Die Lokomotive Re 465 der BLS Lötschbergbahn

Bei den kürzlich in Betrieb genommenen Lokomotiven Re 465 der BLS Lötschbergbahn handelt es sich um eine Weiterentwicklung der nach dem Konzept «Lok 2000» ausgeführten Lokomotiven Re 460 der Schweizerischen Bundesbahnen (SBB). Dank einer neuen Antriebsschaltung mit weniger, aber höher ausgenützten GTO-Thyristoren konnte die Leistung beträchtlich gesteigert werden.

Die ersten der von ABB Verkehrssysteme AG, Zürich, und der SLM Schweizerische Lokomotiv- und Maschinenfabrik AG, Winterthur, entwickelten «Lok 2000» wurden 1991 von den *Schweizerischen Bundesbahnen* (SBB) als Re 460 in Betrieb genommen. Es handelt sich dabei um eine neue Generation schnellfahrender Mehrzwecklokomotiven. Das Konzept dieser leistungsfähigen vierachsigen Streckenlokomotiven mit Drehstromantrieb hat sich inzwischen bestens bewährt.

Die Lokomotive Re 465 der *Berner Alpenbahn-Gesellschaft Bern–Lötschberg–Simplon* (BLS) ist eine Weiterentwicklung der Re 460 der SBB **1** [1, 2]. Der mechanische Aufbau, die Drehgestelle, alle Hilfsbetriebe und die Steuerung unterscheiden sich wenig von dieser. Dank einem neuen Antriebskonzept ist es jedoch gelungen, die Maximalleistung am Rad um rund 15% zu erhöhen. Die acht Re 465 der BLS sind zur Zeit weltweit die stärksten in Serie gebauten vierachsigen Mehrzweck-Streckenlokomotiven (*Tabelle 1*).

Mehr Zugkraft bei höherer Geschwindigkeit

Die *BLS Lötschbergbahn* hat in den Jahren 1964 bis 1983 insgesamt 35 Streckenlokomotiven Re 4/4 (künftig Re 425) beschafft. Bei diesen handelt es sich um Universallokomotiven für Gebirgsstrecken mit einer Stundenleistung von rund 5 MW, die einen Gleichrichterantrieb mit Hochspannungsstufenschalter-Steuerung aufweisen.

Ende der achtziger Jahre nahm der Güterverkehr durch den Lötschberg stark zu. Auch im Reiseverkehr und im Autoverlad Kandersteg–Goppenstein wurde ein Mehrangebot verlangt. Gleichzeitig drängte sich die Ausrangierung alter Streckenlokomotiven aus den Jahren 1920 bis 1931 auf. Deshalb entstand zu Beginn der neunziger Jahre ein dringender Bedarf für neue Triebfahrzeuge.

Die betrieblichen Bedingungen (Anhängelast 650 t auf Steigungen bis 27‰) sind auf den Lötschbergrampen der BLS denjenigen der SBB, für die die Re 460 gebaut wurde, sehr ähnlich. Dennoch war aus verschiedenen Gründen bei hoher Geschwindigkeit eine größere Zugkraft erwünscht **2**:

- Die Lokomotiven Re 465 müssen in der Lage sein, Anhängelasten von 650 t auf Steigungen von 27‰ anzufahren und auf 100 km/h zu beschleunigen.
- Auf den heutigen Lötschbergrampen soll mit neuem Rollmaterial in 300-m-Bögen eine Reisegeschwindigkeit von 90 bis 100 km/h erreicht werden.
- Im geplanten Lötschberg-Basistunnel soll bei 11‰ Steigung mit einer Anhängelast von 650 t mit 160 km/h gefahren werden.
- Einige schwere Reisezüge haben Anhängelasten von mehr als 650 t.

Der Erhöhung der verfügbaren Zugkraft am Rad sind durch die Adhäsion Grenzen gesetzt. Dabei hängt die mögliche Übertragung großer Motordrehmomente vom Rad auf die Schiene stark von äußeren Bedingungen ab (Wetter, Verschmutzung der Schienen usw.). Optimale Kraftschlußverhältnisse zwischen Rad und Schiene lassen sich vor allem erzielen, wenn die Fahrmotoren einzeln gespeist werden. Die selektive Fahrmotoranspeisung war denn auch ein Angelpunkt in der Weiterentwicklung der Lokomotiven nach dem Baukonzept «Lok 2000».

Das neue Antriebskonzept

Die Verwendung der selektiven Fahrmotoranspeisung an Stelle der drehgestellweisen Steuerung wie bei der Re 460 wirkt sich auf den ganzen Hauptstromkreis aus **3**.

Bei der Re 465 gehört zu jedem Fahrmotor ein Antriebsstromrichter. Für die Umrichter der SBB-Lokomotiven wurde eine Dreipunktschaltung mit dreipoligem Zwischenkreis (3500 V) gewählt **3a**. Dadurch werden die gesperrten GTO-Thyristoren und Leistungsdioden nur mit der halben Zwischenkreisspannung (1750 V) beansprucht. Bei den BLS-Lokomotiven wird dagegen die Zweipunktschaltung verwendet, bei welcher im Sperrzustand die volle Gleichspannung (2800 V) des Zwischenkreises an den Leistungshalbleitern liegt **3b**.

Die GTO-Thyristoren mit 4,5 kV Sperrspannung und 2,5 kA Abschaltstrom sind bei beiden Lokomotivgattungen dieselben. Gewisse Fortschritte im Basismaterial und die vertiefte, langjährige Erfahrung ermöglichen es heute, die GTO-Thyristoren und Leistungsdioden spannungsmäßig besser auszunützen. Sie beherrschen eine anliegende Gleichspannung von 2800 V im Sperrbetrieb und die durch die Schaltvorgänge entstehenden kurzzeitigen Spannungsspitzen sicher. Von Bedeutung ist dabei auch, daß eine neuartige, verlustarme Beschaltung verwendet wird. Strommäßig sind die Leistungshalbleiter bei der Re 465 praktisch gleich stark ausgenützt wie bei der Re 460.

Durch die bessere Ausnützung der Sperrspannung der GTO-Thyristoren ließ sich die Leistung der Lokomotive erhöhen. Allerdings zwingt dies zur Absenkung der Zwischenkreisspannung von 3500 auf 2800 V. Ein Nachteil der tieferen Zwischenkreisspannung muß dabei in Kauf genommen werden: bei der Entwicklung der «Lok 2000» dachte man an deren Weiterentwicklung zur Zweisystemlokomotive mit Direkteinspeisung aus einer Fahrleitung mit Gleichspannung von 3 kV, was damals zur Wahl der Zwischenkreisspannung von 3500 V führte. Darauf wurde nun bei der Auslegung der Re 465 u. a. aus Gewichtsgründen verzichtet.

Die tiefere Zwischenkreisspannung und die höhere Leistung haben auch zur Folge, daß netzseitig pro Drehgestell drei Umrichter parallelgeschaltet sind und der Transformator deshalb sechs Traktions-Sekundärwicklungen aufweist. Trotz der höheren Leistung ist aber die Anzahl der Leistungshalbleiter beträchtlich kleiner: bei der Re 460 sind es 148 Halbleiter, bei der Re 465 nur deren 104.

Die selektive Fahrmotoranspeisung ermöglicht nicht nur, das Drehmoment jedes einzelnen Fahrmotors optimal einzustellen, sondern auch den Schleuderschutz achsselektiv zu betätigen.

Weniger Masse trotz höherer Leistung

Wegen der höheren Leistung wäre zu erwarten, daß die Re 465 auch schwerer wäre als die Re 460. Mit Rücksicht auf die Beanspruchung der Gleise soll die Last pro Radsatz jedoch 20 t nicht wesentlich übersteigen. In Kurven mit Halbmessern zwischen 270 und 450 m sind Seitenbeschleunigungen von mindestens 1 m/s², bei Halbmessern über 450 m sogar 1,8 m/s² zu erwarten.



75 Jahre Entwicklungszeit in der elektrischen Zugförderung zwischen der ältesten betriebsfähigen und einer der jüngsten Lokomotiven der BLS Lötschbergbahn – einer Re 465. Sie ist zur Zeit weltweit die stärkste in Serie gebaute vierachsige Mehrzweck-Streckenlokomotive. **1**

Tabelle 1:
Hauptdaten der Lokomotive Re 465 im Vergleich mit der Re 460

		BLS Re 465	SBB Re 460
Jahr der Inbetriebnahme		1994–95	1991–96
Achsanordnung		Bo'Bo'	Bo'Bo'
Dienstmasse	t	82	84
Länge über Puffer	mm	18 500	18 500
Höchstgeschwindigkeit	km/h	230	230
Anhängelast	t	650	650
bei Steigung von	‰	27	27
bei Geschwindigkeit von	km/h	100	80
Maximalleistung am Rad	kW	7 000	6 100
Größte Zugkraft am Rad	kN	320	300
Dauerleistung an der Welle	kW	6 400	4 800
Dauerzugkraft an der Welle	kN	242	194
bei Geschwindigkeit	km/h	93	88
Transformator			
Traktionsdauerleistung	kVA	4 000	4 500
max. Traktionsleistung	kVA	9 195	8 360
Traktions-Sekundärwicklungen		6	4
Zwischenkreisspannung	V	2 800	3 500
Anzahl GTO-Thyristoren		52	60
Anzahl Leistungsdioden		56	88
Fahrmotor-Polzahl		6	4
Mittlere Taktfrequenz der Antriebsstromrichter	Hz	250	143

Peter Gerber
BLS Lötschbergbahn

Marc-Olivier Pellaton
ABB Verkehrssysteme AG

Deshalb erforderte die Begrenzung der Masse bei der Auslegung der Lokomotiven große Aufmerksamkeit, um so mehr als die Re 465 auch gewisse zusätzliche Ausrüstungen aufweist, z. B. für die gemischte Vielfachtraktion. Durch sorgfältige Überprüfung und Optimierung aller Bauteile bezüglich elektrischer, mechanischer und thermischer Beanspruchung ist es gelungen, die Masse der BLS-Lokomotive sogar leicht unter derjenigen der SBB zu halten. Insbesondere konnte im Hauptstromkreis am Transformator, an den Kondensatoren im Zwischenkreis und an den Umrichtern beträchtlich an Masse gespart werden.

Energiesparen bei geringer Zug- oder Bremskraft

Das dezentrale mikrorechnergestützte Leitsystem MICAS-S2 der «Lok 2000» ermöglicht bei den Re 465 eine weitere interessante Neuerung. Erfahrungsgemäß beträgt die mittlere benötigte Zugkraft pro Fahrt durchschnittlich nur etwa 10 bis 20% der verfügbaren Zugkraft einer Lokomotive. Deshalb wird bei der Re 465 bei kleinen Werten die Zug- oder Bremskraft nur durch die zwei Fahrmotoren des einen Drehgestells aufgebracht. Das andere Drehgestell läuft leer mit, wobei die Fahrmotoren stets betriebsbereit bleiben. Entsprechend ist der Gleichspannungszwischenkreis dauernd geladen. Dagegen läßt sich die Leistung der Hilfsbetriebe zu diesem Drehgestell stark reduzieren. Somit lohnt sich die Ausnützung dieser Energiesparmöglichkeit sehr.

Die Umschaltung von einem auf beide Drehgestelle erfolgt automatisch, je nach Zugkraftbedarf. Im Anfahrbereich bis etwa 5 km/h wird sie jedoch nicht aktiviert, damit die Ausnützung der Adhäsion bei ungünstigen Bedingungen nicht beeinträchtigt wird.

Vielfachsteuerung

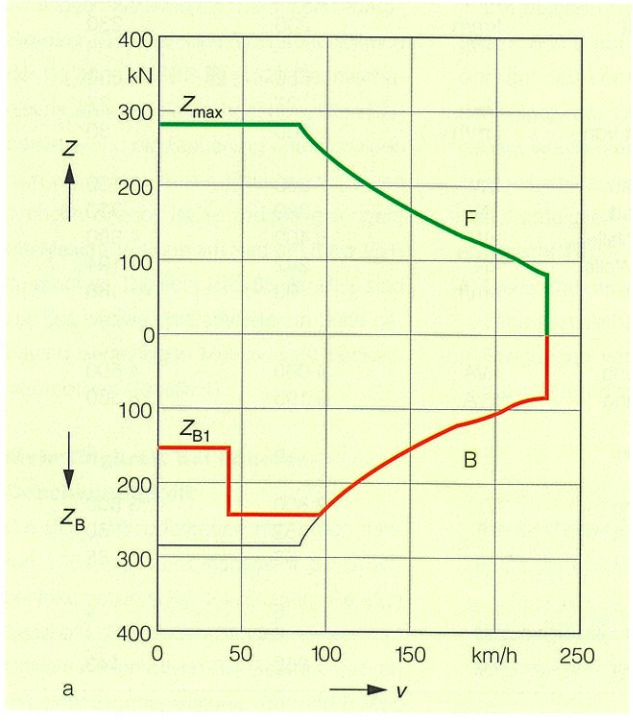
Maximal vier Re 465 können unter sich oder mit Lokomotiven Re 460 artrein in Vielfachsteuerung fahren. Ebenso lassen sich in Zukunft maximal drei dieser Lokomotiven von einem Steuerwagen für EW-IV- oder IC-2000-Pendelzüge fernsteuern. Wenn eine Lokomotive in Zugmitte eingereiht wird, besteht andererseits die Möglichkeit, 2000-t-Güterzüge mit einem einzigen Lokführer über den Lötschberg zu führen, obwohl die maximale Zughakenlast in Steigungen von 27‰ auf 1300 t beschränkt ist. Dies setzt voraus, daß die Güterwagen ein EP-Steuerkabel besitzen, was künftig bei Huckepack- oder Großcontainerfahrzeugen der Fall sein wird.

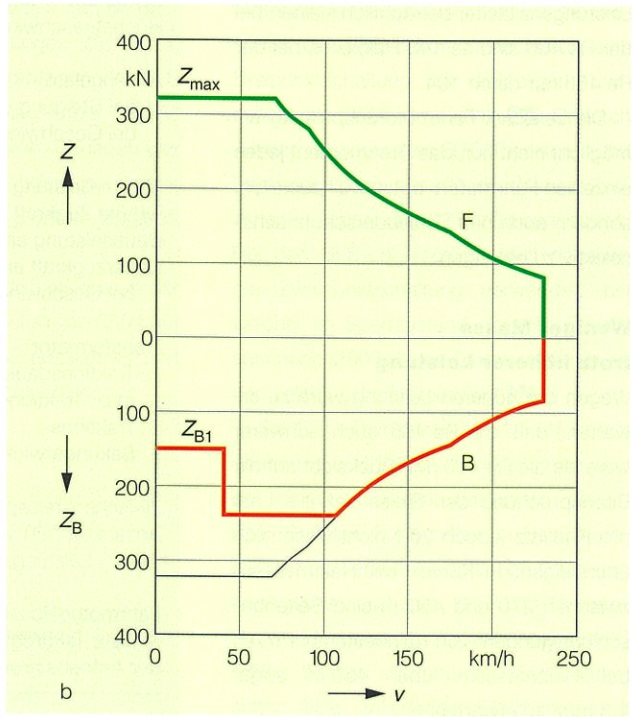
Im Gegensatz zum Fahrzeugbus mit fiberoptischer Datenübertragung wickelt sich die Vielfachsteuerung nach dem Prinzip der Frequenzhub-Codierung auf konventionellen Drahtverbindungen ab. Aus Gründen der Redundanz ist dieser sogenannte Zugbus doppelt vorhanden. Er benützt zweimal zwei Adern des neuerdings neunpoligen Steuerkabels für elektropneumatische Bremssteuerung (EP-Steuerkabel).

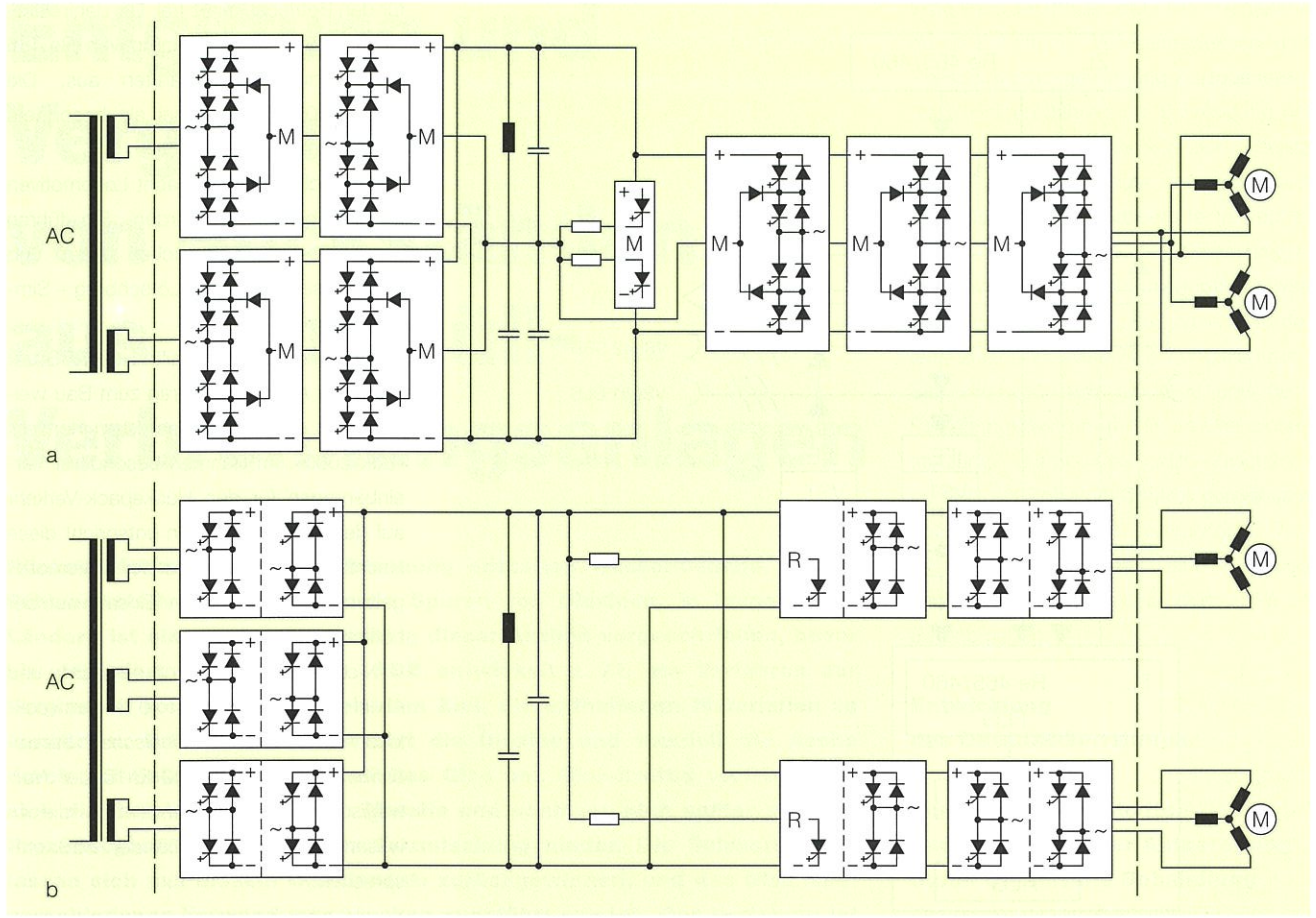
Die Datenübertragungsrate des Zugbusses beträgt 9,5 kBaud und ist somit

Zugkraft/Geschwindigkeits-Diagramm der Re 460 (a) und der Re 465 (b) **2**

F *Fahren*
B *Bremsen*
v *Geschwindigkeit*
Z *Zugkraft am Rad*
Z_{max} *Anfahrzugkraft am Rad*
Z_B *Bremskraft am Rad*
Z_{B1} *Maximale Bremskraft am Rad*







Hauptstromkreis der Re 460 (a) und der Re 465 (b) **3**

a *Umrichter in Dreipunktschaltung*
b *Umrichter in Zweipunktschaltung*

wesentlich niedriger als im Fahrzeugbus mit optischer Übertragung. Für die Kommunikation auf der Zugleitebene ist sie jedoch ausreichend. Der Zugbus ist auf jeder Lokomotive über ein Interface und über den Zugbusverwalter mit dem Fahrzeugbus verbunden.

Neben dieser «artreinen» Mehrfachtraktion verlangt die BLS auch, daß die Umrichterlokomotiven Re 465 mit älteren Triebfahrzeugen auch anderer Bahnverwaltungen in Vielfachsteuerung fahren, insbesondere mit Triebfahrzeugen mit Kollektorfahrmotoren und Stufenschalter- oder Phasenanschnittsteuerung, so z. B. mit

- Lokomotiven Re 4/4, Ae 4/4 und Ae 8/8 der BLS und
- Lokomotiven Re 4/4 II, Re 4/4 III und Re 6/6 sowie den Triebwagen RBe 4/4 und RBDe 4/4 (Nahverkehrspendelzüge) der SBB.

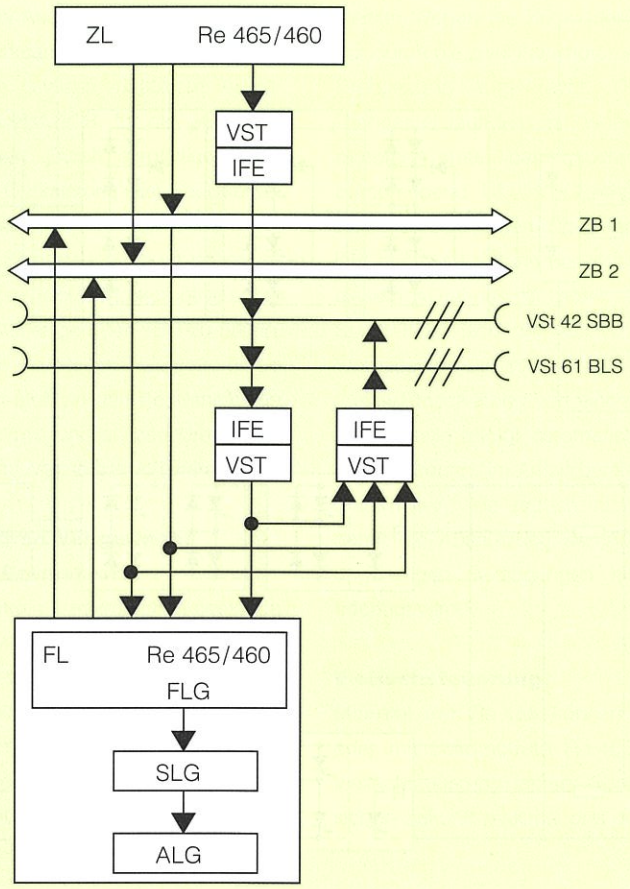
Die Züge sollen bei Bedarf wahlweise von einer Re 465, einer Re 460 oder einer «konventionellen» Lokomotive geführt werden. Die große Anpassungsfähigkeit des Traktionsleitsystems MICAS-S2 kommt bei dieser Aufgabe voll zur Geltung. Allerdings lassen sich bei den früher konzipierten Lokomotivsteuerungen nur begrenzt Informationen abrufen und Funktionen einleiten.

Die gewünschte Vielfalt bedingt, daß neben Zugbus 1 und 2 die Vielfachsteuerkabel der bestehenden Lokomotivgattungen (42-polig bei den SBB, 61-polig bei der BLS) ebenfalls verwendet werden müssen **4**. Hierzu ist in den Re 465 ein zweiter Elektronikschrank mit dem entsprechenden Interface der Vielfachsteuerung erforderlich, über welches die Verbindung zum Fahrzeugbus erfolgt.

Ein wesentliches Problem bei dieser gemischten Mehrfachtraktion liegt darin, daß das Zugkraft/Geschwindigkeits-Verhalten, also die Z-v-Kennlinienschar, der Drehstromlokomotiven und der Triebfahrzeuge mit Kollektorfahrmotoren ganz verschieden sind. Die von MICAS-S2 angebotene Lösung liegt darin, daß in der Re 465 laufend der momentane Betriebszustand innerhalb der Z-v-Kennlinienschar der «konventionellen» Triebfahrzeuge berechnet und damit die momentane Stufenschalterstellung oder Phasenaussteuerung festgelegt wird. Die verschiedenen Motorcharakteristiken sind hierzu in der Software nachgebildet.

Brandmeldeanlage

Erstmals weist ein Triebfahrzeug der BLS im Maschinenraum eine Brandmeldeanlage auf. Grund dafür sind beispielsweise lange Huckepackzüge, bei denen ferngе-



Datenübertragung für gemischte Vielfachsteuerung mit den BLS-Lokomotiven Re 465 4

ZL	*Zugleitebene*	FL	*Fahrzeugleitebene*
VST	*Vielfachsteuerung*	FLG	*Fahrzeugleitgerät*
IFE	*Interface-Etage*	SLG	*Stromrichterleitgerät*
ZB	*Zugbus*	ALG	*Antriebsleitgerät*
VSt	*Vielfachsteuerleitung*		

steuerte Lokomotiven bis zu 750 m vom besetzten Führerraum entfernt sein können. Im Hinblick auf den Lötschberg-Basistunnel kommt dieser Maßnahme eine besondere Bedeutung zu.

Die Brandmeldeanlage basiert auf einem Absaugverfahren mit Detektoren nach dem Prinzip optischer Streulicht-Rauchmelder. Im Maschinenraum ist ein Rohr als Ringleitung verlegt, in welchem entsprechend dem örtlichen Brandrisiko Absauglöcher angebracht sind. Durch diese Löcher saugt der im Detektorgehäuse untergebrachte Radiallüfter kontinuierlich Luft aus dem Maschinenraum ab und führt sie zu zwei unabhängigen optischen Rauchmeldern.

Enthalten die Luftproben Rauchspuren, lösen die Melder Alarm aus. Der Lokomotivführer erhält auf seinem Bildschirm im Führerraum eine Statusmeldung sowie einen Text mit Anweisungen. Auf eine automatische Abschaltung der betroffenen Lokomotive wurde bewußt verzichtet. Die Kompetenz zum Abschalten liegt beim Lokomotivführer, damit er ein zwangsweises Anhalten des Zuges an ungeeigneter Stelle – z. B. in einem Tunnel – vermeiden kann.

Ausblick

Nach umfangreichen Typenprüfungen, Optimierungsprogrammen und Abnahmen gab die BLS die Re 465 per 30. März 1995 für den Betriebseinsatz frei. Bis dahin führten die drei ersten Lokomotiven Re 465 vorwiegend Versuchsfahrten aus. Die Re 465 002 diente dabei als besonders eingerichtete Meßlokomotive.

Inzwischen sind alle acht Lokomotiven in Betrieb gesetzt worden. Sie führen vorab Reisezüge zwischen Bern und Domodossola auf der Lötschberg – Simplon-Achse.

Im Frühjahr 1995 erteilten die SBB der SLM und ABB den Auftrag zum Bau weiterer 10 Lokomotiven nach dem Konzept «Lok 2000». Im Rahmen besonderer Vereinbarungen für den Huckepack-Verkehr auf den Alpentransitlinien entspricht diese Nachbestellung ebenfalls der Lokomotivgattung Re 465 für den Einsatz auf der Lötschbergstrecke.

Nicht zu vergessen sind die in Bau und Ablieferung begriffenen 20 Mehrzwecklokomotiven Sr2 der *Finnischen Staatsbahnen* (VR) und die 22 El 18 der *Norwegischen Staatsbahnen* (NSB), die im wesentlichen der Re 465 der BLS entsprechen.

Literaturhinweise

[1] Gerber, P.: Die Lokomotiven Re 465 001 – 008 der BLS Lötschbergbahn. ABB Verkehrssysteme AG. Druckschrift CHVEK 1865. Sonderdruck aus Schweizer Eisenbahn-Revue 12/94.

[2] Lütscher, J.; Schläpfer, P.: «Lok 2000» – eine neue Generation schnellfahrender Mehrzwecklokomotiven. ABB Technik 10/92, 25–33.

Redaktionelle Bearbeitung

Dr. Hans-Peter Eggenberger
Meilen/Schweiz

Adressen der Autoren

Peter Gerber
Chef Fahrzeuge und Werkstättetechnik
BLS Lötschbergbahn

Marc-Olivier Pellaton
ABB Verkehrssysteme AG
Postfach 8384
CH-8050 Zürich
Telefax: +41 (0)1 318 10 80

Entgiftung und Verglasung von Rückständen aus Hausmüll-Verbrennungsanlagen

Rückstände aus der Müllverbrennung enthalten wasserlösliche, giftige Schwermetallverbindungen sowie Spuren von Dioxinen. In immer mehr Ländern ist eine Spezialbehandlung dieser Aschen vorgeschrieben, bevor sie deponiert werden dürfen. ABB entwickelt z. Zt. ein Verfahren zur Verglasung solcher Aschen mit dem Ziel, die enthaltenen Materialien zu verwerten. Das Verfahren zerstört die Dioxine und wandelt die Asche durch Schmelzung in unschädliches Glas um. Gleichzeitig verflüchtigen sich die meisten gefährlichen Metalle und schlagen sich später aus den Prozeßabgasen in Form einer Salzmischung nieder. Die Schwermetalle lassen sich aus diesem «Kondensat» zurückgewinnen, und das Glas kann verschiedenen Verwendungszwecken zugeführt werden. Das Verfahren ist in mehreren Versuchsanlagen praktisch erprobt worden. Im Hinblick auf den Bau der ersten kommerziellen Anlagen läuft gegenwärtig eine Nachweisprüfung.

Moderne städtische Müllverbrennungsanlagen geben kaum noch schädliche Stoffe an die Luft ab. Die gefährlichen Bestandteile im Müll sammeln sich vorwiegend in den festen Rückständen an. Besonders die in solchen Anlagen entstehende Flugasche enthält größere Anteile an gefährlichen Stoffen, wie Schwermetalle und Dioxine. In vielen Ländern sind deshalb Gesetze in Kraft, die die Unschädlichmachung solcher Aschen vorschreiben. Eine 1991 in Japan vorgenommene Überarbeitung des Müllaufbereitungsgesetzes bezeichnet z. B. die Flugasche als ein «besonders zu steuerndes Abfallprodukt». Das gleiche Gesetz beschreibt die «Behandlung von Flugasche durch Verschmelzung» als ein Verfahren zur Aufbereitung von Flugasche, das vom Ministerium für Gesundheit und Wohlfahrt empfohlen wird. In der Schweiz darf unbehandelte Flugasche auf keiner Deponie entsorgt werden. Die bei der Müllverbrennung anfallende Rostschlacke ist weniger gefährlich, muß aber auch vor einer Verwertung behandelt werden.

Das DEGLOR-Verfahren (*De*toxification and *Gl*assification of *R*esidues) [1–3] entstand im ABB-Forschungszentrum in Baden-Dättwil/Schweiz und stellt eine wirksame Methode dar, die Flugasche durch Entgiftung, Volumenreduktion und Ressourcenrückgewinnung aufzubereiten. Nach einigen Jahren der Entwicklung bei ABB W+E Umwelttechnik in der Schweiz gehört der Prozeß heute der ABB KK in Kobe/Japan. Eine verbesserte Versuchsanlage, die mit Hilfe der Glasschmelzofenbauer Yamabishi in Japan sowie EnVitCo in den USA konstruiert wurde, läuft zurzeit im ABB-Forschungszentrum. Sie wird von ABB Gadelius und dem Forschungszentrum mit finanzieller Unterstützung durch den ABB-Geschäftsbereich Air Pollution Control gemeinsam betrieben. Eine erste kommerzielle Vorführanlage wird dieses Jahr in Japan gebaut und soll im Frühjahr 1996 in Betrieb gehen.

Joichi Iori
ABB KK

Dr. Jürgen Balg
Dr. Christian Wieckert
ABB-Forschungszentrum
Baden/Schweiz

Entwicklung des DEGLOR-Verfahrens

Flugascheeigenschaften und das Prinzip der Aufbereitung durch thermische Behandlung

Verglichen mit der Rostschlacke, sind bei der Flugasche die Korngröße und das spezifische Gewicht kleiner, die Diffusion in Luft und die Feuchtigkeitsaufnahme höher. Ihre chemischen Zusammensetzungen sind ebenfalls unterschiedlich [4]. *Tabelle 1* zeigt als Beispiel die Analyse zweier Arten Flugasche. Asche A ist eine normale Flugasche aus einer Verbrennungsanlage mit nasser Rauchgasreinigung, die keine Rauchgasreinigungsprodukte enthält; Asche B entstammt einer japanischen Anlage und enthält Rauchgasreinigungsprodukte, insbesondere Calciumchlorid.

Gestützt auf diese Ergebnisse, kann die thermische Behandlung, um die Asche unschädlich zu machen, umgekehrt zum Entstehungsprozeß der schädlichen Substanzen erfolgen. Demzufolge lassen sich die meisten Schwermetallverbindungen durch Erhitzen der Asche zu Gasen verdampfen. Die zurückbleibende Schlacke ist völlig unbedenklich. 1 zeigt die Verdampfungsraten einer Vielzahl Schwermetalle und ihrer Verbindungen in Ab-