

2.4 Kabel und Leitungen

Kabel und Leitungen bestehen grundsätzlich aus Leiter, Isolierung und Schutzmantel. Die Werkstoffe sowie die Ausführungen können dabei je nach Anwendung unterschiedlich sein. Das Kabel unterscheidet sich von der Leitung durch die Verlegbarkeit im Boden und im Wasser.

2.4.1 Aufbau und Ersatzschaltbild

Als Leiterwerkstoffe kommen Kupfer oder Aluminium zur Anwendung. Zwar ist der Leitwert κ für Kupfer mehr als 50 % höher als der von Aluminium ($\kappa_{Cu} = 56 \text{ m/mm}^2\Omega$, $\kappa_{Al} = 35 \text{ m/mm}^2\Omega$), aufgrund veränderlicher Rohstoffpreise können dennoch beide Materialien wirtschaftlich anwendbar sein.

Der Aufbau erfolgt ein oder mehrdrätig, die Leiterquerschnittsform ist rund oder sektorförmig. Querschnitte oberhalb von 25 mm^2 werden zumeist mehrdrätig ausgeführt, um handhabbare Biegeradien zu erzielen. Bild 2.16 zeigt verschiedene Ausführungsformen von Niederspannungskabeln und -leitungen.



Bild 2.16: Niederspannungskabel und -leitungen (Fotos: Fa. Nexans)¹

Als Aderisolierung wird üblicherweise Kunststoff verwendet. Kostengünstig ist die Anwendung von PVC (Polyvinylchlorid), alternative, höherwertige Isolierstoffe sind VPE (vernetztes Polyethylen), EPR (Ethylen-Propylen-Kautschuk, Gummi) oder mineralstoffisolierte Kabel.

Das Chlor im PVC ersetzt in jeder vierten Verbindung ein Wasserstoff-Atom und bewirkt eine Erhöhung der Entzündungstemperatur. Der Werkstoff ist dadurch vergleichsweise schlecht brennbar. Im Brandfall können sich jedoch die abgespaltenen Halogenide, hier das Chlor, mit Wasserstoff zu HCl (Salzsäure) verbinden. Diese Säuren können Stahlarmierungen in Gebäuden im Brandfall derart korrodieren, dass eine Instandsetzung nach dem Brandfall nicht mehr möglich ist. Problematisch für den Einsatz von PVC kann

¹ Mit freundlicher Genehmigung der Fa. Nexans Deutschland Industries GmbH & Co. KG, Hannover (www.nexans.de)

außerdem die Erweichung bei bereits ca. 110 °C, die Empfindlichkeit gegen ultraviolette Strahlung (UV) und die Versprödung bei niedrigen Temperaturen sein. Die vergleichsweise hohen dielektrischen Verluste spielen dagegen in der Niederspannungstechnik normalerweise keine Rolle.

PE enthält kein Chlor. Der Wegfall dieses Halogenids wird auch als Halogenfreiheit bezeichnet. Um die Brennbarkeit des PE zu reduzieren, sind bei der Herstellung Zusatzstoffe beizugeben. Üblich ist die Verwendung von Aluminiumoxydhydrat ($\text{Al}(\text{OH})_3$). Dieser Komplex wird im Brandfall in Aluminiumoxyd (Al_2O_3) und Wasser (H_2O) aufgespalten. Das Wasser entzieht durch die Verdampfung dem Werkstoff Wärme und hemmt damit die Brandfortleitung. Dieses Kabel ist kältebeständig und wasserundurchlässig, weist jedoch ebenfalls eine geringe UV-Beständigkeit auf.

EPR ist eine flexible Isolierung, die als wärmebeständige Gummileitung vom Nachweis der Feuersicherheit ausgenommen ist [Hochbaum 97].

Mineralstoffisolierte Leitungen verfügen über eine Isolation aus einem hochverdichteten Magnesiumoxid-Pulver, das von einem Kupfermantel umgeben ist. Die Schmelztemperatur des Kupfermantels ist mit über 1.000 °C die thermische Grenze des Kabels im Brandfall.

Die Wahl des Isolierstoffs und die damit verbundenen Auswirkungen auf den Brandschutz werden ausführlich in [Schmolke 12] dargestellt. Bedeutsam ist in diesem Zusammenhang die Frage nach dem Verhalten des Isolierstoffs im Brandfall, wobei die Aspekte der Entzündbarkeit, der Brandfortleitung, der freigesetzten Energie im Brandfall (Brandlast) und der Funktionserhalt zu klären sind.

Im Zusammenhang mit Fragestellungen nach der Brandlast wird schnell die Halogenfreiheit der Isolierstoffe verlangt. Allerdings lässt sich diese Forderung nicht allein aus den Normen herleiten. [VDE 0100] empfiehlt im Teil 420 beispielsweise die Anwendung von Kabeln und Leitungen mit verbessertem Verhalten im Brandfall nach [VDE 0482] an Orten mit unersetzbaren Gütern, z. B. Museen oder Galerien. Dieses Prüfverfahren mit einer erhöhten Heizleistung stellt erheblich schärfere Anforderungen an die verwendeten Isolierstoffe. Die Hinzuziehung der in diesem Zusammenhang zu beachtenden [MLAR 2005] führt zur Forderung nach geringer Brandfortleitung und einer geringen Rauchdichte der verwendeten Kabel und Leitungen. Die bezüglich der Brandfortleitung und der geringen Rauchdichte bestehenden Prüfanforderungen sind grundsätzlich auch mit PVC-Kabeln bzw. flammhemmenden PVC-Kabeln (sog. FR-PVC) zu bestehen. Allerdings lässt sich die Bildung von Salzsäure (HCl) nur durch Einsatz halogenfreier Isolierstoffe vermeiden. Dabei ist nicht nur die korrosive Wirkung der Salzsäure zu bedenken, sondern auch die Beeinträchtigung von Rettungs- und Löscharbeiten infolge der korrosiven Gase.

Bezüglich des Funktionserhalts gilt, dass für die angegebene Zeit kein Kurzschluss und keine Leiterunterbrechung zu erwarten sind. Der Funktionserhalt wird unterschieden in Klassen von 30 min, 60 min, 90 min, 120 min und 180 min und durch ein aufgedrucktes E30 (für einen Funktionserhalt von 30 Minuten), E60, E90, E120 bzw. E180 gekennzeichnet. Die Kennzeichnung „FE ...“ gibt demgegenüber den Isolationserhalt des Kabels an.

Der Aufbau des Kabels bzw. der Leitung wird durch Kurzzeichen beschrieben, die in der Tabelle 2.4 auszugsweise enthalten sind.

Mit Hilfe dieser Kurzzeichen lassen sich die Kabelkennzeichnungen in Bild 2.16 übersetzen als:

- NYM „N“ - Normtyp, „Y“ - PVC-Mantel, „M“ – mehrdrätig
- NHXMH „N“ - Normtyp, „HX“ - vernetztes, halogenfreies Polymer, „M“ - mehrdrätig, „H“ - halogenfreier Kunststoffmantel
- NYY „N“ - Normtyp, „Y“ - PVC-Isolierung, „Y“ - PVC-Mantel
- NYCWY „N“ - Normtyp, „Y“ - PVC-Isolierung, „CW“ - konzentrischer, wellenförmiger Kupferleiter, „Y“ - PVC-Mantel

Tabelle 2.4: Kurzzeichen von Kabeln und Leitungen (national)

Aufbau	Kurzzeichen
<i>Verwendungsangaben</i>	
Normkabel oder -leitung	N
Sonderkabel	S
<i>Leiter</i>	
Cu	keine Bezeichnung
Al	A
Rundleiter	R
Sektorleiter	S
eindrätig	E
mehrdrätig	M
feindrätig	F
<i>Isolierhülle</i>	
PVC	Y
PE	2Y
VPE	2X
vernetztes, halogenfreies Polymer	HX
<i>Mantel</i>	
PVC	Y
PE	2Y
unvernetztes halogenfreies Polymer	H
vernetztes halogenfreies Polymer	HX
<i>Schirm</i>	
konz. Leiter aus Cu wellenförmig	CW
<i>Schutzleiter</i>	
mit Schutzleiter	-J
mit Schutzleiter, ohne Nullleiter	-
ohne Schutzleiter	-O
<i>Isolations- / Funktionserhalt</i>	
halogenfrei, mit Isolationserhalt ... Minuten	FE...
halogenfrei, mit Funktionserhalt ... Minuten	E...

Die verwendeten Buchstaben sind teilweise doppelt belegt. Ihre Bedeutung ergibt sich aus der Position innerhalb des Kurzzeichens.

Nach dieser Kennzeichnung werden die Leiteranzahl sowie Leiterquerschnitt angehängt (z. B. „-J5 x 10⁴“ für ein 5-adriges Kabel mit Schutzleiter und einem Querschnitt je Ader von 10 mm²).

Harmonisierte Leitungen sind aufgrund der Typenvereinheitlichung international harmonisiert und anerkannt. Tabelle 2.5 enthält auszugsweise die Kurzzeichen für harmonisierte Kabel und Leitungen.

Tabelle 2.5: Kurzzeichen von harmonisierten Kabeln und Leitungen

Aufbau	Kurzzeichen
<i>Verwendungsangaben</i>	
Harmonisiertes Kabel	H
<i>Spannungsbereich</i>	
300/300 V	03
300/500 V	05
450/750 V	07
<i>Isolierhülle</i>	
PVC	V
Kautschuk	R
Silikonkautschuk	S
<i>Mantel</i>	
PVC	V
Kautschuk	R
<i>Besonderheiten im Aufbau</i>	
flache, aufteilbare Leitung	H
flache, nicht-aufteilbare Leitung	H2
<i>Leiterart</i>	
eindrätig	-U
mehrdrätig	-R
feindrätig für feste Installation	-K
feindrätig für flexible Leitungen	-F
feinstdrätiger Leiter für flexible Leitungen	-H
<i>Aderzahl</i>	
mit Schutzleiter	G
ohne Schutzleiter	X

Die Kennzeichnung eines Kabels erfolgt in dieser Darstellung von oben nach unten, innerhalb Tabelle 2.5 werden die einzelnen Merkmale angewendet.

Beispielsweise handelt es sich bei einer Leitung H05VV-F 5G2,5 um einen harmonisierten Typ für eine Nennspannung 400/500 V, PVC-Isolierung und -Mantel, feindrätig, 5-adrig mit Schutzleiter.

Das Kabel bzw. die Leitung lässt sich grundsätzlich durch das nachfolgend dargestellte T-Ersatzschaltbild beschreiben:

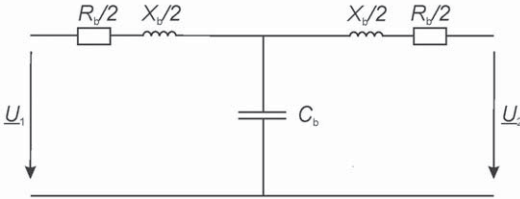


Bild 2.17: Prinzipielles Ersatzschaltbild

Widerstände und Blindwiderstände sind abhängig vom Aufbau des Kabels bzw. der Leitung. Auf die Berücksichtigung der Betriebskapazität wird in der Niederspannungstechnik aufgrund der begrenzten Längen zumeist verzichtet. Der Verzicht auf die Betriebskapazität C_b führt zur Vernachlässigung des kapazitiven Ladestroms, der beispielsweise als Ableitstrom von einem Fehlerstromschutzschalter wahrgenommen werden kann. Da die in den CAE-Programmen verwendeten Modelle in der Regel nicht situativ anpassbar sind, ist in solchen Sonderfällen ein fehlerhaftes Ergebnis nicht auszuschließen.

Abgesehen von derartigen Sonderfällen lässt sich ein Kabel durch ein vereinfachtes Ersatzschaltbild entsprechend Bild 2.18 darstellen:

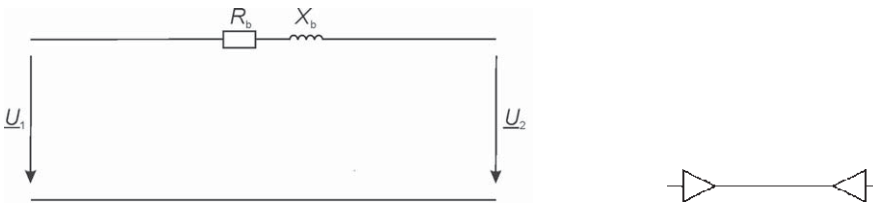


Bild 2.18: Ersatzschaltbild und Netzplandarstellung eines Niederspannungskabels

Die Impedanzen und Reaktanzen eines Kabels sind abhängig von Leiterlänge und -querschnitt sowie den Materialkennwerten. Außerdem ist die Leitertemperatur zu berücksichtigen.

2.4.2 Betriebsverhalten

Für jede Kabelbauart existiert eine maximale Betriebstemperatur, deren Überschreiten die Lebensdauer des Kabels herabsetzt. Bestimmend für diese Betriebstemperatur ist die Temperaturbeständigkeit des Isolierstoffs. Dieser Temperaturbeständigkeit wird durch Definition einer maximalen Betriebstemperatur Rechnung getragen. So liegt diese maximale Betriebstemperatur für PVC bei 70 °C , für VPE bei 90 °C . Die maximale Betriebstemperatur wirkt sich auf die Strombelastbarkeit I_z ¹ aus. Eine höhere zulässige Maximaltemperatur an der Leiteroberfläche erhöht den zulässigen Betriebsstrom I_z .

Wird ein Kabel nur mit dem zulässigen Betriebsstrom I_z belastet, so ist definitionsgemäß eine zumindest theoretisch unbegrenzte Lebensdauer zu erwarten.

¹ Für die Kabeldimensionierung wesentliche Bezeichnungen wie der Bemessungsstrom I_b bzw. die Strombelastbarkeit I_z werden im Kapitel 3 ausführlich behandelt. Dies gilt in gleichem Maße für Einflussgrößen wie die Verlegart und die Häufung von Kabeln.