrabt aus Stahlaluminium eingebaut. Auf der Höllentalbahn wurden total 65,89 t Bronzedraht und auf der Dreiseenbahn total 18,89 t aufgehängt.

Auf Grund der vorliegenden Erfahrungen wurde nur die einfache Isolierung angewendet mit Ausnahme der Tunnel, wo im Hinblick auf die Rauchgase der Lokomotiven und die Feuchtigkeit zur doppelten Isolierung übergegangen wurde. Im Hinblick auf die erhöhte Spannung der Fahr- und der Speiseleitungen von 20 kV ( $U_{max} = 23$  kV) wurden durchschlagsichere Stabisolatoren mit erhöhter Festigkeit verwendet. Die bei der Prüfung einzuhaltenen Bedingungen wurden über die bestehenden VDE-Vorschriften hinaus erweitert. Auf der Höllentalbahn wurden total 6880 und auf der Dreiseenbahn total 1550 Stabisolatoren eingebaut.

Die gesamte Fahrleitung wurde an zwei Pole des Drehstromsystems angeschlossen, zwischen denen eine 56 m lange Schutzstrecke liegt. Diese befindet sich zwischen Titisee und Hinterzarten am Kulminationspunkt der Höllentalbahn auf rund 900 m über Meer. Auf beiden Seiten liegen Strecken mit schwachen Steigungen, so dass es betrieblich möglich ist, die Züge im Schwung über die Phasentrennstelle zu bringen.

Die verschiedenen<sup>1</sup> Bahnhöfe und Haltestellen wurden entweder an private Elektrizitätswerke angeschlossen oder sie verfügen über eine eigene Wasserkraft. Auf den Anschluss an die Fahr- und die Speiseleitungen musste verzichtet werden, da die auftretenden Spannungsabfälle sich für die Beleuchtung als zu gross erwiesen. Weiterhin wurde die Frage des Einbaues automatischer Spannungsregler geprüft. Darauf musste jedoch aus wirtschaftlichen Gründen verzichtet werden.

### Die Speiseleitungen

Vom Unterwerk Titisee aus wurden vier Speiseleitungen aus Stahl-Aluminium mit 95 mm<sup>2</sup> Querschnitt verlegt, von denen zwei (a und b) an den Pol I und zwei (c und d) an den Pol II angeschlossen wurden. Die Speiseleitungen wurden fast ausschliesslich an Auslegern auf den Fahrleitungsmasten befestigt. Nur bei der Umgehung von zwei Tunnel, wo eine Verlegung in Kabel nicht möglich war, mussten besondere Masten aufgestellt werden. Die vier in Titisee abgehenden Speiseleitungen versorgen die Höllental- und die Dreiseenbahn folgendermassen mit elektrischer Energie (Tabelle II):

Die Speisebezirke der Höllental- und der Dreiseenbahn  
Tabelle II

Speiseleitung	Speisung der Fahrleitung in	Gespiesene Strecke	Länge der gespiesenen Strecke km
a	Freiburg—Wiehre	Freiburg—Himmelreich	15,4
b	Hinterzarten	Himmelreich—Hinterzarten inkl. Steilrampe	12,4
c	Titisee	Titisee—Neustadt	8,6
d	Titisee	Titisee—Seebrugg	19,2

Die Strecke Freiburg—Hinterzarten mit dem grössten Verkehr und dem grössten Energiebedarf (Steilrampe) wird zweiseitig gespiesen. Der Einbau von Streckenschaltern erlaubt eine Unterteilung und Abschaltung einzelner Streckenabschnitte, was bei Störungen wichtig ist. Die totale Länge der verlegten Speiseleitungen beträgt 30,676 km.

### Die Energielieferung

erfolgt durch das Badenwerk. Von der 110-kV-Drehstromleitung Laufenburg—Berau—Villingen wurde von Löffingen aus eine rund 18,5 km lange Abzweigung nach dem Unterwerk Titisee, das ungefähr in der Mitte der Höllentalbahn zwischen Freiburg und Donaueschingen liegt, ausgeführt. Von den beiden im Endausbau vorgesehenen Drehstromleitungen wurde vorläufig nur ein Strang erstellt ( $3 \times 150$  mm<sup>2</sup> Stahl-Aluminiumseile). An der Abzweigstelle in Löffingen wurden nur Trenner eingebaut, die eine Speisung der Höllentalbahn aus einem oder der anderen Richtung der 110-kV-Drehstromleitung sowie eine Abtrennung der nach dem Unterwerk Titisee führenden Zweigleitung gestatten. Die Trennstelle sowie das Unterwerk Titisee stehen miteinander über eine Telefonleitung in direkter Verbindung.

Da Erfahrungen über den Einfluss grosser Einphasenlasten zu Beginn der Dreissiger Jahre nicht vorlagen, war man auf die Rechnung sowie auf die Vornahme von Versuchen angewiesen. Die durchgeführten Berechnungen ergaben, dass das 110-kV-Netz des Badenwerkes unter Einhaltung der VDE-Vorschriften hohe Einphasenlasten aufnehmen konnte. Da die Rechnung jedoch eine Anzahl Unsicherheiten aufwies, wurden besondere Versuche mit grossen Einphasenlasten unter Verwendung eines Wasserwiderstandes durchgeführt. Bei Einphasenlasten bis zu 15 000 kW konnten keine nachteiligen Rückwirkungen auf das Drehstromnetz festgestellt werden. Dieser Wert entspricht nahezu dem Spitzenbedarf bei vollem elektrischem Betrieb der ganzen Höllentalbahn, der rechnerisch zu rund 16 000 kW ermittelt wurde.

### Das Unterwerk Titisee

Im Hinblick auf die bei 50 Hz grösseren Spannungsabfälle sowie wegen des grossen Leistungsbedarfes auf der Steilrampe Hirschsprung—Hinterzarten musste die Fahrleitungsspannung auf Grund wirtschaftlicher Überlegungen von 15 auf 20 kV

erhöht werden. Zur Abtransformierung von 110 kV auf 20 kV wurden zwei gleiche Einphasentransformatoren mit natürlicher Ölkühlung und einer Leistung von je 6500 kVA in Scottschaltung aufgestellt. Beide Transformatoren sind entsprechend den Anforderungen des Bahnbetriebes stark überlastbar, nämlich folgendermassen:

1. Im Anschluss an eine Dauerlast von 3000 kVA während 10 min mit je 12 000 kVA oder während 2 min mit je 14 000 kVA;

2. im Anschluss an eine Dauerlast von 5000 kVA während 10 min mit je 10 000 kVA.

Jede der beiden Einheiten des Scottsatzes ist für sich allein in der Lage, den Betrieb der elektrifizierten Versuchsstrecken Freiburg–Neustadt und Titisee–Seebrugg zu übernehmen. Für die Aufstellung eines zweiten Scottsatzes mit zwei gleichen Einheiten bei Ausdehnung des elektrischen Betriebes wurde der nötige Platz vorgesehen.

Das ganze Unterwerk wurde als Freiluftstation ausgebildet. Es enthält die erforderlichen Schalter, Trenner, Sammelschienen, Transformatoren usw. für die ankommende 110-kV-Drehstromleitung, sowie für die abgehenden vier Speiseleitungen; bei Ausdehnung des elektrischen Betriebes können noch zwei weitere Speiseleitungen angeschlossen werden.

Im Unterwerk Titisee wurde zum ersten Male durch die frühere Deutsche Reichsbahn aus Drehstrom durch Herabtransformierung Zweiphasenstrom erzeugt. Die Scottschaltung, wie sie bei der Betriebsaufnahme zur Anwendung gelangte, geht aus Fig. 2 hervor. Es darf nicht unerwähnt gelassen

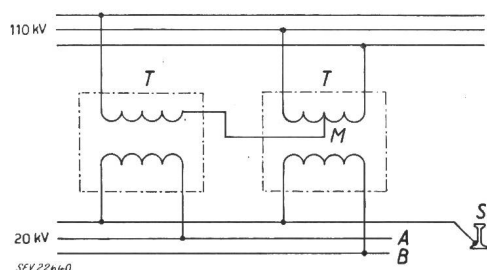


Fig. 2

Prinzip des Drehstrom-Zweiphasen-Unterwerkes Titisee der Deutschen Reichsbahn bis 1943

A Speisung der Fahrleitung Freiburg–Hinterzarten; B Speisung der Fahrleitungen Hinterzarten–Neustadt und Titisee–Seebrugg; M Mitte der Transformatorwicklung; S Schiene; T Transformator

werden, dass der Aufbau eines derartigen Unterwerkes wegen der beiden Pole auf der Unterspannungsseite komplizierter ist als bei der üblichen Bahnfrequenz von  $16\frac{2}{3}$  Hz. Um Fehlschaltungen und damit auch Störungen zu vermeiden, wurden alle wichtigen Schalter elektropneumatisch gegeneinander verriegelt.

### Fernmeldeanlagen

Die theoretischen Überlegungen und die damit im Einklang stehenden Ergebnisse des Betriebes haben gezeigt, dass sich die Verhältnisse bei der Höllental- und der Dreiseenbahn durch den Übergang von 15 kV,  $16\frac{2}{3}$  Hz auf 20 kV, 50 Hz, nicht verschlechtert haben. Wegen der höheren Frequenz

mussten keine besonderen Schutzmassnahmen bei den Fernmelde- oder bei den Starkstromanlagen getroffen werden.

### Die Lokomotiven

Um den Lieferanten der vier Triebfahrzeuge die Möglichkeit zu geben, ihre Erfahrungen zu bewerten, wurde, im Gegensatz zu der sonst üblichen Praxis, von der Herstellung eines durch und durch einheitlichen Lokomotivtyps abgesehen. Es wurde nur ein Rahmenprogramm aufgestellt, dessen wichtigste Bestimmungen aus Tabelle III hervorgehen.

Die wichtigsten Grundlagen für den Entwurf der vier Versuchlokomotiven der Höllentalbahn

Tabelle III

Anhängelast auf der Steilrampe bei der Bergfahrt für eine Lokomotive bei Verwendung einer Schiebelokomotive	t
180	320
Zulässige Höchstgeschwindigkeiten	km/h
In den Horizontalen und auf Steigungen bis 25 ‰	85
Steigung 55 ‰, Bergfahrt	60
Talfahrt	40
Fahrleitungsspannung	kV
normal	20
maximal	23
minimal	16
Maximales Gewicht pro Lokomotive	85 t
Maximaler Achsdruck	21,25 t
Bauart (Achsfolge)	B <sub>0</sub> + B <sub>0</sub>

Die wichtigsten Daten der vier Versuchlokomotiven, wie sie auf Grund des Pflichtenheftes in Tabelle III konstruiert wurden, gehen aus Tabelle IV hervor. Im Einzelnen ist zu den vier Lokomotivtypen folgendes zu bemerken.

Bei der Lokomotive Nr. 244.01 wird der der Fahrleitung entnommene Einphasenstrom von 50 Hz über einen Transformator und über einen Gleichrichter mit Gittersteuerung den vier Triebmotoren als welliger Gleichstrom zugeführt<sup>1)</sup>. Es tritt eine Vergrößerung der Verluste ein, weshalb ein durch Gittersteuerung regulierter Bahnmotor grösser wird als ein normaler Typ für Gleichstrom. Bei nicht voll ausgesteuertem Gitter ist der Leistungsfaktor schlecht, was im Hinblick auf den induktiven Spannungsabfall der Fahrleitung nicht erwünscht war. Eine Verbesserung des Leistungsfaktors liess sich auf zwei Arten folgendermassen erreichen:

1. Durch Einbau zusätzlicher Anoden im Gleichrichter, die von besonderen Anzapfungen des Lokomotivtransformators aus gespeist werden.

2. Durch Einbau einer Serie-Parallelschaltung wie bei Gleichstrombahnen, um zwei wirtschaftliche Dauerfahrstufen mit voll ausgesteuertem Gitter zu erhalten.

3. Durch Anwendung der Feldschwächung in der Serie-Parallelschaltung, so dass insgesamt 6 voll ausgesteuerte Stufen vorhanden sind.

Die gesamte elektrische Ausrüstung wurde so bemessen, dass die für die Triebmotoren erforderliche Gleichspannung von 1500 V bereits dann er-

<sup>1)</sup> siehe Sachs, K.: Elektrische Triebfahrzeuge. Frauenfeld, Huber, 1953, Bd. 2, S. 406.



Die wichtigsten Daten der vier Versuchslokomotiven

Tabelle IV

Position	Bezeichnung	Allgemeine Elektrizitäts-Gesellschaft	Brown, Boveri & Cie. A.-G.	Siemens-Schuckert Werke A.-G.	Friedrich Krupp
1	Reihe und Nummer . . . . .	E 244.01	E 244.11	E 244.21	E 244.31
2	Länge über Puffer . . . . . mm	14 320	15 290	16 440	15 080
3	Triebraddurchmesser . . . . . mm	1250	1250	1250	1250
4	Achsstand der Drehgestelle . . mm	3400	3500	3500	3300
5	Totales Gewicht (Adhäsionsgewicht). . . . . t	85,00	84,60	84,85	83,00
6	Art der Steuerung . . . . .	Transformator und Gleichrichter Gittersteuerung Serie-Parallel-Schaltung und Feldschwächung	Transformator und Gleichrichter	Transformator	Transformator und Wasserwiderstände
7	Zahl der Fahrstufen . . . . .	7	28	14	3
8	Elektrische Bremse . . . . .	Widerstand	Widerstand	Widerstand	Rekuperation
9	Transformatoren				
a	Gewicht inkl. Öl . . . . . kg	7440	8990 <sup>1)</sup>	4900	5100
b	Dauerleistung . . . . . kVA	2160	1980	1720	1900
c	Heizleistung bei 1000 V . . . . kW	400	320	320	320
10	Triebmotoren				
a	Bauart	Gleichstrom Serie	Gleichstrom Serie	Kollektor 50 Hz	Asynchron 1~ Asynchron 3~
b	Zahl . . . . .	4	4	8	4
c	Gewicht pro Motor exkl. Getriebe kg	3220	3620	2500	2600
d	Polzahl . . . . .	4	8	14	6
e	Übersetzungsverhältnis . . . .	1 : 4,5	1 : 3,59	1 : 5,867	1 : 3,8
f	Maximale Spannung pro Triebmotor . . . . . V	1700	800	270	800
g	Dauerleistung bei 59,5 km/h pro Motor . . . . . kW	430	530	226	490 <sup>2)</sup> 480 <sup>3)</sup>

<sup>1)</sup> Inkl. Hochspannungssteuerung.

<sup>2)</sup> Bei 57,3 km/h entsprechend der jeweiligen synchronen Drehzahl.

<sup>3)</sup> Bei 80,2 km/h entsprechend der jeweiligen synchronen Drehzahl.

reicht wird, wenn die Fahrleitungsspannung 18 kV beträgt.

Bei der Lokomotive Nr. 244.11 handelt es sich im Prinzip um eine kombinierte Einphasen-Gleichstromlokomotive. Der mit Hochspannungssteuerung ausgerüstete Transformator speist einen Quecksilberdampf-Gleichrichter, der den erzeugten Gleichstrom an die vier Triebmotoren abgibt<sup>2)</sup>. Im Hinblick auf die Welligkeit des vom Gleichrichter gelieferten Gleichstromes wurden die Triebmotoren besonders ausgebildet und mit möglichst hoher Induktivität entworfen.

Die Lokomotive Nr. 244.21 gleicht im Aufbau einem Einphasentriebfahrzeug für 16 $\frac{2}{3}$  Hz. Auf Grund langjähriger Erfahrungen mit Bahnmotoren niedriger Frequenz wurde ein in gleicher Weise aufgebauter Einphasen-Kollektormotor für 50 Hz entwickelt. Die wichtigsten Daten der verwendeten Triebmotoren und der Vergleich mit einer elektrischen Lokomotive der gleichen Bauart B<sub>0</sub> + B<sub>0</sub> für 16 $\frac{2}{3}$  Hz mit ungefähr gleicher Leistung gehen aus Tabelle V hervor. Hierbei muss ausdrücklich bemerkt werden, dass es sich um Angaben aus den Anfängen der elektrischen Traktion mit Einphasenwechselstrom von 50 Hz handelt.

<sup>2)</sup> siehe Sachs, K.: Elektrische Triebfahrzeuge. Bd. 2, S. 407.

Vergleich der Motoren von zwei ungefähr gleich starken elektrischen Triebfahrzeugen für 16 $\frac{2}{3}$  und 50 Hz

Tabelle V

	Frequenz 16 $\frac{2}{3}$ Hz	Frequenz 50 Hz
Polzahl	8	14
Dauerleistung kW <sup>1)</sup>	425	227
Drehzahl U./min <sup>1)</sup>	1280	1540
Leistung pro Pol kW	53,1	16,2
Gewicht pro Motor kg	—	2500
Gewicht aller Motoren der Lokomotive inkl. Zahnräder und Schutzkästen kg	17 720	22 400
Höchstgeschwindigkeit km/h	90	85
Spannung V	—	214
Stromstärke A	—	1450
Leistungsfaktor cos $\varphi$	—	0,95
Totale Zahl der Motoren pro Triebfahrzeug	4	8

<sup>1)</sup> Entsprechend 70 % der maximalen Geschwindigkeit.

Die Lokomotive Nr. 244.31 verfügt für jede Triebachse über einen kommutatorlosen sechspoli-

gen Einphasenmotor der Bauart Krupp und über einen normalen vierpoligen Dreiphasenmotor<sup>3)</sup>. Die wirtschaftlichen Fahrstufen werden dabei folgendermassen erreicht:

1. Der Einphasen- und der Drehstrommotor jeder Achse sind in Kaskade geschaltet.
2. Die Einphasenmotoren arbeiten allein, die Drehstrommotoren laufen leer mit.
3. Die Drehstrommotoren arbeiten allein. Sie werden von den Einphasenmotoren, die als Phasenspalter wirken, mit Drehstrom versorgt.

Zum Anfahren sowie für die Übergänge von einer Stufe zur andern sind 8 besondere Wasserwiderstände (je einer pro Motor) vorhanden. Die verwendeten Einphasenmotoren ohne Kommutator entsprechen der Bauart Krupp-Garbe-Lahmeyer, d.h. es handelt sich um Induktionsmotoren mit speziellen Eigenschaften.

### Die Betriebsergebnisse

Die Lieferung von Einphasenenergie mit 50 Hz aus dem allgemeinen Landesnetz hat zu keinen Beanstandungen geführt. Bei starkem Verkehr auf der Steilrampe Hirschsprung-Hinterzarten traten Spitzenbelastungen von 10 000 kW bei einem Leistungsfaktor von 0,8 auf, was zu einem beträchtlichen Spannungsabfall im Unterwerk Titisee führte. Um den Lokomotiven auf der Strecke eine hinreichende Spannung am Stromabnehmer zur Verfügung stellen zu können, war es nötig, im Unterwerk Titisee einen besonderen Reguliertransformator aufzustellen. Infolge des Ausbruches des Zweiten Weltkrieges konnte das 1937 bestellte Aggregat mit 19 Stufen erst 1941 eingebaut werden. Seine Durchgangsleistung beträgt 9 000 kVA entsprechend den ungünstigsten Belastungsverhältnissen, wie sie zwischen Freiburg und Titisee auftreten können. Im Maximum kann ein Spannungsabfall von 9 kV ausreguliert werden, der sich aus den Einflüssen von der Oberspannungs- und von der Unterspannungsseite her zusammensetzt. Nach den bisherigen Erfahrungen auf der Höllentalbahn ist eine Spannungsregulierung im Unterwerk wünschenswert. Sie wird effektiv notwendig, wenn in dem die Energie liefernden Oberspannungsnetz oder in der Fahrleitung infolge Belastungsänderungen der gespiesenen Strecke starke Spannungsschwankungen auftreten. Beim Einphasenbetrieb mit 50 Hz sind derartige Spannungsschwankungen eher zu erwarten als bei  $16\frac{2}{3}$  Hz, da die Speisung nicht gleich gut auf die speziellen Bedürfnisse des Bahnbetriebes abgestellt werden kann wie bei einem reinen Bahnnetz.

Durch zweckmässige Aufteilung der Fahrleitungen mit Hilfe der verschiedenen Pole lassen sich die einphasigen Lasten des Drehstromnetzes möglichst klein halten. An Stelle der bis Anfang 1943 verwendeten Scottschaltung wurde später die in Fig. 3 dargestellte Schaltung verwendet. Sie ermöglichte es, jährlich an Leerlaufverlusten der Transformatoren rund 130 000 kWh einzusparen. Die vom Standpunkte des Betriebes des überspannungsseitigen Drehstromnetzes aus erwünschte gleichmässige

Aufteilung der Belastungen auf drei Phasen wird sich normalerweise nur schwer realisieren lassen, da sowohl die örtlichen Verhältnisse als auch der Fahrplan und die Zugbelastungen eine wesentliche Rolle spielen.

Der im Januar 1936 aufgenommene Versuchsbetrieb mit vier elektrischen Lokomotiven und teilweise elektrisch geführten Zügen ergab Einphasenlasten bis nahezu 5000 kW. Aus genau durchgeführten Messungen liess sich der Schluss ziehen, dass der Einfluss derartiger Einphasenlasten auch unter ungünstigen Verhältnissen klein bleibt.

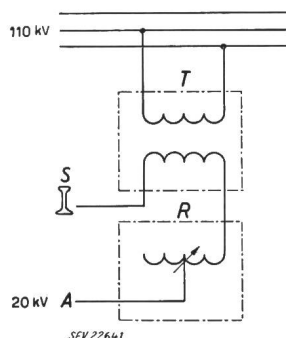


Fig. 3  
Prinzip der im Unterwerk Titisee der Deutschen Reichsbahn ab 1943 angewandten Schaltung

A Speisungen der Fahrleitungen Freiburg-Neustadt und Titisee-Seebrugg; R Reguliertransformator; S Schiene; T Transformator

Die Lokomotiven E 244.01 und E 244.11 besitzen beide einen Gleichrichter, dessen Überwachung, besonders im Winter nach mehrstündigen Betriebspausen, erhöhte Anforderungen an die Bedienung stellt. Das Vakuum lässt sich nicht gleich sicher erhalten wie in stationären Anlagen. Durch unruhigen Lauf des Triebfahrzeuges, insbesondere bei schlechtem Gelesezustand, leidet naturgemäss der Gleichrichter, so dass fast jedes Jahr eine gründliche Überholung nötig war, was einen Betriebsstillstand der Lokomotive von mindestens 14 Tagen bedingte.

Bei der Lokomotive E 244.21 war vor allem das Verhalten der Triebmotoren massgebend. Es ergaben sich starke Abnützungen der Kohlebürsten, die zwischen 0,5 und 5,0 mm pro 1000 Kilometer Fahrleistung lagen, was eine fast tägliche Überprüfung der Motoren erforderte. Nach einer Fahrleistung von 80 000 Kilometer mussten die Kollektoren überschleift oder überdreht werden. Die Kommutierung hat, im Gegensatz zur Einphasen-traktion mit  $16\frac{2}{3}$  Hz, nicht befriedigt. Die seitherige konstruktive Entwicklung der Einphasenmotoren für 50 Hz hat aber gezeigt, dass man damit auf dem richtigen Wege war.

Die Lokomotive E 244.31 wies zahlreiche Störungen an den Trieb- und den Hilfsmotoren auf. Wegen der geringen Zahl von wirtschaftlichen Fahrstufen (3) vermochte sie den gestellten Anforderungen des Bahnbetriebes hinsichtlich Regulierung, Leistung und Überlastbarkeit nicht zu genügen. Diese Bauart ist wohl sehr sinnreich durchkonstruiert worden, doch muss ihr verwickelter Aufbau vom Standpunkte des Bahnbetriebes, der in Richtung grösster Einfachheit tendiert, als Nachteil angesehen werden. Dieser kann auch durch den Wegfall der Kommutatoren bei den Triebmotoren und durch die einfache elektrische Nutzbremse nicht aufgewogen werden. Auch waren die Kosten des Unterhaltes ungefähr doppelt so gross wie bei einem neuzeit-

<sup>3)</sup> siehe Sachs, K.: Elektrische Triebfahrzeuge. Bd. 2, S. 384...386.

lichen elektrischen Triebfahrzeug mit gleicher Leistung für die Frequenz  $16\frac{2}{3}$  Hz. Dieser Anstieg ist darauf zurückzuführen, dass diese Sonderbauart zahlreiche einzelne Apparate erfordert.

Ergebnisse des Versuchsbetriebes

Tabelle VI

Lokomotive	Nr. 244.01	Nr. 244.11	Nr. 244.21	Nr. 244.31
Durchschnittliche Zahl der Störungen pro 50 000 km während 8 Jahren	7,4	8,5	5,0	13,1
Zahl der zugehörigen Störungstage	120,6	142,6	108,9	169,3
Effektiver spezifischer Energiebedarf Freiburg-Neustadt Wh/tkm	49	44	46	52

Fahrleistungen der vier Versuchslokomotiven in den Monaten Mai und Juni 1950

Tabelle VII

Lokomotive	Mai 1950 km	Juni 1950 km
E 244.01	7 904	8 139
E 244.11	7 986	8 238
E 244.21	6 884	7 166
E 244.31	5 567	7 870
Total	28 341	31 413

Über die durchschnittliche Zahl der Störungen sowie über den spezifischen Energiebedarf gibt Tabelle VI Auskunft, während Tabelle VII die Zahl der zurückgelegten Lokomotivkilometer in zwei aufeinanderfolgenden Monaten enthält. Hierbei war der Juni besonders günstig, da nur ein einziger Ausfalltag zu verzeichnen ist. Im Mai war an 15 Tagen oder während 12,1 % der Zeit ein Triebfahrzeug ausser Betrieb (Fig. 4). Nach Tabelle VI weist die Lokomotive Nr. 244.21 gegenüber den drei andern Typen mit Ausnahme des um rund 5 % höheren spezifischen Energiebedarfes einen Vorsprung auf, wenn auch noch nicht die gleich grosse Betriebs-

sicherheit wie bei einer Einphasenlokomotive für  $16\frac{2}{3}$  Hz erreicht wurde. Die seitherigen Entwicklungsarbeiten haben gezeigt, dass der Weg, den Kommutatormotor für 50 Hz weiter zu vervollkommen, der einzig richtige war. Alle später auf der Höllentalbahn noch in Betrieb gesetzten Triebfahrzeuge, wie z. B. die von der Allgemeinen Elektrizitäts-Gesellschaft gelieferte Lokomotive E 244.22 und der von den Siemens-Schuckert-Werken konstruierte Motorwagen ET 255.01, erhielten Ein-

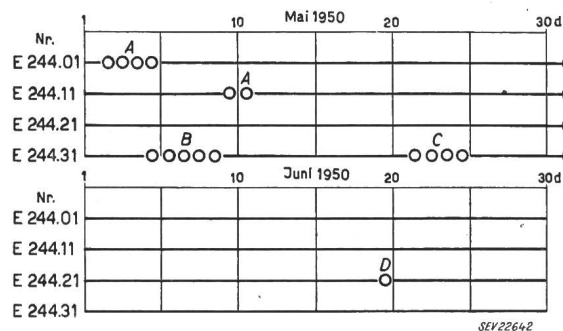


Fig. 4

Betriebszeiten der vier Versuchslokomotiven in den Monaten Mai und Juni 1950

○ Lokomotive ausser Betrieb

A Abnutzung der Bandagen; B Kurzschluss im Stator eines Fahrmotors; C Defekt am Bürstenhalter eines Fahrmotors; D Defekt an der elektrischen Bremse

phasen-Kommutatormotoren verbesserter Ausführung für 50 Hz. Heute ist man nun schon längere Zeit so weit, dass man Bahnmotoren für Einphasen-traktion mit 50 Hz bauen kann, die in jeder Beziehung gleich gut arbeiten wie solche für  $16\frac{2}{3}$  Hz. Die Lokomotiven mit Gleichrichter kommen für einen Weiterbau nicht mehr in Betracht. Sie stellen ein interessantes Zwischenstadium dar, das zeigt, welche Umwege anfänglich beschritten wurden, bis die direkte und betrieblich einfachste Lösung gefunden war.

Adresse des Autors:

Alfred Degen, Dipl. El.-Ing. ETH, Colmarerstrasse 85, Basel.

## Technische Mitteilungen — Communications de nature technique

### Kernenergieforschung in den Vereinigten Staaten <sup>1)</sup>

621.039.4 : 539.17 : 621.317.2(73)

Das Battelle Institut in Columbus, Ohio, plant die Erweiterung seiner bestehenden Einrichtungen für die Kernenergie-Forschung. Die neuen Einrichtungen sollen dem Institut für die Erweiterung der Vertragsforschung, für die Industrie sowie die Kontrolle der Atomenergie zugutekommen. In Kürze soll der Bau eines Cyklotrons, eines Reaktor-Entwicklungs-Laboratoriums und eines Brennstoff-Laboratoriums in Angriff genommen werden.

Der geplante Kernreaktor soll vom «Schwimmbadtyp» und bei 1000 kW Leistung betriebsfähig sein. Er soll als intensive Neutronenquelle für vielfältige experimentelle Studien der Kerntechnologie dienen. Der Hauptzweck besteht darin, Neutronen zur Durchführung potentieller Experimente an Leistungs-Reaktorkernen zu erhalten. Diese Experimente sind für die Entwicklung von Kernanlagen zur Elektrizitätserzeugung wichtig. Ferner soll der Reaktor auch für die Produktion radioaktiver Isotope, zur Aktivierung von chemischen Reaktionen und zum Studium radioaktiver Effekte

<sup>1)</sup> Mitgeteilt vom Battelle Memorial Institute, Columbus (Ohio, USA).

an Metallen, Kunststoffen, Keramik und vielen Materialien und Komponenten verwendet werden. Bei der Institutforschung soll er auch zusätzlich auf biologischem und landwirtschaftlichem Gebiet angewandt werden. Der Name «Schwimmbad-Reaktor» basiert auf der Tatsache, dass der Reaktorkern in einem grossen Wassertank untergetaucht wird, der als Moderator, Kühlmittel und Abschirmung dient. Das Reaktor-Entwicklungs-Laboratorium wird mit Reglern und Instrumenten zur Durchführung kritischer Reaktor-Experimente ausgerüstet, die auch unter dem Namen «Zero-Leistungsversuche» bekannt sind. Hier können grosse Leistungsreaktoren probeweise aufgestellt und ausgewertet werden.

Das Kernbrennstoff-Laboratorium wird über Apparate für chemische, physikalische und metallurgische Reaktor-Brennstoff-Studien verfügen. In den abgedichteten Zellen innerhalb der Laboratoriumsgebäude, die mit einem ferngesteuerten Betriebsmechanismus versehen sind, können radioaktive Materialien verarbeitet, zerteilt, mikrophotographiert und auf verschiedene Weise geprüft werden. Die Zellen können auch für Entwicklungsarbeiten von Brennstoff-Methoden und für die Verwertung von Spalt- und Abfallprodukten benützt werden.