

Pilotierung einer Kettenwerksüberwachung mit Auslösung für die Vereina-Linie

André Dölling, Erlangen; Ronny Berry, Jürg Bebi, Landquart (CH)

Die Rhätische Bahn (RhB) betreibt auf der Vereina-Linie einen Autoverlad. Im Zuge einer geplanten Änderung dieses Betriebs- und Fahrzeugkonzepts sind zur Reduzierung der Gefährdungen neue Maßnahmen an der Oberleitungsanlage und zugehöriger Bahnenergieversorgung umzusetzen. Die Konzeption, Pilotierung und Erprobung der Kettenwerksüberwachung mit Auslösung sind Teil dieser Maßnahmen.

Pilot tests on an overhead contact line monitoring system with tripping function for the Vereina line
The Rhaetian Railway (RhB) operates a car transport service on the Vereina line. During a planned change in this operating and rolling-stock concept, new measures must be implemented on the overhead contact line system and the associated traction power supply to reduce the risks. The conception, creation of the pilot plant and testing of the catenary supervision system with tripping function are part of these measures.

Essais pilotes d'un système de surveillance des caténaires avec déclenchement automatique pour la ligne de la Vereina

Le Chemin de fer rhétique (RhB) exploite un service de transport de voitures sur la ligne de la Vereina. Lors d'une modification prévue de ce concept d'exploitation et de matériel roulant, de nouvelles mesures doivent être mises en œuvre sur le système de lignes de contact et l'alimentation électrique de traction associée afin de réduire les risques. La conception, la création de l'installation pilote et l'essai du système de supervision de la caténaire avec fonction de déclenchement font partie de ces mesures

1 Einleitung

Die Rhätische Bahn (RhB) betreibt den mit 11 kV 16,7 Hz elektrifizierten und maximal 15 ‰ geneigten meterspurigen Vereina-Tunnel auf der Vereina-Linie in der Ostschweiz im Schweizer Kanton Graubünden zwischen den Orten Selfranga (Prättigau) und Sgaliains (Engadin). Sie ist das Bindeglied zwischen den RhB-Strecken Landquart – Davos Platz über Klosters und Bever – Scuol-Tarasp über Sgaliains und wird im Mischverkehr mit Personen- und Güterzügen sowie Autoverlad betrieben. Zudem schafft der Autoverlad eine schnelle und effiziente Anbindung beider Täler an das Schweizer Nationalstraßennetz. Je Stunde und Richtung fahren zurzeit durchschnittlich vier bis fünf Autozüge und zwei bis drei Reisezüge.

Der Tunnel gilt als weltweit längster Meterspur-Eisenbahntunnel mit einer Länge von rund 19,1 km, wird mit maximal 100 km/h befahren und wurde 1999 nach etwa achtjähriger Planungs- und Bauzeit in Betrieb genommen. Die Vereina-Linie verläuft vom Bahnhof Klosters Platz im Prättigau (1 191 m über Normalhöhennull NHN) durch den Zugwald-

tunnel zum Auto-Verladebahnhof Selfranga (1 281 m über NHN) und von dort durch den Vereina-Tunnel zur Auto-Verladestation Sgaliains im Engadin (1 432 m über NHN). In Sgaliains wird die Vereina-Linie an die Strecke Bever – Scuol-Tarasp angebunden. Größtenteils ist der Tunnel einspurig ausgeführt und nur im Bereich der Tunnelportale und beziehungsweise etwa mittig im Bereich der Kreuzungsstelle mehrspurig. Die Oberleitung im Tunnel besteht aus der Bauart *voll nachgespannt* (vn) aus Fahrdrabt AC-107 Cu-ETP und Tragseil StaKu 50 mit einer maximalen Systemhöhe von 40 cm. Beide Leiter werden mit 8 kN über gewichtsbasierte Nachspannvorrichtungen auf Basis von Umlenkrollen mit einem Übersetzungsverhältnis von 1 : 2 und maximal 600 m halber Nachspannlänge abgespannt.

2 Aufgabenstellung, Hintergründe und Ziele

Für die Optimierung des Autotransports durch den Vereina-Tunnel (Bild 1) will die RhB künftig Pendel-

züge mit einem im Vergleich zu heute größerem Anteil von Auffahrwagen ohne Schutzdach (AOS) einsetzen (Bild 2). Damit soll die Transportkapazität für Lastwagen (LKW) mit einem maximalen Gewicht von 44t erhöht und der Verladeprozess durch Verlängerung der Rampen vereinfacht und rationalisiert werden [1]. LKW lassen sich dann in Sagliains ohne das heute nötige Vorziehen des Autozuges beladen. Auf diese Weise können im Süden (Engadin) die LKW der Rampe entlang in Richtung Tunnel fahren und dort kurz vor dem Tunnel auf die offenen Auffahrwagen fahren. Zur gleichen Zeit fahren auch die Autos (PKW) ohne zusätzliche Rangierbewegungen auf den Autozug. Dies führt dazu, dass der Verlad rascher und zuverlässiger durchgeführt werden kann. Außerdem werden positive Auswirkungen auf Pünktlichkeit und damit auf die Fahrplanstabilität erwartet. An Spitzenverkehrstagen möchte die RhB die Transportkapazität weiter erhöhen und auch PKW auf den offenen Auffahrwagen durch den Tunnel transportieren. Zudem ist das aktuelle Rollmaterial aufgrund der aggressiven Umweltbedingungen im Tunnel in einem schlechten Zustand und ist daher zu ersetzen.

Dieses neue Mischverkehrskonzept wurde dem Bundesamt für Verkehr (BAV) vorgestellt. Das BAV gab zur Antwort, dass die Fahrleitungsanlage so zu erstellen sei, dass bei einem Riss des Kettenwerks der Personenschutz auch für die AOS gewährleistet ist. In der Analyse der möglichen Maßnahmen wurde schnell die Lösung einer Deckenstromschiene avisiert und als mögliche Lösung vom BAV akzeptiert. Die bestehende Oberleitungsanlage ist nach rund 22 Jahren im Betrieb technisch einwandfrei und in gutem Zustand. Da der Verschleiß der Oberleitung durch die konstanten Umgebungsbedingungen, verhältnismäßig geringen Befahrgeschwindigkeiten und die gewählte Bauweise im Tunnel äußerst gering



Bild 1: Blick auf das Tunnelportal und den Autoverlad in Selfranga der Vereina-Linie der RhB (Bilder 1, 3 bis 8, 10, 11, 14 bis 21: Siemens Mobility, teilw. bearb. eb).

ist, kann ein wirtschaftlicher Betrieb auch über der nominellen Nutzungsdauer von 40 Jahren erwartet werden. Insbesondere in den Ferien und im Winter existiert eine starke Auslastung der Vereina-Linie mit maximal drei Stunden Sperrpause. Größere Umbaumaßnahmen zur Umrüstung auf eine Deckenstromschiene erfordern längerfristige Streckensperrungen und wären wegen des einspurigen Tunnels nur mit gravierenden Betriebseinschränkungen und Zugausfällen umzusetzen. Die geschätzten Kosten für diese Maßnahme überstiegen deshalb die vergleichbaren Kosten bei Errichtung einer Neubauanlage deutlich. Die Technikabteilung der RhB war somit gefordert, eine wirtschaftliche Alternative vorzulegen und gleichzeitig möglichst wenig in die Bestandsanlage und in den Betrieb einzugreifen. Eine dieser Alternativen stellte die Kettenwerksüberwachung *Sicat®CMS* dar. Diese Idee wurde fortan durch die Zusammenarbeit von Siemens, TBF+Partner AG, Railectric GmbH sowie der RhB kontinuierlich weiterentwickelt und fand anschließend ihre Zustimmung durch das BAV.

Mehrere einzelne Plangenehmigungsverfahren (PGV) sind für die technische Genehmigung und Zu-

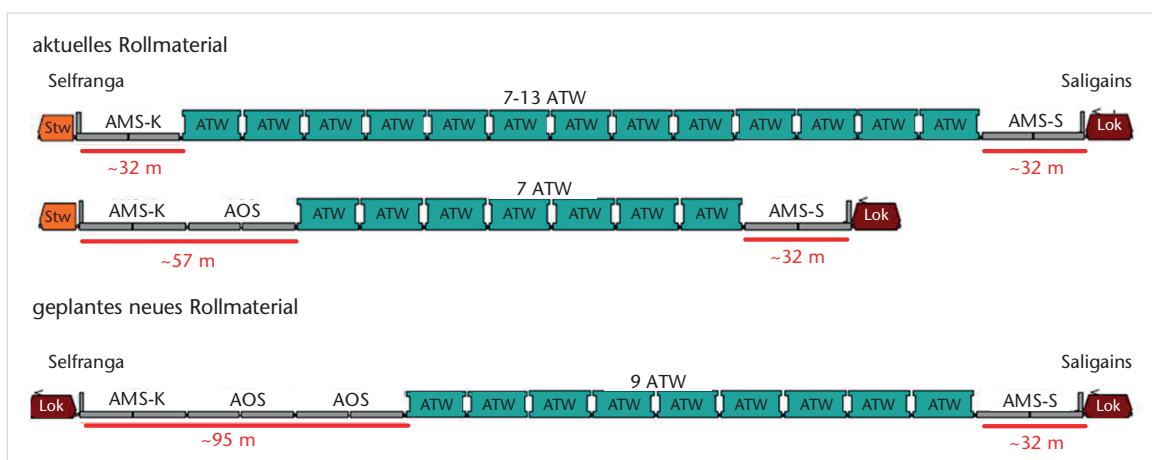


Bild 2: Heutige und geplante Kompositionen für den Autoverlad auf der Vereina-Linie zwischen Selfranga und Sagliains (Grafik: RhB, berab. eb). ATW – Autotransportwagen (mit Schutzdach), AOS – Auffahrwagen ohne Schutzdach, AMS – Auffahrwagen mit Schutzbogen

stimmung der verschiedenen Vorhaben durch das Schweizerische Bundesamt für Verkehr (BAV) einzuweisen. Mit der finalen Zustimmung kann das neue Betriebskonzept ab Anfang 2023 eingeführt und das dafür notwendige Rollmaterial zeitnah beschafft werden.

3 Risikoanalyse, Maßnahmenkatalog und Sicherheitsbewertung

3.1 Gesamtkonzept

ENOTRAC führte 2018/19 im Auftrag der RhB eine Risikoanalyse nach CSM-RA352/2009/EG [2] durch und spezifizierte die Sicherheitsanforderungen für die neue Betriebsführung des Autoverlads [3]. Sieben Anforderungen resultieren aus der Gefährdungsanalyse sowie aus den festgelegten risikomindernden Maßnahmen. Berücksichtigt wurden dabei Anforderungen der Schweizer Eisenbahnverordnung [4] sowie der Ausführungsbestimmungen zur Eisenbahnverordnung (AB-EBV) [5]. Die Oberleitungsinfrastruktur betreffend wurden folgende drei Maßnahmen spezifiziert:

- Kettenwerksüberwachung mit Auslösung,
- Anheben der Fahrleitung im Verladebereich Selfranga und Sagliains sowie
- Anheben der Fahrleitung im Doppelspurabschnitt Vereina Mitte.

Das Anheben der Fahrleitung unter Berücksichtigung der Standfläche auf den Wagen hätte zu einer Fahrdrathöhe von 6,15 m über Schienenoberkante (SOK) geführt, die nach AB-EBV nicht zulässig ist. Deshalb wurde eine Fahrdrathöhe von nur 5,80 m festgelegt. Damit ließ sich jedoch die Anforderung eines Abstandes von 5,50 m von einer Straße als Standfläche des Fahrzeugs zur Oberleitung nach EN 50122-1 [6] nicht einhalten. Die Maßnahme *Schutz durch Hindernis* war aufgrund des geplanten Betriebskonzepts mit Beförderung von LKW und PKW auf den AOS nicht umsetzbar. Somit verblieb der *Schutz durch Abstand* unter Berücksichtigung der Standflächen von LKW und PKW-Chauffeuren. Für die Fahrdrathöhe von 5,80 m wurde ein zulässiger minimaler Abstand von 3,55 m ermittelt. Der Schutz durch Abstand zu Teilen der Fahrleitung mit einer Minimaldistanz von 3,5 m im Fall einer Evakuierung eines Autozuges ist insbesondere im Tunnel bei zirka 4,95 m Fahrdrathöhe für LKW nicht vollständig einhaltbar. Eine Anhebung der Fahrdrathöhe ist im Tunnel baulich nicht möglich. Die Lastkraftwagenkabine bietet bereits in vielen Fällen einen guten Schutz durch Hindernis. Für nicht-öffentliche Bereiche definiert EN 50122-1 einen reduzierten Abstand von 2,75 m. Dieser Mindestwert kann auch im Tunnel

vollständig eingehalten werden. Die vorgeschlagene Nachweismethode und das zugehörige Risiko wurden von allen Beteiligten mitgetragen, da nur unterwiesene LKW-Fahrer mit expliziter Bestätigung der Anweisungen aus einem Faltblatt auf diese Wagen auffahren dürfen.

Jede dieser drei Maßnahmen wird in einem separaten Plangenehmigungsverfahren dem BAV vorgelegt und führt bei erfolgreicher Überprüfung zu einem positiven Bescheid des Antrags auf „Zustimmung“ zum Rollmaterial-Betriebs-Konzept. Im Folgenden wird ausschließlich die Kettenwerksüberwachung mit Auslösung näher beschrieben, da diese eine hohe Sicherheitsrelevanz besitzt und als neuartig gilt.

Anfangs stellte sich die Frage, weshalb überhaupt diese risikosenkenden Maßnahmen zu berücksichtigen sind. Im Fahrleitungsnetz der SBB treten durchschnittlich 1500 Kurzschlüssen pro Jahr bei etwa 7500 km Fahrleitungslänge auf. Davon gelten rund 15 % als permanente Kurzschlüsse. Unterstellt man einem Drittel dieser Dauerkurzschlüsse als Ursache einen Fahrdraht- oder Tragseilriss, so ergibt sich als Richtwert ein Riss pro 100 km Oberleitung und Jahr. Übertragen auf den Vereina-Tunnel wäre das ein Riss alle fünf Jahre. Diese Annahme gilt als pessimistisch, da in den letzten 22 Betriebsjahren kein Riss im Vereina-Tunnel gemeldet wurde. Die Forderung der risikosenkenden Maßnahmen beruht daher lediglich auf der ursächlichen erhöhten Gefährdung durch den erhöhten Anteil der AOS-Wagen ohne Anpassung des akzeptierten Risikos.

3.2 Kettenwerksüberwachung mit Auslösung

Im Mai 2019 wurde seitens der RhB für das Vorhaben der Kettenwerksüberwachung mit Auslösung beim BAV ein Plangenehmigungsverfahren mit Sicherheitsbericht für die elektrischen Anlagen der Vereinalinie zur Phase „Planung mit Betriebserprobung“ eingereicht. Die zugrunde liegende Einführung dieser neuen Fahrleitungs-Schutzfunktion wurde als signifikante Änderung gegenüber dem Stand der Technik klassifiziert. Die Neuartigkeit besteht darin, dass die Schutzfunktion bei Erkennen eines Fahrdraht- oder Tragseilrisses die speisenden Leistungsschalter abschaltet und die schnell schaltenden Erdungsschalter einschaltet, bevor der Draht in die gefährdete Zone (Bild 3) eindringt. *Sicat CMS Safe* automatisiert das Abschalten, das Sichern gegen Wiedereinschalten und Erden der fünf Sicherheitsregeln gemäß EN 50110 [7; 8], da die erforderlichen Abschaltzeiten sonst nicht eingehalten werden können. Das Schutzkonzept nach EN 50633 [9] wird um eine sicherheitsbezogene Funktion ergänzt, welche die Umgebungs- und Anwendungsbedingungen berücksichtigt. Das

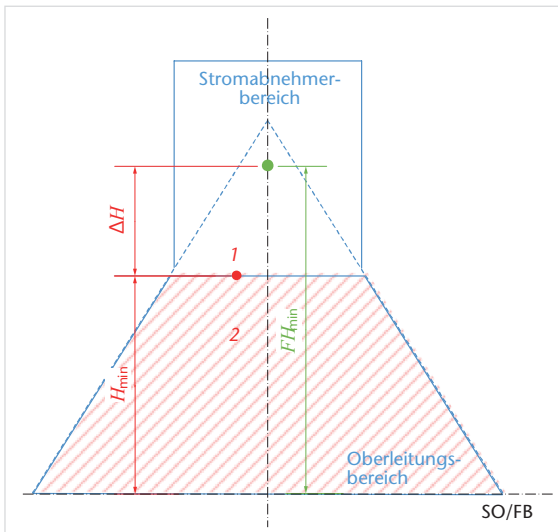


Bild 3:

1 – „gefährdeter Punkt“, 2 – „gefährdete Zone“ mit Bezugshöhe H_{min} im Oberleitungs- und Stromabnehmerbereich nach EN 50122; über die minimale Fahrdradhöhe FH_{min} ergibt sich beispielsweise die maximale Fallhöhe ΔH inklusive eventueller elektrischer Schutzabstände.
weitere Abkürzungen: SO – Schienenoberkante, FB – Fahrbahn

- Ausrüstung des Schutzsystems auf dem gesamten Perimeter der Autoverladung

Zusätzlich wurden dort Anforderungen der Umgebung, Niederspannungsversorgung, Kommunikation und Bahnenergieversorgung niedergeschrieben.

Im Rahmen des Entwicklungsprozesses der Kettenwerksüberwachung mit Auslösung ermittelte SMO explizit die Gefährdungen. Das zugehörige Produkt trägt den Namen *SicatCMS Safe*. Der Sicherheitsplan für das generische Entwicklungsprojekt und spätere Kundenanlagen dokumentiert den angewendeten Sicherheitsmanagementprozess gemäß EN 61508 [11]. Er enthält dabei die Arbeitspakete Planung des Sicherheitsprozesses, Planung des Entwicklungsprozesses sowie Gefährdungsermittlung, Gefährdungsbewertung und *Safety Integrity Level* (SIL)-Einstufung der beteiligten Funktionen. Der Sicherheitsprozess für den Sicherheitslebenszyklus nach EN 61508 wird durch die Anwendung der bahnspezifischen Norm EN 50562 [12] unterstützt. Für die ermittelten Sicherheitsfunktionen wurde eine Sicherheitseinstufung SIL2 nach EN 61508 festgelegt.

Verfahren wurde im Oktober 2019 durch das BAV mit wenigen Auflagen genehmigt.

Hauptbestandteil dieser PGV-Planung bildete ein Sicherheitsmanagementbericht, der neben der fachlichen Verantwortung auf Betreiberseite auch die Verantwortungen der technischen Zuarbeiten festlegte. Die Gesamtverantwortung für die neue Schutzfunktion der Kettenwerksüberwachung mit Auslösung und ihre Einbindung in das übergeordnete Schutzsystem lag bei der Siemens Mobility GmbH (SMO). Die Teilverantwortungen für den Sicherheitsbericht und die Schutzkonzeption übernahmen die Railectric GmbH und für die Sicherheitsbewertung die SCONRAIL AG. Die Projektleitung wechselte von der TBF+Partner zur RhB. Als Sachverständiger (SV) wurde ein erfahrener Mitarbeiter der Südostbahn AG (SOB) ausgewählt.

Im Sicherheitsbericht [10] sind für die Kettenwerksüberwachung mit Auslösung folgende funktionsbestimmenden Sicherheitsanforderungen zur Realisierung des neuen Autoverlad-Betriebskonzepts definiert worden:

- Verfügbarkeit der neuen Schutzfunktion mindestens 99%
- Zeit, bis herunterhängende Teile der Fahrleitung spannungslos, kurzgeschlossen und geerdet sind und dabei außerhalb der gefährdeten Zone sind, kleiner 500 ms
- sichere Anzeige des Betriebszustandes für Betriebs- und Instandhaltungspersonal

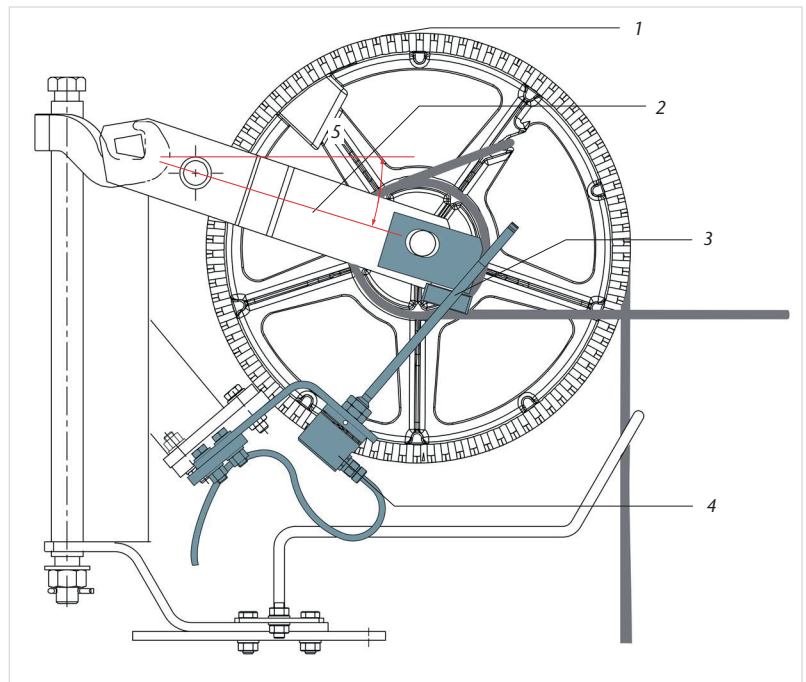


Bild 4:

Anordnung des Sensors zur Überwachung der Wippenneigung am Radspanner *Sicat 8WLS070-0B*.

1 – Spannrad, 2 – Wippe, 3 – Positionsgeber mit Dauermagnet, 4 – Sensor inklusive Befestigungskonstruktion an Prallplatte, 5 – Wippenneigung α

4 Pilotierung der Kettenwerksüberwachung im Vereina-Tunnel

4.1 Generische Entwicklung Sicat CMS Safe

4.1.1 Hintergrund

Sicat CMS Safe ist eine Weiterentwicklung der Kettenwerksüberwachung Sicat CMS [13; 14], die seit 2008 von der SMO weltweit vertrieben wird und im Rahmen einer Forschungskoope-ration mit der technischen Universität (TU) Dresden [15] entstand. Kern der Überwachungseinrichtung ist ein Sensor, der die Wippenbewegung der Radspanner [16] überwacht

(Bild 4). Die Sensorinformationen werden über eine Erfassungs- und Auswertestation eingesammelt und für Monitoring-Anwendungen, Betriebserprobungen und ähnliche Anwendungen eingesetzt [17].

Bereits mit Einführung der eHighway-Pilotanlagen auf Autobahnen wird Sicat CMS dazu genutzt, bei kritischen Oberleitungszuständen wie Leiterseilrissen oder starken Oszillationen die Anlage abzuschalten, kurzzuschließen und zu erden. Dies erfolgte zu diesem Zeitpunkt durch eine Kopplung von Sicat CMS mit der Abschalt- und Erdungsautomatik Sicat AES [18], die für die Herstellung eines elektrisch sicheren Zustandes bei Rettungsmaßnahmen vorgesehen war. In Ergänzung zur Oberleitungsspannungsprüfautomatik (OLSP) der DBAG wird durch die Sicat AES auch das Abschalten der Leistungsschalter inklusive der Blockierung der Wiedereinschaltung vorgenommen. Das Kurzschließen und Erden erfolgt lastfrei über Erdungsmasttrennschalter [19]. Ab Fehlereintritt dauert der Prozess je nach Laufzeit der Schaltgeräte und internen Verarbeitungszeiten etwa drei bis fünf Sekunden. Vergleichbar arbeitende Anwendungen auf Basis von Sicat CMS sind bei Nahverkehrsanlagen in Österreich zuverlässig ohne sicherheitsbezogene Funktion im Einsatz.

4.1.2 Entwicklungsprojekt der SMO

Seit Ende 2019 arbeitet die SMO intern an der generischen Anwendung Sicat CMS Safe, mit der nach EN 61508 ein Sicherheitsintegritätslevel SIL2 eingehalten und durch unabhängige Gutachter bestätigt werden soll. Die Entwicklung soll Anfang 2021 abgeschlossen sein. Die Systemgrenzen von Sicat CMS Safe zeigt Bild 5. Daraus abgeleitet erkennt man die Hauptbestandteile von Sicat CMS Safe:

- Sensor zur Erfassung der Wippenneigung an den Radspannern
- Erfassungsstation (AQ)
- Auswertestation (EVAL)
- Auslösestation (OPR)
- Anzeige- und Bedienstation (VIS)
- Kopfstation (HEAD)

Zusätzlich sind die Schnittstellen zur Oberleitungsanlage, Bahnenergieversorgung, Betreiber, Kommunikation und Stromversorgung erkennbar. Sicat CMS Safe definiert hierbei Anforderungen an diese externen Schnittstellen und ihre Komponenten ausgehend von der notwendigen Funktion. Welche Komponenten in der jeweiligen Anwendung auszuwählen sind, ergibt sich aus den Anforderungen. Über geringfügige Anpassungen im Sicherheitsmanagementprozess sowie durch Konfiguration der Soft-

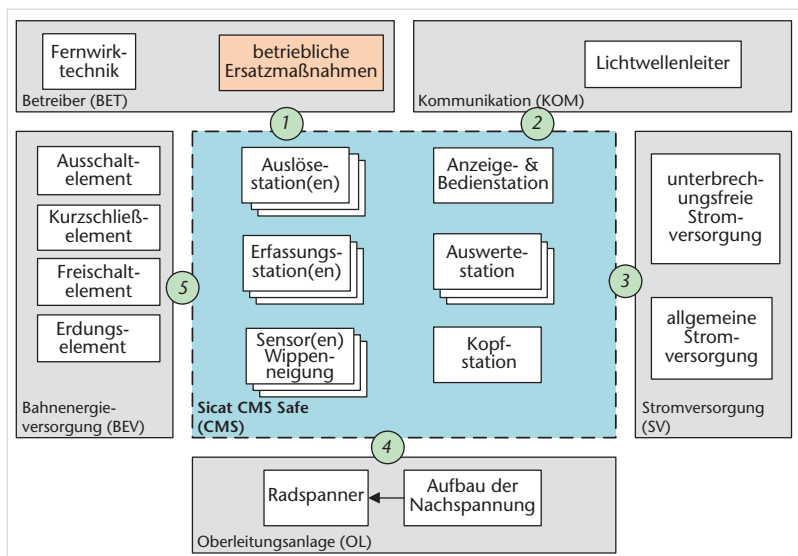


Bild 5: Systemgrenzen von Sicat CMS Safe. grün – Schnittstelle, weiße Box – Hardware, orangene Box – Maßnahmen

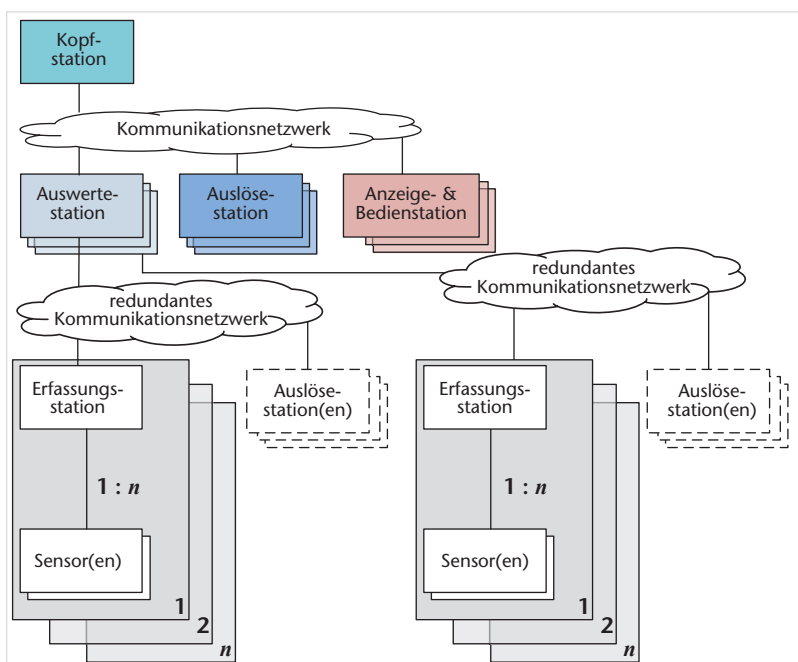


Bild 6: Architektur von Sicat CMS Safe.

ware und Nutzung evaluierter Softwaremodule kann flexibel und mit geringem Aufwand auf veränderte Kundenanforderungen reagiert werden.

Aufgrund der unterschiedlichen Strukturen der Oberleitungsanlagen und insbesondere von AC- sowie DC-Bahnenergieversorgungssystemen ist eine flexible Architektur von *Sicat CMS Safe* notwendig (Bild 6). Die jeweiligen Stationen sind zum Datenaustausch sowie zur Diagnose geeignet vernetzt.

Bild 6 zeigt, dass jeder Sensor an eine Erfassungsstation angeschlossen ist. Diese ist einer Auswertestation zugeordnet. Übersteigt die Anzahl der Erfassungsstationen die maximale Kapazität einer Auswertestation, beispielsweise bei großen Speiseabschnitten in AC-Bahnenergieversorgungen, so übernimmt eine Kopfstation die Gesamtkoordinierung des neuen Überwachungs- und Schutzsystems *Sicat CMS Safe*. Die notwendigen Schaltgeräte werden durch die Auslösestationen gesteuert, die je nach Anwendung geeignet in das Kommunikationsnetz zu integrieren sind. Die Anzeige- und Bedienstation enthält sicherheitsbezogene und nicht sicherheitsbezogene Bedien- und Anzeigefunktionen entsprechend festgelegter Rollen. Ein Ausfall der Überwachung durch *Sicat CMS* wird dem Betreiber angezeigt. Dieser kann dann festgelegte Ersatzmaßnahmen zur Fortsetzung des elektrischen Zugbetriebs einleiten.

Das Abschalten, Kurzschließen und Erden erfordert je nach Speisekonzept verschiedene Schaltgeräte, die an die Auslösestationen anzuschließen sind. Das sind:

1. Abschaltenelement – Leistungsschalter/Schnellschalter mit Schutzgerät
2. Kurzschließelement – Einschaltkurzschlussfester Leistungsschalter
3. Freischaltenelement – Trennschalter [20]
4. Erdungselement – Erdungsschalter mit Einlaufüberwachung [20; 21]
5. Verbindungselement – Trennschalter oder logische Verknüpfung

Bild 7 zeigt die Anordnung dieser Schaltgeräte am Beispiel einer eingleisigen Strecke mit einem Speiseabschnitt und mehreren Schaltgruppen. Bei Ansprechen der Überwachung werden die Abschalt- und Kurzschließelemente zum Erreichen einer sehr schnellen Reaktion gleichzeitig betätigt. Nachfolgend prüft *Sicat CMS Safe*, ob der Fehler auf eine

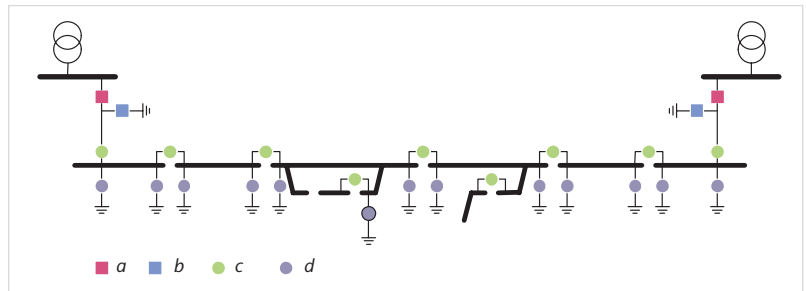


Bild 7: Anordnung der Schaltelemente der Bahnenergieversorgung bei Überwachung eines vollständigen Speisebereichs einer eingleisigen Strecke und optionaler Schaltgruppen durch *Sicat CMS Safe*. a – Abschaltenelement, b – Kurzschließelement, c – Freischaltenelement, d – Erdungselement

Schaltgruppe begrenzt ist. In diesem Fall werden die Erdungselemente und Freischaltenelemente dieser Schaltgruppe(n) betätigt und anschließend die verbleibenden Schaltgruppen des Speisebereichs wieder für eine Wiedereinschaltung vorbereitet. Dazu sind die Blockierungen der Abschaltenelemente zurückzunehmen und die zugehörigen Kurzschließelemente zu öffnen. Die Wiedereinschaltung obliegt der zuständigen Leitstelle oder dem Betriebspersonal.

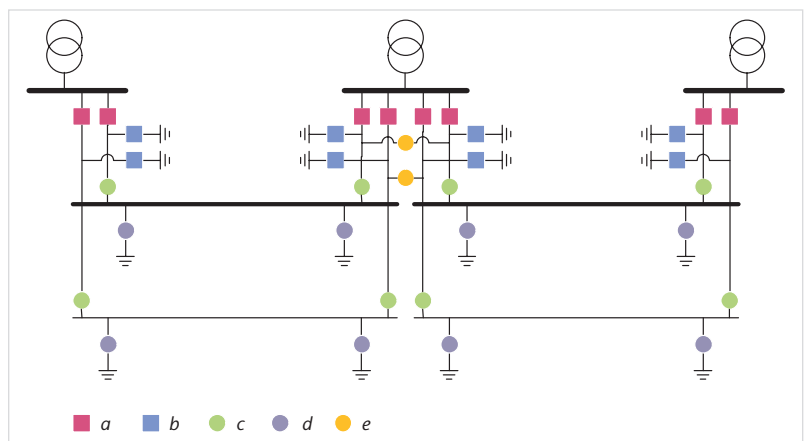
Bild 8 zeigt die Anordnung der Schaltgeräte für mehrere Speiseabschnitte, die über Verbindungselemente zum Beispiel bei Ausfall eines Unterwerks überbrückbar sind. In dieser Darstellung ist die Anzahl der Schaltgruppen innerhalb der Speisebereiche zwecks Übersichtlichkeit auf Eins reduziert.

4.2 Konzeption für den Vereina-Tunnel

4.2.1 Einleitung

An der iterativ erstellten Konzeption der Kettenwerksüberwachung wirkten zwischen Sommer 2018 und Sommer 2020 unterschiedlich erfahrene Akteure wie Instandhalter und Betreiber, RAMS-Experten, Software- und Hardwareexperten sowie zahlreiche

Bild 8: Anordnung der Schaltelemente der Bahnenergieversorgung bei Überwachung von vier Speisebereichen einer zweigleisigen Strecke und Überbrückung per Verbindungselement durch *Sicat CMS Safe*; optional vorhandene Schaltgruppen sind nicht dargestellt. a – Abschaltenelement, b – Kurzschließelement, c – Freischaltenelement, d – Erdungselement, e – Verbindungselement



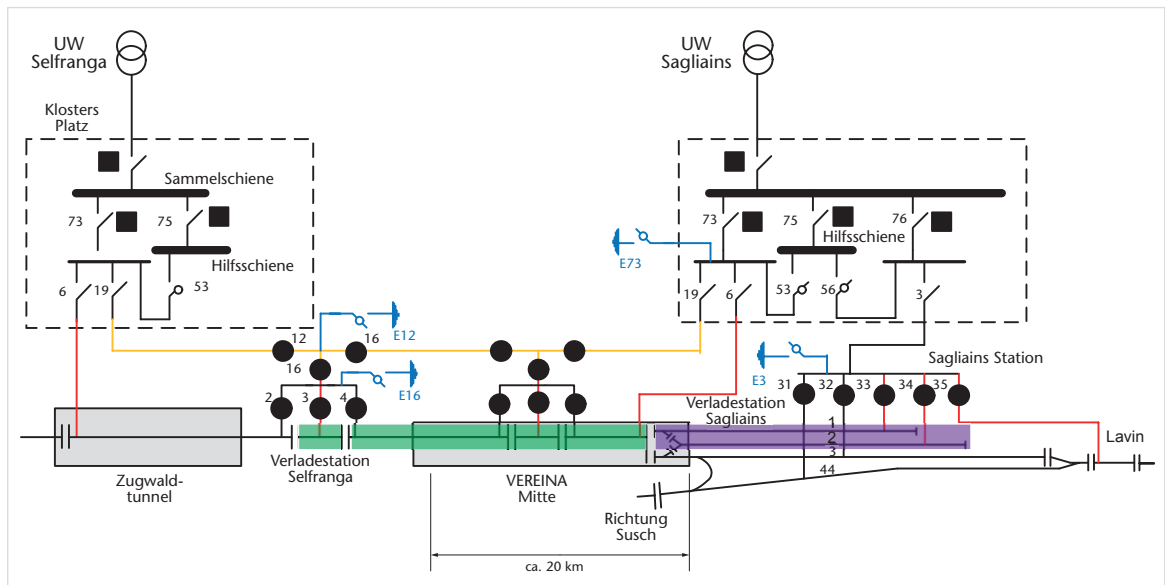


Bild 9: Speisung der Vereina-Linie mit geplanten Erweiterungen der Kurzschließelemente (Schalter E_x) zur Umsetzung der Anforderungen aus der Kettenwerksüberwachung mit Auslösung (Grafik: Siemens Mobility/Railectric/RhB, bearb. eb).

Fachexperten aus Oberleitung, Erdung und Rückstromführung, Schutz- und Schalttechnik sowie Software mit. Im Ergebnis mündete die Konzeptionsarbeit in der Anforderungsspezifikation und Systemarchitektur von *Sicat CMS Safe*. Ausgewählte Schwerpunkte aus der Konzeptionsphase werden kurz erläutert.

4.2.2 Speisekonzept und Schaltgeräte

Das Speisekonzept des Vereina-Tunnels inklusive der Verladebereiche zeigt Bild 9. Die Fahrleitung wird über die Leistungsschalter 73 der Unterwerke Selfranga und Sagliains gespeist. Die Schaltanlage des Unterwerks Selfranga steht rund 3 km unterhalb des Verladebahnhofs Selfranga im Ort Klosters als 11-kV-Innenraumschaltanlage. Das Unterwerk Sagliains ist weitgehend baugleich.

In beiden Unterwerken erfolgt die Streckenspeisung über die Sammelschiene des Leistungsschalters 73 mit Schalter 6 oder über die Speiseleitung über Schalter 19. Der Leistungsschalter 75 ist ein Reserveleistungsschalter, der über Schalter 53 bei Ausfall von Leistungsschalter 73 die Speisung übernimmt. Aufgrund der örtlichen Bedingungen kann in Klosters kein Kurzschließelement E73 sinnvoll eingebaut werden. Daher sind die Kurzschließelemente E16 und E12 im Schaltposten Selfranga sowie E73 und E3 im Unterwerk Sagliains beziehungsweise Schaltposten Sagliains zu integrieren. Weitere Freischalt- und Erdungselemente sind für diese Anwendung nicht vorgesehen. Fällt ein Kurzschließelement aus, wird dieser Fehler gemeldet. Existieren im Speiseabschnitt zwei Kurzschließelemente, so kann ein Ele-

ment ausfallen, ohne die Sicherheitsfunktion zu gefährden.

Als Abschaltenelemente bleiben die bestehenden Leistungsschalter und Schutzgeräte erhalten. Fällt ein Abschaltenelement aus, so reagiert durch die konzipierten Kurzschließelemente der existierende Reserveschutz der Unterwerke. Die notwendigen Funktionen der Abschaltung, Blockierung der Wiedereinschaltung sowie des Befehls zur automatischen Wiedereinschaltung werden über angepasste Verdrahtungsschemata realisiert. Da Kurzschließelemente bisher in der Bahnenergieversorgung nicht notwendig waren, sind diese für die neue sicherheitsbezogene Schutzfunktion nachzurüsten. Die RhB evaluierte aufgrund der verfügbaren Einbauräume in den Schaltposten bevorzugt Lastschalter der ABB mit Typenbezeichnung *FSG 4121S*. Dieser erlaubt ab Befehl eine Einschaltzeit von nur rund 50 ms und besitzt ein Einschaltvermögen bis zu 83 kA.

4.2.3 Verhalten der Oberleitung bei Leiterriss und Einfluss der Nachspannung

Das Verhalten einer Oberleitung *Sicat H1.0* wurde in [13; 14] für einen Leiterriss und die Einwirkung eines 600 kg schweren Baumes gezeigt. Die Daten wurden auf Basis von FEM-Simulationen mit *Sicat Dynamic* [22] erzeugt. Ab 2018 wurde die Methodik auf die aktuelle FEM-Simulationsumgebung angepasst. Anschließend wurden verschiedene Modellrechnungen durchgeführt. Ein Kraftimpuls infolge Leiterriss breitet sich längs der Leitung mit rund 3400 m/s aus – annähernd unabhängig von der Horizontalzugkraft des Leiters. Das bedeutet am Beispiel einer 500 m

langen halben Nachspannlänge und Riss am Festpunkt, dass eine Reaktion am Radspanner bis zu 150 ms verzögert wahrnehmbar ist. Dies wird als Totzeit bezeichnet. Das prinzipielle Verhalten bei Leiterriss in der Nähe des Festpunkts zeigt Bild 10 und bestätigt diese These. Alle anderen Leiter reagieren abhängig von der Laufzeit des Kraftimpulses bis zu ihrer Nachspannvorrichtung zeitverzögert – aber mit starkem Amplitudenausschlag im Verhältnis zum ungestörten Betrieb. Je nach Rissort, konstruktiven Details der Nachspannvorrichtungen, Aufbau der Längskettenwerke inklusive ihrer Stützpunkte variieren Ansprechzeit und Amplitude der Sensoren.

Für *Sicat CMS Safe* spielt es zunächst keine Rolle, ob ein Radspanner der Nachspannvorrichtung infolge des Wippenausschlages in der Prallplatte einrastet oder nicht. In der internen Bewertung und Anzeige kann jedoch unterschieden werden zwischen einem Impuls und einem Riss. Letzterer besitzt nach Fehlerertritt und Abklingen der Schwingung einen neuen abweichenden Gleichgewichtszustand. Aufgrund der implementierten Algorithmen können daher auch Impulse aus herabfallenden Ästen, Bäumen oder Berührung von Fahrzeugen beispielsweise infolge einer Lichtraumverletzung erkannt werden.

Neu in der Simulation des Verhaltens der Leiter ist die Untersuchung der Bewegung der Leiter an der Riss- oder Fehlerstelle. Um das Schutzziel der Kettenwerksüberwachung mit Auslösung festzulegen, muss insbesondere die vertikale Fallhöhe erhoben werden.

Für neue Anlagen wird das Verhalten der Oberleitung und der Nachspannvorrichtungen mit *Sicat Dynamic* ermittelt. Die anlagenspezifische Architektur und Konfiguration der Kettenwerksüberwachung lässt sich somit vor Baubeginn festlegen und auf Einhaltung der Vorgaben hin überprüfen. Das senkt das Risiko einer Fehlfunktion, ähnlich dem heutigen Vorgehen bei der Errichtung neuer Oberleitungsanlagen und der Überprüfung des Zusammenwirkens Fahrleitung – Stromabnehmer.

Aus Bild 10 ist auch erkennbar, dass bei Überwachung aller Sensoren eine Redundanz existiert. Typischerweise hat eine beidseitig überwachte Nachspannlänge vier Sensoren und zwei Erfassungsstationen. Jeweils maximal zwei Sensoren oder eine Station können ohne Einfluss auf die Überwachungsfunktion ausfallen. Für halbe Nachspannlängen existiert zunächst keine natürliche Redundanz. Diese kann über einen hier nicht näher ausgeführten Aufbau der Erfassungsstation erreicht werden, so dass sich die Auswertefunktion softwaretechnisch nicht unterscheidet.

4.2.4 Schutzziel

Abhängig von der Anwendung der Kettenwerksüberwachung mit Auslösung sind zunächst der ge-

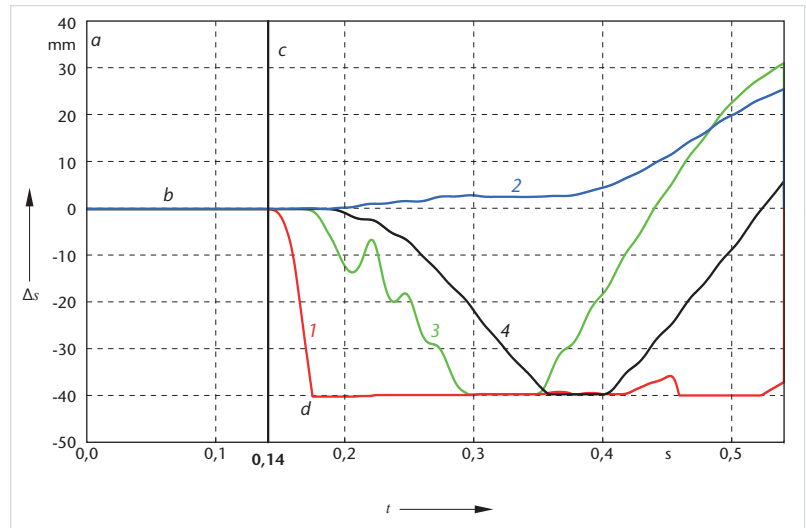


Bild 10:

Simulation des zeitlichen Verlaufs der Wippenbewegungen (Δs) nach Fahrdratriss in Festpunktnähe; der gerissene Fahrdratabschnitt entspricht einer halben Nachspannlänge vom Festpunkt bis Nachspanneinrichtung – die Simulation umfasst die Nachspannlänge zwischen beiden Nachspannvorrichtungen.

1 – Radspanner des Fahrdrattes des gerissenen Fahrdratabschnittes, 2 – Radspanner des Tragseiles des gerissenen Fahrdratabschnittes, 3 – Radspanner des Fahrdrattes des nicht gerissenen Fahrdratabschnittes, 4 – Radspanner des Tragseiles des nicht gerissenen Fahrdratabschnittes, a – Zeitpunkt des Fahrdratrisses, b – Wippenruhelage, c – frühester Beginn der Änderung der Wippenneigung infolge des Fahrdratrisses, d – Radspanner eingearbeitet

fährdete Punkt und das Schutzziel festzulegen. Die zugrunde liegende Methodik basiert auf der Geometrie des Stromabnehmer- und Oberleitungsrisbereichs nach EN 50122:2017 und Bild 3. Der gefährdete Punkt ergibt sich beispielsweise beim Autoverlad aus der Höhe der Standfläche der Ladung eines AOS-Wagens über Schienenoberkante (SO) zuzüglich der Höhe des Motorfahrzeugs und des elektrischen Sicherheitsabstands. Aus der Fahrdrathöhe und der Höhe des gefährdeten Punkts ergibt sich die zulässige Fallhöhe. Für den Autoverlad in der Verein-Linie wurde diese Fallhöhe ΔH mit maximal 2 m angegeben.

Als Schutzziel der Kettenwerksüberwachung mit Auslösung ist damit das Schutzziel aus geometrischer Sicht festgelegt. Es wird vervollständigt über die geforderte Abschaltzeit, die sich jedoch indirekt aus der Physik des freien Falls eines gerissenen Leiters ergibt. Deshalb wurde im Sicherheitsbericht ein Wert von maximal 500 ms genannt.

4.2.5 Weitere Anforderungen und mögliche Reaktionszeit

Da die Kettenwerksüberwachung mit Auslösung als zusätzliche Schutzfunktion innerhalb eines Schutzsystems angesehen wird, gelten auch die Anforderungen an den Schutz gleichermaßen. In Kurzform

4.3 Pilotinstallation der Kettenwerksüberwachung im Vereina-Tunnel

4.3.1 Hintergründe und Ziele

Im März 2019 wurde entschieden, gemeinsam einen Prototyp für die Kettenwerksüberwachung mit Auslösung zu fertigen und im Vereina-Tunnel zu erproben. Nach Klärung der formalen Bedingungen der Erprobung fand im Mai 2019 mit allen Projektpartnern eine Begehung der Verladestation Selfranga, des zugehörigen Unterwerks und Schaltpostens sowie der Fahrleitungsanlage außerhalb und innerhalb des Tunnels statt. Dabei wurden zwei zu überwachende Nachspannlängen, ihre Anbindung an Kommunikations- und Stromversorgungsstrukturen sowie die Standorte des Lastschalters E16 und der Automatisierungskomponenten festgelegt (Bild 11). Bis Herbst 2019 wurden die technischen Anpassungen ausgearbeitet, die mit der Lieferung und dem Einbau der Komponenten ab Dezember 2019 endeten.

Mit dem Errichten einer Pilotanlage wurden folgende Ziele verfolgt:

- Anpassung der Gewichtsnachspannungen an Portalen und im Tunnel von 1 : 2 auf 1 : 3 mit Radspannern 8WL5078
- Sammeln von Erfahrungen aus Errichtung, Betrieb und Instandhaltung (RAMS)

- Nachweis der Funktion der Prozessketten wie beispielsweise Erfassung – Übertragung – Auswertung oder Auswertung – Auslösung
- Nachweis der Kompatibilität mit den Umgebungsbedingungen
- Einprägen von thermisch relevanten Betriebs- und Kurzschlussströmen zum Nachweis der selektiven Schutzfunktion
- Einhaltung der zugesicherten Schaltzeiten
- Bestätigung weiterer Anforderungen aus dem Sicherheitsbericht

4.3.2 Fahrleitung

Im Vereina-Tunnel ist eine vollkompensierte Oberleitung mit bereits genannter Konfiguration im Einsatz. Die maximale halbe Nachspannlänge beträgt 600 m. Im Tunnel kommen zur Reduzierung der System- und Einbauhöhe nur kurze Spannweiten von maximal 40 m zum Einsatz. Statische und dynamische Schutzabstände wurden aus den Vorgaben der 15-kV-Bahnenergieversorgung nach EN 50119 [27] übernommen und proportional zur geringeren Nennspannung von 11 kV bei gleicher Netzfrequenz reduziert. Dieses Vorgehen ist nach AB-EBV zulässig. Der maximale Anhub für den Nachweis der Schutzabstände beträgt 50 mm bei einer Nennfahrdrachhöhe von 4,95 m.



Bild 13: Überwachte Nachspannvorrichtung der beidseitig überwachten Nachspannung im Tunnel (Foto: Siemens Mobility/RhB).

Bild 12: Überwachte Nachspannvorrichtung der halbseitig überwachten Nachspannung außerhalb des Tunnels mit Erfassungsstation am Mast (Foto: Siemens Mobility/RhB).



Bild 14: Blick auf den Schaltposten mit integriertem, aber primärseitig nicht angeschlossenem Lastschalter E16 (*Pfeil*) und Tunnelportal im Bereich Selfranga der Vereina-Linie der RhB.

Die beiden überwachten Nachspannlängen haben folgende Eigenschaften:

- halbe Nachspannung mit rund 335 m Länge im Außenbereich und Abspannung über Umlenkrollen am Portal (Bild 12)
- Nachspannung mit einer Länge von 976 m im Tunnel in einem Abstand von rund 4 km zum Tunnelportal (Bild 13)

Die Fahrdrabt- und Trageilradspanner werden mit Sensoren überwacht. Aufgrund der beschriebenen Konfiguration werden diese Sensordaten von drei Erfassungsstationen eingelesen.

Im Tunnel kommen raumsparende Nachspannvorrichtungen zum Einsatz, deren Gewichte über Gewichtsführungen an der Tunnelwand und deren Gewichtsseile über Umlenkrollen profilfrei geführt werden. Die Konstruktion der bisherigen, schwergängigen Rollenbänder wurde ebenfalls erneuert und an die Besonderheiten der annähernd konstanten Umgebungstemperaturen im Tunnelinneren von rund 25 °C angepasst.

4.3.3 Automatisierungstechnik

Im Niederspannungsgebäude des Unterwerks Selfranga wurden die notwendigen Automatisierungskomponenten wie Kopfstation, Auswertestation, Auslösestation und Anzeige- und Bedienstation nebst Stromversorgung AC 230V/DC 48V und Glasfaser-Kommunikation in einen Schaltschrank gemäß Konzept aus Bild 11 integriert und an die bestehende Schrankzeile angebaut. Von dort aus wurden die Kommunikationsverbindungen zu den drei Erfassungsstationen hergestellt. Als Hardwareplattform

dienten neuste fehlersichere speicherprogrammierbare Steuerungen vom Typ *SIMATIC*. Die Kommunikation zwischen den Automatisierungsgeräten erfolgt per Profisafe in einer redundanten Ringstruktur auf Erfassungsebene. Je nach Anforderung können auch redundante Auswertestrukturen realisiert werden.

4.3.4 Schaltposten Selfranga

Der bestehende Schaltposten Selfranga enthält neben den Trennschaltern 2 bis 16 zur Speisung des Vereina-Tunnels und der Verladestation Selfranga auch einen Transformator für die Weichenheizung. Da im Schaltposten eine Ausbaureserve vorhanden war, konnte der Lastschalter E16 darin integriert werden. Der primärseitige Anschluss an die zugehörige 11-kV-Seilsammelschiene sowie die Rückleitung (Bild 14) wurde nur für Testzwecke realisiert. Für die Betriebserprobungsphase selbst bestanden diese Anschlüsse nicht, um den Betrieb durch eventuelle Fehlauflösungen nicht zu beeinträchtigen. Der Lastschalter E16 gilt im Sprachgebrauch der Kettenwerksüberwachung mit Auslösung als Kurzschließelement und liegt in deren Hoheit. Eine Anbindung des in Klosters eingebauten Abschaltelements wurde wegen der örtlichen Besonderheiten nicht erprobt.

4.3.5 Betriebserprobung

Die Komponenten wurden bis März 2020 im Tunnel montiert und wegen der bereits Corona-bedingten Einschränkungen per Fernzugriff in Betrieb gesetzt. Von April bis Dezember 2020 lief die Betriebserprobungsphase über verschiedene Jahreszeiten. Die Funktion der Kettenwerksüberwachung mit Auslösung bestand anfänglich nur in dem Algorithmus zur Erfassung und Auswertung der Sensorsignale. Da parallel die Abstimmungen und die Softwareentwicklung innerhalb des Entwicklungsprojekts *Sicat CMS Safe* voranschritten, wurde Ende Juli ein neuer Softwarestand eingespielt. Dieser unterschied sich hauptsächlich in den neuen überarbeiteten Bedienfunktionen für die jeweiligen Rollen Fahrleitungs- sowie Automatisierungsinstandhalter, Prüfer und Verloader sowie in den Diagnose- und Visualisierungsfunktionen.

Das Verhalten der Anlage wurde ständig seitens SMO überwacht und diente zur Weiterentwicklung der Software. Zeitgleich wurde die Schnittstelle zur Datenübertragung an die RhB-Leitstelle konfiguriert und erprobt. Ein möglicher Ausfall der Überwachungsfunktion war somit sofort erkennbar.

In einem Erfahrungsbericht der RhB sowie einem Bericht zur Betriebserprobung seitens der SMO wurden die Ergebnisse im Dezember 2020 schriftlich

festgehalten und dem BAV übermittelt. Die gesetzten Ziele gelten innerhalb der Projektbeteiligten als erfüllt! Der offene Austausch trug zu einer zielorientierten Lösungsfindung bei. Aufgrund der speziellen Anforderungen und der Neuheit des Systems war es wichtig und richtig, zunächst ein Funktionsmuster zu errichten, um daran die Funktion zu validieren und die jeweiligen Wünsche für eine Serienentwicklung zu präzisieren.

4.3.6 Validierung durch Versuche

Dem Projektfortschritt entsprechend wurden gemeinsame Validierungsversuche im Vereina-Tunnel für Ende August 2020 geplant. RhB, SMO und Rail-ectric entwickelten dafür ein dreitägiges Versuchsprogramm. Um den Betrieb auf der Anlage nicht zu stören, fanden die Versuche in Nachsperrpausen statt. Tagsüber fanden allgemeine Funktionstests ohne Auswirkung auf den Bahnbetrieb statt.

Schwerpunkte der Versuche waren:

- Abnahme der vereinbarten Funktionen
- Nachweis der Funktionsketten
- Stimulation des Kettenwerks in den überwachten Nachspannlängen mit einem im freien Fall befindlichen Gewicht unterschiedlicher Gewichtskraft (Bild 15)
- Stimulation der Längenänderungen infolge von Ausgleichsströmen der benachbarten Unterwerke Selfranga und Sagliains



- Nachweis der Schalteigenzeit des ABB-Lastschalters E16
- Kurzschlussversuche durch Schalten auf Kurzschluss in Fahrleitung oder Kurzschlusseinschaltung über den Lastschalter E16
- Beteiligung des Sachverständigen gemäß der PGV-Planung

Die Versuchsergebnisse wurden von SMO und Rail-ectric in einem Versuchsbericht dokumentiert. Regt man ein Kettenwerk inklusive der mit Sensoren überwachten Nachspannvorrichtungen über ein herabfallendes Gewicht an, so kann damit der Nachweis der geforderten Gesamtreaktionszeit nicht erbracht werden. Grund dafür ist die langsame Fallgeschwindigkeit des Gewichtssatzes, die bei 2 m Fallhöhe und 10 kg Masse zu einer Falldauer von rund 500 ms führt. Die bei Leiterseilrissen bekannte Impulsausbreitung von 3400 m/s ist aufgrund der langsamen Fallbewegungen, der annähernd konstanten Leiterzugspannung und der von der Nachspannvorrichtung abgeforderten Seillängung nicht zu beobachten. SMO arbeitet an einer alternativen Nachweisführung, ohne einen physischen Leiterriss herzustellen. Die Option, einen wirklichen Leiterriss zu erzeugen, konnte aufgrund der geringen Sperrpause und der Priorität der Vereina-Linie nicht untersucht werden.

5 Validierung der Eigenschaften der Kettenwerksüberwachung mit Auslösung durch Rissversuche

5.1 Hintergrund

Nach rund neun Monaten Planung und Vorbereitung fanden im März 2020 auf der eingleisigen Strecke 5916 zwischen Erlangen-Bruck und Erlangen-Frauenaurach Versuche zur Validierung des Verhaltens der Oberleitung bei unterschiedlichen Störungen statt. Hauptgegenstand waren dabei Rissversuche des Fahrdrabtes eines abweichend vom Regelwerk der DB AG vollkompensiert ausgeführten und beidseitig beweglich nachgespannten Kettenwerks der Bauart Re75. Die Anlage wurde Ende der 1960er Jahren im Zuge der Bewirtschaftung des Steinkohlekraftwerks Franken II errichtet und sollte auch 16,7-Hz-Bahnenergie in die damalige Strecke 5900 Nürnberg – Bamberg speisen. Das Material wurde jedoch aus Kostengründen bereits ab 1970 verstärkt per Schiff zugeführt. Zur Einspeisung der 16,7-Hz-

Bild 15:

Erprobung der Kettenwerksüberwachung mit Auslösung auf der Vereina-Linie durch Stimulation der Nachspannvorrichtungen per herabfallendem Gewicht.

Energie kam es nie. Mit Abriss des Kraftwerks wurden die Fahrleitungsanlagen auf dem Kraftwerksgelände größtenteils zurückgebaut. Nur eine Nachspannlänge sowie die Weichenbespannung zur Einbindung in die Strecke 5900 ist erhalten geblieben. Die Strecke wird einmal werktäglich von einem dieselbetriebenen Güterzug bedient. Sie quert die Bundesautobahn (BAB) A73, die Regnitz inklusive zugehörige Wiesen, eine 110-kV-Höchstspannungsleitung sowie drei Gemeindestraßen im Stadtgebiet Erlangen.

5.2 Versuchsplanung

Ab September 2019 wurde nach Zustimmung des regionalen Anlagenverantwortlichen (ALV) sowie des Bau- und Betriebskoordinators der DB AG die Feinplanung angestoßen. Die Arbeiten umfassten die bahnbetrieblichen Leistungen einschließlich Sicherungsplanung, Betriebs- und Bauanweisung (Beta), Einsatzplanung und die eigentliche Versuchsplanung.

Im Rahmen der Forschungsk Kooperation mit der TU Dresden wurde das Versuchskonzept zwischen den Projektpartnern ausgearbeitet. Die Konzeption der Kettenwerksüberwachung mit Auslösung übernahm die SMO. Das Versuchskonzept bestand im Wesentlichen aus folgenden Bestandteilen:

- Kettenwerksüberwachung mit Auslösung, bestehend aus Kopf-, Auswerte-, Erfassungs-, Auslöse- sowie Anzeige- und Bedienstation
- Radspanner 8WL5078 mit Sensoren
- Kommunikationsnetzwerk per Glasfaser und 1-AC-230-V-Stromversorgung
- Stromabnehmer inklusive Gestell zur Einleitung eines Fahrdrahrisses durch Erreichen der kritischen Abschmelzstromstärke
- Hochgeschwindigkeitskameras
- Messsysteme

- Fahrleitungs montagefahrzeuge sowie diverse Hilfsgeräte

Das Kommunikationsnetzwerk diente dazu, alle notwendigen Komponenten der Kettenwerksüberwachung und der Messsysteme zu vernetzen und auf dieser Basis einheitliche Triggersignale zu generieren.

Aufgrund diverser Erfahrungen aus Rissversuchen wurde abgeleitet, dass eine Risseinleitung durch kritische Abschmelzstromstärken vorteilhaft sei. Die zugehörigen Stromstärken und Zeiten konnten im Laborversuch vorab als risikomindernde Maßnahme validiert werden. Um den zugehörigen Aufwand zu rechtfertigen, sollten der Fahrdrahtquerschnitt, das Fahrdrathmaterial und die Kontaktkraft und damit der Kontaktwiderstand variiert werden. Zusätzlich galt es den Fehlerort innerhalb der Nachspannlänge sowie Konstruktionsparameter des Oberleitungs kettenwerks wie Zugkräfte, Hängerabstände, Hängerlängen und Festpunktgestaltung zu untersuchen.

Neben der Einleitung eines Leiterseilrisses sollte auch das Verhalten bei einem ins Kettenwerk stürzenden Baum untersucht werden. Zu diesem Zweck wurden Aluminiumrohre mit \varnothing 80 mm verwendet, die gemäß den Vorgaben in variabler Länge bis 16 m und Gewicht bis 1 000 kg zu einem Rohrbündel kombinierbar sind. Zum Aufrichten wurde ein Bagger mit Abrissgreifer vorgesehen, der das Rohrbündel aufrichten, im zugehörigen Fundament fixieren und dann zielgerichtet ins Kettenwerk fallen lassen sollte. Ungeplant galt es je nach Zeitplan, weitere Einwirkungen wie das Fahren eines am Kettenwerk angelegten Stromabnehmers, die Simulation eines seitlich ausgelenkten Seiles infolge Lademaßüberschreitung eines Fahrzeugs oder allgemeine Instandhaltungstätigkeiten auszuführen und die Reaktion der Kettenwerksüberwachung mit Auslösung auf diese Einwirkungen zu überprüfen.

Aufgrund der drei niveaugleichen Bahnübergänge und der BAB-Überführung war das Kettenwerk mit technischem Stand der 1960er Jahre zu ertüchtigen. Dazu wurden alle Glasisolatoren auf die von der DB AG zugelassenen 15-kV-Verbundisolatoren *Sicat 8WL3068* getauscht und in den gefährdeten Bereichen Hänger erneuert und der Hängerabstand auf 3 m verkürzt.

Die Gesamtdauer der Sperrpause war mit drei Wochen veranschlagt; zwei Wochen zur Versuchsdurchführung und jeweils eine halbe Woche zum Auf- und Abbau der Komponenten.

Bild 16:

Versuchsaufbau zur Validierung der Kettenwerksüberwachung mit Auslösung im Rahmen von Rissversuchen auf der Strecke 5916 in Erlangen im März 2020.



5.3 Versuchsdurchführung und -ergebnisse

Ab Anfang März 2020 wurden die Versuche gemäß dem vorgestellten Versuchskonzept aufgebaut und nach Plan und ohne Schwierigkeiten mit einem motivierten Team durchgeführt. Jeder einzelne wollte bei diesem nicht alltäglichen Versuchsprogramm sein Bestes geben und Teil dieser Mammutaufgabe sein. Die TU Dresden begleitete die Versuche und wertete sie aus [27]. Bei den Versuchen anwesend war ebenfalls der Sachverständige der SOB, der für den SIL2 Prozess anerkannte Gutachter des *Safety Assessment Centre* (SAC) Erlangen sowie ein vom Eisenbahn-Bundesamt (EBA) anerkannter Plan- und Abnahmeprüfer. Da die Versuche mitten in die ersten Corona-Beschränkungen fielen, konnten das BAV und das EBA nicht wie geplant persönlich teilnehmen und ließen sich daher durch die anerkannten Sachverständigen vertreten.

Bild 16 zeigt den Versuchsaufbau zur Durchführung der Rissversuche. Der Stromabnehmer wurde auf einem Holzgestell montiert und transportabel auf einem zweiachsigen Wagen aufgestellt. An dem Gestell waren ein Raster zur Fallhöhenmessung und eine Lampenleiste zum Darstellen der Reaktion des Kettenwerksüberwachungssystems mit Auslösung angebracht. Auf dem zweiten Wagen stand das Aggregat zur Erzeugung der Abschmelzenergie. Die restliche elektrische Steuerungs- und Hochstromtechnik wurde auf dem Wagen mit dem Gestell untergebracht. Ein Zweiwege-Oberleitungsmontagefahrzeug diente als Zugfahrzeug der beiden Wagen und gleichzeitig zum Halten des Einspeisekabels. Mit Hilfe beider Fahrzeuge erfolgte die Reparatur der Oberleitung nach der Fehlereinwirkung jeweils binnen 30 min. Dieser transportable Versuchsaufbau konnte innerhalb der Nachspannlänge flexibel verschoben werden.

Bild 17 zeigt das Verhalten des gerissenen Fahrdrabtes unmittelbar nach Fahrdrabtriss und Bild 18 400 ms später bei rund 1,50 m Fallhöhe bei Fehlerereignis etwa 50 m entfernt vom Festpunkt und einer halben Nachspannlänge von knapp 710 m. Die aus der Simulation mit *SicatDynamic* ermittelten Wippenbewegungen der Radspanner, die Fallhöhe und -geschwindigkeit des Fahrdrabtes sowie die Impulsausbreitung der Zugkraftänderungen konnten innerhalb der Genauigkeitsgrenzen für alle Fehlerorte prinzipiell bestätigt werden. Die Kettenwerksüberwachung mit Auslösung reagierte konform zur Spezifikation und erkannte die Fehler schnell, sicher und selektiv. Als Abschmelzstrom stellte sich im Prüfkreis ein Effektivwert zwischen 1,0 und 1,3 kA ein. Je nach Material, Querschnitt, Kontaktkraft und damit Kontaktwiderstand variierte die Stromflussdauer zwischen 3 und etwa 25 s bei Abschmelzladungen zwischen etwa 2500 und bis zu 30000 As. Erwartungs-

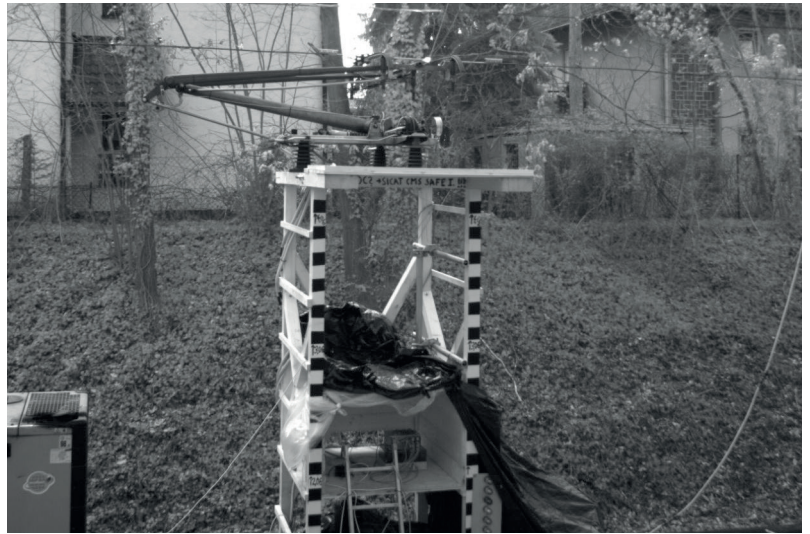


Bild 17: Verhalten des durch Abschmelzen per Stromabnehmer gerissenen Fahrdrabtes unmittelbar nach Risseintritt.

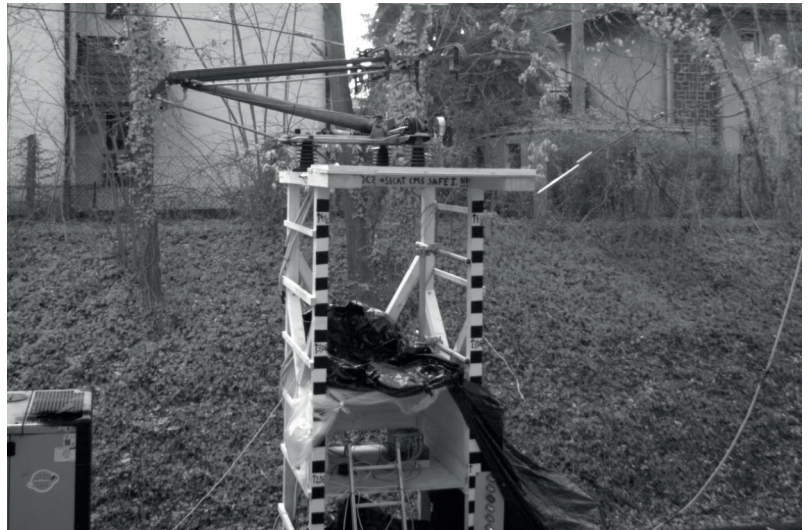


Bild 18: Verhalten des gerissenen Fahrdrabtes unmittelbar nach Risseintritt und weiteren 400 ms später bei einer Fallhöhe ΔH von rund 1,5 m und bereits ausgelöster Schutzstufe der Kettenwerksüberwachung.

gemäß besitzen Fahrdrähte mit einem größeren Querschnitt und mit höher temperaturbeständigeren Materialien größere Festigkeiten gegenüber Fahrdrabtabbrand. Die Werte liegen generell deutlich über den in der Literatur bekannten 1200 As [28], die jedoch bei Kurzschlussereignis ermittelt wurden und vermutlich durch überlagerte Lichtbogenbildung zu beschleunigten Abbränden bei Stromflussdauern unter 1 s führte. Demnach sind die höheren Abschmelzladungen wahrscheinlich durch die Effekte der Wärmeleitung, -strahlung und -strömung begründet.

Bereits aus den Rissversuchen während der Entwicklung des eHighway-Kettenwerks war bekannt, dass ein auf rund 3 m verkürzter Hängeraabstand das



Bild 19: Verhalten des durch Abschmelzen per Stromabnehmer gerissenen Fahrdrabtes rund 1 s nach Fehlereintritt und auf 3 m verkürztem Hängerabstand bei Fehlereinwirkung etwa 55 m vor dem Festpunkt.



Bild 20: Einschlagversuch mit 600 kg schwerem Rohrbündel kurz vor (*oben*) und nach (*unten*) dem erstmaligen Berühren der Oberleitung.

Herabfallen des gerissenen Fahrdrabtes bei unbeschädigten Hängern in den gefährdeten Bereich verhindern kann. Diese Ergebnisse bestätigten sich auch während der Rissversuche (Bild 19). In ausgewählten Bereichen, beispielsweise im Bereich von Autoverlad, Bahnübergängen sowie Haltepunkten und Bahnhöfen, wird durch verkürzte Hängerabstände die mechanische Gefährdung durch herabfallende oder herabhängende Komponenten bei einem Leiterriss der Oberleitung reduziert. Das Erkennen des Fehlers und Beseitigung der elektrischen Gefährdung erfolgt durch die Kettenwerksüberwachung mit Auslösung.

Die Erhöhung der Zugkraft von 8 auf 10 kN wirkte sich nicht auf die Reaktionszeit des Überwachungssystems aus. Infolge der höheren Zugkräfte erhöht sich jedoch das Risiko von Beschädigungen des BzII10-Hängerseils insbesondere bei unter 500 mm langen Hängern und nochmals signifikant bei Hängertängen unter 300 mm.

Bild 20 zeigt die Einschlagversuche durch das 600 kg schwere Rohrbündel, das den Baum simuliert. Infolge dieser Einwirkungen kam es zu keinem Riss der Längsleiter. Aufgrund der starken seitlichen Auslenkung mit dafür notwendigen zusätzlichen Seillängen wurden die Gewichte an den Gewichtssäulen stark beschleunigt. Auch hier erkannte die Kettenwerksüberwachung mit Auslösung zuverlässig diese Fehlerzustände.

Während der Versuche wurden auch Videoaufnahmen zum seitlichen Fallverhalten gespeichert und mit dem Oberleitungs- und Stromabnehmerbereich nach EN 50122-1 verglichen. Es zeigte sich unter Berücksichtigung der Versuchsdurchführung, dass ohne eine beschleunigende Querkraft zum Beispiel infolge einer Querung einer Oberleitung durch einen LKW mit Ladekran die Gewichtskraft dominiert. Wie weit der Fahrdrabt seitlich von der Gleisachse auf metallische Strukturen trifft, hängt von der Fehlereinwirkung ab. Ist ein Fahrzeug beteiligt, wird der Fahrdrabt in der Regel das Fahrzeug berühren und anschließend seitlich neben dem Lichtraumprofil zum Liegen kommen. Die Versuche haben gezeigt, dass die heute in Deutschland üblichen 4 oder 5 m Breite des Oberleitungsbereichs in Höhe der Schienenoberkante (SO) große Sicherheiten enthalten. Durch eine weitergehende Auswertung der Versuchsergebnisse verbunden mit theoretischer Simulation des Fallverhaltens gerissener Leiter könnte man die heutigen Vorgaben an den Stand der Technik anpassen und länderspezifische Unterschiede berücksichtigen.

6 Fazit und Ausblick

Die Kettenwerksüberwachung mit Auslösung stellt eine neuartige Schutztechnik für Oberleitungsanla-

gen dar. Das von der SMO nach neuesten Sicherheitsstandards und -vorgaben entwickelte Produkt *Sicat CMS Safe* wird nach finaler Qualifizierung die sicherheitsbezogene Kettenwerksüberwachungsfunktion mit Abschaltung mit der Sicherheitsanforderungsstufe SIL 2 bereitstellen. *Sicat CMS Safe* kann selektiv Fehler von betrieblichen Zuständen unterscheiden und den Ort der Fehlereinwirkung lokalisieren. Abhängig vom nachgelagerten Konzept kann binnen kürzester Zeiten die Stromversorgung im betroffenen Speisebereich abgeschaltet sowie die Fahrleitung kurzgeschlossen und geerdet werden. Sind Freischalt- und Erdungselemente in Schaltgruppen verfügbar und in der Hoheit der Kettenwerksüberwachung, so lässt sich abhängig vom Betriebskonzept automatisiert der Fehler isolieren und der restliche Speisebereich zur Wiederzuschaltung vorbereiten.

Die gewählte Lösung der Kettenwerksüberwachung mit Auslösung ermöglicht bei Bestandsanlagen mit Oberleitungen wie auf der Vereina-Linie die Implementierung zusätzlicher Sicherheitsanforderungen. Auf wirtschaftliche Art und Weise werden die notwendige Sicherheit und Verfügbarkeit ohne langwierigen Umbau auf eine Stromschienenoberleitung sichergestellt. Neben Anwendungen wie der des Autoverlads lässt sich auch die Personensicherheit auf Bahnsteigen, an Bahnübergängen und in Bereichen mit erhöhter Risswahrscheinlichkeit im notwendigen Verhältnis zur Anlagensicherheit umsetzen. Zu diesem Schluss kommt auch der vom EBA anerkannte Plan- und Abnahmeprüfer [29].

Alle Projektbeteiligten sind vom Potenzial der Kettenwerksüberwachung mit Auslösung persönlich überzeugt und haben die notwendigen Herausforderungen eines höchst komplexen, vielfältigen und spannenden neuen Schutztechnikprojekts gern angenommen. Nur durch die hohe Motivation, Kompetenz, Zielorientierung und die individuelle persönliche Unterstützung konnte gemeinsam der hier vorgestellte Stand erreicht werden. Ein weiterer Dank gilt den unterstützenden Unternehmen, die die notwendigen Finanzmittel bereitgestellt und die Umsetzung einer Idee zu einer technischen Lösung gefördert haben. Möglich wurde dieses Vorhaben nur, weil einerseits Siemens die notwendige Technologie vor Jahren entwickelt und erfahrene Partner einbezogen hat und weil andererseits ein technologiefreundlicher Betreiber wie die RhB diese Lösungen durch Mitwirken im Anforderungsprozess verbessert hat und bei positiver Abwägung von Chancen und Risiken gewillt ist, sie die nächsten Jahrzehnte hindurch zu betreiben.

Literatur

- [1] Florin, C.; Arnold, T.: Der Vereina-Tunnel zwischen Erfolg und neuen Herausforderungen. In: Schweizer Eisenbahn-Revue, H. 07/2020.
- [2] Verordnung 352/2009/EG: Verordnung über die Festlegung einer gemeinsamen Sicherheitsmethode für die Evaluierung und Bewertung von Risiken gemäß Artikel 6, Absatz 3 Buchstabe a, der Richtlinie 2004/49/EG des Europäischen Parlaments und des Rates. In: Amtsblatt der Europäischen Union L 108 vom 29.04.2009, S. 4–19.
- [3] Würzler, D.: Sicherheitsanforderungen Betriebskonzept Mischverkehrs zug des RhB Autoverlad Vereina. Erstellt von ENOTRAC AG im Auftrag der RhB Rhätische Bahn AG, Juli 2019.
- [4] Der Schweizerische Bundesrat: Verordnung über Bau und Betrieb der Eisenbahnen (Eisenbahnverordnung, EBV). Dokument SR 742.141.1 vom 15.05.2018.
- [5] Das Eidgenössige Department Für Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation (BAV): Ausführungsbestimmungen zur Eisenbahnverordnung (AB-EBV), gestützt auf Art. 81 der EBV, Dokument SR 742.141.1, vom 01.07.2016.
- [6] EN 50122-1:2011 + A1:2011 + AC:2012 + A2:2016 + A3:2016 + A4:2017: Bahnanwendungen – Ortsfeste Anlagen – Elektrische Sicherheit, Erdung und Rückleitung – Teil 1: Schutzmaßnahmen gegen elektrischen Schlag.
- [7] EN 50110-1:2013 Betrieb von elektrischen Anlagen – Teil 1: Allgemeine Anforderungen.
- [8] EN 50110-2:2010: Betrieb von elektrischen Anlagen – Teil 2: Nationale Anhänge.
- [9] EN 50633 Bahnanwendungen – Ortsfeste Anlagen – Schutzprinzipien für Wechselstrom- und Gleichstrom-Bahnenergieversorgungssysteme
- [10] Basler, E.: Sicherheitsbericht Elektrische Anlagen – Phase Planung – für Erweitertes Schutzkonzept durch Kettenwerksüberwachung mit Auslösung. Erstellt von Railetric im Auftrag der RhB Rhätische Bahn AG, Mai 2019.
- [11] EN 61508 (Serie): Funktionale Sicherheit sicherheitsbezogener elektrischer/elektronischer/programmierbarer elektronischer Systeme.
- [12] EN 50562:2018: Bahnanwendungen – Ortsfeste Anlagen – Prozess, Schutzmaßnahmen und Nachweisführung für die Sicherheit für elektrische Bahnanlagen.
- [13] Bechmann, J; Dölling, A.; Hahn, G.; Schwab, H.-J.; Wolpensinger, T.: Überwachungseinrichtung für Oberleitungskettenwerke. In: Elektrische Bahnen 106 (2008), H. 8-9, S. 400–407.
- [14] Hahn, G.: Betriebserfahrungen mit einer Überwachungseinrichtung für Oberleitungen. In: Elektrische Bahnen 107 (2009), H. 4-5, S. 221–225.
- [15] Dölling, A.: Erhöhung der Belastung von Oberleitungen. Dissertation der TU Dresden. 2007.
- [16] Dölling, A.: Nachspanneinrichtungen mit Radspannern für Oberleitungen. In: Elektrische Bahnen 112 (2014), H. 8-9, S. 506–513.
- [17] Dölling, A.; Kurzweil, F.: Oberleitungsentwicklung und -instandhaltung – Nutzung von Zustandsdaten. In: Elektrische Bahnen 113 (2015), H. 12, S. 626–634.
- [18] Dölling, A.; Focks, M.; Gumberger, G.: Fahrleitungserdung – automatisiert mit *Sicat AES*. In: Elektrische Bahnen 111 (2013), H. 3, S. 172–184.

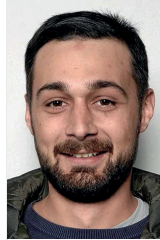
- [19] *Dölling, A.; Leistner, S.*: Lasttrenn- und Trennschalter für DC-Oberleitungsanlagen. In: Elektrische Bahnen 112 (2014), H. 1-2, S. 44–51.
- [20] *Dölling, A.; Leistner, S.*: Trennschalter für AC-Oberleitungsanlagen. In: Elektrische Bahnen 112 (2014), H. 3, S. 104–112.
- [21] *Dölling, A.*: Schalterstellungsmeldung *SicatDMS*. In: Elektrische Bahnen 111 (2013), H. 12, S. 770–776.
- [22] *Reichmann, T.*: Simulation des Systems Oberleitungskettenwerk und Stromabnehmer mit der Finite-Elemente-Methode. In: Elektrische Bahnen 103 (2005), H. 1-2, S. 69–75.
- [23] IEC 60870-5-104:2006/AMD1:2016: Telecontrol equipment and systems – Part 5-104: Transmission protocols – Network access for IEC 60870-5-101 using standard transport profiles.
- [24] EN 50121-4:2016/A1:2019: Bahnanwendungen – Elektromagnetische Verträglichkeit – Teil 4: Störaussendungen und Störfestigkeit von Signal- und Telekommunikationseinrichtungen – Teil 5: Störaussendungen und Störfestigkeit von ortsfesten Anlagen und Einrichtungen der Bahnenergieversorgung.
- [25] EN 50121-5:2016/A1:2019: Bahnanwendungen – Elektromagnetische Verträglichkeit – Teil 5: Störaussendungen und Störfestigkeit von ortsfesten Anlagen und Einrichtungen der Bahnenergieversorgung.
- [26] EN 50119:2020: Bahnanwendungen – Ortsfeste Anlagen – Oberleitungen für die elektrische Zugförderung.
- [27] *Strohhäcker, J.*: Fahrdrabt-Rissversuche, Phase 2 (Versuchsdurchführung und -auswertung). Bericht 2020-EB-005 der Professur Elektrische Bahnen, TU Dresden, 2020.
- [28] *Kießling, F.; Puschmann, R.; Schmieder, A.*: Fahrleitungen elektrischer Bahnen: Planung, Berechnung, Ausführung, Betrieb. Erlangen: Publicis Publishing, 3. Auflage, 2014.
- [29] *Puschmann, R.*: Gutachten zur Bewertung der Fahrdrabt-Rissversuche auf der Strecke 5916 Erlangen – Herzogenaurach zwischen Erlangen-Bruck und Erlangen-Frauenaurach. Igensdorf, 2020.

Autoren



Dr.-Ing. André Dölling (41), Studium des Verkehrsingenieurwesens an der TU Dresden, 2003 bis 2007 wissenschaftlicher Mitarbeiter und Promotion an der Fakultät Verkehrswissenschaften „Friedrich List“, Professur für elektrische Bahnen; seit 2007 tätig bei Siemens AG, jetzt Siemens Mobility GmbH, in diversen Funktionen im Bereich Entwicklung von Fahrleitungskomponenten und -systemen, Vertrieb, Consulting und Kundens Schulungen sowie Produktportfolio- und Produktmanagement für Bahnelektrifizierung/Fahrleitung; Senior Key Expert für Fahrleitungskomponenten und -systeme sowie Lehrbeauftragter für Fahrleitungen an der TU Dresden und Bahnelektrifizierung an der Technischen Hochschule Nürnberg; seit 2021 Plan- und Abnahmeprüfer des Eisenbahn-Bundesamtes.

Adresse: Siemens Mobility GmbH, SMO RI EL CoC COL, Mozartstraße 33b, 91052 Erlangen, Deutschland; Fon: +49 152 09026336; E-Mail: andre.doelling@siemens.com



Ronny Berry (31), Ausbildung zum Elektroinstallateur EFZ; von 2012 bis 2015 Höhere Fachschule an der Schweizerischen Technischen Fachschule Winterthur (STFW) im Bereich Elektrotechnik und Energie; von 2010 bis 2018 bei der Firma Montelec AG als Elektromonteur und Montageleiter für diverse Neu- und Umbauten der Sekundäranlagen in Kraft- und Unterwerken; seit 2018 tätig bei der Rhätischen Bahn AG als Projektleiter Fahrleitung und Energie.

Adresse: Rhätische Bahn AG, Infrastrukturstützpunkt, Austrasse 1, 7302 Landquart, Schweiz; Fon: +41 81 2882236; E-Mail: ronny.berry@rhb.ch



Jürg Bebi (58), Leiter Energie/Fahrleitung bei der RhB.

Adresse: wie oben; Fon: +41 81 2882305; E-Mail: juerg.bebi@rhb.ch