

# Physikalische und elektrische Eigenschaften gefüllter Bahnsignalkabel

---

Dipl.-Ing. (FH) Andreas Hoffmann  
Bayerische Kabelwerke AG, Roth

---

Kabel und Leitungen zählen zu den wichtigsten Bestandteilen der Elektrotechnik, denn ohne sie wäre eine Stromübertragung nicht möglich. So werden Kupferkabel beispielsweise zur Übertragung von Schaltsignalen und für die Stromversorgung von Signalen und Weichen an der Bahnstrecke verwendet. Um den Veränderungen in der modernen Schalttechnik gerecht zu werden, wurde in den vergangenen Jahren auch die Kabeltechnik auf den Prüfstand gestellt. Im Auftrag der Deutschen Bahn AG (DB AG) entwickelte die Kabelindustrie ein neues Bahnsignalkabel, welches den strengen Anforderungen an Betriebskapazität und Standhaftigkeit gegenüber negativen Umwelteinflüssen gewachsen ist. Um die konstruktiven Veränderungen zu erklären, werden am Anfang dieses Beitrags die Umwelteinflüsse beschrieben, die auf ein Bahnsignalkabel einwirken und zum Funktionsverlust führen können. Anschließend wird auf die einzelnen Entwicklungsschritte eingegangen, die notwendig waren, um die Funktionen dieses gefüllten und mit einem Schichtenmantel versehenen Kabels sicherzustellen. Hierzu werden auch die wichtigsten elektrischen und mechanischen Eigenschaften beschrieben und in welcher Art und Weise

diese konstruktiv beeinflusst werden können.

Ein wesentlicher Punkt bei der Qualitätssicherung von Signalkabeln ist die Definition des Begriffes „querwasserfest“ für Kabelsysteme sowie die Beschreibung eines allgemein gültigen Prüfaufbaus. Dieser während der Entwicklungsarbeit für die neuen, gefüllten Signalkabel konzipierte Versuch wurde durch den Verband der Elektrotechnik, Elektronik, Informationstechnik e.V. (VDE) aufgegriffen und soll zum Standard für Signalkabel werden. Da die neue Kabeltechnik natürlich nicht flächendeckend ausgetauscht werden kann, wird zum Abschluss darauf eingegangen, wie an bereits verlegten Kabelstrecken die Standhaftigkeit gegenüber schädlichen Einflüssen verbessert werden kann.

## 1 Vorgeschichte

Das Wort Kabel stammt aus dem Arabischen und bedeutet Seil oder Tau. Über Seeleute gelangte der Begriff im 14. Jahrhundert ins Deutsche. Folgerichtig wurden auch die ersten Elektrokabel von Reepschlägern und Seilern hergestellt. Aus dieser Zeit stammen die heute noch in der Kabelindustrie gebräuchlichen Begriffe Ader, Seele, Schlag und Trosse. Mit Beginn der Energieversorgung verlegte man vor etwa 125 Jahren in Deutschland erste Energiekabel mit Bleimantel, in den

1930er Jahren folgte ein weiterer technologischer Durchbruch mit der Verwendung von Kunststoffen als Isoliermaterial und in den 1970er stellte die Verwendung von Glasfasern als Übertragungsmedium den nächsten entscheidenden Quantensprung dar. Kupfer und Aluminium sind jedoch auch heute noch die Hauptmetalle zur Übertragung elektrischer Signale [1]. Die Entwicklung in der modernen Leitungs- und Übertragungstechnik sowie die flächendeckende Inbetriebnahme elektronischer Stellwerke verschärften in den letzten Jahren die Anforderungen an Signalkabel. Moderne Kabel müssen auch bei sich verändernden Peripherien einsetzbar sein und müssen vor allem über die gesamte Lebensdauer absolut längs- und querwasserdicht sein, um Signalstörungen und damit Zugausfälle und Verspätungen zu minimieren. Gemeinsam mit anderen Vertretern aus der Kabelindustrie erhielt die Bayka AG von der DB AG den Auftrag, für die bis zu diesem Zeitpunkt gängige Signalkabeltechnik nach Lastenheft 416.0114 V1.1 einen Ersatz mit längs- und querwasserdichten Kabeln zu entwickeln.

## 2 Umwelteinflüsse auf Signalkabel

Im Allgemeinen sind Bahnsignalkabel für eine Lebensdauer von mehr als 35 Jahren ausgelegt, solange sie fachgerecht behandelt werden. Dies gilt sowohl für die Fertigung und den Transport als auch für die Verlegung sowie eventuelle Baumaßnahmen an der Strecke. Da Bahnsignalkabel meist im Freien verlegt werden, sind sie den verschiedensten Umwelteinflüssen ausgesetzt. So können zum Beispiel Säure aus Regen oder Erde, Schadstoffe in der Luft, Wasser im Kabeltrog, UV-Strahlung, Nagetiere, Baumaßnahmen oder auch Sabotage mehr oder weniger schädigend sein. Auswirkungen auf die Lebensdauer der Kabellesee haben insbesondere eingedrungen

gene Feuchtigkeit, Erwärmung aufgrund elektromagnetischer Induktion, oder die sogenannte „Kabelatmung“, bei der aufgrund eines Temperaturgefälles Luft durch das Kabel „gepumpt“ wird und Feuchtigkeit kondensieren kann. Auch durch nicht fachgerechte Verlegearbeiten kann das Kabel nachhaltig beschädigt werden, darum muss besonderes Augenmerk auf den sorgsamsten Umgang und die fachtechnisch richtige Verlegung beachtet werden. Darüber hinaus kann durch Baumaßnahmen an der Strecke die Schutzhülle bzw. der Kabelmantel durch verschiedene Arbeitsgeräte (Bagger, Schaufel, Hammer usw.) beschädigt werden.

Um diese Belastungen an einem Kabel zu simulieren, werden Schlagversuche nach DIN EN 60811-1-4 durchgeführt. Dabei fällt ein Gewicht, das je nach Spezifikation ausgelegt ist (Auslöswinkel, Fallhöhe, Masse) auf das Kabel. Meist geschieht das bei niedrigen Temperaturen, da das Material in diesem Zustand spröder ist. Bei dieser Prüfung dürfen am Innenmantel keine bleibenden Deformierungen oder gar Risse entstehen. Ist der Kabelmantel erst einmal beschädigt, kann sich bei den Signalkabeln, die nach altem Lastenheft konstruiert sind, unbemerkt Wasser bzw. Feuchtigkeit ausbreiten und in der Folge die Betriebskapazität erhöhen. Auch das Unterschreiten der minimal zulässigen Biegeradien während des Heraushebens aus einem Kabeltrog führt zu Schäden am Kabel, denn bei ungünstigen Witterungsverhältnissen (tiefe Temperaturen) könnte der Innenmantel bersten. Die Kältebeständigkeit (Kältebiegung- und -dehnung) eines Kabels und damit der minimale Biegeradius wird nach DIN EN 60811-1-4 geprüft. Dabei wird das gekühlte Kabel je nach Spezifikation entweder einmal oder mehrmals über einen Dorn mit festgelegtem Durchmesser gebogen. Es dürfen keine nachhaltigen Beschädigungen zurückbleiben.

Soll an der Strecke ein zusätzliches Kabel mit eingezo-gen werden, kann unerwünschte Schleifwirkung (Sand als Schleifmittel) die Kabelmäntel beschädigen bzw. zerstören und durch eindringendes Wasser zu einer Kapazitätserhöhung führen. Da die Kabel in der Natur in Trögen oder im Boden verlegt werden, können sie von Nagetieren angefressen werden. Um dieser Gefahr zu begegnen, wurden mit feuerverzinkten Stahlbändern bewehrte Kabel entwickelt. Somit kann der Nager zwar die äußere Schutzhülle durchbeien, jedoch nicht die Bewehrung. Der Innenmantel bleibt unbeschädigt, das Kabelinnere vor „Wassereinbrüchen“ durch Löcher im Mantel geschützt, und die Funktion des Kabels somit garantiert.

### 3 Begriffsklärung Querwasserfestigkeit

Was ist Querwasser? Der Begriff Querwasser tauchte im Zusammenhang mit den Bahnsignalkabeln der alten Generation auf, denn in manchen Fällen fand man keine Erklärung, wie und wo nachweislich Feuchtigkeit in die Kabelstrecke eindringen konnte. Beinahe alle Materialien, außer z.B. Metalle, sind dampfdurchlassig. Auch Kunststoffe haben eine Dampfdiffusionszahl und sind durchlässig für Wassermoleküle. Ein plausibler Erklärungsansatz war also, Feuchtigkeit könnte durch den Kunststoffmantel in das Kabel diffundieren. Diese These wurde durch einen praktischen Versuch bestätigt. Hierzu wurde ein Stück Kunststoffrohr unter Wasser getaucht und mit absolut trockener Luft durchströmt. In diesem Luftstrom wurden dann die aufgenommenen Wassermoleküle gemessen, welche durch den Kunststoffmantel drangen. Somit war der Beweis erbracht, dass Kunststoffe bereits Feuchtigkeit in geringsten Mengen durchlassen. Im Unterschied zum Versuchsaufbau werden im Boden verlegte Kabel nicht von getrockneter Luft durchströmt, daher

stellt sich im Kabel eine Art Gleichgewicht ein. Das bedeutet, irgendwann ist die Luft im Kabel mit Feuchtigkeit gesatigt, und es kann keine zusätzliche Feuchtigkeit in das Kabel eindringen bzw. aufgenommen werden.

Die schwerwiegendste Auswirkung eingedrungener Feuchtigkeit ist die Erhöhung der Betriebskapazität eines Signalkabels und somit eine Veränderung der ubertragungseigenschaften. Erhöht sich die Betriebskapazität über den definierten zulässigen Wert, kann dies eine ganze Kette an unerwünschten Folgen auslösen, denn es erfolgt im elektronischen Stellwerk automatisch eine Funktionsprüfung an den angeschlossenen Geräten. Erfolgt die Signalantwort (auf Grund der erhöhten Kapazität) nicht mehr innerhalb des zulässigen Zeitfensters, wird das als fehlerhaft erkannte Signal aus sicherheitstechnischen Gründen in den Haltebegriff und Störungszustand gesetzt. Diese längeren Prufsignallaufzeiten haben wiederum Zugverspatungen und damit sowohl finanzielle als auch Imageschäden für die Bahnbetreiber zur Folge. Eine Weiter- bzw. Neuentwicklung der lagenverseilten Bahnsignalkabel erschien aus Sicht der DB also zwingend notwendig. Im Jahr 2010 stellte sie daher an ein Team aus langjährigen Entwicklungspartnern die Anforderung, ein längs- und querwasserdichtes, äußerst widerstandsfähiges Signalkabel zu konstruieren. Da eine mechanische Beschädigung nie ganz verhindert oder ausgeschlossen werden kann, sollte das Kabel zumindest gegen die negativen Folgeerscheinungen von eindringendem Wasser möglichst gut geschützt werden.

Der Nachweis der Langswasserfestigkeit war noch relativ einfach anhand der Norm DIN VDE 0472 Teil 811 Prüfverfahren A möglich. In dieser Norm gilt das Kabel als langswasserfest, wenn ein 3 m langes Kabelstück über 24 Stunden ohne Wasseraustritt an der offenen Seite einem Wasser-

druck von 0,1 bar standhält. Kabel ohne besondere Schutzmaßnahmen sind, wenn sie gefertigt werden, immer längswasser-durchlässig. Dies bedeutet, sollte an einem Kabelende ein Wassereintritt sein, wird sich die Feuchtigkeit im Kabel ausbreiten und, solange ein Gefälle vorhanden ist, am anderen Kabelende wieder austreten. Da aber Wasser, bzw. Feuchtigkeit, in den meisten Fällen im Kabel unerwünscht ist, sind verschiedene längswasserfeste Kabel am Markt.

Mit dem Nachweis der Querwasserfestigkeit verhielt es sich hingegen deutlich schwieriger, da der deutschen Kabelindustrie kein genormtes Verfahren für die Prüfung bekannt war. Es existieren lediglich Normen und Prüfungen, mit denen die Werte der Wasserdampfdiffusion ermittelt werden. Um den bis zu diesem Zeitpunkt bloßen Marketingbegriff „querwasserfest“ zu einem technisch nachweisbaren Qualitätsmerkmal zu verändern, wurde von der Kabelindustrie eine neue Anweisung zur Prüfung der Querwasserfestigkeit ausgearbeitet. Die komplette Prüfung inklusive Prüfaufbau kann dem DB LH 416.0113 V2.1 Abschnitt 8.6 entnommen werden. Die Prüfung bestätigt die Querwasserfestigkeit von Kabeln mit Schichtenmantel, und somit gelten die neuen, gefüllten Signalkabel heute als Stand der Technik.

#### 4 Entwicklungsarbeit für das querwasserfeste Bahnsignalkabel

Solange Wasser und Feuchtigkeit von außen nicht durch den Kabelmantel zur Kabelleseele vordringen kann, ist das Kabel querwasserfest, so hatten viele Fachleute den Begriff querwasserfest für sich definiert. Lange Zeit galt bei Signalkabeln ein Kabelmantel aus PVC oder PE als „dicht“. Da jedoch auch diese Kunststoffe minimale Mengen an Feuchtigkeit durchlassen, fand ein Umdenken statt. Kabel

mit einem reinen Mantel aus PVC oder PE und anderen Kunststoffen werden als bedingt querwasserdicht bezeichnet, d. h., kurze Belastungen durch Wasser (Kabel liegt z. B. kurz im Wasser) kann das Kabel überstehen, aber bei einer Dauerbelastung, entweder durch Wasser oder Feuchtigkeit (Erdboden oder ähnliches), wird sich längerfristig auch eine gewisse Luftfeuchtigkeit im Kabel einstellen, welche bei Signalkabeln negative Auswirkungen auf die Übertragungseigenschaften hat.

Aufgrund der fehlenden Dampfdichtigkeit wird für solche Kabel nur eine Metallschicht als absolut wasserdicht angesehen (Wasserdampfdiffusionswiderstandszahl Aluminium:  $\infty$ ), für ein absolut querwasserdichtes Kabel kam also nur der Aufbau mit einem Schichtenmantel in Frage. Das bedeutet, dass ein Aluminiumband längseinlaufend um die Kabelleseele geformt und an der Nahtstelle verklebt wird. Über dieses Aluminiumband wird dann der Kabelmantel aus PE aufgebracht. Um die Anforderungen der DB zu erfüllen, standen verschiedene Möglichkeiten für eine längs- und querwasserdichte Kabelkonstruktion offen. Die einzelnen Verfahren wurden mit ihren jeweiligen Vor- und Nachteilen zur Erlangung der Längs- bzw. Querwasserfestigkeit betrachtet und bewertet. Zusätzlich wurde die Konstruktion hinsichtlich der Anfälligkeit bei Montagefehlern analysiert.

In Tab. 1 werden einige mögliche Verfahren für die Konstruktion des Schichtenmantels mit ihren Vor- und Nachteilen genannt. Dabei gilt grundsätzlich die Unterscheidung zwischen Trockenfüllung (verschiedene trockene quellfähige Materialien; in Tab. 1 mit „t“ gekennzeichnet) und Petrolatfüllung (verschieden fettartige Füllmassen; in Tab. 1 mit „f“ gekennzeichnet). Nach der Betrachtung möglicher Füllmaterialien wurden von der liefernden Kabelindustrie folgende Verfahren vorgeschlagen und diskutiert [2]:

| Füllmaterial  | Art | Vorteile  | Nachteile  |
|---|-----|---|--|
| Quellpulver   | t   | + Einfach zu Verarbeiten<br>+ Dicht durch Aufquellen bei Eindringen von Wasser  | - Nur dicht bei Wasser, nicht bei feuchter Luft<br>- Atemschutz bei Verarbeitung empfehlenswert                    |
| Quellvlies  | t   | + Einfach zu Verarbeiten<br>+ Dicht durch Aufquellen bei Eindringen von Wasser<br>+ Quellpulver in gebundener Form                  | - Nur dicht bei Wasser, nicht bei feuchter Luft<br>- sehr teuer  |
| Quellgarn   | t   | + Einfach zu Verarbeiten<br>+ Dicht durch Aufquellen bei Eindringen von Wasser<br>+ Quellpulver in gebundener Form                  | - Nur dicht bei Wasser, nicht bei feuchter Luft<br>- sehr teuer<br>- Sinnvolle Verwendung nur in „Viererezwickeln“ |
| Petrolat  | f   | + Dicht gegen Wasser und Feuchtigkeit<br>+ verschließt alle Lücken<br>+ Leicht zu verarbeiten                                       | - große Auswirkung auf die Kapazität<br>- montageunfreundlich, da fettähnliche Masse<br>- niedriger Tropfpunkt     |
| Füllnidz (Füllmasse mit niedriger Dielektrizitätskonstante) | f   | + Dichte gegen Wasser und Feuchtigkeit<br>+ verschließt alle Lücken<br>+ hoher Tropfpunkt<br>+ geringe Auswirkung auf die Kapazität | - montageunfreundlich, da fettähnliche Masse<br>- sehr anhaftend<br>- schwerer zu verarbeiten, da hoher Tropfpunkt |

**Tab. 1:** Mögliche Verfahren für die Konstruktion des Schichtenmantels mit ihren Vor- und Nachteilen; t = trocken, f = feucht

- I. Kabelaufbau mit Schichtenmantel
- II. Kabelaufbau mit Schichtenmantel u. Quellvlies und Quellgarn
- III. Kabelaufbau mit Schichtenmantel u. Petrolatfüllung
- IV. Kabelaufbau ohne Schichtenmantel mit Petrolatfüllung
- V. Kabelaufbau mit Schichtenmantel u. Füllnidz (kapazitätsarme Füllmasse)
- VI. Kabelaufbau ohne Schichtenmantel mit Füllnidz (kapazitätsarme Füllmasse).

Da die neu zu entwickelnden Kabeltypen hinsichtlich Wasser, Feuchtigkeit, Montagefehler und Beschädigungen sehr sicher sein sollten, entschied man sich für Lösungsvorschlag V. Bei geringen Mehrkosten kann ein nahezu 100%-iger Schutz vor den genannten Umwelteinflüssen gewährleistet werden. Fehler und Beschädigungen

sollten nur noch einen geringen Einfluss auf die Kabelkapazität haben, da sich Wasser oder Feuchtigkeit nicht mehr im Kabel ausbreiten konnten. Ein weiterer Grund war, dass ein ähnlicher Kabelaufbau schon seit Jahrzehnten bei den Telekommunikationskabeln erfolgreich eingesetzt wird. Die Kabelbezeichnungen für diese neuen Signale lauten A-2YOF(L)... und AJ-2YOF(L)2YDB2Y...

### 5 Wichtige mechanische und elektrische Eigenschaften

Die Verlegeeigenschaften sind für ein Kabel von entscheidender Bedeutung. Die Bedingungen, die an die Standhaftigkeit des Kabels gestellt werden, sind im Lastenheft, im Technischen Kennblatt sowie in der Literatur festgelegt. Als allgemein

gültige Werte für das Signalkabel sind die Werte aus dem Lastenheft anzusehen. Dabei muss das Kabel beim mehrfachen Biegen einen Biegedurchmesser des 20-fachen Kabeldurchmessers ohne Beschädigung überstehen. Für das letztmalige Ausformen (Kabel ist verlegt und wird den Gegebenheiten angepasst) muss bei bewehrten Kabeln der 15-fache und für unbewehrte der 10-fache Außendurchmesser möglich sein. Bei sämtlichen Verlegearbeiten muss das Kabel Temperaturen von  $-10^{\circ}\text{C}$  bis  $+60^{\circ}\text{C}$  aushalten können. Sobald es verlegt ist, sogar von  $-40^{\circ}\text{C}$  bis  $+60^{\circ}\text{C}$ , wobei die niedrigen Temperaturen kritischer sind, da dort das Kunststoffgefüge spröder ist. Sowohl für die Temperaturkorridore als auch für den maximalen Biegedurchmesser wollte einer der Entwicklungspartner, die Bayka AG, die möglichen Grenzen für das Bahnsignalkabel mit verbesserten Eigenschaften weiter ausloten. Aus diesem Grund wurden zusätzliche Spezialversuche durchgeführt. Das Kabel wurde unter Zug und bei Temperaturen von  $-20^{\circ}\text{C}$  bis  $+60^{\circ}\text{C}$  über verschiedene Durchmesser geführt, um die in der Theorie vorliegenden Vermutungen über die Belastbarkeit des Kabels zu bestätigen. Neben der Temperatur und dem Biegedurchmesser spielt bei den Belastungstests auch der Zug eine wesentliche Rolle. Ein Kabel wird mit einer Winde oder etwas Ähnlichem an der Bahnstrecke entlang verlegt. Zur Zugkraftübertragung auf das Kabel verwendet man meist einen so genannten Ziehstrumpf. Dieser kann leicht auf ein Kabel aufgeschoben werden, zieht sich dann aber auf Grund seiner Konstruktion unter Zugbelastung zusammen und drückt sich in den Kabelmantel ein, um die Zugkraft auf das

Kabel zu übertragen (ähnlich der Funktionsweise einer Fingerfalle). Zu den wichtigsten mechanischen Eigenschaften eines Kabels gehört die Widerstandsfähigkeit gegen diese einwirkenden Kräfte.

Im Technischen Kennblatt der DB ist für alle Kabel nur die maximal zulässige Zugkraft bei Verwendung einer form- und kraftschlüssigen Zugeinrichtung direkt mit den Kupferadern vermerkt. Beim Einsatz des falschen Zugverfahrens bzw. eines Zugverfahrens mit Ziehstrümpfen unter Verwendung der falschen Zugkraft ist eine irreversible Beschädigung des Signalkabels nicht ausgeschlossen.

Obwohl die DB jetzt vorzugsweise nur noch bewehrte Signalkabel einsetzt, kann es jedoch auch weiterhin zu Beschädigungen an den neu entwickelten Signalkabeln kommen (z. B. Bauarbeiten, bei unbewehrten Kabeln durch Nager, usw.). Um abschätzen zu können, welche Auswirkungen das Eintreten von Feuchtigkeit oder Wasser durch einen beschädigten Kabelmantel haben kann, wurde ebenfalls ein spezieller Prüfaufbau entwickelt. Für den Versuch wurde ein A-2YOF(L)2Y 50x1x0,9 Kabel verwendet, bei dem auf einer Länge von ca. 5–10 cm der Kabelmantel komplett entfernt wurde (Abb. 1).

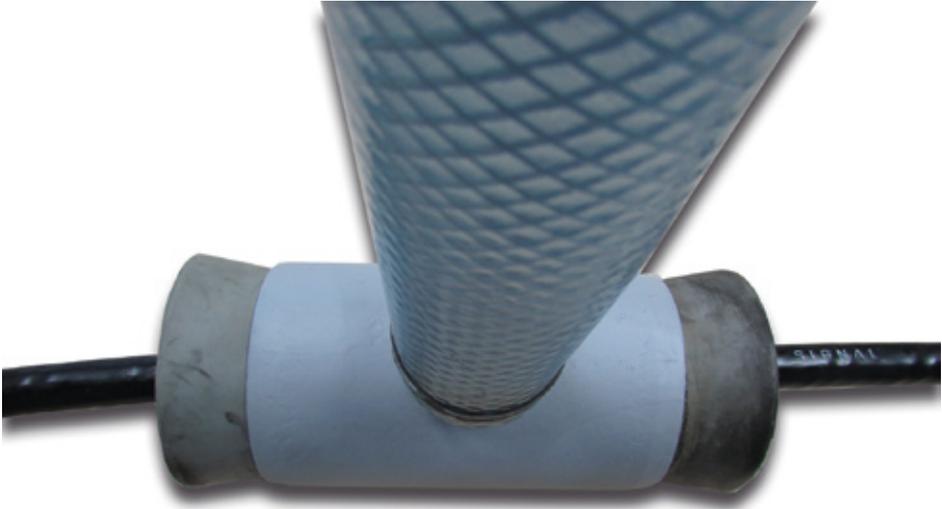
Um die Belastung zusätzlich zu erhöhen, wurde nach einer abgewandelten Form des Prüfverfahrens VDE 0472 Teil 811 Prüfmethode B die zerstörte Mantelstelle mit dem Druck einer 1 m hohen Wassersäule bei  $40^{\circ}\text{C}$  belastet (Abb. 2). Die Temperatur wurde aus Gründen der Vergleichbarkeit mit den schon im Querwasserversuch gewonnenen Werten für ein gefülltes Kabel gewählt.

Auch die Kapazitätsmessung wurde in bewährter Art und Weise wie beim Querwas-



Abb. 1: Freigelegte Kabelseele

Foto: Bayka AG

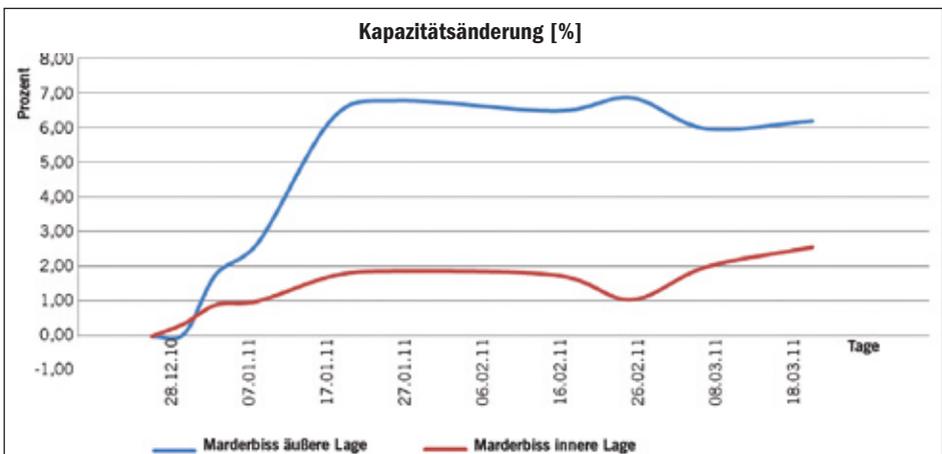


**Abb. 2:** T-Stück für Belastung mit Wassersäule

Foto: Bayka AG

erversuch für die gefüllten Signalkabel durchgeführt. Abb. 3 zeigt, dass Wasser selbst bei einer so großen Schadsstelle und mit einem Druck von 1m Wassersäule nicht tief in das Kabel eindringen kann. Geht man von einem Messfehler von ca. 1,5% aus, so ist die Kapazität der unteren Lage kaum

angestiegen, und die Kapazität der direkt mit Wasser in Berührung gekommenen äußeren Lage liegt noch innerhalb des Toleranzbereiches (99,8 nF/km bei max. möglichen 115 nF/km). Die Ergebnisse dieses Versuchs legen nahe, dass Beschädigungen, die bei der ungefüllten Kabelkonstruktion noch ein K.O.-Kriterium dar-



**Abb. 3:** Messdiagramm der Kapazitätsänderung

Grafik: Bayka AG

stellen, bei den neuen Signalkabeln nicht mehr zum Austausch des beschädigten Kabelstückes zwingen und die Schadstelle wesentlich einfacher und kostengünstiger mit so genannten „Reparaturmuffen“ repariert werden kann.

### 6 Konstruktive Beeinflussungsmöglichkeiten

Die Eigenschaften eines Kabels hinsichtlich des elektrischen Verhaltens sowie der Robustheit und Standhaftigkeit gegenüber seiner Umgebung ist von den verwendeten Materialien abhängig. Als Leitermaterial wird meist Kupfer oder Aluminium verwendet, wobei Kupfer aus Gründen der Verarbeitbarkeit beim Anschließen und der besseren elektrischen Leitfähigkeit pro Volumen bei den Signalkabeln der DB zum Einsatz kommt.

Durch die Verwendung des richtigen Materials als Leiterisolation sind Parameter wie der nicht erwünschte Rückschumpf der Isolation sowie die Absolierbarkeit (benötigte Kraft) einstellbar. Auch kann durch Oberflächenrauheit der Adern sowie die Stabilität des Verseilverbandes festgelegt werden, wie sich das Kabel beim Verlegen verhält.

Über die Wandstärken der Aderisolation kann die Kabelkapazität beeinflusst werden. Da jedes Material eine spezifische relative Dielektrizitätskonstante (Durchlässigkeit für elektrische Felder) besitzt, wird die geforderte Kapazität alleine über das Isolationsmaterial und die Wandstärken eingestellt. Um diesen Effekt etwas mehr zu verdeutlichen, soll näher auf die Kapazität eingegangen werden. Das Fassungsvermögen für elektrische Ladungsteilchen nennt man elektrische Kapazität „C“. Das entsprechende elektrische Bauteil, eine Art Speicher für Elektronen, wird Kondensator genannt. Bei der Kabelkapazität dient die Aderisolation mit ihrer speziellen Dielektrizitätskonstante zwischen den

einzelnen Leitern als Kondensator. Dieser Kapazitätsbelag ist bei Leitungen aber eher ein unerwünschter Nebeneffekt und führt zu Verlusten bei der Signalübertragung.

Bei den Bahnsignalkabeln wird die Kapazität durch die Zahlen H95 ( $\hat{=}$  95 nF/km), H115 ( $\hat{=}$  115 nF/km) und H145 ( $\hat{=}$  145 nF/km) beschrieben. Dies stellt die maximal zulässigen Werte für die Kabelkapazität dar. Der Maximalwert wurde eingeführt, da die Stellwerke, wie oben beschrieben, ein Prüfsignal schicken. Dieses überprüft, ob das jeweilige angeschlossene System noch ordnungsgemäß funktioniert und innerhalb eines definierten Zeitfensters antwortet. Wird nun die maximale Kabelkapazität überschritten, wird das Prüfsignal so stark verzögert, dass die Antwort nicht mehr innerhalb der erlaubten Zeit kommt und somit das angeschlossene Gerät als defekt erkannt wird, obwohl es ordnungsgemäß funktionieren würde. Aber was hat dieser Effekt mit den neuen gefüllten Bahnsignalkabeln zu tun? Eindringende Feuchtigkeit verändert die Dielektrizitätskonstante zwischen den Leitern, da die Luft zwischen den Aderisolationen durch Feuchtigkeit verdrängt wird.

Zum Vergleich hier die mitwirkenden Dielektrizitätskonstanten:

- Luft: ~1,0
- PE: ~2,4
- Wasser: ~88

Anhand dieser Zahlen ist ersichtlich, dass Wasser eine sehr hohe Dielektrizitätskonstante hat und somit schon geringe Mengen Feuchtigkeit die Kabelkapazität beträchtlich beeinflussen können. Um zu verhindern, dass sich Feuchtigkeit zwischen den Adern ausbreiten und die Kapazität verschlechtern kann bis zu dem Punkt, dass Baumaßnahmen notwendig werden, wurde bei den neuen Signalkabeln die Füllmasse Füllnidz mit niedriger Dielektrizitätskonstante (~1,7) eingeführt. Dadurch konnte der Kabelaufbau in seinen Abmessungen weitestgehend so belassen

werden, allerdings kann in das Kabel jetzt keine Feuchtigkeit mehr eindringen.

Eine weitere konstruktive Möglichkeit, die Kabelseele weitestgehend gegen negative Umwelteinflüsse abzuschirmen, ist die Ummantelung mit einem Metallrohr. Bei alten Kabelkonstruktionen oder Spezialkabeln wird ein Bleimantel eingesetzt, da Blei sehr biegsam und leicht bearbeitbar ist. Aber Blei ist ein toxischer Werkstoff und sollte weitestgehend vermieden werden. Darum setzt man in modernen Kabelkonstruktionen auf einen Schichtenmantel. Dieser besteht aus einem an der Nahtstelle verklebten Aluminiumband, welches mit einem PE-Mantel vollständig verklebt wird. Diesen Sandwichaufbau nennt man Schichtenmantel und auch dieser kann die schädigenden Einflüsse von außen auf die Kabelseele abhalten.

Darüber hinaus sind die Eigenschaften des Kabels durch die Wahl der Kunststoffe für das Mantelmaterial stark beeinflussbar. So ist ein Mantel aus PVC zum Beispiel sehr günstig und elastisch, aber PVC ist schwer recycelbar und setzt bei Bränden Halogene frei. Das geeignetste Kunststoffmaterial für diese Aufgaben ist PE, daher kommt es auch bei den Bahnsignalkabeln zum Einsatz. Es ist zwar etwas teurer als PVC, doch setzt es bei Bränden keine Halogene frei, ist äußerst robust gegen mechanische Umwelteinflüsse und garantiert eine lange Standzeit des Kabels.

Als dritten Kunststoff gibt es das sogenannte H-Material. Diese Kunststoffmischung kommt vor allem in sicherheitsrelevanten Bereichen wie z. B. Tunneln, zum Einsatz, da sie flammhemmend wirkt und keine Brandfortleitung zulässt.

Nun besitzt das Kabel die beiden Eigenschaften, durch die es definiert wird, eine Kabelseele und einen Mantel. Aber um die Seele vor äußeren Einflüssen wie z. B. Nagetieren zu schützen, kann es, wenn gefordert, noch zusätzlich mit Stahlbändern umwickelt werden. Zusätzlich kann

durch die Oberleitung an elektrifizierten Bahnstrecken eine induktive Beeinflussung auftreten, welche Spannung auf die Ader induziert. Durch diese Spannung können die angeschlossenen Geräte oder das System beschädigt bzw. negativ beeinflusst werden. Um diesen Effekt möglichst zu vermeiden, gibt es induktionsgeschützte Kabel mit Reduktionsfaktor. Um das Kabel wird ein Induktionsschutz aus Kupfer und Stahl aufgebaut, der diese induktiven Einflüsse möglichst gut dämpft. Dieser Induktionsschutz wird gleichzeitig als Nagetierschutz mitverwendet. Um den Nagetier- bzw. Induktionsschutz vor Beschädigungen beim Einziehen der Kabel zu schützen, wird um den ganzen Aufbau noch eine Schutzhülle aus Kunststoff extrudiert. Diese Schutzhülle kann bei Nagetierverbiss Löcher bekommen. Dies beeinträchtigt nicht die Funktion des Kabels, da die Kabelseele durch den darunter liegenden Mantel wasserdicht abgeschlossen ist.

## 7 Induktionsgeschützte Kabel

Der sogenannte Reduktionsfaktor ist abhängig vom Volumeneinsatz an Stahl und Kupfer. Er beschreibt im Fall von Signalkabeln, um welchen Faktor eine Störbeeinflussung im direkten Vergleich zwischen geschütztem und ungeschütztem Kabel verringert wird.

Man unterscheidet in drei Gruppen:

| Induktionsschutz | rk-Kennzahl*) |
|------------------|---------------|
| mittel           | 600           |
| gut              | 500           |
| sehr gut         | 400           |

\*) Kennzahl geteilt durch 1000 ergibt Rechenfaktor

Die jeweilig verfügbaren Reduktionsfaktoren sowie entsprechende induktionsgeschützte Kabel sind in den zugehörigen Lastenheften beschrieben.

Induktionsgeschützte Kabel werden im Streckenbau überall dort eingesetzt, wo Anlagen der Sicherungs- und Leittechnik von induktiven Störgrößen beeinflusst werden können. Diese induktiven Beeinflussungen sind immer dann relevant, wenn ein Kabel über mehrere 100 m mit einem Starkstromsystem (z. B. Bahngleis) parallel geführt wird. Durch Rückströme in der Schiene bei Vorbeifahrt eines Zuges wird ein sehr starkes induktives Feld erzeugt, welches in das Kabel einkoppeln würde. Dadurch wird im Kabel eine hohe Spannung erzeugt, die somit eine Fehlfunktion bzw. Zerstörung der daran angeschlossenen Anlagen zur Folge hätte. Der Induktionsschutz bei diesen Spezialkabeln funktioniert wie eine um das Kabel gelegte Spule, die durch Induktion von Spannung ein dem verursachtem Feld entgegengesetztes Magnetfeld aufbaut, wodurch der Strom, der letztendlich in das Kabel einkoppelt, reduziert wird. Dies ist aber nur der Fall, wenn das Kabel an beiden Enden mit der elektrischen Erde verbunden ist, da sonst kein Stromfluss zustande kommen kann.

Beeinflussungsquellen sind [3]:

- Bahnstromanlagen der Wechselstrombahn (Ober- und Speiseleitungen, Bahnstromleitungen, Schienenrückströme, Schienenpotential, Erdungsanlagen)
- Drehstromanlagen (Übertragungsleitungen, Erdungsanlagen)
- Energieversorgungssysteme, die die Schiene als Rückleiter mit einbeziehen (z. B. elektr. Zugheizung, Zugvorheizung)

Neben der induktiven Beeinflussung gibt es zudem eine kapazitive sowie eine galvanische, auf die aber bei der Beschreibung induktionsgeschützter Kabel nicht näher eingegangen wird. Durch die induktive Beeinflussung wird in den längs durchgehenden metallenen Aufbauelementen eine Mantelspannung (UMB) erzeugt. Durch die zweiseitige Erdung der metalle-

nen Aufbauelemente wird durch die Mantelspannung ein Mantelstrom (IM) angetrieben. Dieser wiederum induziert auf den Kabeladern eine Aderspannung (UAM), die der Beeinflussungsspannung auf den Adern durch das beeinflussende System (UAB) weitgehend entgegengerichtet ist. Durch die vektorielle Addition von UAB und UAM ergibt sich die verbleibende (reduzierte) Aderspannung UA (Abb. 4).

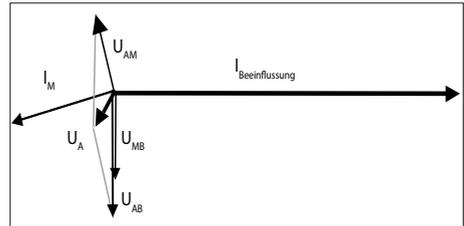


Abb. 4: Vektorielle Addition der Beeinflussungsspannungen [4]

Im Streckenbau wird somit die einfache Formel zur Berechnung der Spannungsreduktion angewandt:

$$r_K = \frac{U_A}{U_{AB}} \quad (\text{Kabelreduktionsfaktor})$$

Diese Formel ist für den Kabelhersteller ungenügend, da er den geforderten Reduktionsfaktor und somit die Schutzwirkung in erster Linie durch genügend Metall in der Hülle erzeugen muss.

Für diese Berechnung wird folgende Formel [4] verwendet:

$$r_K = \frac{R_M}{|Z_M|} = \frac{R_M}{\sqrt{R_M^2 + (\omega L_M)^2}}$$

$R_M$  = Gleichstromwiderstand der metallenen Aufbauelemente im Schirm

$Z_M$  = Gesamtimpedanz (Gleichstrom- u. induktiver Widerstand) der metallenen Aufbauelemente im Schirm

$\omega$  = Kreisfrequenz =  $2 \cdot \pi \cdot f$

$L_M$  = induktiver Widerstand

Aus der oben genannten Formel geht hervor, dass der Reduktionsfaktor umso besser wird, je kleiner der Gleichstromwiderstand ist. Dieser ist wiederum auch von den ferromagnetischen Eigenschaften der im Schirm verwendeten Metalle abhängig. Durch einen hohen induktiven Widerstand wird der Reduktionsfaktor somit kleiner.

Der zu erfüllende Reduktionsfaktor wird durch die Reduktionskurven im Technischen Kennblatt (Abb. 5) vorgeschrieben. Diese Kurven enthalten den Absolutwert des Reduktionsfaktors in Abhängigkeit von der induzierten Spannung.

Zur Berechnung der zu erwartenden Störspannung werden diese Kurven vom LST-Planer herangezogen. Er benötigt aber noch zusätzliche folgende Informationen:

- Fahrstrom- und Kurzschlussdiagramme,
- Streckenkilometer der Unterwerke,

- Ausrüstung der Strecke bezüglich Oberleitungsanlagen,
- Signallageplan,
- Kabelübersichtsplan,
- Abstände der Kabeltrasse zum Gleis sowie
- Stellwerkstechnik.

Der Kabelhersteller muss den geforderten Reduktionsfaktor durch eine Anpassung des Kupfereinsatzes (Anzahl, Drahtdurchmesser) bzw. des Stahleinsatzes (Bandbreite, Banddicke, Bebänderungslücke) gewährleisten, um die geforderte Reduktionsfaktorkurve möglichst gut nachzubilden (Stahlbänder und Kupfereinsatz sind im Technischen Kennblatt festgelegt).

### 8 Möglichkeiten zur Verbesserung alter Kabelanlagen

Alte Kabelanlagen können natürlich nicht flächendeckend gegen die Signalkabel der

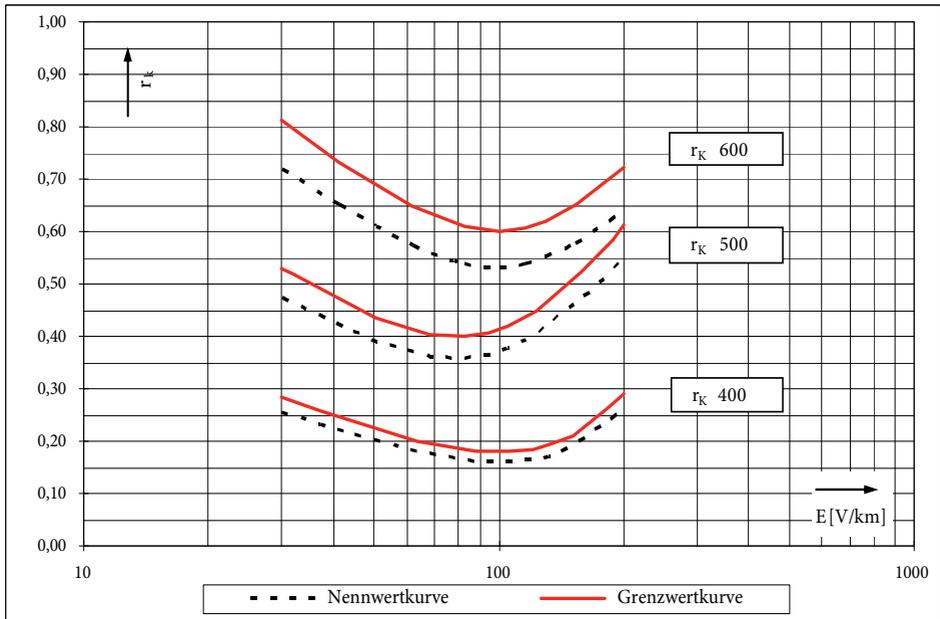


Abb. 5: Reduktionskurve [5]

neuen Generation ausgetauscht werden. Es gibt mehrere Möglichkeiten, alte, ungefüllte Kabelanlagen zu reparieren, die aufgrund eingedrungener Feuchtigkeit Störungen verursachen, ohne das ganze Kabel austauschen zu müssen.

Eine Möglichkeit ist es, mit Hilfe eines Kompressors und eines Kondentrockners Luft durch das Kabel zu pressen. Dabei erzeugt der Kompressor einen Luftstrom, der je nach Kabeltype dem unterschiedlichen Luftvolumen im Kabel angepasst ist. Betrachtet man das Mollier-Diagramm, das die Zustandsänderungen feuchter Luft in Abhängigkeit von Temperatur (sowie Druck, Enthalpie und Dichte) angibt, kann die Luft im Kabel unterschiedlich viel Feuchtigkeit aufnehmen und nach draußen abtransportieren. Die Luft wird also, bevor sie in das Kabel geleitet wird, über den Trockner geschickt. Im Trockner wird der Taupunkt der Luft auf ca.  $-6^{\circ}\text{C}$  abgesenkt, um die Luft zu entfeuchten. Nach dem Trockenvorgang wird die weitestgehend „trockene“ Luft in das Kabel geleitet. Die einzige Schwierigkeit bei diesem Verfahren ist, dass Kompressor und Trockner elektrischen Strom benötigen, welcher nicht an jeder Baustelle einfach verfügbar ist und eventuell per Generator erzeugt werden muss. Darüber hinaus darf der Luftstrom nicht zu schwach bzw. zu stark eingestellt werden, da sonst in beiden Fällen die Feuchtigkeit nicht richtig abtransportiert wird. Dieses Verfahren ist unsicher und gibt keine Garantie für eine 100 % sichere Kabelanlage.

Für Kabelreparaturarbeiten auf der Baustelle wird daher aus oben genannten Gründen ein weiteres Verfahren vorgeschlagen, damit das Kabel nicht zerstört bzw. herausgerissen werden muss. Eine Flasche Stickstoff mit ca.  $100\text{ m}^3$  Füllung wird direkt an der Baustelle an das Kabel angeschlossen. Da der Flaschenstickstoff bereits getrocknet geliefert wird, entfällt der Prozess mit Kompressor und Lufttrockner, und somit

auch die Notwendigkeit, Strom bereitzustellen. Auch bei diesem Verfahren muss der Luftdruck optimal eingestellt werden, um den Feuchtigkeitsaustrag zu maximieren. Die Möglichkeiten zum Einsatz dieses Verfahrens sind aber witterungsbedingt begrenzt, denn nachts oder im Winter ist es in der Umgebung zu kalt. Die Luft könnte nicht genügend Feuchtigkeit aufnehmen und man bräuchte zu lange, bis die vorhandene Feuchtigkeit ausgetragen ist. Im Sommer kann unterstützend der Kabeltrog geöffnet werden, damit sich das schwarze Kabel in der Sonne aufheizt, um den Feuchtigkeitsaustrag zu optimieren. Doch die Ursache wird dadurch nicht beseitigt. Ein erneutes Eindringen von Feuchtigkeit ist nicht auszuschließen.

Auf Grund von Temperaturunterschieden in der Kabelstrecke atmet jedes Kabel, d.h. die Kabel „pumpen“ Luft von der einen auf die andere Seite. Auch dadurch kann Feuchtigkeit in das Kabel eingetragen werden. Damit dieses Problem zumindest einigermaßen eingedämmt wird, ist es mittlerweile Vorschrift, bei allen Kabeln, außer Stickleitungen, die Enden einer Übertragungsstrecke mit Gießharz zu verschließen. Über fehlerhafte Muffen kann jedoch weiterhin Wasser in das Kabel eindringen. Für diesen Fall könnten so genannte vergießbare Verbindungsmuffen verwendet werden. Bei diesem Verfahren werden erst die Kabel verbunden, dann die Muffe gesetzt und zum Schluss die ganze Muffe mit Gießharz/Gel ausgefüllt. Dies würde das Problem des eindringenden Wassers zumindest insofern lösen, dass sich Wasser nicht weiter ausbreiten kann. Da die Kabel aber mehr als 35 Jahre liegen und im Laufe der Zeit manchmal an der Verkabelung in den Muffen etwas geändert werden muss (neue Signale, Weichen usw.), ist dieses Verfahren wahrscheinlich nicht umsetzbar, da man bei Änderungen die ganze Muffe entfernen und ein Kabelstück einsetzen müsste.

Bei einem weiteren möglichen Verfahren, dem Einbau von Feuchtigkeitssperren, können entweder, wie oben beschrieben, Schrumpfmuffen und Enden vergossen werden, oder anstatt der Schrumpfmuffen wird das Kabel an beliebigen Stellen geöffnet, um dort Gießharz einzubringen. Dies erweist sich in der Praxis aber als ziemlich schwierig, da zuerst die Stahlbewehrung und der Kupferschirm zu entfernen sind. Anschließend muss mit äußerster Sorgfalt das Kabel geöffnet werden und in die doch sehr kompakte Kabelseele an allen Stellen Gießharz eingebracht werden. Nach der Verfüllung muss das Kabel wieder verschlossen werden. Die Wiederherstellung des Kabelmantels ist dabei noch das Einfachste, allerdings wäre die vollständige Wiederherstellung des Induktionsschutzes (Kupferschirm und Stahlbewehrung) doch sehr aufwendig.

Die Drucküberwachung ist eine Technik aus der Telekommunikationsbranche. Dabei wird auf ein „Stammkabel“ (ab 100 Paare) ständig Druckluft gegeben. Das Kabel steht dabei ständig unter einem minimalen Überdruck im Vergleich zur Umgebung und es kann praktisch kein Wasser eindringen. Sollte doch eine Beschädigung auftreten, würde sich diese durch einen Druckabfall sofort bemerkbar machen. Das einzige Problem könnte die Infrastruktur darstellen, da die Stammkabel bei der Telekommunikation meist in Gebäuden enden, Bahnsignalkabel jedoch meist in Anschlusskästen. Somit müsste auch erst eine Infrastruktur zur Versorgung mit Druckluft, z. B. mittels kleiner Kompressoren, geschaffen werden. Die technisch einfachste Lösung, defekte Kabelmuffen und Mäntel zu lokalisieren, die in den allermeisten Fällen für das Ein-



Die ganze  
**Welt der Kabel**  
alles aus einer Hand

[www.bayka.de](http://www.bayka.de)

- BayRail®**  
Bahn- & Verkehrskabel
- BayCom®**  
Telekommunikationskabel (Cu & LWL)
- BayEnergy®**  
Energiekabel
- BaySpecial®**  
Kabel für spezielle Anwendungen
- BayGreen**  
Kabel für erneuerbare Energie
- BayMotion®**  
Anschluss- und Motorleitungen

BAYERISCHE KABELWERKE AG · Otto-Schrimppf-Str. 2 · 91154 Roth (Germany) · Tel +49 (0)9171 806 111

dringen von Wasser verantwortlich sind, wäre eine ständige Kontrolle der Kabelanlagen durch Personal. Dazu müssten regelmäßig alle Kabelkanäle und Schächte geöffnet, eine Sichtprüfung der Kabel und Muffen vorgenommen und anschließend die Kanäle und Schächte wieder verschlossen werden. Dies würde die DB aber vor ein personelles und finanzielles Problem stellen, da doch sehr viele Kilometer an Kabeln verlegt sind.

## 9 Muffenmontage

Die Kabelmuffe war und ist über Jahrzehnte hinweg ein wesentlicher Einflussparameter auf die korrekte Funktion der Kabelanlagen. Werden Fehler bei der Montage gemacht, könnte dies auf das Kabel große Auswirkungen haben. In der Vergangenheit konnte nie ganz ausgeschlossen werden, ob die Feuchtigkeit, welche in den Kabeln gefunden wurde und zu erhöhten Ausfällen führte, auf eine undichte Muffe zurückzuführen ist. Muffen müssen mit äußerster Genauigkeit und Sauberkeit am Bahndamm montiert werden. Dies stellt sich aber unter den Gegebenheiten, die am Gleis vorzufinden sind, meist als sehr schwierig dar. Die Kabelmäntel müssen für das Aufschrumpfen der Muffe absolut sauber sein, obwohl am Bahndamm um den Monteur herum immer Staub und Dreck vorzufinden ist. Ein weiterer Grund macht die Muffenmontage so schwierig. Auf Grund der Molekülstruktur haftet

der Heißkleber nicht absolut perfekt auf dem PE-Mantel, schon geringe Verunreinigungen auf dem Mantel verhindern eine 100%ige Klebeverbindung zwischen Muffe und Mantel. Bei Erschütterungen und Kabelbewegungen kann sich die Klebeverbindung wieder lösen und in der Folge tritt Feuchtigkeit ein.

Durch das neue Bahnsignalkabel wurde aber auch diesem Problem ein Riegel vorgeschoben, da nun die Feuchtigkeit sich nicht mehr im Kabel ausbreiten kann, sondern nur als lokales Problem in der Muffe vorhanden bleibt. Trotzdem ist auch bei den neuen gefüllten Bahnsignalkabeln darauf zu achten, dass die Muffenmontage, wie in der Vergangenheit, weiterhin mit äußerster Genauigkeit und Sauberkeit durchgeführt wird. Zusätzlich muss jetzt darauf geachtet werden, dass vor dem Verschrumpfen der Muffe keine Füllmasse auf dem Kabelmantel und somit auf der Klebestelle Mantel-Muffe zurück bleibt. Dann steht der zu erwartenden Lebensdauer einer Signalkabelanlage von 35 und mehr Jahren nichts im Wege.

### Quellen

- [1] Fendrich, L. (Hrsg.): Handbuch Eisenbahninfrastruktur, S. 523, Springer Verlag
- [2] Feuchtigkeit in Signalkabeln der DB Netz AG, 2010 (4)
- [3] Ril 819-0801
- [4] Ril 819-0805
- [5] Technisches Kennblatt 416.0116 Version 2.0