

Ermittlung der Widerstandsverluste in einem Energieseekabel mittels FEM

STURM SEBASTIAN, PAULUS JOHANNES, KEMPKE JOACHIM;
Hochschule für angewandte Wissenschaften, Würzburg- Schweinfurt
Schweinfurt

Es werden die in Schirmung und Mantelung (Armierungsdrähte) auftretenden Verluste in einem Energieseekabel mit einem Leiterquerschnitt von 1200 mm^2 mittels FEM simuliert und den nach IEC 60287-1-1 kalkulierten gegenübergestellt. Dabei wird zunächst die Kalkulation der Verluste nach IEC Norm aufgezeigt, anschließend der Aufbau und die relevanten Stoffeigenschaften des Simulationsmodells erläutert. Die anhand der FEM Simulation berechneten Verluste sind im Gesamten um etwa 25 % geringer als nach IEC Norm. In Armierungsdrähten betragen die berechneten Verluste lediglich ein Drittel der nach IEC Norm kalkulierten.

Kategorie und Themenbeschreibung: Electromobility and Energy Engineering

Zusätzliche Schlüsselwörter: FEM Simulation, Energieseekabel, Widerstandsverluste, Mantelverluste, IEC 60287-1-1

1 EINLEITUNG

Energieseekabel dienen z.B. zur Anbindung von Offshore Windkraftanlagen an das Stromnetz auf dem Festland. Große Mengen an elektrischer Energie müssen bei möglichst geringen Verlusten und hoher Systemsicherheit transportiert werden. Die elektrische Energie wird dabei mit hoher elektrischer Spannung transportiert. Dadurch ergeben sich besondere Anforderungen an die im Kabel verbauten Isolationsmaterialien zur Beherrschung der elektrischen Feldstärken.

Die im Kabel auftretenden Verluste verursachen eine Erwärmung der Komponenten. Die maximal zulässigen Temperaturen für Isolationsmaterialien, die in der IEC 60502-2 [3] angegebenen sind, dürfen nicht überschritten werden. Bei zunehmender Temperatur (Grenztemperatur für den im betrachteten Kabel verwendeten Kunststoff - XLPE 90°C) zersetzen sich die verwendeten Kunststoffe und damit verlieren diese ihre elektrische Festigkeit. Das Kabel kann dann durch einen Durchschlag ausfallen. Um die maximal mögliche Übertragungsleistung eines Energieseekabels abschätzen zu können, müssen neben den thermischen Eigenschaften die auftretenden Verluste bekannt sein.

In dieser Arbeit werden für ein dreiadriges Wechselstromkabel mit Leiterquerschnitten von 1200 mm^2 je Leiter die Wirbelstromverluste in den metallischen Komponenten mit einer FEM Simulation berechnet. Überprüft wird die Größenordnung der nach IEC 60287-1-1 berechneten Verluste in den Armierungsdrähten des Energieseekabels. Dabei werden ebenfalls die Schirm- und Leiterverluste mit berücksichtigt.

Adressen der Autoren:

Sturm Sebastian, Paulus Johannes, Kempke Joachim,
Hochschule für angewandte Wissenschaften, Würzburg-Schweinfurt

Die Erlaubnis zur Kopie in digitaler Form oder Papierform eines Teils oder aller dieser Arbeit für persönlichen oder pädagogischen Gebrauch wird ohne Gebühr zur Verfügung gestellt. Voraussetzung ist, dass die Kopien nicht zum Profit oder kommerziellen Vorteil gemacht werden und diese Mitteilung auf der ersten Seite oder dem Einstiegsbild als vollständiges Zitat erscheint. Copyrights für Komponenten dieser Arbeit durch Andere als FHWS müssen beachtet werden. Die Wiederverwendung unter Namensnennung ist gestattet. Es andererseits zu kopieren, zu veröffentlichen, auf anderen Servern zu verteilen oder eine Komponente dieser Arbeit in anderen Werken zu verwenden, bedarf der vorherigen ausdrücklichen Erlaubnis.

2 ENERGIESEEKABEL ZUR ÜBERTRAGUNG VON ELEKTRISCHER LEISTUNG

2.1 Aufbau des Energiesseekabels

Erläutert werden in erster Linie die für diese Arbeit relevanten Komponenten des Energiesseekabels. Das in dieser Arbeit untersuchte Energiesseekabel besteht aus drei Milliken-Leitern (1) die jeweils von vernetztem Polyethylen - XLPE (2) umgeben sind. Diese wiederum sind mit einer Schirmung aus Blei (6) umfasst. Zwischen den drei Leiterpaketen befinden sich Fülldrähte aus Polyethylene und Datenkabel. (8 und 9). Die verseilten Leiter werden durch Armierungsdrähte (11) aus Stahl umgeben. Der Aufbau des betrachteten Energiesseekabels ist in Abbildung 5 dargestellt.

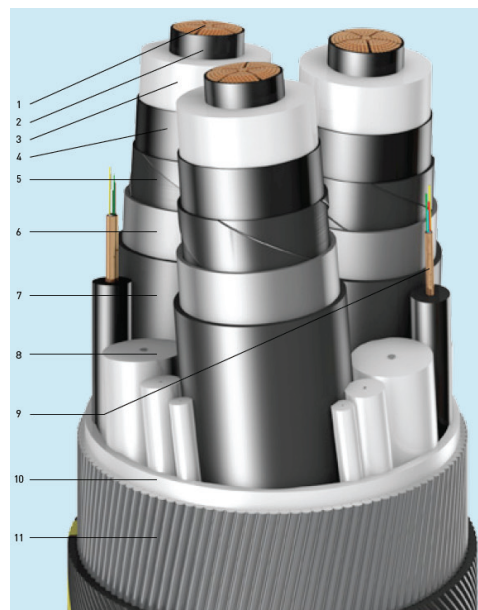


Abbildung 5 Aufbau eines Energiesseekabels (Bild: © Norddeutsche Seekabelwerke GmbH) mit Milliken-Leitern und einem Kabelquerschnitt von 1200 mm²

2.2 Verluste in einem dreiadrigen Energiesseekabel nach IEC 60287-1-1

Mit der IEC Norm können die Verluste in Energiesseekabeln abgeschätzt werden. In dieser Arbeit werden die in der IEC 60287-1-1 zu Grunde liegenden Verluste in den metallischen Komponenten eines Energiesseekabels mittels FEM überprüft. Zunächst wird die Verlustberechnung nach IEC Norm für das betrachtete Energiesseekabel erläutert. Zuerst wird der elektrische Widerstand der Leiter unter der Berücksichtigung des Einflusses von Skin- und Proximity Effekt ermittelt. Dazu wird der Gleichstromwiderstand des Leiters mit Faktoren nach [1] erhöht.

$$R = R' \cdot (1 + y_s + y_p) \quad [1]$$

Die Faktoren (y_S und y_P) werden durch folgende Formeln gebildet. [2] und [3]

$y_S = \frac{x_S^4}{192 + 0,8 \cdot x_S^4}$ [2]	$y_P = \frac{x_P^4}{192 + 0,8 \cdot x_P^4} \cdot \left(\frac{d_c}{s}\right)^2 \cdot 2,9 \cdot \left[0,312 \cdot \left(\frac{d_c}{s}\right)^2 + \frac{1,18}{\frac{x_P^4}{192 + 0,8 \cdot x_P^4} + 0,27} \right]$ [3]
$x_S^2 = \frac{8\pi f}{R'} \cdot 10^{-7} k_S$	$x_P^2 = \frac{8\pi f}{R'} \cdot 10^{-7} k_P$

R	=	Wechselstromwiderstand der Leiter (Ω)
R'	=	Gleichstromwiderstand (Ω)
y_S	=	Verlustfaktor zur Berücksichtigung des Skineffekts (-)
y_P	=	Verlustfaktor zur Berücksichtigung des Proximity Effekts (-)
k_S	=	Verlustfaktor Skineffekt (-)
k_P	=	Verlustfaktor Proximity Effekt (-)
d_c	=	Äquivalenzdurchmesser des Leiters (mm)
s	=	Abstand zwischen den Leiterachsen (mm)
x_P	=	Faktor zur Kalkulation des Proximity Effekts (-) 0,37 für Milliken-Leiter
x_S	=	Faktor zur Kalkulation des Skineffekts (-) 0,435 für Milliken-Leiter
f	=	Frequenz (Hz)

Zur Berechnung der Verluste in den Armierungsdrähten und der Bleischirmung werden Verlustfaktoren gebildet. Die Formeln [4] und [5] zur Berechnung dieser Verlustfaktoren sind im Folgenden dargestellt.

Widerstandsverluste in der Armierung λ_2	Widerstandsverluste im Schirm λ_1
$\lambda_2 = 1,23 \cdot \frac{R_A}{R} \cdot \left(\frac{2c}{d_A}\right)^2 \cdot \frac{1}{\left(\frac{2,77 \cdot R_A \cdot 10^6}{\omega}\right)^2 + 1}$ [4]	$\lambda_1 = \frac{R_S}{R} \cdot \frac{1}{\left(\frac{R_S}{2 \cdot \pi \cdot f \cdot 10^{-7} \ln\left(\frac{2s}{d}\right)}\right)^2 + 1}$ [5]

λ_1	=	Verhältnis der Verluste in der Schirmung zu den Verlusten in den Leitern (-)
λ_2	=	Verhältnis der Verluste in der Armierung zu den Verlusten in den Leitern (-)
R_S	=	Gleichstromwiderstand der Schirmung (Ω)
d_A	=	Durchmesser der Armierung (mm)
c	=	Abstand zwischen den Achsen der Leiter und der Achse des Kabels (mm)
d	=	Mittlerer Durchmesser der Schirmung (mm)
R_A	=	Gleichstromwiderstand der Armierung (Ω)
ω	=	Kreisfrequenz (1/s)

Die Verluste in der Armierung und im Schirm ergeben sich nach den Gleichungen. [6] und [7]

$$\lambda_2 = \frac{P_A}{P_L} \quad [6] \qquad \lambda_1 = \frac{P_S}{P_L} \quad [7]$$

P_A = Verluste in der Armierung (W)
 P_S = Verluste in der Schirmung (W)
 P_L = Verluste in allen Leitern des Energiesekabels (W)

Die anhand dieser Formeln abgeschätzten Verluste pro Meter Kabellänge (W/m) sind in Abbildung 6 für einen Leiterstrom von 1000 A effektiv dargestellt.

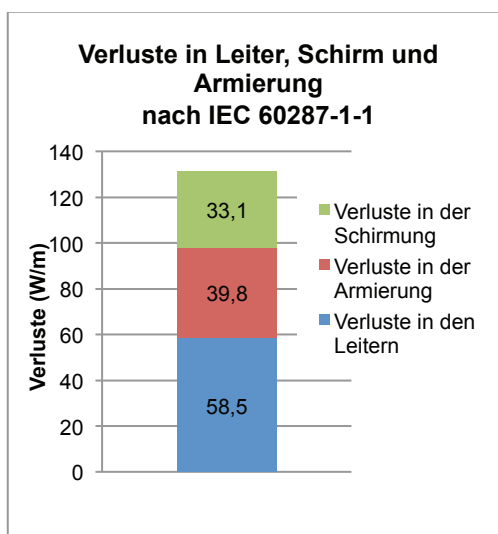


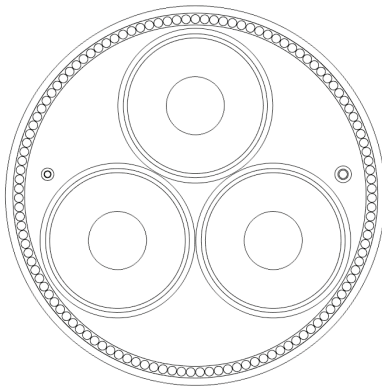
Abbildung 6 Nach IEC 60287-1-1 kalkulierte Verluste in Schirm, Armierung und Leitern in einem Energiesseekabel mit einem Leiterquerschnitt von 1200 mm²

Für Energiesseekabel mit einem Leiterquerschnitt von 1200 mm² sind die Verluste im Mantel und der Schirmung größer als in den Leitern. Vergleicht man die Werte mit einem Energiesseekabel mit einem Leiterquerschnitt von 285 mm² und einem transportiertem Strom von 300 A (dann sind die Leiterverluste jeweils gleich) ergeben sich nach IEC Norm Schirm- und Armierungsverluste von 0,3 und 3,5 W/m. Die abgeschätzten Verluste für ein Kabel mit 1200 mm² Leiterquerschnitt erscheinen somit relativ hoch.

3 FEM SIMULATIONSMODELL

3.1 Aufbau des Simulationsmodells

Das FEM Simulationsmodell ist eine vereinfachte zweidimensionale Abbildung des Energiesseekabels. Die für die Simulation nicht relevanten Gebiete werden nicht abgebildet, um den Rechenaufwand der Simulation möglichst zu begrenzen. Den drei Leitern wird jeweils ein Strom von 1000 A (effektiv) mit der für Drehstrom üblichen Phasenverschiebung von 120 ° bei einer Frequenz von 50 Hz eingeprägt. In Abbildung 7 ist der geometrische Aufbau der Simulation sowie die relevanten Stoffwerte dargestellt.



Stoffwerte	Elektrische Leitfähigkeit σ (S/m)	Magnetische Permeabilität μ_r
Leiter (90 °C)	4,55 bzw. $5,5 \cdot 10^7$	1
Schirm (80 °C)	$3,77 \cdot 10^6$	1
Armierung (60 °C)	$4,95 \cdot 10^6$	300

Abbildung 7 Geometrischer Aufbau des Simulationsmodells

Mit dem Energiesseekabel wird ein ausreichend großer Raum simuliert um die Ausbreitung der magnetischen und elektrischen Felder nicht zu stören. Die zur Berechnung verwendeten Stoffwerte ergeben sich bei der maximal zulässigen Temperatur. Die verwendeten elektrischen Leitfähigkeiten für Leiter (Kupfer) und Schirm (Blei) ergeben sich bei den Maximaltemperaturen von 90 °C am Leiter und 80 °C am Schirm. Bei den Armierungsdrähten wird von einer Temperatur von 60 °C ausgegangen.

In der Realität treten geringere Leiterverluste wegen des verwendeten Milliken-Leiters auf. Dieser kann aufgrund der Komplexität in der Simulation nicht berücksichtigt werden. Der Milliken-Leiter besteht aus einzelnen Kupferdrähten welche in sechs Segmente unterteilt sind. Innerhalb dieser Segmente sind die Kupferdrähte verseilt. Dadurch wird der Einfluss des Skineffektes auf die Verluste im Leiter reduziert. Die im Simulationsmodell berechneten Verluste in den Leitern müssen daher größer sein als in der Realität. Hier wird sich wie folgt beholfen: Die Leitfähigkeit der Leiter wird erhöht um die Auswirkung des Milliken-Aufbaus auf die Verluste nachzustellen. Dieser Faktor wird mit Hilfe der IEC 60287-1-1 gebildet. Dazu wird der Widerstand eines Rundleiters unter gleichen Umständen berechnet. Das Verhältnis der äquivalenten Leitfähigkeit eines Milliken-Leiters zu einem Rundleiter beträgt 1,2. Die äquivalente elektrische Leitfähigkeit eines Millikenleiters ist also um 20 % höher als die eines Rundleiters. Um diesen Faktor wird die elektrische Leitfähigkeit der Leiter im Simulationsmodell erhöht. (Siehe Abbildung 7 Leitfähigkeit Kupfer $4,55 \cdot 10^7$ (S/m) für Kupfer bei 90 °C und $5,5 \cdot 10^7$ (S/m) um den Einfluss des Milliken-Leiters zu berücksichtigen)

3.2 Berechnungsergebnisse der FEM Simulation

Im Folgenden werden die berechneten Verluste dargestellt und erläutert. Abbildung 8 zeigt das Simulationsergebnis als graphische Oberfläche.

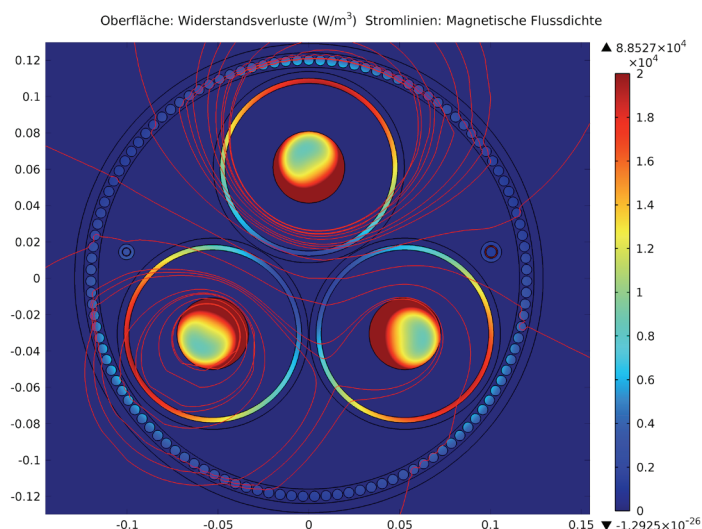


Abbildung 8 Verluste in den metallischen Komponenten des betrachteten Energiesekabels und die magnetische Flussdichte als Feldlinien

Rot dargestellt sind Bereiche mit hohen Verlusten (bis zu knapp $1 \cdot 10^5 \text{ W/m}^3$), in blauen Bereichen (Außerhalb der Leiter und teilweise in den Armierungsdrähten) treten geringe oder gar keine Verluste auf. Die magnetische Flussdichte ist durch die Feldlinien dargestellt. Der magnetische Fluss verdichtet sich in der Mitte des Leiters. Die auf den ersten Blick ungleichmäßige Flussdichte kommt durch den Phasenversatz des Stroms in den drei Leitern zu Stande. Synchron zu den sinusförmigen und phasenverschobenen Strömen in den Leitern „laufen“ die eingeschnürten Feldlinien in der Kabelmitte um.

Die Aufteilung der Verluste in den drei Leitern sind auf Skin- und Proximity Effekte zurückzuführen. Der Skineffekt sorgt für eine Stromverdrängung in den Leitern zum Rand hin. Der Proximity Effekt verstärkt, bzw. schwächt diese Verdrängung ab. Wie in der Abbildung zu sehen, verstärkt der Proximity Effekt die Stromverdrängung in den zur Mitte hin gerichteten Bereichen der Leiter. Die Verluste im Schirm verteilen sich ebenfalls nicht gleichmäßig. In den Randbereichen sind die Verluste höher als in der Mitte der Anordnung. Die gegenseitige Abschwächung der Magnetfelder verursacht hier geringere Verluste. Die ungleichmäßige Verteilung in den Armierungsdrähten folgt aus dem Abstandsgesetz. Das Magnetfeld um den Leiter nimmt mit der Beziehung $1/r$ ab.

Die berechneten Verluste sind neben den nach IEC 60287-1-1 kalkulierten in Abbildung 9 dargestellt.

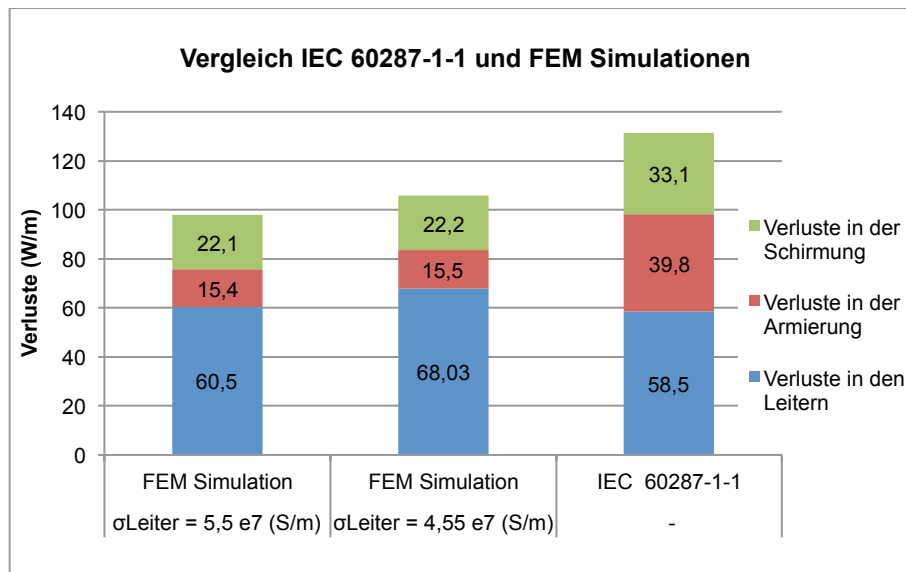


Abbildung 9 Vergleich der nach IEC 60287-1-1 kalkulierten und mittels FEM berechneten Verluste

Der Betrag der Verluste in den Leitern hat nur einen marginalen Einfluss auf die Verluste in Schirmung und Armierung. Die mittels FEM berechneten Verluste sind deutlich geringer als nach IEC 60287-1-1. Die Armierungsverluste betragen lediglich ein Drittel, die Schirmverluste in etwa zwei Drittel der Verluste nach Norm. Die Gesamtverluste sind je nach verwendeter elektrischer Leitfähigkeit der Leiter um 25 bis 19 % geringer.

4 ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK

Die in dieser Arbeit mit FEM berechneten Verluste für ein Energiesseekabel sind deutlich geringer als wie sie nach IEC 60287-1-1 üblicherweise kalkuliert werden. Berücksichtigt man den Millikenaufbau, indem man eine größere elektrische Leitfähigkeit der Leiter als äquivalente Leitfähigkeit einsetzt, ergeben sich geringere Leiter- und Gesamtverluste. Ein Einfluss auf die Schirm- und Armierungsverluste ist dabei fast nicht zu beobachten. Dieser Sachverhalt erscheint einleuchtend, da die induzierten Verluste neben weiteren, unveränderten Parametern von der magnetischen Feldstärke und diese von der Stromstärke des Leiterstroms abhängig sind.

In [1] wird darauf hingewiesen, dass die in der IEC Norm verwendeten Formeln zur Abschätzung der Verluste als „gute Näherung“ für Leiterquerschnitte von weniger als 400 mm² zu sehen sind. In der aktuellen IEC Norm ist dieser Hinweis jedoch nicht zu finden. Die naheliegende Vermutung, dass die Berechnungsgleichungen für größere Leiterquerschnitte nicht mehr stimmen, spiegelt sich in den Berechnungsergebnissen wieder.

Die Auswirkungen weiterer wichtiger Einflussgrößen sind in zukünftigen Betrachtungen zu untersuchen. In dieser Arbeit wurde unterstellt, dass die einzelnen Armierungsdrähte nicht in Kontakt stehen. Die Armierungsdrähte sind in Bitumen eingebettet, welches die Armierungsdrähte untereinander isoliert. Dies kann jedoch in der Realität nicht immer sichergestellt werden. Stehen

mehrere Drähte in Kontakt, vergrößern sich die Wirbelstromverluste. (Vergleiche hierzu die geblechte Ausführung von Transformatorkernen zur Reduzierung der Wirbelstromverluste)

Weiteres Optimierungspotential steckt in der Auswahl der Stahlsorte. Je nach Materialart ändern sich die elektrische Leitfähigkeit und die magnetische Permeabilität. Allgemein sind die Wirbelstromverluste umso geringer, je niedriger die elektrische Leitfähigkeit eines Materials ist. Die magnetische Permeabilität hat ebenfalls Einfluss auf die Wirbelstromverluste. Hier kann mittels Parameterstudien ein optimaler Werkstoff ermittelt werden.

Zwischen den auftretenden Verlusten und der sich einstellenden Temperatur besteht eine Kopplung. Die Leiterverluste steigen mit zunehmender Temperatur wegen des größer werdenden elektrischen Widerstandes. In Schirmung und Armierung hingegen werden die Verluste durch Wirbelströme mit zunehmender Temperatur geringer. Zur exakten Bestimmung der auftretenden Verluste muss daher der Temperaturverlauf im Kabel bekannt sein.

REFERENZEN

- [1] BRAKELMANN, H. 2005. Belastbarkeiten der Energiekabel – Berechnungsmethoden und Parameteranalysen –
VDE-Verlag ISBN 3-8007-1406-X
- [2] INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION IEC, 2001-11 Publication 60287-1-1, "Electric cables - calculation of the current rating - current rating equations (100 % load factor) and calculation of losses - general"
- [3] INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION IEC, 2005-03 Publication 60502-2,