liche Gesamtkonzept 2030“ – d. h. eine bis zum Jahr 2030 geltende Konzeption zur Stromversorgung in Deutschland. Erarbeitet wurde sie durch das Energiewirtschaftliche Institut an der Uni zu Köln und die Energy Environment Analysis GmbH in Münster.

5 Netzmanagement und Integration von BZ

Ein Schwerpunkt des Kongresses war die erste Bewertung der Studie unter dem Motto: „Wir brauchen Innovation – Heute und Morgen“. Dazu gehören Kraftwerksneubau und Netzausbau. Zur Realisierung, die spätestens bis 2020 abgeschlossen sein müsste, stehen 80 Mrd. Euro zur Verfügung. Erstes Ziel könnte offensichtlich die Modernisierung des Managements für das Verteilungsnetz sein. Dadurch werden im Endeffekt der Energieaufwand und gleichzeitig die CO_2-Emission reduziert.

Bei der Lösung der zuletzt genannten Aufgabe setzt der VDEW auch auf BZ – gegebenenfalls auch als virtuelles Kraftwerk. Gemeint sind BZ-Heizgeräte und KWK-BHKW, die Wärme und Strom liefern. Daneben gibt es aber auch kleine, dezentrale BZ-Anlagen, die den Betrieb der Stromnetze optimieren. Dazu müssen die BZ in ein Kommunikations- und Informationssystem mit einer Leitzentrale eingebunden werden. Die dezentralen BZ-Anlagen können dann als virtuelles Kraftwerk das Lastmanagement ergänzen und dazu beitragen, Täler und Spitzen des Stromverbrauchs zu glätten. Managementsysteme zur Integration von Strom aus EE könnten diese Anwendung der BZ ergänzen.

Allerdings sind diese Anwendungen der BZ für die Energiewirtschaft nicht völlig neu. Bereits vor drei Jahrzehnten begann der Energiekonzern E.ON mit BZ-Tests. Nach eigenem Bekunden wurden dabei die unterschiedlichsten BZ-Typen für die verschiedensten Anwendungen getestet. Die Investitionen in 18 Projekte beliefen sich auf über 100 Mio. Euro. 40 % der Gesamtkosten übernahm E.ON. Im Ergebnis dieser Forschungsarbeiten „konnten ähnliche Ergebnisse bereits als zuverlässige Nischenprodukte eingeführt werden“. Gleiches wurde an anderer Stelle bereits von RWE berichtet.

Literatur

[1] Bundesministerium für Wirtschaft: Strategiepapier zum Forschungsbedarf in der Wasserstoff-Energietechnologie.
[2] DWV: H_2 und BZ-Bericht anlässlich seiner Jahreskonferenz am 22.02.2007.
[3] DWV: H_2 der neue Energieträger.
[4] Energieagentur NRW: BZ-Entwicklungsstand.
[5] Forschungsverbund Sonnenenergie (FVS): Jahresbericht 2004 zum Thema BZ und H_2 (Tagungsband).
[6] *Kabisch, H.*: BZ für die stationäre Versorgung. Elektropraktiker, Berlin: Sonderheft „Erneuerbare Energien“ (2006), S. 64–68.

Schutz ortsveränderlicher Betriebsmittel unter Tage

L. Armbrust, Zielitz; *H.-J. Feigl,* Grünberg (Hess.); *W. Schumann,* Chemnitz

Die ungenügenden Ergebnisse des untertägigen Betriebs mit der normativ empfohlenen elektrischen Schutzeinrichtung erforderten die Suche nach neuen technischen Lösungen. Grundlegende Messungen zur Fehlerstromverteilung zeigen Lösungsansätze. Eine geeignete Messtechnik (RCM) steht zur Verfügung. Ein aktives Messverfahren erfüllt praxisrelevante Forderungen.

1 Elektrische Sicherheit im Bergbau unter Tage

Elektrische Netze unter Tage werden überwiegend als IT-System mit Isolationsüberwachung mit Warnung/Abschaltung betrieben (Bild ❶). Die Anwendung des IT-Systems sichert, unter den besonderen Bedingungen im untertägigen Bergbau, kleine Berührungsströme, geringe Explosions- und Brandgefahr, kontinuierliche Isolationsüberwachung, hohe Zuverlässig- und Verfügbarkeit, Nichtabschaltung im einpoligen Fehlerfall und damit letztendlich eine stabile Versorgung. In [1] und [2] sind normative Festlegungen und Vorgaben für IT-Systeme aufgeführt, die in [3] für das Betreiben weitestgehend geregelt sind. Die Physik des IT-Systems, sein Wirkprinzip, moderne Verfahren der Isolationsüberwachung, Methoden einer selektiven Fehlererfassung, Hinweise für Planer, Errichter und Betreiben, Wahl der Ansprechwerte u. a. werden in [4] und [5] umfassend dargelegt und sind ein wertvoller Fundus für alle Anwender ungeerdeter Systeme.

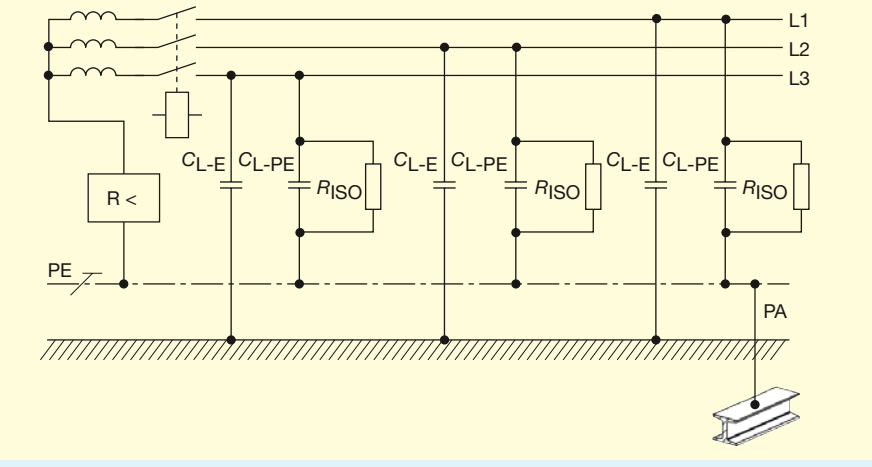
Autoren

Dipl.-Ing. *Lothar Armbrust* ist Leiter der Abteilung Elektrotechnik unter Tage in der Firma K+S Kali, Zielitz; Dipl.-Ing. *Hans-Joachim Feigl* ist Vertriebsleiter Inland der Firma Dipl.-Ing. W. Bender, Grünberg (Hessen); Dipl.-Ing. *Werner Schumann* betreibt ein Ingenieurbüro, Chemnitz.

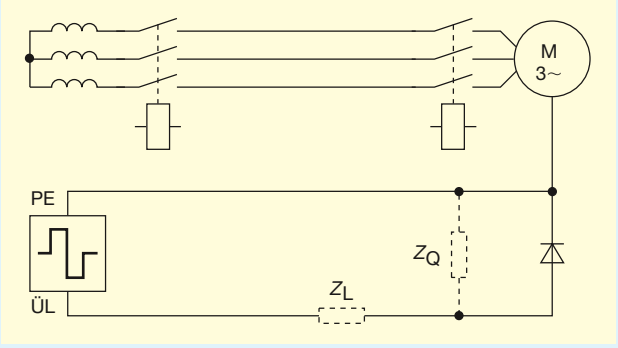
2 Grundlagen und Normen

Die besonderen Sicherheitsanforderungen im Bergbau bedingen, dass spezielle Sicherheitsbestimmungen, Betriebsvorschriften und Arbeitsschutzbestimmungen erlassen werden müssen und einzuhalten sind. Das betrifft im Übrigen auch bestimmte andere Räume, Bereiche und Industriezweige, die durch Sonderbestimmungen reguliert sind.

Die besondere Problemstellung des Personen- und Anlagenschutzes erfordert Regelungen und Festlegungen, die über das „normale“ Maß hinausgehen. Das betrifft im Besonderen Kabel und Leitungen und die zugehörigen elektrischen Schutzeinrichtungen. Die einschlägigen Normen werden durch zusätzliche Verordnungen präzisiert und von den zuständigen und aufsichtsführenden Bergämtern, unter anderem auch für schutztechnische Einrichtungen, sinnvoll ergänzt.



❶ **Prinzipschaltbild eines IT-Systems**
C_{L-E} Leiter-Erde-Kapazität; C_{L-PE} Leiter-Schutzleiter-Kapazität; R_{ISO} Isolationswiderstand



❷ **Prinzip Schleppkabelschutz mit Schleifenüberwachung (5-adrig)**
Z_L Längswiderstand;
Z_Q Querwiderstand

3 Stand der Schutztechnik in IT-Systemen

In IT-Systemen ist die Verwendung folgender Überwachungs- und Schutzeinrichtungen nach [1][2] anerkannt:

- Isolationsüberwachungseinrichtungen,
- Überstrom-Schutzeinrichtungen,
- Fehlerstrom-Schutzeinrichtungn (RCD).

Zum Schutz von Leitungen gegen Gefahren durch mechanische Einflüsse in nicht schlagwetter- und/oder nicht explosionsgefährdeten Grubenbauen sind nach [2] auch Fehlerstromrelais erlaubt.

Bei Anwendung des IT-Systems wird das Wirkprinzip: Kleinhalten des Fehlerstromes bei Körperschluss durch das Erdungsverbot im Zusammenspiel mit dem Potentialausgleich genutzt [4][5]. Kriterien für die Anwendung ungeerdeter Systeme im Bergbau unter Tage sind allgemein bekannt, im einzelnen in der einschlägigen Fachliteratur zu finden und durch messtechnische Untersuchungen [7][8] dokumentiert. Der aktuelle Stand der elektrischen Schutztechnik im Bergbau unter Tage ist gekennzeichnet durch:

- Isolations-Überwachungsgeräte,
- selektive Erdschlusserfassungs- und -suchsysteme,
- allstromsensitive Differenzstrom-Überwachungsgeräte in Verbindung mit Schaltorganen,
- Schleppkabel-Schutzeinrichtungen für ortsveränderliche elektrische Betriebsmittel und
- Fehlerstrom-Schutzeinrichtungen nach Maßgabe ihrer Wirksamkeit in ungeerdeten Systemen und ihrer technischen Kennwerte.

Die genannten Schutzeinrichtungen gewährleisten und sichern in der Regel das Betreiben elektrischer Anlagen und Betriebsmittel. Leistungsstärkere Verbraucher, der Einsatz der Umrichtertechnik und die Zunahme nichtlinearer Verbraucher bedingen neue funktionelle Überlegungen und den Einsatz von neuen gerätetechnischen Lösungen. D. h., der Stand der Technik ist hier das wesentliche Element. Hierin bestehen auch Notwendigkeiten zur Aktualisierung von Normen.

4 Messtechnische Untersuchungen

4.1 Gefährdungsmöglichkeiten

In den Gewinnungs- und/oder Vortriebsorten – also Arbeitsbereiche unmittelbarer bergmännischer Tätigkeit – ist eine Beschädigung der Isolation von Kabeln und Leitungen besonders wahrscheinlich und auch gegeben, da Leitungen mit einer Bemessungsspannung ≥ 250 V aus Kostengründen ohne mechanischen Schutz verlegt werden. Die Leitungen können unter anderem beschädigt werden durch:

- Eindringen von leitfähigem Material (so genannte Spießer),
- Quetschung, bevor ein Kurzschluss zwischen 2 aktiven Leitern entsteht oder
- mechanische Beschädigung des Außenmantels – Freilegung eines aktiven Leiters.

Diese Beschädigungen werden von den eingebrachten Schutzeinrichtungen nicht erkannt. Erst bei Berührung durch den Menschen werden diese wirksam, z. B. RCD. Das beachten natürlich auch die Norm [2] und die Verordnungen [3]. Besondere Abschnitte beinhalten Aussagen und Empfehlungen für den Schutz von Leitungen gegen Gefahren durch mechanische Einflüsse, für Leitungen zu ortsveränderlichen elektrischen Betriebsmitteln, für Leitungen auf diesen und für Leitungen in Abbau- und Ortsbetrieben.

Elektrische Schutzeinrichtungen, zugehörige Leitungen und Anforderungen an den Aufbau dieser Leitungen vervollständigen die normativen Aussagen.

Eine Beschädigung der Isolation von Kabeln und Leitungen muss nicht zwingend zum Ansprechen und Auslösen der für IT-Systeme zwingend nach [1] geforderten Isolationsüberwachungseinrichtungen führen. Damit besteht für den Bergmann die Gefahr der Berührung eines aktiven Leiters unter Einschaltung des menschlichen Körpers.

Der Grad der Gefährdung des Menschen ist dabei von den Parametern Stromweg, Berührungsstromstärke und Durchströmungsdauer abhängig. Bei Vorkommnissen und Elektrounfällen sind nach [4][7][8] folgende Stromwege relevant: Hand-Hand, Hand-Fuß und Hand-Füße. Die mögliche Gefährdung des Menschen ist objektiv gegeben, muss und kann

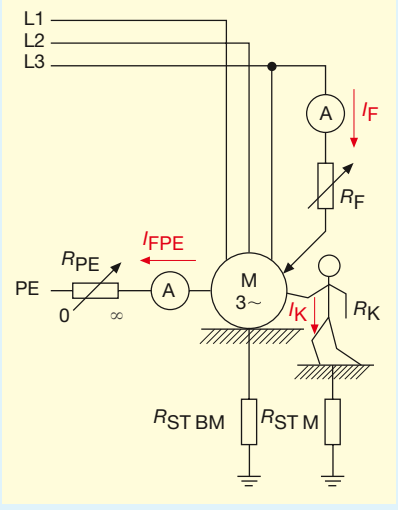
aber durch den Einsatz von modernen Geräten der Schutztechnik minimiert werden, wobei natürlich auch wirtschaftliche Betrachtungen, unter Beachtung eines zulässigen Restrisikos, eine nicht unbedeutende Rolle spielen.

4.2 Aktueller technischer Stand

Die im Punkt 19 von [2] genannte Schutzeinrichtung erfordert in Einheit mit der zugehörigen Leitung die Erfassung von inneren und äußeren Fehlern und ein Abschalten in Verbindung mit einem Schaltgerät. Diese normative Forderung wird so erfüllt, dass eine 5-adrige Leitung mit L1, L2, L3, Überwachungsleiter (ÜL) und PE eingesetzt und eine Leiterschleife ÜL – PE über ein Endglied gebildet wird, das auf dem ortsveränderlichen elektrischen Betriebsmittel installiert ist [2]. In diese Schleife wird ein getakteter Messstrom eingekoppelt und nach Betrag und Polarität ausgewertet. Damit wird die ÜL – PE-Schleife kontinuierlich auf Längs- und Querwiderstand überwacht. Das derzeitige Überwachungsprinzip ist zwingend an die 5-adrigkeit gebunden. Unterbrechungen im ÜL – PE-Kreis erfordern den Einsatz dieser Leitung nach Bild ❷.

Aufgrund wirtschaftlicher und technischer Bedingungen ist die 5-adrige Leitung querschnittsungleich ausgeführt, wobei die verdrillten Überwachungsleiter einen geringeren Querschnitt haben (z. B. NTSWÖU 3 x 50/25 KON + 3 x 2,5 St KON). Werden diese Leitungen im untertägigen Betrieb beispielsweise durch intensiven Trommelbetrieb beansprucht, werden die einzelnen Leiter der Länge nach gestaucht und gedehnt, sodass schon nach wenigen Betriebsstunden der Überwachungsleiter mechanisch überlastet wird und bricht. Damit ist ein weiterer Betrieb nicht möglich. Der so entstehende Kostenfaktor ist nicht zu vertreten und es ergibt sich dringend die Notwendigkeit einer anderen technischen Lösung, die mindestens das bisherige Sicherheitsniveau bieten muss und normativ einzuordnen ist.

Neue gerätetechnische Lösungen, wie die Differenzstrom-Überwachungsgeräte RCM und RCMA, bieten hier Ansatzpunkte für neue funktionelle Überlegungen [5].



❸ Prinzipschaltung zur Messung der Fehlerstromverteilung
R_F Isolationsfehler; R_K Körperwiderstand des Menschen; R_{PE} Widerstand im Schutzleiter; R_{STBM} Standortwiderstand des ortsveränderlichen elektrischen Betriebsmittels; R_{STM} Standortwiderstand des Menschen; I_F ges; Fehlerstrom gesamt; I_{FPE} Fehlerstrom im Schutzleiter; I_K Körperstrom

4.3 Fehlerstromverteilung und Messwerte

Eine wesentliche Grundlage und Voraussetzung für neue funktionelle Betrachtungen und die Prüfung einer geeigneten Gerätetechnik ist die Kenntnis der Fehlerstromverteilung im einpoligen Fehlerfall.

Die Prinzipschaltung „Fehlerstromverteilung" zeigt Bild ❸. Theoretische Grundlage bildet dabei das 1. Kirchhoff'sche Gesetz, mit dessen Hilfe die Ströme gemessen und berechnet werden können.

Bei den Messungen werden verschiedene Randbedingungen beachtet. Diese sind u. a.: Fehlerstromstärke (satter oder widerstandsbehafteter Fehler), veränderbarer Widerstand des Schutzleiters, verschiedene Standortwiderstände (trocken, feucht, nass). Um repräsentative und gesicherte Aussagen zu erhalten, wurden in verschiedenen Gruben (Salz, Erz, Kalk, Spat) viele Messungen vorgenommen. Bei der Auswertung der Messungen wurde festgestellt, dass der Fehlerstrom in trockenen Grubenbauen vollständig (100 %) über den Schutzleiter zurückfließt und selbst in feuchten oder nassen Grubenbauen noch zu ca. 95 %. Die versuchsweise eingesetzte Gerätetechnik – Differenzstrom-Überwachungsgeräte RCM – ermöglichen eine sichere Erfassung der Fehlerströme.

IT-System mit PE-Unterbrechung. Parallel zu den Messungen wurde der Fall betrachtet, dass ein Mensch durchströmt wird, weil er ein fehlerhaftes ortsveränderliches elektrisches Betriebsmittel berührt, dessen Schutzleiteranschluss defekt ist (PE-Unterbrechung).

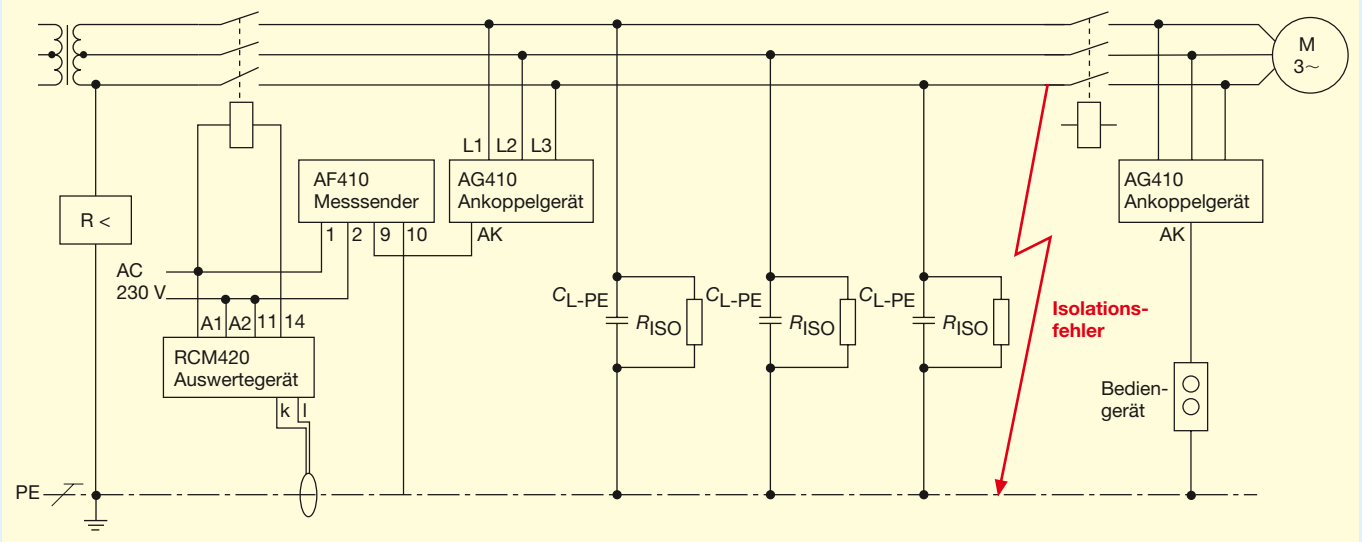
IT-Systeme zeichnen sich in der Regel durch kleine Berührungsströme aus, da diese Systeme meist räumlich kleine Ausdehnungen haben:

- IT-System in Krankenhäusern: $I_K \sim 10$ ... 20 mA.

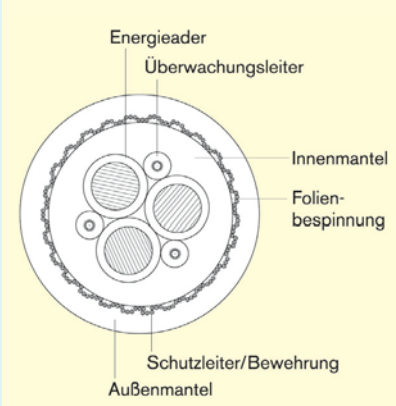
Erforderliche Kabel- und Leitungslängen im Bergbau oder der Industrie, aber auch vorhandene Filterschaltungen in elektrischen Betriebsmitteln, rufen Kapazitäten gegen PE/E hervor, die größere Fehlerströme bedingen:

- IT-System im Bergbau: $I_K < 150$ mA.

Der Strom I_K bei PE-Unterbrechung entspricht somit einer direkten Berührung.



❹ Prinzipschaltbild der PE-Schleifenüberwachung



❺ Leitung für die Energieversorgung und Überwachung von Elektroladern

Im Falle einer PE-Unterbrechung liegt ein 2. Fehler vor, für den die Normen keinen Handlungsbedarf sehen, denn die Schutzmaßnahmen entsprechend DIN VDE 0100-410 berücksichtigen ausschließlich den 1. Fehler.

5 Alternative Lösung zum Überwachen des Schutzleiters

5.1 Allgemeine Betrachtungen

Obwohl die Testergebnisse eine Anwendung von RCM-Geräten ermöglichen, haben weiterführende Analysen und Betrachtungen der Unternehmen K + S Kali und Dipl.-Ing. W. Bender zu der Erkenntnis geführt, nicht die systemeigenen Fehlerströme für die Überwachung des Schutzleiters zu nutzen, sondern ein Superpositionsverfahren (Überlagerungsverfahren) anzuwenden. Weiterhin hätte die RCM-Gerätetechnik auch zu Problemen mit der Steuerung des elektrischen Betriebsmittels (EIN-AUS) sowie bei der Integration der Schutzeinrichtung in ausgeführten Anlagen geführt (Nachrüstung).

5.2 Funktionsprinzip

Zur Überwachung des Schutzleiters in der Zuleitung zum ortsveränderlichen elektrischen Betriebsmittel wird ein aktives Messverfahren angewendet. Es wird eine Messspannung mit einer Frequenz von 1 kHz generiert und in eine Überwachungsschleife eingekoppelt, die aus den 3 aktiven Leitern und dem Schutzleiter besteht. Dieser Messstrom im Schutzleiter wird mittels Wandler und Auswertegerät (Basis RCM) erfasst. Bei einer Änderung der Widerstandverhältnisse im PE führt der Messstrom zu einer Signalgabe, die in der Steuerung des elektrischen Betriebsmittels erfasst wird (EIN-AUS) [9].

5.3 Komponenten der Schutzeinrichtung

Bild ❹ zeigt das neue Prinzip der PE-Schleifenüberwachung und dokumentiert die funktionelle Zuordnung der Einzelkomponenten [9]. Die Schutzeinrichtung ist durch folgende Einzelgeräte gekennzeichnet:

- Im Messfrequenzgenerator wird die Messspannung und der Messstrom erzeugt. Da der Generator über 2 Ausgänge verfügt, können 2 ortsveränderliche elektrische Betriebsmittel parallel überwacht werden.
- Das Ankoppelgerät dient einmal der Anbindung des Messfrequenzgenerators an die aktiven Leiter des IT-Systems und zum anderen zur Verbindung des Bediengerätes auf dem Betriebsmittel. Der PE-Leiter in der überwachten Leitungsstrecke schließt die Messschleife.
- Ein frequenzselektives Strom-Überwachungsgerät kontrolliert die Messschleife auf Unterstrom. Im PE-Leiter ist hierzu ein Messwandler installiert.
- Das Bediengerät ermöglicht die Steuerfunktion für das Betriebsmittel über die Schutzeinrichtung.
  Die Installation der Komponenten erfolgt sowohl im netzseitigen Anschlusskasten als auch auf dem ortsveränderlichen Betriebsmittel.

6 Betriebsergebnisse im Netzbetrieb unter Tage

Für die normgerechte Energieversorgung und Überwachung von Elektroladern werden spezielle Leitungen verwendet (Bild ❺). Die in dieser Leitung integrierten drei Überwachungsleiter sind der Schwachpunkt hinsichtlich der Haltbarkeit der Leitung. Die mittlere fehlerfreie Betriebsstundenzahl liegt bei ca. 2750 h. Ca. 40 % aller notwendigen Leitungswechsel haben ihre Ursache in defekten Überwachungsleitern. Nach mehrmonatiger Bergerprobung wurden in 2006 bei Kali & Salz 14 Elektrolader nachgerüstet. Der Betreiber konstatiert einen fehlerfreien Betrieb der Überwachungseinrichtung und des neuen Leitungstyps (NTSWÖU 3 x 50/25 KON) und plant eine schrittweise Nachrüstung von weiteren E-Ladern.

Literatur

[1] DIN VDE 0100-410 (VDE 0100 Teil 410):1997-01 Errichten von Starkstromanlagen mit Nennspannungen bis 1000 V Teil 410: Schutz gegen elektrischen Schlag.
[2] DIN VDE 0118 - 1,2 und 3 (VDE 0118 Teil 1 bis 3):2001-11 Errichten elektrischer Anlagen im Bergbau unter Tage.
[3] Verordnung des Sächsischen Oberbergamtes über elektrische Anlagen, die der Bergaufsicht unterstehen (ElBergVO) vom 25.04.2001, rechtsbereinigt mit Stand vom 23.05.2004.
[4] *Bender, W.*: Kleine Wechselstromnetze mit Schutzleitungssystem ETZ-A, Bd. 83, H. 3, S. 62–68, 1962.
[5] *Hofheinz, W.*: Schutztechnik mit Isolationsüberwachung VDE-Schriftenreihe 114.
[6] *Hofheinz, W.*: Fehlerstromüberwachung in elektrischen Anlagen VDE-Schriftenreihe 113.
[7] *Schumann, W.*: Gefährdungsanalyse für IT-Netze mit Isolationsüberwachung, Abschaltung, Erdschlusskompensation unter einer Nennspannung von 380 V, Grüna, 1989.
[8] *Schumann, W.; Lewey, W.; Heidel, W.*: Messbericht zu Berührungsströmen, Durchströmungszeiten und Einsatzmöglichkeiten der selektiven Abschaltung, Grüna, 1988.
[9] Bedienungsanweisung „MF-Schleifenüberwachung“, TGH 1402/08.2006 Dipl.-Ing. W. Bender, Grünberg.