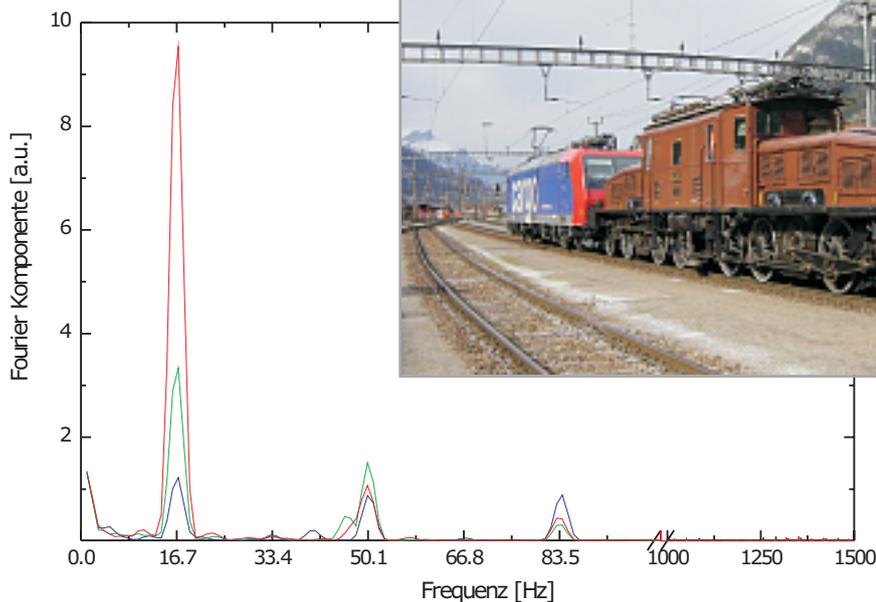
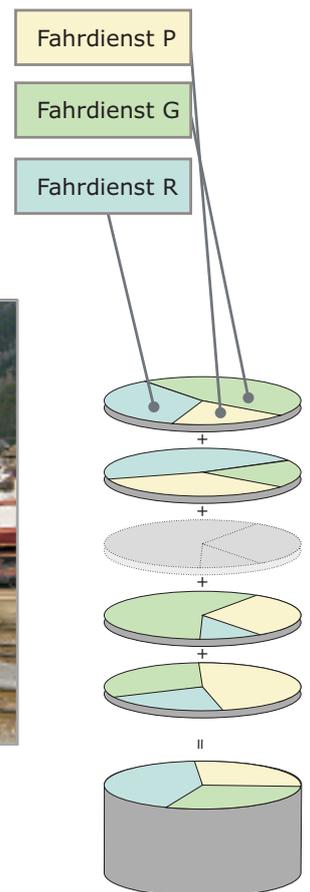
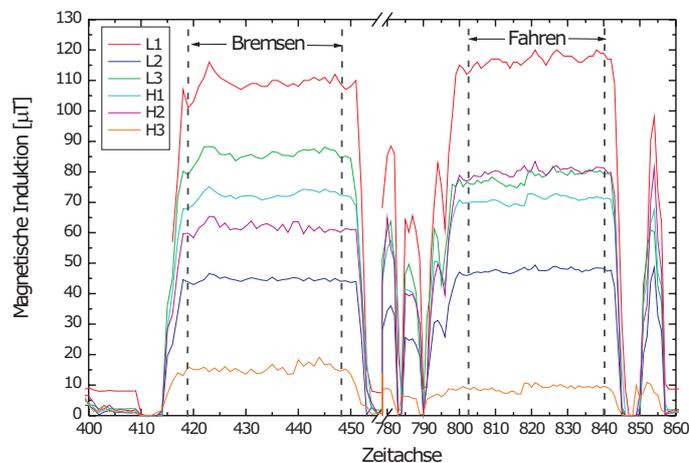


Niederfrequente Elektro-Magnetische Felder in Führerständen von Triebfahrzeugen der SBB

Manfred Lörtscher, Emanuel Lörtscher

Sonderdruck aus eb - Elektrische Bahnen 8-9/2004



Niederfrequente elektromagnetische Felder in Führerständen von Triebfahrzeugen der SBB

Manfred Lörtscher, Bern; Emanuel Lörtscher, Bonstetten

Der elektrische Betrieb von Eisenbahnen hat für die unmittelbare Umgebung der Bahnanlagen verschiedene Arten von elektromagnetischer Strahlung zur Folge. Medizinisch sind die Einwirkungen nichtionisierender, niederfrequenter Strahlung noch wenig untersucht, weshalb Triebfahrzeugführer, die beruflich solchen Expositionen ausgesetzt sind, für eine entsprechende Studie besonders interessant sind. Die messtechnische Erfassung der Feldwerte für verschiedene Triebfahrzeugtypen der Schweizerischen Bundesbahnen (SBB) wird beschrieben, welche die Grundlage für spätere statistische und medizinische Aussagen bildet.

Low Frequency Electro-Magnetic Fields in Driver's Cabins of SBB

Electrical operated railways cause electro-magnetic radiation to the immediate environment of railway installations. The influence of non-ionising, low frequency radiation is not yet medically sufficiently investigated, thus people like engine drivers exposed job-related to that kind of radiation represent an ideal object of study. The measurement of electro-magnetic field distributions in driver's cabins of different types of Swiss Federal Railways (SBB) engines will be reported. These results provide a basis for future statistical and medical conclusions.

Champs électro-magnétiques de basse fréquence dans les postes de mécanicien sur les locomotives des CFF

L'exploitation des chemins de fer avec current de traction amène différents types de radiation électromagnétique. L'effet de la radiation non-ionisante de basse fréquence n'est médicalement analysé guère. C'est pourquoi les personnes comme les mécaniciens exposées à cette radiation en exerçant leur profession sont particulièrement intéressantes. L'acquisition des valeurs mesurées pour des différents types de locomotives des chemins de fer fédéraux suisses (CFF) est détaillée, qui sert à la base pour des futures conclusions mathématico-statistiques et médicales.

1 Einführung

Bis heute fehlen nachvollziehbare Studien über allfällige gesundheitsschädigende Wirkungen von niederfrequenten Magnetfeldern im Bereich 16,7 bis 50/60 Hz (Extremely Low Frequency Electromagnetic Fields / ELF-EMF). Da vor allem langfristig wirkende Effekte vermutet werden, ist es sehr schwierig, eine geeignete Personengruppe für eine solche Studie zu finden. Das Schweizerische Bundesamt für Gesundheit (BAG) will nun eine bereits früher begonnene Studie fortsetzen [1]. Sie soll der Hypothese nachgehen, ob eine signifikant erhöhte Magnetfeldexposition mit einer allenfalls ebenfalls erhöhten Sterblichkeit bei bestimmten Krankheitsbildern in Zusammenhang gebracht werden kann. Da Triebfahrzeugführer grundsätzlich eine sehr gesunde Berufsgruppe darstellen und auch gegenüber der übrigen durchschnittlichen Bevölkerung in der Schweiz einer höheren ELF-EMF-Belastung ausgesetzt sind, eignen sie sich gut für

eine solche Untersuchung. Dabei werden die Personal- und Sterblichkeitsdaten von über 20 000 Triebfahrzeugführern mit den gleichen Angaben von über 500 000 übrigen Personen im gleichen Zeitraum verglichen. Das Schweizerische Bundesamt für Verkehr (BAV) wurde mit der Teilaufgabe betraut, die ELF-EMF-Expositionen auf Triebfahrzeugen der Schweizerischen Bundesbahnen (SBB) zu ermitteln.

Dabei sind folgende Grenzwerte von Interesse, welche sich in der Schweiz nach der Richtlinie der Internationalen Kommission zum Schutz vor nichtionisierender Strahlung (ICNIRP) über die Begrenzung der Immissionen elektrischer, magnetischer und elektromagnetischer Wechselfelder (bis 300 GHz) richten [2]. Für die Immissionen ortsfester elektrischer Anlagen wie Oberleitungen gilt die Verordnung zum Schutz vor nichtionisierender Strahlung [3], wie dies in [4; 5] erläutert wurde: Der so genannte Anlagegrenzwert ($1 \mu\text{T}$ gemittelt über 24 Stunden) und der Immissionsgrenzwert ($300 \mu\text{T}$) gelten für den Aufent-

halt von Personen insbesondere an Orten empfindlicher Nutzung wie Schulen, Spitäler usw. Demzufolge gelten sie nicht für die Triebfahrzeugführer oder die Reisenden im Zug. Dagegen gelten für Triebfahrzeugführer die Werte gemäß der SUVA-Richtlinie [6] mit Grenzwerten am Arbeitsplatz von maximal $1500\mu\text{T}$.

Für die Beschreibung der Expositionen sind zum einen physikalisch-technische Beobachtungen und Messungen notwendig. Zum anderen ist aber auch die statistische Berechnung der während eines Triebfahrzeugführerlebens akkumulierten Expositionswerte, welche schließlich medizinische Aussagen über die Einwirkung dieser Strahlungsart erlauben, von großer Bedeutung.

In diesem Aufsatz wird die messtechnische Erfassung der Feldwerte für verschiedene Triebfahrzeug- und Steuerwagentypen der Schweizerischen Bundesbahnen (SBB) beschrieben. Dabei wird von einem technischen Standpunkt aus versucht, mit Hilfe der Rollmaterialentwicklung Aussagen über den tendenziellen Verlauf der totalen Exposition während des Zeitraums von 1920 bis 2000 zu formulieren, ohne der statistisch-medizinischen Analyse, welche in der Studie durch das Bundesamt für Gesundheit (BAG) bearbeitet wird, vorgreifen zu wollen.

2 Aufgabenstellung

2.1 Problembeschreibung

Die im elektrischen Betrieb von Eisenbahnen vorkommenden elektromagnetischen Felder (EMF) sind in Tabelle 1 nach deren Herkunft aufgeführt. Dabei wird bereits klar, dass die EMF-Verteilung im Führerstand alleine aufgrund der verschiedenen örtlichen Quellen sehr komplex ist. Grundsätzlich ist wegen der unterschiedlichen Bauarten der Triebfahrzeuge und der vielschichtigen Feldverteilung eine theoretische Simulation schwierig und aufwändig, weshalb sich eine empirische Analyse aufdrängt.

Tabelle 1: Quellen elektromagnetischer Felder im elektrischen Betrieb von Eisenbahnen.

1. Triebfahrzeug-Hauptstromkreise (Transformator, Stromrichter, Fahrmotoren usw.)
2. Triebfahrzeug-Hilfsbetriebestromkreise (Hilfsbetriebe- und Bordnetzumrichter, Motoren für Ventilation und Kompressor, Batterieladegerät usw.)
3. Zugsammelschiene (1000 V 16,7 Hz, Wagenheizung, Klimageräte, Batterieladegerät für Beleuchtung und Steuerung, Bordnetz 230/400 V 50 Hz usw.)
4. Stromschleife gebildet aus Oberleitung (Hinstrom) und Schienen (Rückstrom) [5]
5. Andere Quellen des elektrischen Eisenbahnbetriebes (andere Lokomotiven auf gleichen Speiseabschnitten, Doppelspurstrecken, Hilfs- und Umgehungsleitungen usw.) [26]
6. Wenig bekannte Quellen (z. B. fremde und bahneigene Übertragungsleitungen entlang der Bahntrasse) [25]

Neben den erforderlichen großen Anstrengungen, sich mit vertretbarem Aufwand ein verlässliches Bild über die vielseitige EMF-Situation auf den Triebfahrzeugen zu verschaffen, musste auch festgestellt werden, dass sich die eisenbahnbezogenen Lebensläufe der Triebfahrzeugführer mit Geburtsjahr 1905 deutlich von denjenigen mit Geburtsjahr 1945 und später unterscheiden. Dies führt beim ausreichend genauen Ausfüllen einer Expositionsmatrix mit Geburtsjahr, Eisenbahndienst-Eintritt und -Austritt, jährlich ändernde mittlere Exposition usw. zu einer weiteren großen Herausforderung bei dieser Studie. 1919 fuhren die ersten elektrisch geführten Züge und bereits 1927 wurde die Hälfte des schweizerischen Normalspurnetzes elektrisch betrieben [7; 8]. Teilweise verkehrten trotzdem noch lange Zeit Dampflokomotiven auch auf Strecken unter einer Oberleitung, so dass auch diese Triebfahrzeugführer und Heizer bei der Triebfahrzeug- und Feuerbedienung einem minimalen Magnetfeld der Oberleitung ausgesetzt waren.

Da in der Schweiz bereits ab 1930 eine nach heutigen Sicherheitsvorstellungen einfache Zugsicherung eingeführt wurde, wurden die elektrischen Triebfahrzeuge seither nur noch durch einen Triebfahrzeugführer bedient. Somit genügt es, nur die Expositionen am Arbeitsplatz des Triebfahrzeugführers genau zu kennen (Bild 1). Ein Aufenthalt der in Ausbildung stehenden Triebfahr-



Bild 1: EMF backpack® montiert am Triebfahrzeugführersitz im Führerstand des Triebwagens RBDe 560 (NPZ).

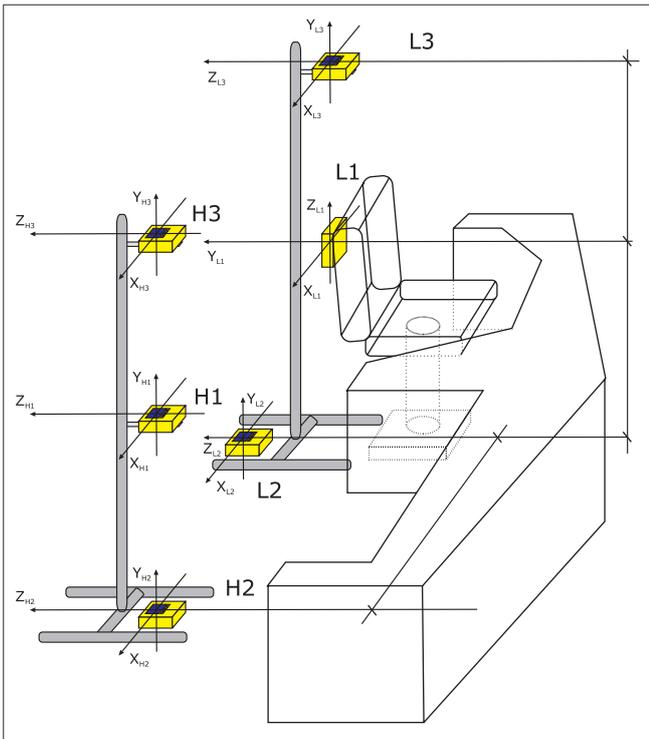


Bild 2: Definition der gerätespezifischen Koordinatensysteme an den sechs gewählten Messpositionen (L1 EMF backpack®, L2 und L3 auf Montagegestell auf Seite Lokführer, H1-H3 auf Montagegestell Seite „Heizer“/Führergehilfe montiert).

zeugführer („Heizer“) auf der Führergehilfenseite ist zeitlich begrenzt und somit unbedeutend. Um die Feldverteilungen in den Führerständen (insbesondere die Herkunft der jeweiligen Magnetfelder) genauer zu kennen, wurde trotzdem bei den meisten Messungen mit einer 2x3-Messgeräteanordnung gearbeitet (Bild 2).

Die Aufgabenstellung erforderte die Messung der niederfrequenten Magnetfelder auf elektrischen Triebfahrzeugen ab Baujahr 1919 [7] bis hin zu Triebzügen neuester Bauart (zum Beispiel ICN mit Baujahr 1999) und der damit verbundenen Auseinandersetzung mit der gesamten Entwicklung der elektrischen Traktion in diesem Zeitraum [9; 10].

2.2 Messtechnischer Lösungsansatz

Die messtechnische Erfassung der EMF-Exposition eines Triebfahrzeugführers müsste theoretisch auf jeder befahrenen Strecke mit jedem eingesetzten Triebfahrzeug- und Zugtyp einzeln durchgeführt werden. Da dies aber ein äußerst aufwändiges Unterfangen wäre und man zudem im Nachhinein keine klaren Aussagen über die feldverursachenden Motor- und Fahrleitungströme machen könnte, wurde der folgende Ansatz gewählt: Durch Anordnung mehrerer Messgeräte (Bild 2) im Führerstand kann zunächst im Stillstand die Feldverteilung der Hilfsbetriebe gemessen werden. Dies erlaubt eine Aussage über die auch während der Fahrt vorkommenden Felder der Hilfsbetriebe, welche je nach Triebfahrzeugtyp nicht vernachlässigbar sind. Zugfahrten auf einer einfachen

Strecke mit genau definierten Betriebspunkten und aufgezeichneten Speisepunktströmen liefern zudem genaue Felddistributionen im Führerstand und erlauben eine Beziehung zwischen der EMF-Emission des untersuchten Triebfahrzeugtyps und dem Oberleitungsstrom. Die totale EMF-Exposition eines Triebfahrzeugtyps ergibt sich dann durch Überlagerung der EMF der Hauptstromkreise und der Hilfsbetriebe sowie allfälliger weiterer von außen auf das Triebfahrzeug wirkenden Felder (Tabelle 1).

Diese unter genau definierten Bedingungen gemessenen EMF werden durch mehrfach wiederholte Messungen bei vergleichbaren Bedingungen (gleiche Strecke, gleiche Züge) im normalen Fahrplanbetrieb verglichen und überprüft (Abschnitt 4.3). Ergänzt werden diese Messungen mit weiteren Messungen während ganzer, gezielt ausgewählter Dienstsichten der Triebfahrzeugführer (Abschnitt 4.4), welche dann auch eine Überprüfung der statistischen Berechnungen erlauben (Abschnitt 5).

2.3 Messung der Magnetfelder

Als Messgeräte wurden ausschließlich Geräte der Firma Wandel & Goltermann (heute Narda Safety Test Solutions GmbH) eingesetzt. Die älteren Geräte der Typen EFA-2 und EFA-3 können nur integrale Magnetfeldwerte messen (EFA-3 kann optional mit einem E-Feldsensor ausgestattet werden), während die Typen EFA-200 und EFA-300 auch spektral mit Fast-Fourier-Transformation (FFT) messen können [11]. Alle Geräte erfassen mit drei induktiven Spulen, welche orthogonal zueinander im Gerät eingebaut sind, die durch die magnetische Flussdichte B induzierte Spannung.

Um die Feldverteilung örtlich darstellen zu können, wurden mehrere Messpunkte im Führerstand festgelegt. Dabei muss die Relativgeschwindigkeit zwischen den Messgeräten und Magnetfeldern klein gehalten werden, um den Einfluss der dynamischen Komponenten vernachlässigen zu können. Dies wurde realisiert, indem eine massive, starre Messgerätehalterung verwendet wurde. Diese erlaubt eine stabile Befestigung von fünf Messgeräten im Führerstand. Mit dem speziell für diese Untersuchungen entwickelten so genannten EMF backpack® können die EMF-Expositionen auf Brusthöhe des Triebfahrzeugführers gemessen werden (Bild 1). Damit kann die insgesamt sechs Messpunkte umfassende Matrix für die EMF, welche auf den Triebfahrzeugführer an seinen typischen Arbeitspositionen – in Fuß-, Brust- und Kopfweite unterteilt – einwirken, erfasst werden. Um den Zusammenhang zwischen Ort und Zeit herzustellen, wurde häufig noch ein weiteres Messgerät auf dem Führerstandspult installiert. In Bild 2 sind die verschiedenen Messpunkte mit den entsprechenden Bezeichnungen (L1-L3 und H1-H3) und ihren Koordinatensystemen im Führerstand dargestellt. Teilweise wurden auch die Bezeichnungen – dort, wo die Geräte aus Platzgründen nur in der Führerstandmitte aufgestellt werden konnten – Z10-Z12 und Z20-Z22 (1. Zahl für den Führerstand, 2. Zahl 0 = Fußboden, 1 = 1 m und 2 = 2 m) verwendet. Zum Teil

wurden bis zu neun Magnetfeldgeräte zeitsynchron eingesetzt. Als Test zur Prüfung der Messgenauigkeit wurden die neun Geräte gleichzeitig parallel zu einer einfachen Streckenoberleitung aufgestellt: Die einzelnen Amplituden differierten um weniger als 3%, was für die Qualität der Geräte spricht.

2.4 Gerätekonfiguration und Datenerfassung

Die Messgeräte EFA-2, EFA-3, EFA-200 und EFA-300 besitzen eine minimale zeitliche Messauflösung von 5 Sekunden. Der interne Speicher reicht bei 4 096 Datensätzen und kleinster Auflösung für eine maximale Messdauer von 5 h 40 min. Diese Auflösung wurde bei allen Messungen gewählt, einzig bei den ausgewählten Führertouren wurde ein Messintervall von 10 s gewählt, was eine unterbruchsfreie Dauermessung über die ganze Arbeitszeit des Triebfahrzeugführers (Dauer der Dienstschicht teilweise über 10 h) erlaubte. Die einzelnen Messwerte wurden jeweils mit dem Messzeitpunkt und der belegten Speicherplatznummer für die spätere Weiterbearbeitung gespeichert. Die Messgeräte besitzen verschiedene spektrale Filter. Eingesetzt wurden Bandpass-Filter für 16,7 Hz und Breitband-Filter mit 5 Hz–2 kHz-Bandpass. Die Feldstärken wurden als RMS-Signal gespeichert. Die Komponenten des Feldvektors werden in Prozenten des Totalbetrages angegeben. Wo nicht anders vermerkt wird, ist die Einheit der magnetischen Flussdichte Tesla und die Größenordnung der Einfachheit halber 10^{-6} (also Mikrottesla μT). Für die Bewertung der Oberschwingungen können mit den Messgeräten EFA-200 und EFA-300 auch spektrale Untersuchungen mittels FFT durchgeführt werden. Dabei wurde das Band von 5 Hz bis 2 kHz ausgewählt (Bild 13 und 14).

Sämtliche Daten wurden nach der Messung auf ein Notebook übertragen und in unverändertem Zustand archiviert. Während der Messungen wurden detaillierte Messprotokolle geschrieben, indem neben den Ortsangaben, ausgewählten Speicherplatz-Nummern auch Brems- und Anfahrströme sowie weitere relevante Randbedingungen notiert wurden.

3 Durchführung der Messungen

3.1 Auswahl der untersuchten Triebfahrzeuge und Steuerwagen

Um den Aufwand klein zu halten, musste für die Messungen eine repräsentative Auswahl von Fahrzeugen getroffen werden. Einerseits mussten auf Grund des langen Untersuchungszeitraumes der Studie auch gezielt ältere Fahrzeuge (Tabelle 2) aus der Stiftung „SBB Historic“ für die Messungen eigens wieder in Betrieb genommen werden (Bild 3). Organisatorisch einfacher waren die Messungen der in Betrieb stehenden Triebfahrzeuge, wobei hier eher die bei der herrschenden Typenvielfalt zu treffende Auswahl ein Problem darstellte (Tabelle 3).

Tabelle 2: Übersicht des SBB-Rollmaterials der Baujahre 1919–1927.

Typ	Literatur	Anzahl	Leistung kW	Inbetriebsetzung ab	ausrangiert
Ae 3/5	[15]	26	1 147	1923	1983
Ae 3/6 ^I	[8]	114	1 368	1923	1994
Ae 3/6 ^{II}	[12]	60	1 224	1923	1977
Ae 3/6 ^{III}	[15]	11	1 147	1925	1980
Ae 4/7*	[13]	124	2 294	1927	1997
Be 4/6*	[8]	40	1 294	1919	1976
Be 6/8 ^{III}	[12; 14]	18	2 000	1926	1977
Ce 6/8 ^{II} *	[14]	33	1 354	1919	1977
gesamt		426			
* für die Studie ausgemessene Triebfahrzeuge					

Tabelle 3: Übersicht des heute eingesetzten SBB-Rollmaterials.

Typ	Literatur	Anzahl	Leistung kW	kumulierte Leistung kW	Anteil Leistung
Re 420*	[18]	273	4 700	1 283 100	30,0%
Re 430	ähnlich [18]	21	4 650	97 650	2,3%
Re 620*	[19]	88	7 850	690 800	16,2%
Ae 610*	[16]	120	4 300	516 000	12,1%
RABDe 510*	[17]	18	2 444	43 992	1,0%
RBe 540*	–	80	1 988	159 040	3,7%
Re 450*	[22; 23]	115	3 200	368 000	8,6%
Re 460*	[24]	119	6 100	725 900	17,0%
Re 465	–	10	7 000	70 000	1,6%
RABDe 500*	–	26	4 200	109 200	2,6%
RBDe 560*	[21]	120	1 650	198 000	4,6%
RBDe 562	ähnlich [21]	6	1 500	9 000	0,2%
gesamt		996		4 270 682	100%
* für die Studie ausgemessene Triebfahrzeuge					

Betrachtet man das in Tabelle 2 aufgeführte Rollmaterial mit den Baujahren 1919–1927 [7; 8; 12; 15], welches teilweise bis kurz vor die Jahrtausendwende eingesetzt wurde, so wird ersichtlich, dass die ähnlich ausgeführten Triebfahrzeuge Ae 3/6^I und Ae 4/7 damals die mit Abstand größte Lokgruppe bildeten (mehr als 50%). Deshalb wurde aus dieser Triebfahrzeuggeneration ein Fahrzeug des Typs Ae 4/7 ausgewählt [13]. Auf Grund der besonderen Anordnung der Hauptstromapparate im zentralen Maschinenraum und in den langen Vorbauten (Bild 3) wurde zudem auf einem Fahrzeug aus der Gruppe der legendären Krokodile (Be 6/8^{III}, Ce 6/8^{II}) gemessen [14].

Aus der Tabelle 3 geht hervor, dass zum heutigen Zeitpunkt die Triebfahrzeugreihe Re 420/Re 430/Re 620 mit Direktmotoren trotz der in den Jahren 1989–1995 zahlreich in Betrieb genommenen Umrichtertriebfahrzeugen



Bild 3: Magnetfeldmessfahrten mit der historischen Lok Ce 6/8^{II} und einer Brems- und Zuglok der Reihe Re482 in Erstfeld.

mit Drehstrommotoren nach wie vor die größte Triebfahrzeugserie darstellt. In der Tabelle 3 ist auch aufgeführt, mit welchen kumulierten, installierten Triebfahrzeugleistungen die einzelnen Triebfahrzeugtypen am Gesamtstromverbrauch beteiligt sind; die Spalte „Anteil“ bezieht sich dabei auf die kumulierte Leistung. Bild 4 gibt einen Überblick über die anzahlmäßige Verteilung der Triebfahrzeugtypen und der verschiedenen Traktionsarten sowie der Steuerwagen in den Jahren 1900 bis 2000.

3.2 Verschiedene Arten von Messungen

Die Messungen der Exposition auf den Triebfahrzeugen erfolgte auf verschiedene Art und Weise:

- Bei älteren und häufig vorkommenden Triebfahrzeugtypen wurden auf Extrafahrten auf einer passenden Strecke einzelne, genau definierte Betriebspunkte beim Fahren und elektrischen Bremsen angefahren. Dabei wurde mit einem zusätzlichen Triebfahrzeug als Brems- resp. Zuglok gemessen (Bild 3);
- bei fahrplanmäßig verkehrenden Zügen wurden zur Erfassung der mittleren und der maximalen Feldbelastungen im normalen Betrieb auf verschiedenen Trieb-

fahrzeugen und Steuerwagen (zum Teil mit Wiederholungen, um allfällige Zufälligkeiten bei Einzelmessungen zu erkennen) Messungen durchgeführt; bei diesen beiden Messweisen wurden jeweils gleichzeitig auf der Triebfahrzeugführerseite und der Führergehilfenseite auf Kopf-, Brust (Thorax)- und Fußhöhe mit total sechs Messgeräten gemessen (Bild 2);

- während der ganzen Dauer der Dienstschicht auf ausgewählten Intercity-, Schnell-, Regional- und S-Bahn-Zügen sowie auf Güterzügen und im elektrischen Rangierdienst (Bild 1) wurde direkt am Thorax des Triebfahrzeugführers mit dem bereits erwähnten EMF backpack[®] gemessen. Bei Arbeiten des Triebfahrzeugführers im Stehen konnte der EMF backpack[®] wie ein kleiner Rucksack am Rücken mitgetragen werden.

4 Resultate

4.1 Einfluss der verschiedenen Quellen

Die Auswertungen der ersten Messungen haben rasch gezeigt, dass nur Messungen direkt am Arbeitsplatz des Triebfahrzeugführers verlässliche Werte ergeben. Messungen an weiter entfernten Referenzpunkten ergaben sofort beträchtliche Abweichungen. Bei älteren Triebfahrzeugen können beispielsweise die Sekundärwandlerströme der Fahrmotorströme im Nahbereich des Führertisches bei den Fahrmotorstrom-Amperemetern hohe lokale Feldwerte ergeben.

Die Messungen haben gezeigt, dass hauptsächlich folgende Verursacher und deren fahrzeugspezifische Anordnung für die EMF-Exposition der Triebfahrzeugführer verantwortlich sind:

- Verursacher im Triebfahrzeuginnern
- Anordnungen der Hauptstromapparate und ihrer Verkabelungen (Transformatorsekundärabgänge, Fahr-

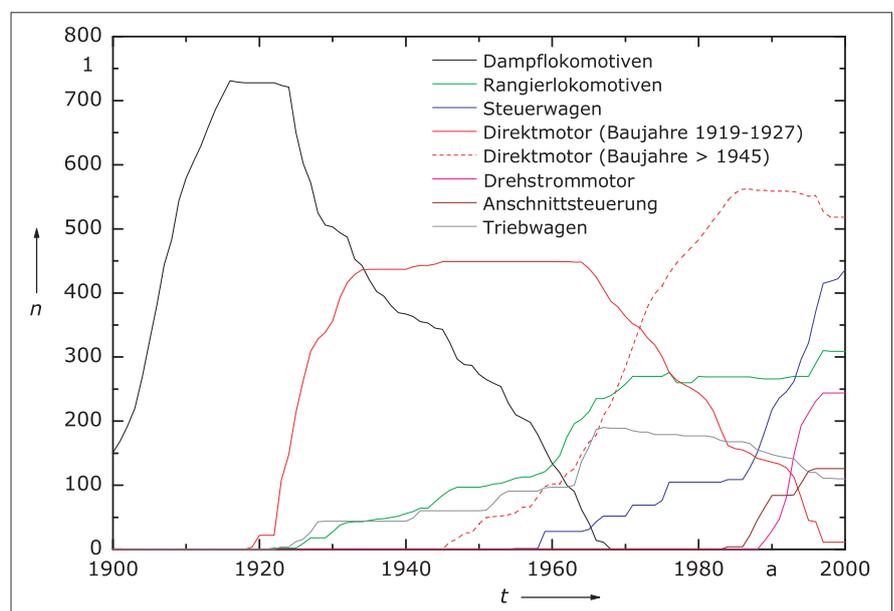


Bild 4: Jährliche Anzahl der verschiedenen Triebfahrzeugarten von 1900 bis 2000.

richtungsschalter, Fahr-Bremsumschalter, Motorstromkabel usw., in Einzelfällen auch Primärtransformatoranschluss bei älteren Triebfahrzeugen);

- Hilfsbetriebmotoren und deren Verkabelungen (zum Beispiel Fahrmotorventilation);
- Verlauf der Zugsammelschiene für die Speisung von Reisezügen

Je nach Anordnung dieser Apparate in Bezug auf die Triebfahrzeugmitte oder auf die Längsachse der Triebfahrzeuge ergeben sich zum Teil große Unterschiede in der Feldexposition zwischen den beiden Führerständen an den Fahrzeugenden. Große Feldbelastungen wurden bei Triebfahrzeugen mit mittig angeordnetem Führerstand festgestellt: Dort werden die Motorstromkabel vom zentral (Lok Ce 6/8^{II}) oder in einem Vorbau (Rangierlok Ee 3/3) eingebauten Transformator direkt im Arbeitsbereich der Triebfahrzeugführer zu den Fahrmotoren in den Vorbauten geführt. Ein weiterer Grund für führerstandabhängige Feldunterschiede ist die oft vorgefundene unterschiedliche Anordnung der Stromkabel und der Luftleitungen in Triebfahrzeugslängsachse unter dem Führerstandboden.

Im Fahrzeuginnern werden die Feldwerte eindeutig von der eingesetzten Antriebstechnik bestimmt: Sämtliche Triebfahrzeuge mit Direktmotoren und damit relativ kleinen Fahrmotorspannungen sowie entsprechend hohen Motorströmen weisen die höchsten Feldwerte auf. Dagegen haben neuere Triebfahrzeuge mit Drehstromfahrmotoren gespeist ab einem Gleichspannungszwischenkreis mit hohen Motorspannungen und vergleichsweise niedrigen Motorströmen kleine Feldwerte im Bereich der Arbeitsplätze. Bei dieser Technik kann es zur Frage nach den allfälligen Oberschwingungen in den Motorströmen in Abhängigkeit der Taktverfahren der Antriebswechselrichter kommen. Diese Frage wird in Abschnitt 4.5 noch behandelt.

b) Verursacher außerhalb der Triebfahrzeuge

Hier wirken hauptsächlich Feldanteile der Oberleitungsanlagen (Tragseil, Fahrdrabt, Verstärkungs-, Hilfs- und

Umgehungsleitungen sowie Speiseleitungen, Rückleiter, Erdseile, Schienen usw. [5]) und die oft entlang der Bahnstrecke verlaufenden 66- und 132-kV-Bahnstromleitungen [25] als Feldverursacher. Diese Felder wirken in gleichem Maße sowohl auf den Triebfahrzeugführer, das übrige Zugpersonal als auch auf die Reisenden im Zug. Für die Exposition der Triebfahrzeugführer ist dieser Fremdfeldeffekt auf Steuer- und Triebwagen, wo die fahrzeugeigene Feldabstrahlung eher gering ist, nicht zu vernachlässigen. Bei den Messungen dieser Feldeinwirkungen von außerhalb der Fahrzeuge zeigten sich die leicht unterschiedlichen Dämpfungswirkungen in der Führerkabine in Abhängigkeit der verwendeten Konstruktionsstoffe (Stahl, Aluminium, Kunststoffverbundwerkstoff).

4.2 Ergebnisse der Versuchsfahrten

In einem Triebfahrzeug der Reihe Ce 6/8^{II} [14] wurden die Feldwerte bei definierten Punkten im Zug- oder Bremskraft-Geschwindigkeitsdiagramm beim Fahren und elektrischen Nutzbremsen mit Hilfe einer Brems- oder Zuglok der Reihe Re 482 (Bild 3) gemessen. In Bild 5 sind die entsprechenden Messwerte dargestellt: Beim Fahren kann aus dem zeitlichen Verlauf der Feldwerte beinahe das Zugkraft-Geschwindigkeitsdiagramm herausgelesen werden. Beim elektrischen Bremsen (Nutzbremse nach Behn-Eschenburg) bleiben die resultierenden Felder über den ganzen Geschwindigkeitsbereich nahezu konstant. Am Führerstandboden werden in beiden Führerständen in Nähe der Motorstromkabel bei maximal 4000 A die größten Felder (bis maximal 4000 A pro Vorbau) gemessen. Beide dargestellten Fahrten (Bild 5) wurden vom Führerstand II aus gefahren, bei denen auch die Belastung des Triebfahrzeugführers mit 200 bis 400 μT hoch ist. Bei Fahrten auf dem anderen Führerstand – aber sonst gleichen Versuchsbedingungen – betrug die Feldstärke beim Triebfahrzeugführer nur rund 75 bis 150 μT .

Ähnliche Fahrten wurden mit einem Triebfahrzeug der Reihe Ae 4/7 [13] aus dem Lieferanteil Brown, Boveri &

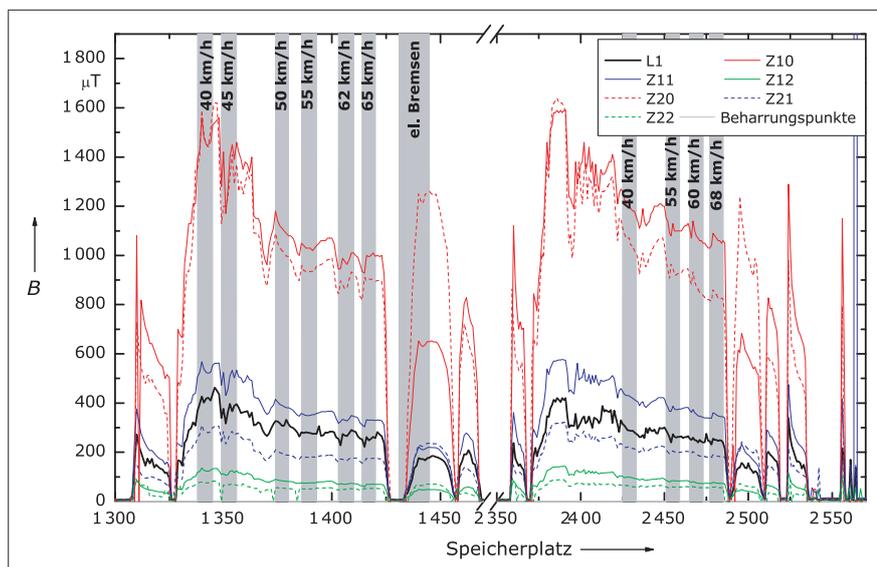


Bild 5: Verlauf der Magnetischen Flussdichte B an den verschiedenen Messstellen auf dem Triebfahrzeug Ce 6/8^{II} auf der Strecke Flüelen – Erstfeld (Führerstand II bedient).

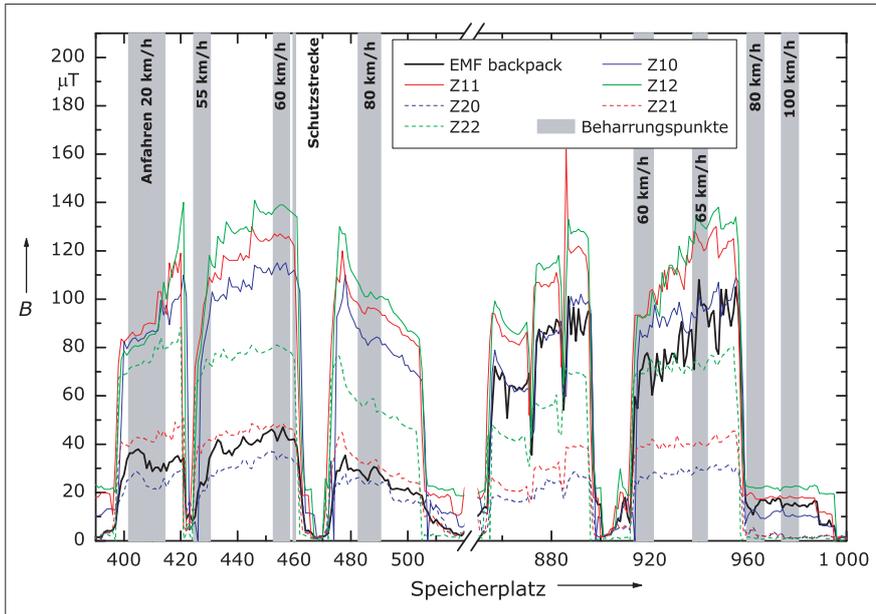


Bild 6: Verlauf der Magnetischen Flussdichte B an den verschiedenen Messstellen auf der Lok Ae 4/7. x-Achse: Speicherplätze 400–520 Fahrrichtung I, Führerstand I besetzt; 860–1000 Fahrrichtung II, Führerstand II besetzt.

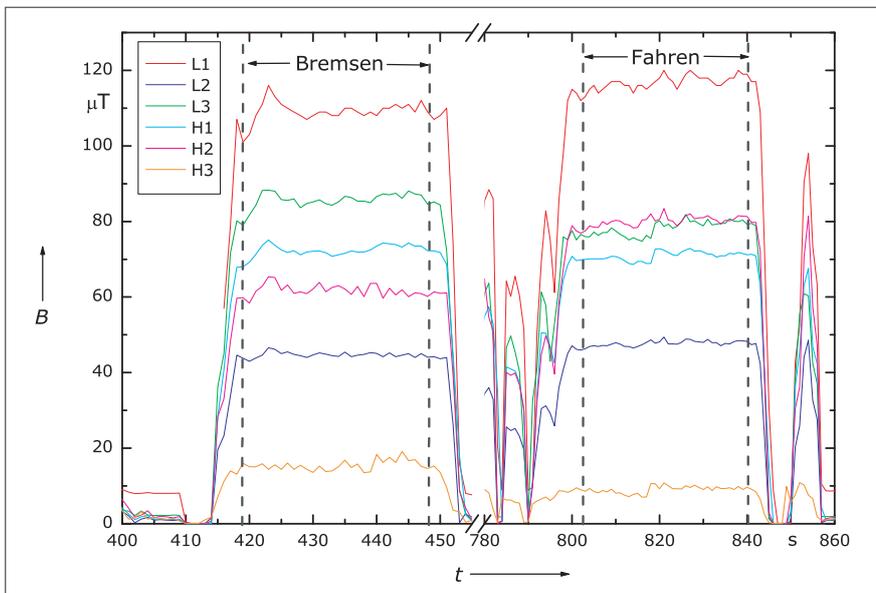


Bild 7: Magnetische Flussdichte B gemessen an den 6 verschiedenen Positionen im Führerstand der Lok Re 420 bei Fahren und elektrischem Bremsen (80 km/h und Motorstrom pro Fahrmotor 3 400 A Fahren oder 2 800 A Bremsen).

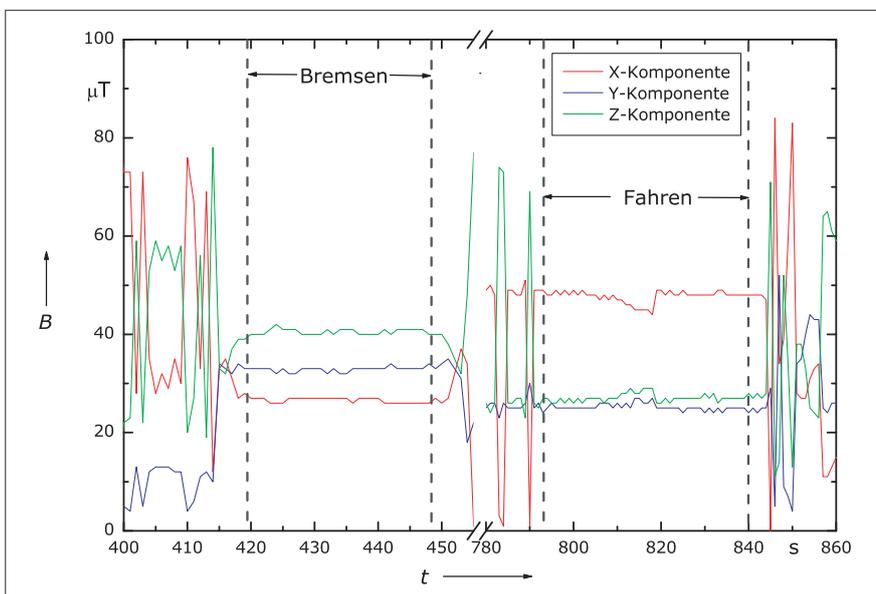


Bild 8: Komponenten der Magnetischen Flussdichte B in x-, y- und z-Achse des Messgeräts gemessen am Thorax des Triebfahrzeugführers im Führerstand der Lok Re 420 bei Fahren und elektrischem Bremsen (80 km/h und Motorstrom pro Fahrmotor 3 400 A Fahren oder 2 800 A Bremsen).

Cie AG (BBC) durchgeführt. Aus betrieblichen Gründen mussten hier als Bremslokomotiven (die Ae 4/7 von BBC haben im Gegensatz zu denjenigen der Maschinenfabrik Oerlikon keine elektrische Nutzbremse) zwei Triebfahrzeuge der Reihe Re 420 [18] in Doppeltraktion eingesetzt werden, was wegen der Stufenschaltersteuerung das genaue Einstellen gewisser Betriebspunkte erschwerte. Aus Bild 6 geht hervor, dass auch bei diesem Fahrzeugtyp die Feldwerte führerstandsabhängig deutlich unterschiedlich sind: In Fahrrichtung II ist der Transformator sowohl mit der Einführung des Primärstromes wie auch mit den Sekundärabgängen zum Stufenschalter mit maximal 4×2500 A Fahrmotorstrom direkt hinter der Führerstandrückwand Hauptverursacher des Magnetfeldes.

Mit der größten vorkommenden Triebfahrzeugserie Re 420 (und Re 430) [18] wurden sowohl einzelne Messfahrten mit einer Brems- und Zuglok vom Typ Re 460 [24] wie auch umfangreiche Messungen mit fahrplanmäßigen Zügen durchgeführt. In Bild 7 werden die Feldstärken an den 2×3 Messstellen (Bild 2) beim Fahren mit maximalem Motorstrom 3400 A (2×3400 A in den Hauptstromapparaten auf der Führerstandseite des näher liegenden Drehgestells) und elektrischer Nutzbremse mit

2800 A Bremsstrom pro Fahrmotor miteinander verglichen. Bild 8 zeigt die isotrope Verteilung (Magnetfeldanteile in % der x-, y- und z-Achse) ebenfalls im Vergleich zwischen Fahren und elektrischem Bremsen in den gleichen Betriebspunkten. Es fällt dabei auf, dass das Feld der Oberleitung kaum sichtbar ist (keine dominanten Anteile der z-Anteile), dafür aber die schwergewichtig aus dem Maschinenraum her gerichteten Felder der Fahrmotorstromkreise eines Drehgestells sowie des Ventilatorstromkreise direkt hinter der Führerstandrückwand. Unterschiede zwischen Fahren und Bremsen ergeben sich vor allem durch den örtlich geänderten Stromfluss im Bereich des Fahr-Bremsumschalters und der Bremsdrosselspule.

4.3 Messungen im Fahrplanbetrieb

Als typische Beispiele von Messungen bei fahrplanmäßig verkehrenden Zügen werden Fahrten mit einem Interregiozug (IR) auf der Strecke Bern – Zürich sowie einem Transitgüterzug auf der Nord-Süd-Achse zwischen Basel – Gotthard – Chiasso, teilweise mit den gleichen Triebfahrzeugtypen [18; 19; 24], erläutert: Die folgenden Bilder zeigen die Feldverläufe am EMF backpack® auf den

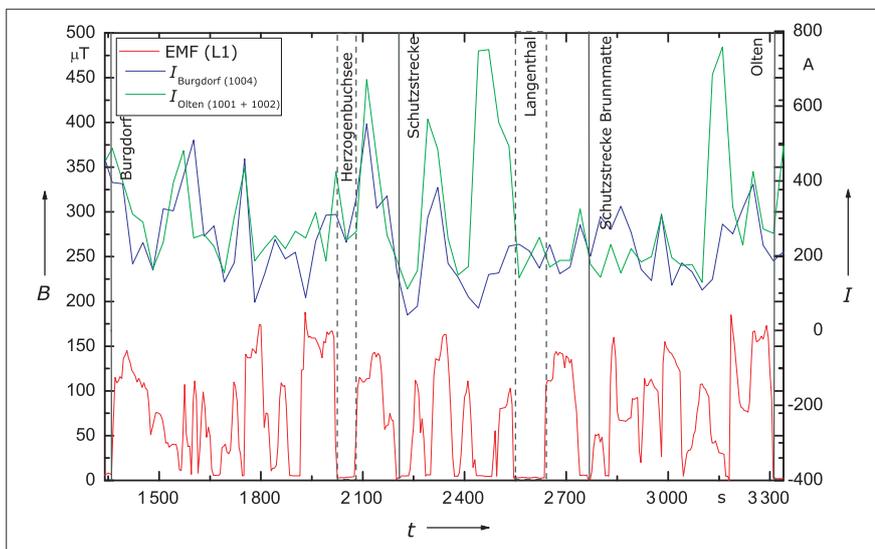


Bild 9: Magnetische Flussdichte B gemessen am Thorax des Triebfahrzeugführers im Führerstand der Lok Re 420 auf der Fahrt mit einem Interregio zwischen Burgdorf und Olten sowie Speiseströme der beidseitig einspeisenden Unterwerke Burgdorf und Olten.

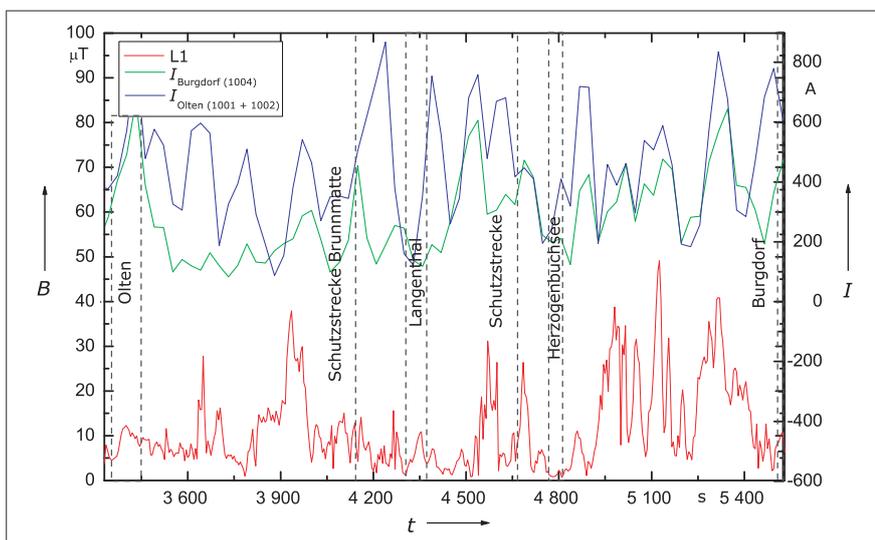


Bild 10: Magnetische Flussdichte B gemessen am Thorax des Triebfahrzeugführers im Führerstand der Lok Re 460 auf der Fahrt mit einem Interregio zwischen Burgdorf und Olten sowie Speiseströme der beidseitig einspeisenden Unterwerke Burgdorf und Olten.

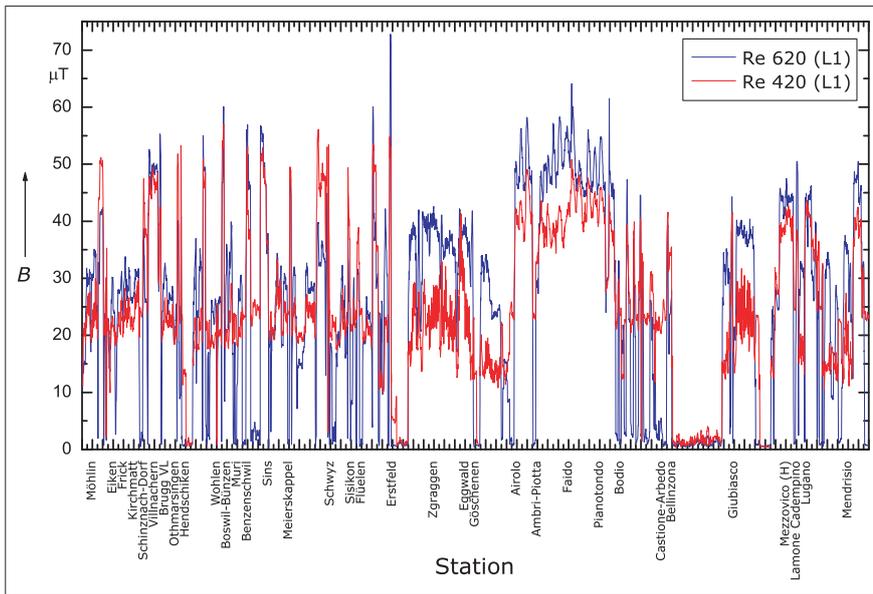


Bild 11: Verlauf der Magnetischen Flussdichte B an den Triebfahrzeugführersitzen gemessen bei einer Fahrt mit einem Güterzug in Doppeltraktion Re 6/6 (Re 620) und Re 4/4^{II} (Re 420) von Basel RB – Gotthard – Chiasso (1580 t, 482 m, zusätzlicher Schiebedienst auf den Abschnitten Erstfeld – Göschenen mit Re 482 und Giubiasco – Rivera mit Re 421).

Triebfahrzeugen Re 420 (Bild 9) und Re 460 (Bild 10) mit der gleichen Anhängelast auf dem gleichen Streckenabschnitt Burgdorf – Olten (Bern – Olten – Zürich). Da die Strecke sehr kurvenreich ist und deshalb viele örtliche Geschwindigkeitsbeschränkungen einzuhalten sind sowie zwei Halte vorkommen, müssen die Anfahrströme und die maximalen elektrischen Bremsströme häufig gefahren werden. Dies zeigt sich in den durch die hohen Motorströme der Direktmotortechnik verursachten Magnetfelder auf der Re 420. Auf der Re 460, die die gleiche Zugleistung mit kleineren Motorströmen erbringt, sind die Feldwerte aus dem Maschinenraum entsprechend kleiner. In diesen Bildern ist zusätzlich der Speisepunktstrom der beiden speisenden Unterwerke Olten und Burgdorf aufgeführt [25; 26]. Die Stromstärken ab Unterwerk verändern sich laufend in starkem Maße und ihre Beträge sind beachtlich. Aus dieser Darstellung kann allerdings nicht auf die eigentliche Strom- resp. Feldverteilung der Oberleitung längs der Strecke geschlossen werden. Insbesondere auf der Re 460 sind aber auch im Stillstand die Anteile des Oberleitungsfeldes eindeutig festzustellen.

Beim Führen eines Transitgüterzuges (Anhängelast am Messtag 1580 t) über die Gotthardstrecke interessieren sowohl die Zu- und Wegfahrten zu den Bergstrecken Gotthard und Monte Ceneri wie auch die eigentlichen Berg- und Talfahrten. Bei den Zufahrten ist zu beachten, dass diese auch längere Abschnitte (Bözberggrampe) mit 12% aufweisen, welche erhöhte Zug- und Bremskräfte verlangen. Der gemessene Transitgüterzug wurde von je einem Triebfahrzeug der Reihe Re 620 [19] und Re 420 in Doppeltraktion geführt. Bild 11 zeigt den Verlauf des Magnetfeldes auf der führenden Re 620. Diese Messung wurde mit dem EMF backpack[®] durchgeführt. Gleichzeitig wurde auch auf dem hinteren Führerstand der ferngesteuerten Re 420 am unbenutzten Führersitz gemessen. Da der Zug auf den Bergstrecken Erstfeld – Göschenen (Re 482) und Bellinzona/Giubiasco – Rivera (Re 421) nachgeschoben wurde, sind die Felder auf den Bergfahrten kleiner als bei den Talfahrten mit voll wirkender elekt-

rischer Bremse. Ein Triebfahrzeugführer führte den Zug von Basel bis nach Erstfeld; ein zweiter von Erstfeld bis Chiasso, was für diese Strecke typisch ist. Insbesondere auch wegen der relativ hohen Messwerte der Triebfahrzeuge der Reihe Ce 6/8^{II} (Bild 5) wird innerhalb der Studienarbeitsgruppe diskutiert, ob allenfalls eine Teilgruppe der Triebfahrzeugführer, welche nahezu jeden Tag über den Gotthard fahren oder gefahren sind, gebildet und besonders untersucht werden soll.

4.4 Begleitung ganzer Dienstsichten

Die Auswertung der im Dezember 2003 (Fahrplanperiode 2002/2003) ausgewählten einzelnen Dienstsichten von Triebfahrzeugführern (aufgeteilt nach Wegzeiten zum Aufsuchen resp. Verlassen des Triebfahrzeugs, Vor- und Nacharbeiten auf dem Triebfahrzeug, eigentlicher Fahrdienst, Rangierfahrten, Reservezeiten, Pausen usw.) ergab folgende typische Mittelwerte: Für den Personenverkehr 15 μT , für den Güterverkehr im Mittelland 6 μT und am Gotthard 25 μT sowie 15 μT beim elektrischen Rangierdienst. Als Beispiel ist im Einzelnen der Verlauf des Magnetfeldes einer Dienstsicht aus dem Geschäftsbereich Personenverkehr dargestellt (Bild 12). Diese Dienstsicht beinhaltete das Führen von IC-, IR- und S-Bahnzügen sowohl auf Triebfahrzeugen (Re 420, Re 460, Re 450) wie auch auf Steuerwagen (IC Dosto 2000, S-Bahn). Der EMF backpack[®] wurde während der ganzen Schicht entweder am Führersitz befestigt oder am Rücken getragen.

4.5 Einfluss von Oberschwingungen

Aus medizinischer Sicht stellte sich die Frage, ob in den zu messenden Magnetfeldern auch Anteile von anderen Feldern im Bereich von 12 bis 15 Hz oder niederfrequente Oberschwingungen (3./5./7./9. Ordnung) der Grundfrequenz von 16,7 Hz vorkommen können. Parallel zu den Feldmessungen mit schmalen Bandpassfiltern bei 16,7 Hz

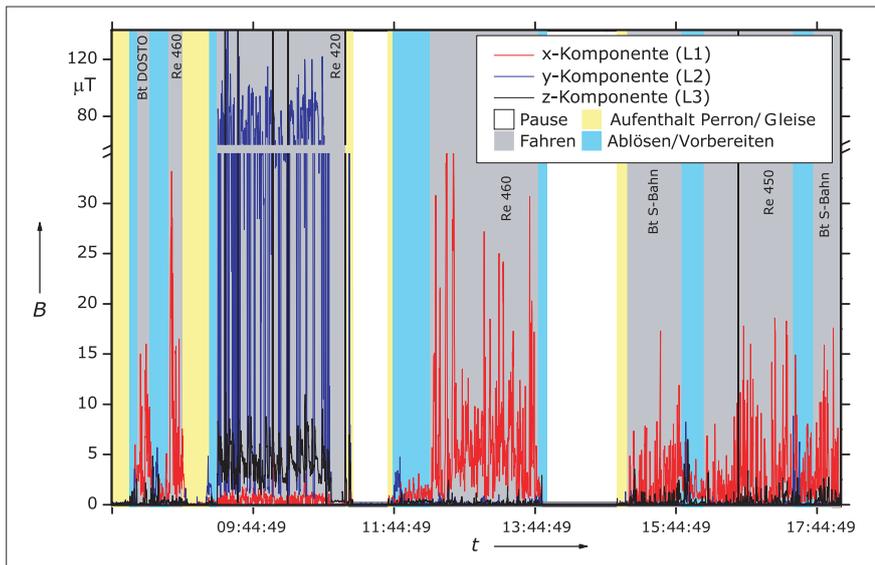


Bild 12: Magnetische Flussdichte B gemessen am Thorax des Triebfahrzeugführers während einer ausgewählten Dienstschrift von 07:50 bis 18:00 Uhr.

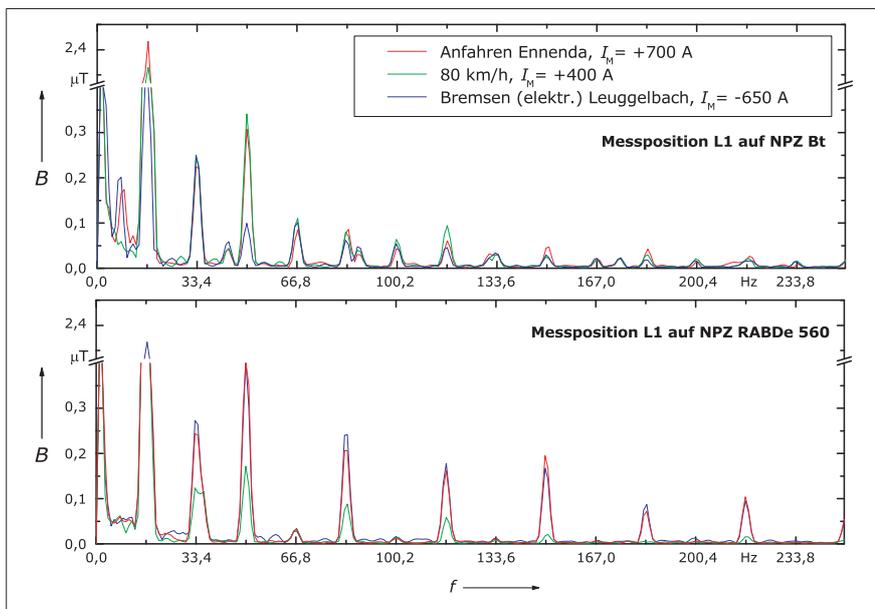


Bild 13: Spektrale Komponenten der Magnetischen Flussdichte B gemessen am Thorax des Triebfahrzeugführers mit Berücksichtigung der Oberschwingungsanteile bei verschiedenen Betriebspunkten auf dem Steuerwagen Bt (NPZ) oben und Triebwagen RABDe 560 (NPZ) unten (vierstufige Anschnittsteuerung mit Netzbremse).

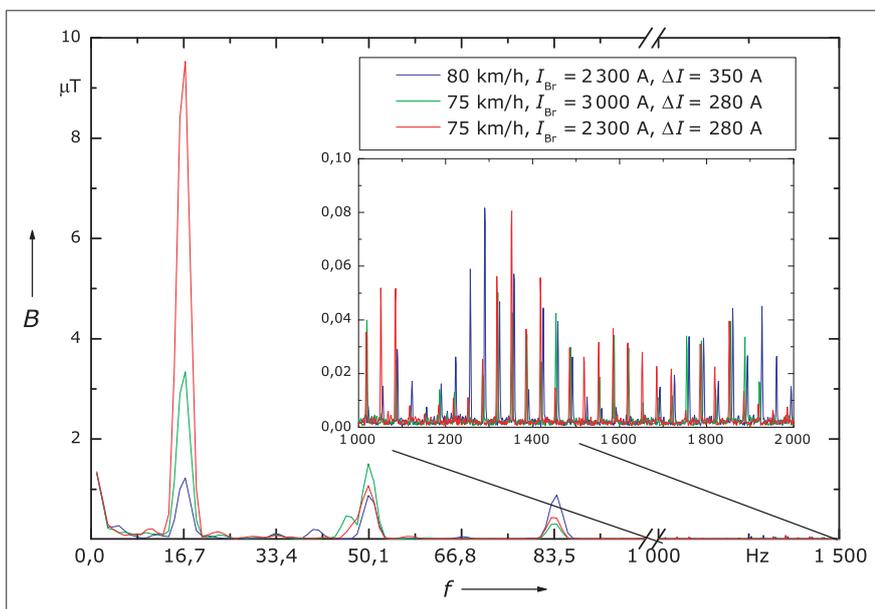


Bild 14: Spektrale Komponenten der Magnetischen Flussdichte B gemessen am Thorax des Triebfahrzeugführers mit Berücksichtigung der Oberschwingungsanteile bei verschiedenen Betriebspunkten auf der Lok Re 460 (Drehstromfahrmotoren und 4QS-Netzstromrichter). Die Angaben des Motor- und des Motordifferenzstromes beziehen sich auf die Bremslok Re 420.

wurden gezielt zusätzlich FFT-Feldanalysen durchgeführt. Diese waren besonders aussagekräftig bei den Fahrten mit dem RDe 560 (NPZ) [21] und dem zugehörigen Steuerwagen Bt auf einer Strecke, auf der die Fahrleitung einseitig gespeist wird [26]. Bei den Feldern auf dem Triebwagenführersitz sind neben den ungradzahligen Oberschwingungen auch Oberschwingungsanteile bei 33 1/3 Hz (nach [27] neu 33,4 Hz!) des nicht ideal geglätteten Fahrmotorstromes sichtbar (Bild 13 unten). Im Spektrum auf dem Führersitz des Steuerwagens fällt auf, dass die rechnerbasierten Steuersätze der Anschnittsteuerung auch bei stationären Betriebspunkten nicht ganz symmetrische Impulslagen ermöglichen und so neben den typischen ungradzahligen Oberschwingungen auch gradzahlige vorkommen (Bild 13 oben). Im Rahmen der laufenden Studie sind die gemessenen Oberschwingungsanteile unbedeutend. Dies gilt auch für die Ergebnisse auf dem Triebfahrzeug Re 460 (Bild 14).

5 Statistische Auswertungen von Dienstschichten und Triebfahrzeugumläufen

Für die Jahre 1993, 1998 und 2003 wurden pro Jahr rund 50 Dienstschichten wie folgt analysiert: Zuerst wurde jede Dienstschicht nach den oben erwähnten Teiltätigkeiten der Triebfahrzeugführer aufgegliedert. Danach wurde bei den fahrzeugbezogenen Tätigkeiten aus der Dienst-einteilung der Triebfahrzeuge (Umlaufplan) das entsprechende Triebfahrzeug (oder Steuerwagen) herausgesucht und mit den entsprechenden Expositionswerten gewichtet. Da diese Dienstunterlagen bis vor kurzem von Hand erstellt und bearbeitet wurden, ist die Auswertung sehr aufwändig und eignet sich daher nur für eine selektive Auswertung. Die Ergebnisse sind in der Tabelle 4 dargestellt und zeigen eine deutliche Abnahme der mittleren Exposition in den letzten 10 Jahren. Dies lässt sich durch die zunehmende Verpendelung, auch der IC-Züge, mit dadurch häufigerer Arbeit der Triebfahrzeugführer auf Steuerwagen und die Einführung von Triebzügen im Regional- und Fernverkehr erklären. Allerdings werden die Werte nach wie vor stark beeinflusst durch die nur leicht abnehmende Dominanz der Direktmotortriebfahrzeuge der Reihen Re 420, 430 und Re 620 gegenüber den

Tabelle 4: Errechnete mittlere Feldexposition der Dienstschichten einer ausgewählten Gruppe von Triebfahrzeugführern während den Jahren 1993, 1998 und 2003.

Mittlere Exposition / Jahr		1993	1998	2003
Dienstschicht mit dem höchsten Wert	μT	40,59	33,43	44,82
Dienstschicht mit dem kleinsten Wert	μT	3,24	2,97	2,16
Mittelwert über alle Dienstschichten	μT	20,60	12,15	10,99
Mittelwert aller Dienstschichten	% (Ausgangswert)	100	59	53

neu eingeführten Fahrzeugen mit Drehstromantrieben. Zu erwähnen ist hier, dass als Stichprobe das Ergebnis einer gemessenen Dienstschicht (Bild 12) mit demjenigen der theoretisch berechneten durchschnittlichen Exposition verglichen wurde. Der Wert der gemessenen Dienstschicht lag rund 8 Prozent über dem berechneten Wert. Der Unterschied ließ sich durch Vergleich der einzelnen Zeitabschnitte erklären: Am Messtag musste der Triebfahrzeugführer ausnahmsweise einen längeren Rangierdienst, statt einer Dienstpause, ausführen.

6 Zusammenfassung und Schlussfolgerungen

Zwischen November 2003 und April 2004 wurden umfangreiche EMF-Messungen auf verschiedenen Triebfahrzeugen und Steuerwagen der SBB durchgeführt und ausgewertet. Im Rahmen dieses Aufsatzes konnte nur eine kleine Auswahl der verschiedenen Resultate und Erkenntnisse wiedergegeben werden. Insbesondere hätte es zu weit geführt, wenn noch über die Vergleichsmessungen in verschiedenen Reisenden-Abteilen von Triebwagen und Triebzügen berichtet würde. In Tabelle 5 sind die gemessenen Feldstärken im Überblick dargestellt. Aus diesen Ergebnissen lassen sich in Tabelle 6 die verschiedenen SBB-Triebfahrzeug- und Steuerwagentypen in EMF-Gruppen nach Feldstärken zusammenfassen.

Mit den vorliegenden Ergebnissen und der erfolgreich erprobten Methode der statistischen Auswertung von Dienstschichten und Triebfahrzeugumläufen auch früherer Fahrplanperioden ist der theoretische Rahmen für die komplette statistische Auswertung gegeben. Der statistisch-medizinische Teil der Studie soll in den nächsten 12 bis 15 Monaten abgeschlossen werden. Darüber wird dann in einem späteren Aufsatz berichtet.

Literatur

- [1] Minder, Ch. E., Pfluger, D. H.: Extremely low frequency electromagnetic field measurements (ELF-EMF) in Swiss Railway Engines. In: Radiation Protection Dosimetry Vol. 48 (1993), No. 4, S. 351–354, Nuclear Technology Publishing.
- [2] Guidelines for limiting exposure to time-varying electric, magnetic and electromagnetic fields (up to 300 GHz): International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection (ICNIRP). In: Health Physics 1998, Vol. 54, No. 1 (January), S. 115–123.
- [3] Verordnung über den Schutz vor nichtionisierender Strahlung (NISV) vom 23. Dezember 1999 (Stand am 1. Februar 2000). SR 814.710.
- [4] Lörtscher, M.: Vollzug der Verordnung über den Schutz vor nichtionisierender Strahlung (NISV) bei Eisenbahnanlagen in der Schweiz. In: SCHWEIZER EISENBahn-REVUE (2002), H. 5, S. 221–227.
- [5] Lörtscher, M., Aeberhard M., Oehry M.: Messung und Modellierung von Magnetfeldern um 16,7-Hz-Oberleitungsanlagen. In: Elektrische Bahnen 100 (2002), H. 7, S. 267–280.
- [6] SUVA (Schweizerische Unfall-Versicherungsanstalt): SUVA-Richtlinie Nr. 1903: Grenzwerte am Arbeitsplatz. MAK-Werte, BAT-Werte, Grenzwerte für physikalische Einwirkungen.
- [7] Heyden, W.: Die Lokomotiven der Gotthardbahn. In: Elektrische Kraftbetriebe und Bahnen 19 (1921), H. 7, S. 73ff.
- [8] Sachs, K.: Die Entwicklung der elektrischen Vollbahnlokomoti-

Tabelle 5: Durchschnittliche EMF-Expositionen auf verschiedenen Fahrzeugtypen.

Fahrzeugtyp	Minimale durchschnittliche EMF-Exposition μT	Maximale durchschnittliche EMF-Exposition μT	Antriebsart
Re 420 Mittelland	58	72	Einphasen-Direktmotor
Re 420 Gotthard	29,9	36,5	Einphasen-Direktmotor
Re 460	8,1	9,3	Drehstrommotor
Re 450		5,3	Drehstrommotor
Re 620 Mittelland	24,1	34,4	Einphasen-Direktmotor
Re 620 Gotthard	24,5	29,5	Einphasen-Direktmotor
Ae 610		6,2	Einphasen-Direktmotor
Ae 4/7	18,9	50,2	Einphasen-Direktmotor
Ce 6/8 ^{II}	62,5	215	Einphasen-Direktmotor
Ee 3/3		13,4	Einphasen-Direktmotor
Bm 4/4		0,24	Gleichstrommotor
Am 6/6 [20]		0,43	Drehstrommotor
RABDe 500 (ICN)		7,9	Drehstrommotor
RABDe 510	2,21	3,47	Einphasen-Direktmotor
RABe 526		0,55	Drehstrommotor
RBe 540	3,76	7,54	Einphasen-Direktmotor
RBDe 560 (NPZ)		1,4	Anschnittsteuerung
BDt		2,5	(Steuerwagen)
NPZ Bt		1,4	(Steuerwagen)
IC Bt	5,9	7,0	(Steuerwagen)
Dosto Bt	2,6	4,1	(Steuerwagen)
EW IV	4,8	12,7	(Personenwagen)
Dosto A	3,2	3,4	(Personenwagen)

Tabelle 6: Klassifizierung des Rollmaterials nach EMF-Expositionsstärken.

EMF-Exposition μT	< 5	5 ... 10	10 ... 20	20 ... 50	50 ... 100	> 100
Triebfahrzeuge	RABDe 510 RBDe 560 RABe 526 Bm 4/4 Am 6/6	Re 450 Re 460 Ae 610 RABDe 500 RBe 540	Ee 3/3	Ae 4/7 Re 620	Re 420 Re 430	Ce 6/8 ^{II}
Steuerwagen	Dosto Bt NPZ Bt	IC Bt	–	–	–	–
Personenwagen	EW IV Dosto IC	–	–	–	–	–

ven in der Schweiz. In: Elektrische Bahnen 5 (1929), Ergänzungsheft, S. 24–35.

- [9] Horstmann, D.; Wagner, R.; Weigel, W.-D.: 100 Jahre Entwicklung der Antriebstechnik für elektrische Bahnen – Teil 1. In: eb – Elektrische Bahnen 101 (2003), H. 6, S. 255–270.
- [10] Horstmann, D.; Wagner, R.; Weigel, W.-D.: 100 Jahre Entwicklung der Antriebstechnik für elektrische Bahnen – Teil 2. In: eb – Elektrische Bahnen 101 (2003), H. 7, S. 338–345.
- [11] Narda Safety Test Solutions: Transfersoftware EFA-TS für EMC-Messungen. In: Elektrische Bahnen 100 (2002), H. 7, S. 281.
- [12] Die Entwicklung der elektrischen Oerlikon-Lokomotiven von den Anfängen der elektrischen Vollbahn-Traktion bis heute. In: Elektrische Bahnen 5 (1929), Ergänzungsheft, S. 92.
- [13] Aktiengesellschaft Brown, Boveri & Cie, Baden (Schweiz): Einphasen-Schnellzuglokomotive Type 2D₀1 mit Einzelachsantrieb Bauart Brown Boveri. In: BBC Mitteilungen, 1000D-V.4 (2044), 1927, Sonderheft, S. 1–16.
- [14] Maschinenfabrik Oerlikon, Oerlikon: 1C+C1 Güterzug-Lokomotiven für die Gotthardlinie der S.B.B. In: Schweizerische Bauzeitung, Band LXXV, 1929, Sonderheft 648, S. 1–8.
- [15] 45 Jahre Elektro-Triebfahrzeuge der Sécheron-Werke, Genf. In: Elektrische Bahnen 5 (1929), Ergänzungsheft, S. 90.
- [16] v. Meyenburg, K.: Die neuen elektrischen Schnellzuglokomotiven Ae 6/6 für die Gotthardstrecke der Schweizerischen Bundesbahnen. In: Elektrische Bahnen 28 (1957), H. 6, S. 121–125.
- [17] Rutschmann, J.; Desponds, M.: Die Vororttriebzüge RABDe 12/12 1101–1120. In: Schweizerische Bauzeitung 85 (1967), H. 22, S. 377–393.

- [18] Meyer, K.: Die Lokomotive Re 4/4^{II} und Re 4/4^{III} der SBB. In: Schweizerische Bauzeitung 88 (1970), H. 14, S. 311–334.
- [19] Jäger, A.: Die elektrische Ausrüstung der Lokomotive Re 6/6 der Schweizerischen Bundesbahnen (SBB). In: Elektrische Bahnen, 45 (1974), H. 11; S. 250–258.
- [20] Gerber, M.; Müller, M.; Winter, P.: Die dieselelektrischen Lokomotiven Am 6/6 der Schweizerischen Bundesbahnen. In: Schweizerische Bauzeitung 95 (1977), H. 14/15, S. 193–202/217–226.
- [21] Baumgartner, W.; Kobel, F.; Goetschi, H.: Die neuen Pendelzüge (NPZ) der Schweizerischen Bundesbahnen. In: SCHWEIZER EISENBAHN-REVUE (1984), H. 4, S. 111–123.
- [22] Gerber, M.; Müller, R.: Die neuen Fahrzeuge für die Zürcher S-Bahn. In: SCHWEIZER EISENBAHN-REVUE (1989), H. 5–6, S. 75–103.
- [23] Kobel, F.: Die Lokomotive S 450 der SBB für die S-Bahn Zürich. In: Elektrische Bahnen 87 (1989), H. 12, S. 355–366.
- [24] Weiss, T.: Die Lokomotive 2000 der Schweizerischen Bundesbahnen. In: Elektrische Bahnen 89 (1991), H. 11, S. 376–377.
- [25] Eggimann, A.; Fasel, N.; Guillelmon, B.; Marti, A.; Riatsch, J.: Geschäftseinheit Energie und Bahnstromversorgung der SBB AG – Teil 2. In: eb – Elektrische Bahnen 102 (2004) H. 3, S. 123–133.
- [26] Basler, E.: Schaltungsaufbau im 16,7-Hz-Oberleitungsnetz der SBB. In: eb – Elektrische Bahnen 102 (2004) H. 4, S. 164–173.
- [27] Behmann, U.: Nennfrequenz 162/3 Hz ade ? In: eb – Elektrische Bahnen 100 (2002) H. 12, S. 455–457.



Dipl. El.-Ing. ETHZ *Manfred Lörtscher* (57), Studium Elektrotechnik an der Eidgenössischen Technischen Hochschule (ETH) Zürich bis 1971; 1985 bis 2000 Leiter Elektrische Anlagen bei den Schweizerischen Bundesbahnen in Zürich; seit 2000 Leiter Zulassung Anlagen beim Bundesamt für Verkehr (BAV).

Adresse: Bundesamt für Verkehr, Bollwerk 27, CH-3003 Bern; Fon: +41 31 3235504, Fax: +41 31 3220898; E-mail: manfred.loertscher@bav.admin.ch



Dipl. Physiker ETHZ *Emanuel Lörtscher* (27), Studium Physik an der Eidgenössischen Technischen Hochschule (ETH) Zürich bis 2003; Seit 2004 Doktorand im IBM-Forschungslabor Rüschlikon, Inhaber der Firma LOITS.

Adresse: LOITS, Alte Stationsstr. 4, CH-8906 Bonstetten, Fon: +41 43 4660768; E-mail: emanuel.loertscher@loits.com

