

Hochspannungstechnik beim Aufbau des Bahnstromnetzes in der Schweiz

Thomas Aschwanden, Innertkirchen; Martin Aeberhard, Zollikofen; Reinhold Bräunlich, Zürich

Zu Beginn der Bahnelektrifizierung in der Schweiz war die Hochspannungstechnik noch wenig etabliert. Wichtige Grundlagen zum Verständnis der Vorgänge in Hochspannungsanlagen mussten erst erarbeitet werden. Die technischen Herausforderungen beim Aufbau der Bahnstromnetze wurden durch die parallel laufende Entwicklung der Hochspannungstechnik gemeistert. Diese hat dank ihrer stetigen Fortschritte auch heute noch große Bedeutung für die elektrische Bahntechnik.

HIGH-VOLTAGE TECHNOLOGY IN ESTABLISHING THE ELECTRIC RAIL NETWORK IN SWITZERLAND
At the beginning of railway electrification in Switzerland, high-voltage technology was still relatively new. Important basics for understanding the processes in high-voltage equipment had to be compiled at first. The technical challenges in establishing the electric rail network had been mastered due to the parallel development of the high-voltage technology. Thanks to its continuing progress, high-voltage technology is still of great importance for railway technology today.

TECHNIQUES DE LA HAUTE TENSION DANS L'ÉDIFICATION DU RÉSEAU DE COURANT DE TRACTION EN SUISSE

Au début de l'électrification des chemins de fer en Suisse, les techniques de la haute tension n'étaient que peu répandues. Tout d'abord, il a fallu élaborer des principes essentiels permettant de bien comprendre les processus inhérents aux systèmes à haute tension. Les défis techniques apparus au cours de l'édification des réseaux de courant de traction ont été maîtrisés suite au développement parallèle des techniques de la haute tension. Grâce aux progrès continus dont celles-ci font l'objet, elles sont aujourd'hui encore, d'une importance primordiale pour les équipements ferroviaires électriques.

1 Einführung

Bei den ersten elektrisch betriebenen Bahnen hatten technische Betriebsstörungen laut einer 1908 verfassten Studie [1] drei Hauptursachen:

- Blitzschlag bei Gewitter
- Eisbildung an der Oberleitung oder der Kontaktschiene
- Versagen von Komponenten der Fahrleitungen oder von elektrischen Einrichtungen an Triebfahrzeugen

Schäden durch Blitzeinwirkung werden in dieser Studie bei fast allen Bahnen genannt. Die Reaktion auf diese naturbedingten Störungen erfolgte damals mit aus heutiger Sicht erstaunlicher Gelassenheit: Viele Gleichstrombahnen hatten nämlich in den Unterwerken auch Akkumulatoren und konnten bei Gewittern die Drehstromeinspeisung der Unterwerke kurzerhand ausschalten! Bei der mit Drehstrom betriebenen Burgdorf-Thun-Bahn war dies natürlich nicht möglich. Dort stand aber ein betriebsfähiger Reservetransformator auf einem Plattformwagen bereit. Exklusive Transport dauerte das Auswechseln eines defekten Transformators etwa 35 Minuten, sodass man sich auch dort offenbar keine größeren Sorgen gemacht hat.

Mit wachsender Ausdehnung und Bedeutung der Netze und den immer länger werdenden Über-

tragungsdistanzen wurden jedoch die Gewitterüberspannungen zu einem zentralen Thema der Betriebszuverlässigkeit, sowohl bei der 50-Hz-Energieversorgung als auch bei den elektrifizierten Bahnen.

2 Untersuchungen zu Überspannungen

2.1 Überspannungen als Störungsursache

In den Anfangsjahren der elektrischen Energieübertragung führten Beanspruchungen der elektrischen Isolierungen durch Gewitterüberspannungen sehr oft zu Betriebsstörungen und auch zu größeren Schäden, besonders an den Isolatoren der Freileitungen, bei den Stationseinführungen, aber auch an Transformatoren und Messwandlern. Als Überspannung in elektrischen Netzanlagen wird das kurzzeitige, also *transiente* Auftreten von Spannungsamplituden weit über der stationären Betriebsspannung bezeichnet. Diese Überspannungen werden hauptsächlich durch Blitzeinschläge, Schaltvorgänge und Kurzschlüsse in den betroffenen Anlagen verursacht. Abhilfe wurde in der Pionierzeit der Bahnelektrifizierung durch

Überdimensionierung der elektrischen Isolation und durch primitive Schutzeinrichtungen wie Luftstrecken in Form von Funkenhörnern erreicht. Für die korrekte Isolationsbemessung von Freileitungen der Bahnen, also Fahrleitungen und Übertragungsleitungen, von Hochspannungsapparaten wie Transformatoren, Leistungsschaltern, Messwandlern und besonders auch der Traktionsmittel fehlten bis in die 1920er Jahre wichtige physikalische und elektrische Grundlagen. Konkret waren die für die Dimensionierung und den Schutz der Hochspannungsanlagen maßgebenden elektrischen Beanspruchungen weitgehend unbekannt, also die auftretenden Amplituden und der zeitliche Verlauf der Überspannungen. Für die experimentelle Untersuchung und Bewertung dieser grundlegenden Phänomene der elektrischen Energieübertragung, vor allem der sogenannten Gewitterüberspannungen, fehlte zur damaligen Zeit die geeignete Messtechnik.

2.2 Messtechnik für transiente Vorgänge

Auf Initiative des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins (SEV) und mit finanzieller Unterstützung des Verbandes der Schweizerischen Elektrizitätswerke (VSE), der Elektroindustrie und der SBB wurde 1926 die Problematik der transienten Vorgänge in Hochspannungsnetzen mit einer Weiterentwicklung des damals erst seit Kurzem bekannten Kalkathodenstrahl-Oszillographen (KO) [2] gezielt angegangen. Als Basis für diese Forschungsaktivitäten wurde von den Initianten die *Kathodenstrahl-Oszillographen-Kommission* (KOK) gegründet, die bis 1937 bestand. Die Planungen der schweizerischen Elektrizitätswerke zur Errichtung eines 50-Hz-Verbundnetzes und der Beschluss der SBB, zwischen Vernayaz und Rupperswil eine 132-kV-Bahnstrom-Übertragungsleitung zu bauen [3], lieferten für dieses Forschungsvorhaben genügend Argumente und Motivation. Zum Verständnis muss an dieser Stelle erwähnt werden, dass damals in der Schweiz die Elektroindustrie, an ihrer Spitze die *Maschinenfabrik Oerlikon* (MFO), die *Brown Boveri & Cie* (BBC) und die *Sécheron SA* (SAAS), die Elektrifizierung der Bahnen mit eigenen innovativen Entwicklungen stark vorantrieb und unterstützte. Zudem bot die Eidgenössische Technische Hochschule (ETH) in Zürich eine solide Ingenieurausbildung an. Was der schweizerischen Industrie und der ETH jedoch fehlte, war die systematische experimentelle Forschung, besonders in der sich stark entwickelnden Hochspannungstechnik. Es war die Absicht der KOK, diese Wissenslücken bei den transienten Netzvorgängen mit möglichst wenig Mittelaufwand zu schließen.

Dem späteren Blitzforscher *Karl Berger* (Hintergrund 1) gelang es in erstaunlich kurzer Zeit, mit Änderungen am *Dufour'schen* KO ein Messgerät zu schaffen, mit dem einmalige, schnell veränderliche



Bild 1: Erster funktionsfähiger Kalkathodenstrahl-Oszillograph der schweizerischen Kathodenstrahl-Oszillographen-Kommission im Jahr 1926 (alle Fotos: Sammlung FKH).

Vorgänge mit einer Zeitauflösung von Mikrosekunden (10^{-6} s) photographisch festgehalten und ausgewertet werden konnten (Bild 1) [4].

HINTERGRUND 1



Karl Berger (* 1898 Balgach im St. Gallischen Rheintal, † 1933 Zollikon bei Zürich) trat nach Ingenieursstudium an der Eidgenössischen Technischen Hochschule (ETH) 1923 seine erste Stelle bei BBC im Spezial-Versuchslokal an, wo er den Wärmedurchschlag

an Bakelit-Kondensatordurchführungen entdeckte. Ab 1926 entwickelte er den *Dufour'schen* Kathodenstrahl-Oszillographen weiter, um damit schnell veränderliche elektrische Vorgänge in Hochspannungsanlagen aufzuzeichnen. Die ersten Messungen mit dem neuen Gerät führten 1930 zur Dissertation, und 1936 folgte die Habilitation mit einem Lehrauftrag an der ETH über Ausgleichsvorgänge auf Hochspannungsleitungen. Als erster Versuchsleiter der 1937 gegründeten *Forschungskommission für Hochspannungsfragen* (FKH) erforschte Berger die Auswirkungen von Blitzen auf Energieübertragungssysteme. 1948 wurde er außerordentlicher Professor für Hochspannungstechnik an der ETH. Auch nach seiner Emeritierung 1969 war er in der Blitzforschung und im Blitzschutz aktiv tätig. *Berger* war einer der weltweit erfolgreichsten Blitzforscher und hat seine experimentellen Ergebnisse in zahlreichen wissenschaftlichen Publikationen dokumentiert. Durch seine aktive Mitarbeit in der CIGRE und in der IEC haben die Resultate der schweizerischen Blitzforschung auch international Anerkennung gefunden.

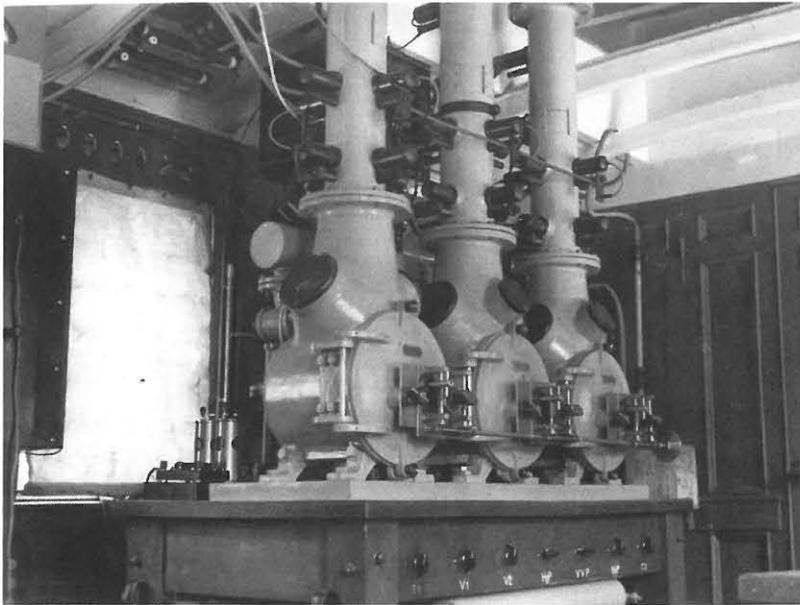


Bild 2: Weiterentwickelter Kathodenstrahl-Oszillograph mit drei unabhängigen Messkanälen, eingebaut in einen Bahnwagen der SBB von 1930 bis 1937.

Die weitere Entwicklung der KO und besonders deren mehrstrahliger Ausführung wurde bis in die 1950er Jahre fortgesetzt. Das daraus entstandene industrielle Produkt hat die innovative Schweizer Firma *Trüb, Täuber & Co* (TTC) weltweit an zahlreiche Hochspannungslabors geliefert.

2.3 Messungen bei der Forchbahn

Im Sommer 1928 wurden mit dem neuen KO erste Blitzüberspannungsmessungen an der 13 km langen, mit DC 1 200 V elektrifizierten *Forchbahn* Zürich Rehalp – Esslingen ausgeführt. Mit einbezogen war auch das 8-kV-Versorgungsnetz des Elektrizitätswerks des Kantons Zürich (EKZ) an der Einspeisestelle der Bahn.

In der nur knapp ein Jahr dauernden Messkampagne konnte die Leistungsfähigkeit der neuen Messtechnik mit großem Erfolg nachgewiesen werden. Diese ersten Resultate sind in [5] dokumentiert. Die Oszillogramme zeigten dank der hohen Schreibgeschwindigkeit und Strahlqualität des KO bisher unbekannte Details von Überspannungsvorgängen, welche an der Fahrleitung während Gewittern infolge direkter wie auch indirekter Blitzeinschläge registriert wurden. Dabei stellte man unter anderem fest, dass direkte Blitzeinschläge in die Fahrleitung zwar recht selten sind, dass aber die dadurch verursachten impulsförmigen Überspannungen durch sehr kurze Anstiegs- und Abfallzeiten und hohe Amplituden geprägt sind. Erstmals wurden auch die durch Blitzüberspannungen oder durch Schalthandlungen angeregten Wanderwellen auf der Fahrleitung messtechnisch nachgewiesen. Zur

weiteren Klärung der atmosphärischen Überspannungen besonders auf längeren Hochspannungs-Übertragungsleitungen waren allerdings weitere systematische Messungen notwendig.

2.4 Messungen im Übertragungsnetz der SBB

Bereits 1929 setzte Berger die zeitaufgelösten Messungen mit dem KO an der neu erstellten 132-kV-Leitung Vernayaz – Puidoux – Rapperswil der SBB fort. Die Anregung dazu kam vom damaligen SBB-Oberingenieur *Hans Habich*.

Nachdem in der ersten Messperiode im Sommer 1930 am Ende der langen Leitung in Rapperswil nur wenig verwertbare Blitzstörungen aufgezeichnet werden konnten, verlegte *Berger* seine Messapparaturen für die nächste Gewitterperiode in die Nähe des anderen Leitungsendes nach Puidoux. Mit einem zweiten KO konnten dort beide Phasen der Bahnstromleitung gleichzeitig überwacht werden. Durch diese Messungen ließ sich nachweisen, dass die eingesetzten Hängeisolatoren der neuen Leitung ungenügend spannungsfest waren, denn bei Gewitterüberspannungen und Erdschlüssen kam es häufig zu Isolatorüberschlägen.

Mit tatkräftiger Unterstützung der SBB wurde die Messeinrichtung – es standen neu drei KO mit je einem Messkanal zur Verfügung – in Bahnwagen eingebaut (Bild 2). Mit dieser mobilen Anlage, zu der auch ein Wohnwagen für *Berger* und seine Familie gehörte, wurden in den Jahren 1930 bis 1937 in allen wichtigen Bahnstromanlagen der SBB und an vielen 50-Hz-Leitungen systematische Messungen der auftretenden Blitzüberspannungen durchgeführt und die Resultate in mehreren Publikationen der Fachwelt zugänglich gemacht [6].

Mit einer weiteren Messkampagne an der ersten alpenüberquerenden Drehstromleitung, der *Gottthardleitung* mit 150 kV Betriebsspannung, konnten die bisherigen Erkenntnisse über die Auswirkungen der Gewitterüberspannungen an langen Leitungen wesentlich erweitert werden [7].

Der praktische Nutzen dieser systematisch durchgeführten Messkampagnen lag in der Ermittlung von quantitativen Werten und Parametern für die tatsächlich auftretenden Überspannungen in Bahnstromanlagen und im 50-Hz-Netz. Mindestens so bedeutsam war aber auch das gewonnene Verständnis der vielfältigen und komplexen transienten Vorgänge auf Hochspannungsleitungen. Die wesentlichen Erkenntnisse lassen sich folgendermassen zusammenfassen:

- Die gemessenen Blitzüberspannungen übersteigen im Normalfall die Überschlagsfestigkeit der Leitungsisolatoren nicht, weil bei einem Direkteinschlag die ausgelösten Wanderwellen auf der Leitung stark gedämpft werden.

- Indirekte Blitzeinschläge in der Nähe einer Leitung, bei denen kein Leiterseil getroffen wird, sind für Betriebsspannungen über 50 kV ohne Bedeutung. Ebenso sind direkte Einschläge in gut geerdete Maste oder in das Erdseil ungefährlich.
- An Leitungen mit hohen Betriebsspannungen führen ausschliesslich direkte Einschläge in ein Leiterseil oder in schlecht geerdete Maste zu Betriebsstörungen.
- Erdseile wie bei der Gotthardleitung ausgeführt bilden einen weitgehenden abschirmenden Schutz gegen Direkteinschläge in die Phasenseile.

2.5 Schaltüberspannungen bei Kurzschlüssen

Der Erfassung der transienten Vorgänge beim Abschalten von Kurzschlüssen auf der 132-kV-Übertragungsleitung Vernayaz – Rapperswil war eine weitere Messkampagne mit dem KO gewidmet [8]. In Abschaltvorgängen bei einpoligem Kurzschluss gegen Erde trat übereinstimmend mit der Wanderwellentheorie am Schalter eine Beanspruchung mit rund zweifacher Überspannung auf. Die Abschaltversuche bei zweipoligen Kurzschlüssen ohne Erdberührung zeigten jedoch unerwartet hohe Überspannungen mit bis zu vierfacher Amplitude der Betriebsspannung, welche zu Isolatorschäden führten. Mit Hilfe der hohen Zeitauflösung des KO war es möglich, diese hohen Überspannungen auf Rückzündungen in den Öl-Leistungsschaltern zurückzuführen. Die Schaltversuche zeigten auch, dass die damaligen Vorschriften für die Typprüfung der Schalter im Werk den Schaltfall einer langen leerlaufenden Übertragungsleitung nicht abdeckten. Die damaligen Autoren hielten zur Qualifikation eines Leistungsschalters zwingend einen Netzkurzschlussversuch für notwendig.

2.6 Forschungskommission für Hochspannungsfragen

Um die eingeleitete Entwicklung der Hochspannungsmesstechnik und die Forschung auf dem Gebiet der transienten Vorgänge in den Netzen fortzusetzen, gründeten auf Initiative der SBB im Jahre 1937 die Schweizerischen Elektrizitätswerke und die Elektroindustrie mit den Branchenverbänden SEV und VSE eine gemeinsame *Forschungskommission für Hochspannungsfragen* (FKH). Zu den Gründermitgliedern zählten neben diesen Verbänden auch die ETH sowie 40 Unternehmen aus dem Kreis der Elektrizitätswerke und der Industrie. Gründerpräsident war *Hans Habich* von den SBB und als erster Geschäfts- und Versuchsleiter wurde Prof. *Berger* gewählt. Das Arbeitsgebiet der FKH wurde im Vergleich zur bisherigen KOK stark erweitert, indem nicht mehr ausschliesslich Gewitterüberspannungen, sondern jegliche Forschung zur Hochspannungs-Energieübertragung als Zweck und Ziel erklärt wurde.

3 Blitzforschung auf dem Monte San Salvatore

Nachdem Ende der 1930er Jahre durch systematischen Überspannungsmessungen an Leitungen und ausgewählten Netzanlagen ein recht guter Kenntnisstand über die Auswirkungen von Blitzeinschlägen erreicht wurde, bestand die nächste Etappe der Blitzforschung darin, den eigentlichen Blitzstrom als Ursache durch direkte Messungen in allen Einzelheiten zu erforschen. Bei der Suche nach einem geeigneten Berggipfel in einer Zone mit hoher Gewitteraktivität fiel die Wahl auf den 915 m hohen *Monte San Salvatore* bei Lugano (Bild 3). Mitten in der schwierigen Kriegszeit wurde dort 1943 eine Blitzmessstation in Betrieb genommen, die bis 1973 bestand [9].

Mit Hilfe der von Berger entwickelten KO und speziell dafür entwickelter Messwiderstände (Shunts) konnten echte Blitzströme mit hoher Zeitauflösung aufgezeichnet und ausgewertet werden (Bild 4). Bereits 1947 lagen erste Messer-



Bild 3: Blitzmessstation Monte San Salvatore, Eremitengebäude mit Mess- und Wohnraum und 60 m hoher hölzerner Messturm im Jahr 1943; Blickrichtung Süd auf Luganer See mit Seedamm von Melide.



Bild 4: Aufwärtsblitz-Einschlag in Messturm.

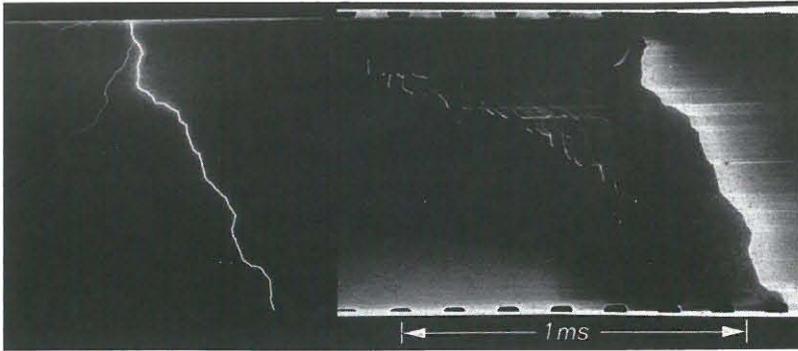


Bild 5:

Abwärtsblitz vor dem Einschlag, aufgenommen mit ruhendem Film (*links*) und mit rotierendem Film in *Streak-Kamera* (*rechts*); impulsförmigen Ströme während der Vorwachsphase im Blitzkanal lassen diesen jeweils kurzzeitig aufleuchten.

gebnisse über den zeitlichen Verlauf der Blitzströme vor. Die Forschungsarbeiten wurden später auch auf das Vorwachsen der Blitzentladungen im Raum kurz vor dem Einschlag in den Messturm ausgedehnt. Dabei kamen optische Verfahren mit ruhendem und bewegtem Film (*Streak-Kameras*) zum Einsatz (Bild 5).

Die Ausbeute der Blitzmessungen auf dem Monte San Salvatore war dank der hohen Einschlaghäufigkeit sowie des Geschicks und der Einsatzbereitschaft der Mitarbeiter von FKH und ETH sehr ergiebig. Durch die große Zahl der Blitzeinschläge lagen nach 30 Jahren genügend Ergebnisse vor, um statistische Aussagen über folgende Parameter der Blitzströme zu machen:

- Scheitelwert des Blitzstromes
- größte Steilheit des Blitzstrom-Anstieges
- elektrische Ladung eines Gesamtblitzes
- Stromquadratimpuls eines Gesamtblitzes (*action integral*)

Die Resultate dieser einzigartigen Forschungseinrichtung auf dem Monte San Salvatore sind in zahlreichen Veröffentlichungen dokumentiert [10; 11]. Die daraus ermittelten Blitzstrom-Parameter sind in der Fachwelt anerkannt und haben in der Isolationskoordination und im Blitzschutz breite Anwendung gefunden. Mit diesen Kennwerten können heute elektrische Isolationen und der Überspannungsschutz sowohl von 50-Hz-Netzanlagen als auch von Bahnstromanlagen korrekt dimensioniert werden.

(wird fortgesetzt)

AUTORENDATEN



Dr. sc. techn. Thomas Aschwanden (61), Elektroingenieurstudium und Promotion Eidgenössische Technische Hochschule (ETH) Zürich; Research Associate Pulsed Power Laboratory Polytechnic University of New York, Oberassistent Fachgruppe Hochspannungstechnik ETH, Geschäftsleiter und heute Präsident Fachkommission für Hochspannungsfragen (FKH); Abteilungsleiter Engineering Netze und danach Leiter Geschäftseinheit Operations Netze bei BKW FMB Energie AG; Leiter Projekte, Mitglied der Geschäftsleitung und heute Senior Engineer bei Kraftwerke Oberhasli AG.

Adresse: Kraftwerke Oberhasli AG,
Grimselstr. 7,
3862 Innertkirchen, Schweiz;
Fon: +41 339822082;
E-Mail: thomas.aschwanden@kwo.ch



Dipl. El.-Ing. ETHZ Martin Aeberhard (46), Studium Elektrotechnik ETH Zürich; Technische Projektleitung bei ABB Verkehrssysteme AG Zürich, Leiter Steuerungen und Systeme bei SLM AG Winterthur; Leiter Fachbereich Fahrstrom bei ENOTRAC AG; seit 2005 bei SBB Energie und dort seit 2007 Leiter Systemdesign; seit 2007 Mitglied des Vorstandes der FKH.

Adresse: SBB AG, Infrastruktur Energie,
Industriestr. 1,
3052 Zollikofen, Schweiz;
Fon: +41 51 2204633;
E-Mail: martin.aeberhard@sbb.ch



Dr. sc. techn. Reinhold Bräunlich (56), Studium und Promotion Elektrotechnik ETH Zürich; nach Industrietätigkeit seit 1990 bei FKH und heute dort Geschäftsleiter; Mitglied Technisches Komitee TK 42 Hochspannungsprüftechnik im Schweizerischen Elektrotechnischen Komitee CES.

Adresse: Fachkommission für Hochspannungsfragen, Voltastr. 9, 8044 Zürich, Schweiz;
Fon: +41 44 2536263;
E-Mail: braenlich@fkh.ch