

Auftraggeber:

Südtiroler Transportstrukturen AG
Gerbergasse 60 Via Conciapelli
I-39100 Bozen / Italien

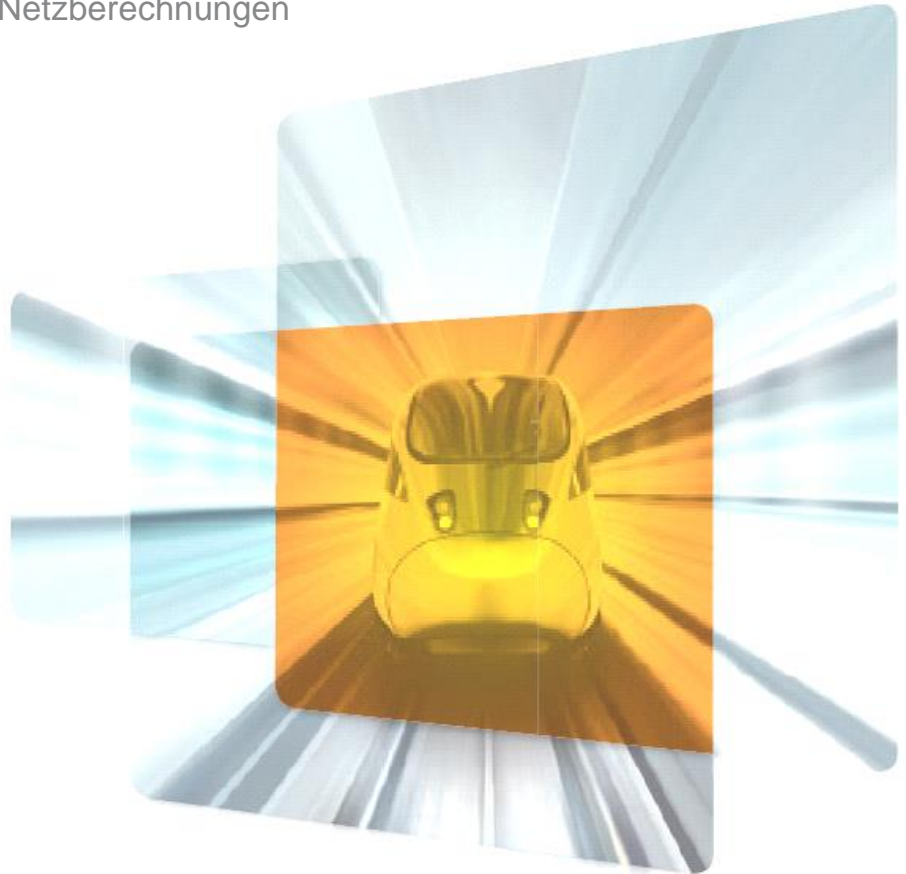
Technischer Bericht

Lastflussberechnungen AC 25 kV 50 Hz

Version: 1.1 vom 25.08.2014

Projekt: 10053-900

Elektrifizierung Vinschgerbahn mit AC 25 kV, 50 Hz
Netzberechnungen



Kontakt

SIGNON Schweiz AG

Aargauerstrasse 250

Ch-8048 Zürich/Schweiz

Ansprechpartner: Dr. Ralf Zabel

Tel.: +41 44 43 53 77-1

Fax: +41 44 533 3707

E-Mail: ralf.zabel@signon-group.com

Web: www.signon-group.com

Technischer Ansprechpartner:

Herr Karsten Preuß

Tel.: +49 351 82992 -37

E-Mail: karsten.preuss@signon-group.com

Änderungsübersicht

Version	Datum	Bearbeiter	Prüfer	Änderung
1.0	23.07.2014	Karsten Preuß	Zabel	keine
1.1	22.08.2014	Karsten Preuß	Zabel	Revision gemäß Besprechung in Innsbruck

Inhaltsverzeichnis

1 Aufgabenstellung	4
2 Lösungsweg.....	4
3 Ausgangsdaten.....	5
3.1 Fahrwegdaten	5
3.2 Fahrzeugdaten	5
3.3 Fahrplandaten	6
3.4 Elektrische Netzdaten.....	7
3.4.1 Speisekonzept.....	7
3.4.2 Fahrleitung und Gleis	7
4 Berechnungen	8
4.1 Variantenübersicht.....	8
4.2 Spannungshaltung.....	9
4.3 Strombelastung der Fahrleitung und Kabel.....	9
4.4 Belastung und Belastbarkeit der Unterwerke	10
4.5 Betriebs- und Kurzschlussströme der Streckenabgänge.....	12
4.6 Gleis-Erde-Spannung	12
4.7 Energiebedarf	13
5 Zusammenfassung.....	15

1 Aufgabenstellung

Für die eingleisig zwischen Mals und Meran auf einer Länge von 60,4 km verlaufende Vinschgerbahn ist eine Elektrifizierung mit Einphasenwechselstrom 25 kV 50 Hz über ein Unterwerk mit zwei Transformatoren in Goldrain/Vetzan (ungefähr Streckenmitte) vorgesehen.

Auf der Basis der von der ELBAS GmbH Dresden (jetzt SIGNON/ Fachbereich ELBAS) bereits für AC 15 kV 16,7 Hz durchgeführten Lastflussberechnungen soll die erforderliche Dimensionierung der Bahnenergieversorgungsanlage, insbesondere der Transformatoren und der Fahrleitungsanlage (letztere in zwei Varianten), für den Normalbetrieb sowie unter Berücksichtigung von Ausfallszenarien (Teil- und Totalausfall des Unterwerkes Goldrain/Vetzan) auf der Grundlage des Dimensionierungsfahrplans (ungleichmäßiger 30-min-Takt mit 6teiligen Fahrzeugen FLIRT ETR 170) ermittelt werden.

2 Lösungsweg

Es werden Simulationsberechnungen mit dem Programmsystem ELBAS WEBANET durchgeführt, das die zeitsynchrone Zugfahrtsimulation und elektrische Netzberechnung komplexer Streckennetze von Wechselstrombahnen mit allen technologischen und elektrischen Verknüpfungen gestattet und insbesondere geeignet ist für die

- Konzipierung neuer und Optimierung bestehender Bahnenergieversorgungsanlagen,
- Ermittlung optimaler und alternativer Speisekonzepte,
- Auslegung von Fahrzeugen sowie
- Berechnung von Fahrplänen.

Die Lösung der Aufgabenstellung erfolgt in den Arbeitsschritten:

- Datenerfassung,
- Modellierung des zu betrachtenden Netzgebietes,
- Durchführung von Simulationsrechnungen,
- Bewertung der Berechnungen und Aussage zur Bemessung der Bahnenergieversorgungsanlagen hinsichtlich folgender Punkte:
 - Energiebedarf ab Unterwerk für eine zweistündige Belastung;
 - Belastung und Dimensionierung der Transformatoreinheiten nach EN 50329:2002¹;

¹ EN 50329:2002-05-01: Bahnanwendungen, Ortsfeste Anlagen, Bahntransformatoren

- Strombelastung und erforderliche Dimensionierung von Fahrleitung und Kabeln nach DIN VDE 0276-620²;
- Spannungshaltung am Fahrzeug-Stromabnehmer entlang der Strecke nach EN 50163:2004³;
- Maximale Gleis-Erde-Spannung nach EN 50122-1:2011⁴
- maximale Betriebs- und minimale Kurzschlussströme der Streckenabgänge (Überprüfung Einstellwerte statischer Überstromschutz).

3 Ausgangsdaten

3.1 Fahrwegdaten

Die Fahrwegdaten, insbesondere die kilometrische Lage von

- Bahnhöfen und Haltepunkten,
- Bogenradien und Topologien,
- Geschwindigkeitseinschränkungen sowie
- ein- und zweigleisigen Abschnitten⁵

lagen beim Auftragnehmer aufgrund vorangegangener Untersuchungen vor und sind in der Anlage P14-0457_DATEN dokumentiert.

3.2 Fahrzeugdaten

Auf der Vinschgerbahn ist der Einsatz von FLIRT-Fahrzeugen (Fa. Stadler) als vier- oder sechsteilige Zugkonfiguration vorgesehen. In der vorliegenden Untersuchung wird sowohl für die Dimensionierung der Einphasen-Wechselstrom-25-kV-/50-Hz-Bahnenergieversorgungsanlage als auch für die Energiebedarfsermittlung von sechsteiligen FLIRT-Fahrzeugen ausgegangen. Bei der Bestimmung des Energiebedarfs wird für die Fahrzeuge jeweils von einer verringerten Dauerleistung der Hilfsbetriebe ausgegangen. Die Anlagen P14-0457_DATEN und P14-0457_TFZ_KL zeigen die berücksichtigten Fahrzeugparameter und Kennlinien.

² DIN VDE 0276-620:2010-11: Starkstromkabel – Energieverteilungskabel mit extrudierter Isolierung für Nennspannungen von 3,6/6 (7,2) kV bis einschließlich 20,8/36 (42) kV;

³ EN 50163:2004-07-06: Bahnanwendungen, Speisespannungen von Bahnnetzen

⁴ EN 50122-1:2011-09-01: Bahnanwendungen – Ortsfeste Anlagen – Elektrische Sicherheit, Erdung und Rückleitung – Teil 1: Schutzmaßnahmen gegen elektrischen Schlag

⁵ Zweigleisige Ausweichstellen wurden in den Stationen Marling, Töll, Schnalstal, Latsch, Schlanders, Laas und Spondinig berücksichtigt, nicht jedoch (für den zukünftigen Halbstundentakt erforderlich) in den Streckenabschnitten Staben – Tschars, Goldrain – Holzbrugg und Laas – Eysrs.

Seitens des Auftraggebers wurde für die Fahrzeuge ein Leistungsbegrenzungsdiagramm vorgegeben. Demzufolge wird der Fahrzeugoberstrom (Traktion und Hilfsbetriebe) zwischen der Nennspannung AC 25 kV und der nach EN 50163:2004³ niedrigsten zulässigen nichtpermanenten Spannung AC 17,5 kV bei 135 A konstant gehalten (siehe Tabelle 3.2):

Tabelle 3.2 Spannungsabhängige Leistungs- und Oberstrombegrenzung der sechsteiligen Stadler-FLIRT-Fahrzeuge (Hilfsbetriebscheinleistung 300 kVA) gemäß vom AG vorgegebenem Leistungsbegrenzungsdiagramm					
$U_{FI, \min}$ V	$I_{\text{Traktion, nom}}$ A	Ausnutzung %	$I_{\text{Traktion, begrenzt}}$ A	$I_{\text{Hilfsbetriebe}}$ A	I_{Summe} A
27 500	106	100	106	13	119
25 000	116	100	116	14	130
20 000	145	80	116	18	134
17 000	171	67	114	21	135

In den Berechnungen zum Totalausfall des Unterwerkes Goldrain/Vetzan und Betrieb mittels der Noteinspeisungen in Algund und Mals wurde nach Vorgabe des Auftraggebers für die sechsteiligen FLIRT eine Oberstrombegrenzung von 80 A angesetzt. Die daraus resultierende Fahrzeitverlängerung infolge verringerter Zugkraft beträgt für eine Fahrt von Meran nach Mals ca. 2 min. Durch kürzere Haltezeiten in den Stationen entlang der Strecke können jedoch die vorgegebenen Abfahrtszeiten (Dimensionierungsfahrplan siehe Abschnitt 3.3) weitgehend eingehalten werden.

3.3 Fahrplandaten

Auf der Vinschgerbahn verkehren derzeit je Richtung drei Züge innerhalb von zwei Stunden (abwechselnd Stunden- und Halbstundentakt). Zukünftig ist durchgängig ein Verkehr mit konstanter 30-min-Zugfolge vorgesehen, für den die Streckenabschnitte Staben – Tschars, Goldrain – Holzbrugg und Laas – Eysrs zweigleisig ausgebaut werden sollen. Für die Auslegungsberechnungen zur elektrischen Dimensionierung der Bahnenergieversorgungsanlage wird in Abstimmung mit dem Auftraggeber vom Fahrplan 2011 mit 500er Zügen unter Einbeziehung einer bislang nicht belegten Fahrplantrasse ausgegangen, mit dem ebenfalls ein Verkehr mit zwei Zügen je Stunde und Richtung realisiert werden kann⁶. Hierbei sind örtlich und zeitlich größere Belastungsspitzen zu erwarten als bei einer gleichmäßigen Zugfolge. Die Anlage P14-0457_FPL zeigt diesen Dimensionierungsfahrplan mit Begegnung der Züge ausschließlich in den Bahnhöfen.

⁶ siehe „Grafischer Fahrplan 2011.dwg“, Stand 2010-12-03

3.4 Elektrische Netzdaten

3.4.1 Speisekonzept

Gemäß der Vorgabe des Auftraggebers soll die Vinschgerbahn mit AC 25 kV 50 Hz elektrifiziert und in Goldrain/Vetzan (km 64,762) ein Unterwerk mit zwei Transformatoreinheiten (jeweils 7,2 MVA) errichtet werden, so dass sich zwei einseitig elektrisch versorgte Speiseabschnitte mit einer Länge von ca. 32,5 km (Meran – Goldrain/Vetzan) bzw. 26,6 km (Goldrain/Vetzan – Mals) ergeben. Die Einspeisungen werden jeweils mit einer spezifischen Resistanz von 0,180 Ohm/km und einer Reaktanz von 0,360 Ohm/km bei einer Länge von 200 m angenommen. Die Anlage P14-0457_SCHALT zeigt das elektrische Übersichtsschaltbild der Strecke.

3.4.2 Fahrleitung und Gleis

In den Simulationsberechnungen werden die beiden in der nachstehenden Tabelle 3.4.2 beschriebenen Fahrleitungskonfigurationen berücksichtigt.

Tabelle 3.4.2 Untersuchte Fahrleitungskonfigurationen und Betriebsimpedanzen bei AC 25 kV 50 Hz (Rückstromführung jeweils in beiden Schienen des Gleises)					
Kennung	Beschreibung	Lage A (x-Achse) m	Lage H (y-Achse) m	Resistanz- belag R' Ω/km	Reak- tanzbelag X' Ω/km
K1	Fahrdraht Ri 100 Cu oder CuAg	0,00	5,50	0,1398	0,3410
	Tragseil Cu 65	0,00	6,90		
	Rückleiter 1, Al 127,5 mm ² + Stahl 20,9 mm ² Cat. 785/142	3,20	6,90		
	Rückleiter 2, Al 127,5 mm ² + Stahl 20,9 mm ² Cat. 785/142	3,20	5,30		
	Schienen 2 UIC 50 E5	+/- 0,72	0,00		
K2	Fahrdraht Ri 80 Cu oder CuAg	0,00	5,50	0,1861	0,3640
	Tragseil Cu 40 äquivalent Bz 50 II	0,00	6,90		
	Rückleiter 1, Al 127,5 mm ² + Stahl 20,9 mm ² Cat. 785/142	3,20	6,90		
	Rückleiter 2, Al 127,5 mm ² + Stahl 20,9 mm ² Cat. 785/142	3,20	5,30		
	Schienen 2 UIC 50 E5	+/- 0,72	0,00		

Die in Tabelle 3.4.2 angegebenen Impedanzen gelten für AC 25 kV 50 Hz und Gleis UIC 50 E5 (Rückstromführung in beide Schienen⁷). Sie wurden mit dem Programm ELBAS-

⁷ Die Isolierstöße der Gleisstromkreise sind mittels Trenntransformatoren überbrückt.

IMAFEB/ELEFEB bestimmt, mit dem für Einphasenwechselstrombahnen die magnetischen und elektrischen Feldverteilungen im Querprofil von Fahr- und Freileitungsanlagen unter Zugrundelegung von

- Aufbau und Materialeigenschaften der elektrischen Leiter (Querschnitt, Radius, äquivalenter Radius – Bündelung, Leitfähigkeit, Permeabilität)
- Geometrische Anordnung der Fahrleitungs- bzw. Freileitungsanlage im Querprofil (Koordinaten der Einzelleiter)
- Betriebsfrequenz, Erdleitfähigkeit und Ableitung des Rückleitungssystems

berechnet werden können. Die Berechnung der Betriebsimpedanzen erfolgt nach dem Prinzip der induktiv gekoppelten Leiter-Erde-Schleifen unter Berücksichtigung der Stromverdrängungsvorgänge in ferromagnetischen Leitern.

Für den Strom im Gesamtsystem wurden jeweils 500 A zugrunde gelegt. Der Rückstrom fließt bei beiden Konfigurationen zu jeweils ca. 42 % in den Rückleiterseilen.

4 Berechnungen

4.1 Variantenübersicht

Für die Bestimmung der erforderlichen Leistungsfähigkeit der Bahnenergieversorgungsanlage sind Berechnungen für den Dimensionierungsfahrplan (siehe Abschnitt 3.3) bei Normalbetrieb, Teil- und Totalausfall des 132-kV-/27,5-kV-Unterwerkes Goldrain/Vetzan durchzuführen. Die nachstehende Tabelle 4.1 zeigt die untersuchten Berechnungsvarianten:

Tabelle 4.1 Berechnungsvarianten	
Variante	Beschreibung
VIN_K1_N VIN_K1_U VIN_K1_A	VIN = Dimensionierungsfahrplan mit sechsteiligen Stadler-FLIRT-Fahrzeugen K1 = Fahrleitungskonfiguration 1 (siehe Tabelle 3.4.2) N = Normalbetrieb Unterwerk Goldrain/Vetzan (zwei 7,2-MVA-Transformatoreinheiten) U = Teilausfall Unterwerk Goldrain/Vetzan (eine Transformatoreinheit) A = Totalausfall Unterwerk Goldrain/Vetzan, Noteinspeisung mit je einer Transformatoreinheit 2,0 MVA in Algund und Mals
VIN_K2_N VIN_K2_U VIN_K2_A	wie VIN_K1_~ K2 = Fahrleitungskonfiguration 2 (siehe Tabelle 3.4.2)

4.2 Spannungshaltung

Nach EN 50163:2004³ beträgt bei einer Nennspannung von AC 25 kV die niedrigste zulässige Dauerspannung AC 19 kV und die niedrigste zulässige nichtpermanente Spannung AC 17,5 kV.

Für die untersuchten Berechnungsvarianten wurden die in Tabelle 4.2 ausgewiesenen minimalen Fahrleitungsspannungen ($U_{FI, \min}$) bestimmt.

Tabelle 4.2 Minimale Fahrleitungsspannung in den untersuchten Berechnungsvarianten (siehe Tabelle 4.1)					
Variante	$U_{FI, \min}$ V	Ort Km	Variante	$U_{FI, \min}$ V	Ort Km
VIN_K1_N	25 639	37,33	VIN_K2_N	25 365	37,33
VIN_K1_U	25 192	83,63	VIN_K2_U	24 924	83,63
VIN_K1_A	20 788	60,78	VIN_K2_A	20 393	60,78

Die minimalen Fahrleitungsspannungen liegen in allen berechneten Varianten sicher oberhalb der nach EN 50163:2004³ zulässigen unteren Spannungsgrenzwerte, wobei dies bei Totalausfall des Unterwerkes Goldrain/Vetzan und Versorgung der Strecke über die Noteinspeisungen Algund und Mals auch durch die für die sechsteiligen FLIRT-Fahrzeuge berücksichtigte Oberstrombegrenzung auf 80 A erreicht wird (siehe Abschnitt 3.2).

4.3 Strombelastung der Fahrleitung und Kabel

Die maximale Dauerstrombelastbarkeit einer Kettenfahrleitung mit Fahrdraht Ri 100 (-20 %) und Tragseil Cu 65 beträgt ca. 650 A. Bei Einsatz einer Fahrleitung mit Fahrdraht Ri 80 (-20 %) und Tragseil Bz 50 II beträgt die Dauerstrombelastbarkeit ca. 410 A. Für kurzzeitig auftretende Belastungen sind nach einer hyperbolischen Funktion um ein mehrfaches erhöhte Werte zulässig.

In der Tabelle 4.3 sind die in den untersuchten Varianten in der Fahrleitung erreichten höchsten Dauerstromeffektivwerte dargestellt.

Tabelle 4.3 Maximale Fahrleitungs-Dauerstromeffektivwerte in den untersuchten Berechnungsvarianten (siehe Tabelle 4.1)					
Variante	$I_{FI, EW \max}$ A	Ort Km	Variante	$I_{FI, EW \max}$ A	Ort Km
VIN_K1_N	96	64,750	VIN_K2_N	96	64,750
VIN_K1_U	97	64,750	VIN_K2_U	97	64,750
VIN_K1_A	102	32,900	VIN_K2_A	102	32,900

Der höchste Dauerstromeffektivwert tritt bei Totalausfall des Unterwerkes Goldrain/Vetzan auf und beträgt 102 A. Damit wird die zulässige Strombelastbarkeit bei beiden untersuchten Fahrleitungskonfigurationen sicher eingehalten. Die Anlage P14-0457_IEFF zeigt die Dauerstromeffektivwerte in der Fahrleitung entlang der Strecke für alle berechneten Varianten.

Die Dauerstrombelastbarkeit eines Cu-120-mm²-Kabels beträgt nach DIN VDE 0276-620², HD 620 S2:2010, Teil 10-C, Tabelle 7, Spalte 7 (VPE-Isolierung, zulässige Betriebstemperatur 90 °C, separate Verlegung/keine Bündelung) für erdverlegte Kabel 409 A.

Die höchste Strombelastung einer Unterwerk-Einspeisung beträgt 350 A (1-s-Maximalwert) und 102 A (Dauereffektivwert). Die beiden Einspeisungen des Unterwerkes Goldrain/Vetzan sind mit je zwei und die Rückleitung mit vier Kabeln von jeweils Cu 120 mm² ausreichend dimensioniert.

4.4 Belastung und Belastbarkeit der Unterwerke

Nach EN 50329:2002¹ sind für Bahntransformatoren der Belastungsklasse VI eine dreifache Überlast für einen Zeitraum von einer Minute und eine 1,5-fache Überlast für die Dauer von zwei Stunden zulässig. Die für das Unterwerk Goldrain/Vetzan vorgesehenen Transformatoren sind jedoch nur mit dem 2fachen Nennwert für 5 min und dem 1,5fachen Nennwert für 15 min überlastbar. Für die bei Totalausfall des Unterwerkes Goldrain/Vetzan vorgesehenen Noteinspeisungen in Algund und Mals wird von einer vergleichbaren Überlastbarkeit ausgegangen.

In den Tabellen 4.4.1 und 4.4.2 sind die für den Normalbetrieb, Teil- und Totalausfall des Unterwerkes Goldrain/Vetzan bei Dimensionierungsfahrplan berechneten 5-min-, 15-min und 2-h-Effektivwerte der Scheinleistung der jeweils in Betrieb befindlichen Transformatoren ausgewiesen.

Tabelle 4.4.1 Kennwerte der Transformator-Scheinleistung im Unterwerk Goldrain/Vetzan in den untersuchten Berechnungsvarianten (siehe Tabelle 4.1, Belastbarkeit jeweils 7,2 MVA dauernd – 10,8 MVA für 15 min – 14,4 MVA für 5 min)

Variante	Einheit	$S_{EW, 5 \text{ min}}$ kVA	$S_{EW, 15 \text{ min}}$ kVA	$S_{EW, 2 \text{ h}}$ kVA	Variante	Einheit	$S_{EW, 5 \text{ min}}$ kVA	$S_{EW, 15 \text{ min}}$ kVA	$S_{EW, 2 \text{ h}}$ kVA
VIN_K1_N	TR1	4 038	3 279	2 633	VIN_K2_N	TR1	4 060	3 291	2 642
	TR2	4 714	3 265	2 185		TR2	4 736	3 278	2 192
VIN_K1_U	TR1	6 460	5 080	3 945	VIN_K2_U	TR1	6 493	5 102	3 960

Tabelle 4.4.2 Kennwerte der Transformator-Scheinleistung der Noteinspeisungen Algund und Mals bei Totalausfall des Unterwerkes Goldrain/Vetzan (Varianten VIN_K*_A) bei Dimensionierungsfahrplan (*informativ*)

Fl.-Konf.	Trafo-standort	$S_{EW, 5 \text{ min}}$ kVA	$S_{EW, 15 \text{ min}}$ kVA	$S_{EW, 2 \text{ h}}$ kVA	Fl.-Konf.	Trafo-standort	$S_{EW, 5 \text{ min}}$ kVA	$S_{EW, 15 \text{ min}}$ kVA	$S_{EW, 2 \text{ h}}$ kVA
K1	Algund	4 076	3 191	2 521	K2	Algund	4 088	3 206	2 531
	Mals	3 951	3 007	2 022		Mals	3 948	3 003	2 023

In der Anlage P14-0457_S_UW_BDK ist jeweils der zeitgewichtete Scheinleistungsverlauf für alle berechneten Varianten (siehe Tabelle 4.1) dargestellt.

Die Anlage P14-0457_S_UW zeigt analog den Scheinleistungs-Zeitverlauf der Transformatoren in den berechneten Varianten für die Fahrleitungskonfiguration K2.

Im Unterwerk Goldrain/Vetzan stellt die Belastbarkeit der beiden 7,2-MVA-Transformatoren bei Normalbetrieb bzw. des verbliebenen 7,2-MVA-Transformators bei Teilausfall gegenüber den auftretenden Belastungen eine ausreichende Dimensionierung dar.

Bei Totalausfall des Unterwerkes Goldrain/Vetzan und Dimensionierungsfahrplan würden in den beiden Noteinspeisungen von Algund und Mals kurzzeitig hohe Belastungsspitzen von bis zu 7,5 MVA auftreten. Allerdings ist dieser Belastungsfall, bei dem sich bis zu vier 6teilige Stadler-FLIRT-Fahrzeuge gleichzeitig (Oberstrom jeweils auf 80 A begrenzt) im Speiseabschnitt zwischen Systemgrenze (km 32,3) und Trennstelle Goldrain/Vetzan (km 64,762) befinden, nach Aussage des Auftraggebers nicht relevant:

- Ein Totalausfall des Unterwerkes Goldrain/Vetzan, d. h. der gleichzeitige Ausfall der dort befindlichen zwei Transformatoren oder der beiden 3-AC-/132-kV-Einspeisungen des Unterwerkes ist wenig wahrscheinlich.
- Die Noteinspeisungen in Algund und Mals sollen insbesondere im Fall von Fahrleistungsstörungen an Bahnübergängen, bei denen die Energieversorgung durch das Unterwerk Goldrain/Vetzan unterbrochen werden kann, einen Havariebetrieb gewährleisten.
- Als Havariebetrieb muss ein Verkehr mit einem Zug je Stunde und Richtung durchführbar sein (Dimensionierungsfahrplan: zwei Züge je Stunde und Richtung).
- Der Oberstrom der Fahrzeuge soll im Havariefall bis auf 40 A reduziert werden.
- Bei Havarien obliegt dem Fahrdienstleiter die Koordination der Zugläufe, so dass die je Noteinspeisung maximal zur Verfügung stehende Leistung von 2 MVA nicht überschritten wird.

4.5 Betriebs- und Kurzschlussströme der Streckenabgänge

Für den sicheren Betrieb ist die Erkennung von Kurzschlüssen erforderlich. Dies soll mit dem statischen Überstromauslöser der Streckenabgangsschalter erfolgen, wozu ein ausreichend großer Unterschied zwischen minimalem Kurzschlussstrom und maximalem Betriebsstrom erforderlich ist. Die minimalen Kurzschlussströme werden unter Berücksichtigung einer Kurzschlussimpedanz von 10 mΩ bestimmt.

In den Tabellen 4.5.1 und 4.5.2 sind jeweils die maximalen Betriebsströme $I_{B,max}$ den minimalen Kurzschlussströmen $I_{K,min}$ der in der jeweiligen Berechnungsvariante beteiligten Streckenschalter gegenübergestellt.

Tabelle 4.5.1 Kenngrößen der Streckenabgänge des Unterwerkes Goldrain/Vetzan in den untersuchten Berechnungsvarianten (siehe Tabelle 4.1)

Variante	Ab-zweig	$I_{B,max}$ kA	$I_{K,min}$ kA	Einstell- wert kA	Variante	Ab-zweig	$I_{B,max}$ kA	$I_{K,min}$ kA	Einstell- wert kA
VIN_K1_N	S1	0,35	1,18	0,45	VIN_K2_N	S1	0,35	1,13	0,45
	S2	0,33	1,30	0,45		S2	0,33	1,25	0,45
VIN_K1_U	S1	0,35	1,18	0,45	VIN_K2_U	S1	0,35	1,13	0,45
	S2	0,34	1,30	0,45		S2	0,34	1,25	0,45

Tabelle 4.5.2 Kenngrößen der Noteinspeisungen Algund und Mals bei Totalausfall des Unterwerkes Goldrain/Vetzan (Varianten VIN_K*_A)

Fl.-Konfig.	Einspei-sung	$I_{B,max}$ kA	$I_{K,min}$ kA	Einstell- wert kA	Fl.-Konfig.	Einspei-sung	$I_{B,max}$ kA	$I_{K,min}$ kA	Einstell- wert kA
K1	Algund	0,31	0,69	0,45	K2	Algund	0,32	0,67	0,45
	Mals	0,24	0,77	0,40		Mals	0,24	0,75	0,40

Die Unterscheidung von Betriebs- und Kurzschlussströmen durch den Überstromschutz ist in allen untersuchten Berechnungsvarianten (Normalbetrieb, Teil- und Totalausfall des Unterwerkes Goldrain/Vetzan für beide Fahrleitungskonfigurationen) sicher möglich.

Die Anlage P14-0457_KS zeigt den Stromverlauf bei einem Kurzschluss entlang der Strecke für alle berechneten Varianten gemäß Tabelle 4.1.

4.6 Gleis-Erde-Spannung

Der Bewertung der Bahnenergieversorgungsanlage hinsichtlich der zulässigen Gleis-Erde-Spannungen liegt die Europäische Norm EN 50122-1:2011⁴ zugrunde. In dieser Norm sind für Wechselstrombahnen u. a. folgende Grenzwerte festgelegt:

Tabelle 4.6 Höchste zulässige abgreifbare Spannungen bei Wechselstrombahnen

Kurzzeit		Langzeit	
Zeitdauer s	Grenzwert V	Zeitdauer s	Grenzwert V
0,3	480	1	75
0,5	220	300	65
< 0,7	155	> 300	60

Die Berechnungen sind mit einer Zeitschrittweite von einer Sekunde durchgeführt worden. Die 1-s-Maximalwerte dürfen laut EN 50122-1:2011⁴ die Spannung von 75 V nicht überschreiten.

Für die beiden untersuchten Fahrleitungskonfigurationen wurden maximale bezogene Gleis-Erde-Spannungen von 4,3979 V/100 A (K1) bzw. 4,3908 V/100 A (K2) ermittelt.

Bei einem maximalen Betriebsstrom von 350 A (siehe Abschnitt 4.5) ergibt sich damit eine höchste Gleis-Erde-Spannung von ca. 16 V, so dass der nach EN 50122-1:2011 dauernd zulässige Wert von 60 V überall entlang der Strecke sicher eingehalten wird.

Bei einem maximalen Kurzschlussstrom in der Nähe der Einspeisung von ca. 2,3 kA (Normalbetrieb Unterwerk Goldrain/Vetzan) würde die höchste Gleis-Erde-Spannung ca. 103 V betragen. Bei einer Abschaltung des Kurzschlusses innerhalb einer Zeitdauer von weniger als 0,7 s wird der nach EN 50122-1:2011⁴ zulässige Maximalwert von 155 V eingehalten.

4.7 Energiebedarf

Den absoluten und den spezifischen Energiebedarf für zwei Stunden Hauptverkehrszeit bei Dimensionierungsfahrplan zwischen Meran und Mals zeigt die Tabelle 4.6.1:

Tabelle 4.6.1 Absoluter und spezifischer Energiebedarf ab Unterwerk (2 h Dimensionierungsfahrplan, sechsteilige Stadler-FLIRT-Fahrzeuge mit 30 kVA Hilfsbetriebe-Scheinleistung, Normalbetriebsvarianten lt. Tabelle 4.1)

Variante	$E_{\text{ges, 2 h}}$ kWh	E_{spez} Wh/tkm	Variante	$E_{\text{ges, 2 h}}$ kWh	E_{spez} Wh/tkm
VIN_K1_N	3 342	31,02	VIN_K2_N	3 530	32,77

Bei der Energiebedarfsermittlung wurde für die Hilfsbetriebe-Scheinleistung der Fahrzeuge als Dauerwert 30 kVA anstelle des Nennwertes von 300 kVA berücksichtigt.

In der nachstehenden Tabelle 4.6.2 sind für beide Fahrleitungskonfigurationen die je Unterwerksteil (je Transformator) innerhalb von zwei Stunden Hauptverkehrszeit gelieferte und zurückgespeiste Energie ausgewiesen. Für die Rückspeisung wurde die maximale Bremsspannung der FLIRT-Fahrzeuge mit 27,6 kV berücksichtigt.

Tabelle 4.6.2 Ins Fahrleitungsnetz gelieferte und von dort zurückgespeiste Energie je Unterwerks-Transformator (2 h Dimensionierungsfahrplan, sechsteilige Stadler-FLIRT-Fahrzeuge mit 30 kVA Hilfsbetriebe-Scheinleistung, Normalbetriebsvarianten lt. Tabelle 4.1)

Variante / UW-Transformator	$E_{\text{geliefert, 2 h}}$ kWh	$E_{\text{bezogen, 2 h}}$ kWh	Variante / UW-Transformator	$E_{\text{geliefert, 2 h}}$ kWh	$E_{\text{bezogen, 2 h}}$ kWh
VIN_K1_N			VIN_K2_N		
Goldrain Tr. 1	2412,8	551,7	Goldrain Tr. 1	2432,0	465,0
Goldrain Tr. 2	1915,7	483,4	Goldrain Tr. 2	1924,6	409,5

Die berechneten Energiebedarfswerte zeigen energetische Vorteile für den Einsatz einer Fahrleitung gemäß Konfiguration K1. Um möglichst niedrige Energiebedarfswerte zu erzielen, spielt jedoch auch die möglichst vollständige Nutzung der zur Verfügung stehenden Bremsenergie eine Rolle. Die maximale Bremsspannung der Fahrzeuge (zulässige Werte nach EN 50163:2004³ innerhalb der oberen Grenzen $U_{\text{max1}} = 27,5 \text{ kV}$ und $U_{\text{max2}} = 29,0 \text{ kV}$) sollte daher möglichst deutlich über der Einspeisespannung des Unterwerkes Goldrain/Vetzan (27,5 kV) liegen.

5 Zusammenfassung

Für die Vinschgerbahn (Meran – Mals) ist eine Elektrifizierung mit AC 25 kV 50 Hz unter Errichtung eines redundant ausgelegten Unterwerkes in Goldrain/Vetzan (nahe der Streckenmitte) vorgesehen. In der vorliegenden Untersuchung wurden mittels Lastflussberechnung die elektrischen Verhältnisse für den Zugbetrieb mit 6teiligen Stadler-FLIRT-Fahrzeugen (siehe Abschnitt 3.2) unter Dimensionierungsfahrplan (30-min-Takt mit unregelmäßiger Zugfolge, siehe Abschnitt 3.3) bei Normalbetrieb, Teil- und Totalausfall des Unterwerkes Goldrain/Vetzan bestimmt. Die Ergebnisse sind wie folgt:

- Das Unterwerk Goldrain/Vetzan ist mit zwei 7,2-MVA-Transformatoreinheiten für die bei Normalbetrieb und Teilausfall auftretenden Belastungsanforderungen ausreichend dimensioniert (siehe Abschnitt 4.4).
- Bei einer Fahrleitungsstörung, wo die Energieversorgung durch das Unterwerk Goldrain/Vetzan unterbrochen ist, kann über die beiden Noteinspeisungen Algund und Mals (Belastbarkeit jeweils 2,0 MVA) zwar nicht der untersuchte Dimensionierungsfahrplan, jedoch noch sicher ein Havariebetrieb (ein Zug je Stunde und Richtung) mit 6teiligen Stadler-FLIRT-Fahrzeugen durchgeführt werden (siehe ebenfalls Abschnitt 4.4).
- Die Einspeisungen sind mit jeweils zwei Kabeln und die Rückleitung mit vier Kabeln Cu 120 mm² ausreichend dimensioniert (Abschnitt 4.3).
- Mit den beiden untersuchten Fahrleitungskonfigurationen (siehe Abschnitt 3.4.2) sind sicher gewährleistet:
 - die Spannungshaltung (Abschnitt 4.2 – bei Totalausfall UW Goldrain/Vetzan durch 80-A-Oberstrombegrenzung der Fahrzeuge),
 - die ausreichende Strombelastbarkeit (Abschnitt 4.3),
 - der Kurzschlussschutz (Abschnitt 4.5) und
 - die Einhaltung der zulässigen Gleis-Erde-Spannung (Abschnitt 4.6).
- Die Ergebnisse der Energiebedarfsermittlung für die beiden untersuchten Fahrleitungskonfigurationen sind im Abschnitt 4.7 dargestellt.

Anlagenverzeichnis

P14-0457_DATEN	Blatt 1..14	Ausgangsdaten (Fahrweg-, elektrische, Fahrplan- und Fahrzeugdaten)
P14-0457_TFZ_KL	Blatt 1	Kennlinien der 6teiligen Stadler-FLIRT-Fahrzeuge
P14-0457_SCHALT	Blatt 1	Elektrischer Übersichtsschaltplan der Strecke
P14-0457_FPL	Blatt 1..2	Bildfahrplan (Dimensionierungsfahrplan bei Normalbetrieb und bei Totalausfall UW Goldrain/Vetzan)
P14-0457_UMIN	Blatt 1..2	Minimale Fahrleitungsspannung
P14-0457_IEFF	Blatt 1..2	Maximale Fahrleistungsstromeffektivwerte
P14-0457_S_UW	Blatt 1..2	2-h-Zeitverlauf der Unterwerk-Scheinleistungen
P14-0457_S_UW_BDK	Blatt 1..2	Zeitgewichtete Scheinleistungen der Unterwerke
P14-0457_KS	Blatt 1..2	Kurzschlussstromverlauf

---Ende des Dokumentes---