

Starkstromkabel – Laudatio zum Stand der Technik

In einem modernen Starkstromkabel steckt weit mehr als nur blanker Kupfer mit etwas Isolation. Ganz besonders gilt dies für Drehstromkabel mit Leiterquerschnitten ab 25 mm^2 bzw. mit Stromstärken über 100 A. Es ist deshalb nicht nachvollziehbar, dass in der heutigen Zeit der Kabelpreis primär durch den Tageskurs der Kupfernotierung bestimmt wird. In jüngerer Zeit hat man nun doch erkannt, dass die elektromagnetische Umweltverträglichkeit bei der Starkstromübertragung, maßgebend durch die Konstruktion des Starkstromkabels beeinflusst wird und somit verbunden mit Know-how ein höherer Mehrwert geschaffen werden kann.

Text: Christian Fischbacher

Kürzlich wurde in einer Fachzeitschrift über ein Starkstromverkabelungsproblem berichtet, es ging dabei um die Verlegung von Einleiterkabel in je vierfacher Ausführung pro Außenleiter. Der Experte gab dem Fragesteller die zwei Empfehlungen in **Bild 1** und **Bild 2** ab. Gemäß der Normenreihe DIN VDE 0100-540 existiert die EMV-Anforderung, dass keine AC-Ströme auf Schutzleiter, Erdleiter und

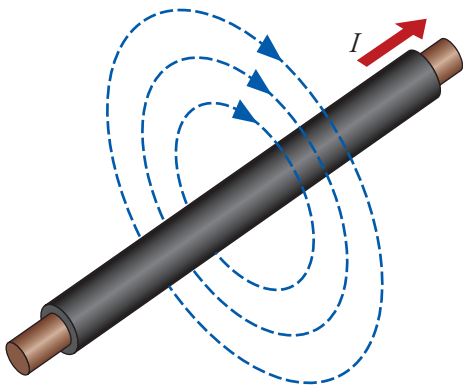
Potenzialausgleichsleiter fließen dürfen. Diese Forderung wird in der Praxis leider immer noch verletzt; die induzierten Erdleiterströme betragen bei der Verlegung nach Bild 1 ca. 50 A, nach Bild 2 ca. 40 A. Es ist unverständlich, dass Experten immer noch solche Empfehlungen abgeben, weil Erdschleifenströme so oder so zu den ärgerlichsten EMV-Problemen in der Elektrotechnik gehören; siehe auch [1].



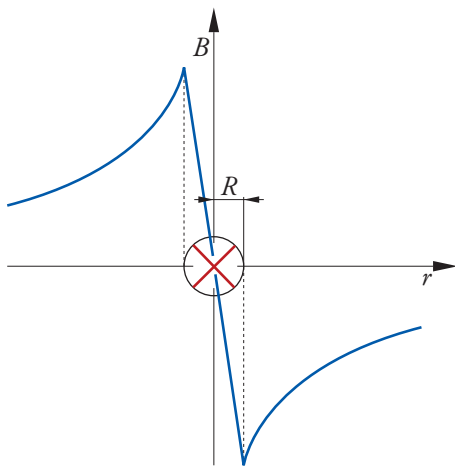
01 Einleiterkabel, parallel verlegt; $I_{\text{tot}} \approx 1000 \text{ A}$



02 Einleiterkabel, im Bündel verlegt; $I_{\text{tot}} \approx 1000 \text{ A}$



03 Magnetfeld um einen stromdurchflossenen Leiter



04 Magnetfeldverlauf

Einzelader parallel



Einzelader gebündelt



Standardkabel



CFW PowerCable



05 Installationsarten

Im weiteren darf es bei der Verlegung von Starkstromkabeln im Normalfall keine Rolle spielen, wie die Kabel verlegt werden: ob in Trassen, unterhalb von Decken, im Doppelboden oder in Kabelkavernen. Starkstromverbindungen müssen so ausgelegt sein, dass die magnetischen Streufelder sowie Erdschleifenströme keine Grenzwerte verletzen, weder gesetzliche noch technische. Im folgenden werden zwei EMV-Merkmale beschrieben, welche die NF-Qualität von Starkstromleitungen bestimmen.

Das magnetische Streufeld

Jeder stromdurchflossene Leiter erzeugt ein magnetisches Streufeld. Die Höhe dieses Streufelds ist abhängig von der Stromstärke sowie der Anordnung der stromführenden Leiter. Bild 3 und Bild 4 zeigen schematisch den Streufeldverlauf eines stromführenden Leiters.

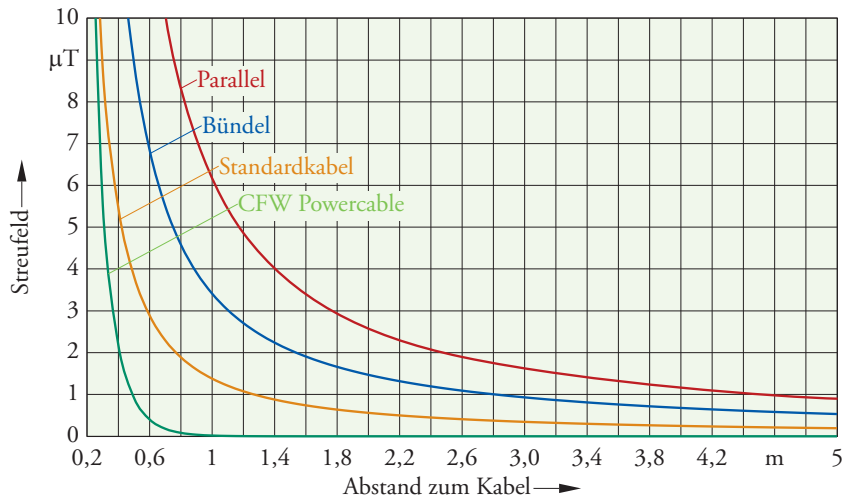
Um das resultierende, magnetische Streufeld zu minimieren, werden bei Starkstromverbindungen Hin- und Rückleiter möglichst nahe zusammengelegt. Noch viel effizienter lässt sich das Streufeld reduzieren, indem man die stromführenden Leiter zusätzlich verseilt. Dabei sollte die Schlaglänge aber optimal auf den Kabeldurchmesser abgestimmt sein. Je kleiner das Streufeld, umso höher der Wirkungsgrad und umso geringer werden ganz nebenbei auch die Übertragungsverluste. Die Installationsarten in Bild 5 werden nun entsprechend ihrer elektromagnetischen Verträglichkeit miteinander verglichen.

Damit die durchgeführten Berechnungen möglichst der Praxis entsprechen, wurden die Leiterströme unterschiedlich gewählt, damit sich auch ein Neutralleiterstrom einstellt. Die genauen Berechnungsparameter sind in Bild 6 eingetragen. Zudem wurden in der Simulation auch die induzierten PE-Ströme berücksichtigt. Die approximativen PE-Induktionsströme sind in in Bild 7 ersichtlich.

Ersichtlich ist, dass das magnetische Streufeld mit der „CFW PowerCable“-Technologie [2] steil abfällt: Somit werden mit dieser Technologie auch die Übertragungsverluste am kleinsten. Dies ist die Folge des zentrisch angeordneten Schutzleiters sowie der verseilten Außenleiter. Mit dieser Technologie wird der CH-Anlagegrenzwert ($1 \mu\text{T}$) bereits im Abstand von ca. 35 cm eingehalten und im Abstand von ca. 1 m auch der empfindlichste technische Grenzwert ($0,02 \mu\text{T}$). Der Elektroplaner braucht sich also bei der Kabelführung keine Gedanken mehr über die Einhaltung von Mindestabständen zu machen – selbst bei Strömen über 1000 A.

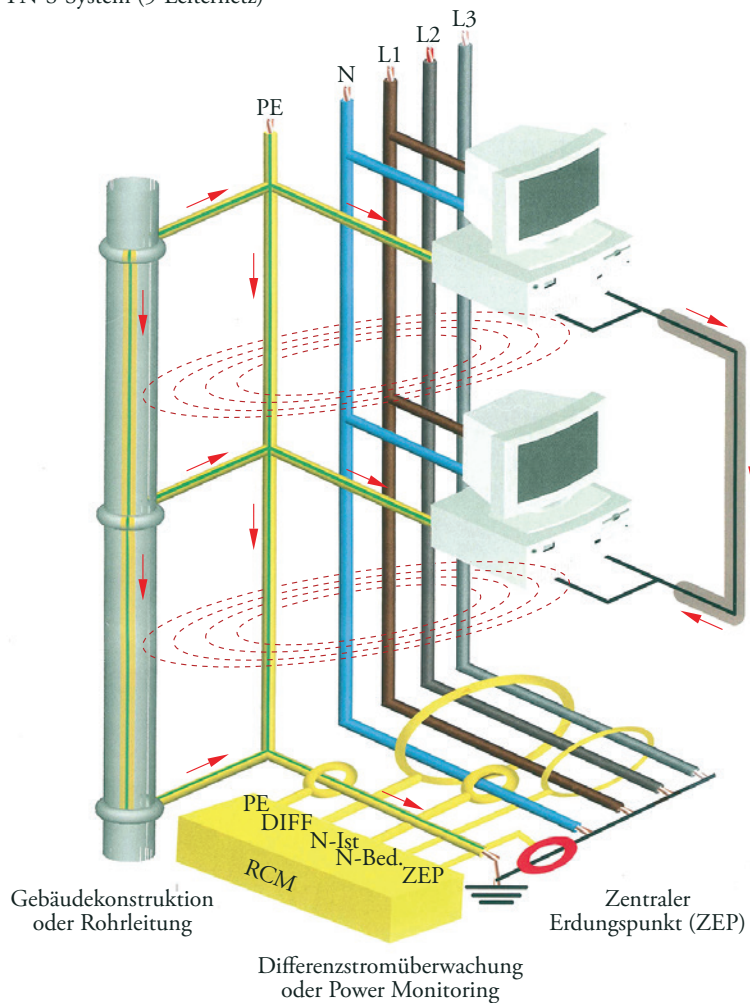
Die Induktion und Gegeninduktion

Magnetische Streufelder erzeugen in elektrisch leitenden Materialien Induktionsspannungen, die, wenn diese parallel zu den stromführenden Leiter angeordnet sind – beispielsweise Erd-



06 Magnetische Streufeldberechnungen für $I_1 = 250 \text{ A}$, $I_2 = 216 \text{ A}$, $I_3 = 195 \text{ A}$ und $I_N = 48,1 \text{ A}$

TN-S-System (5-Leiternetz)



07 Das Bild zeigt, dass der PE-Leiter im TN-S-Netz als Folge des Induktionsgesetzes nicht stromlos ist. Das rot eingezeichnete Streufeld induziert in die PE-Schleifen Induktionsspannungen, die sich in der Praxis als Erdschleifenströme (IPE) jederzeit nachweisen lassen, Teilströme findet man auch auf Elektronikplatinen und Datenkabelabschirmungen

leiter, Kabeltrassen, Gas- und Wasserleitungen – in sogenannte Erdschleifenströme umgewandelt werden. Bei Nichtbeachtung dieser Problematik können so auch bei TN-S-Installationen massive Erdschleifenströme entstehen, die nicht selten 10 % bis 15 % des größten Leiterstroms erreichen.

Die unangenehmen Folgen sind beispielsweise Korrosionsschäden, lästige Magnetfelderhöhungen, galvanische und magnetische Einkopplungen auf Elektronikplatinen, Daten- und Signalleitungen sowie zusätzliche Übertragungsverluste.

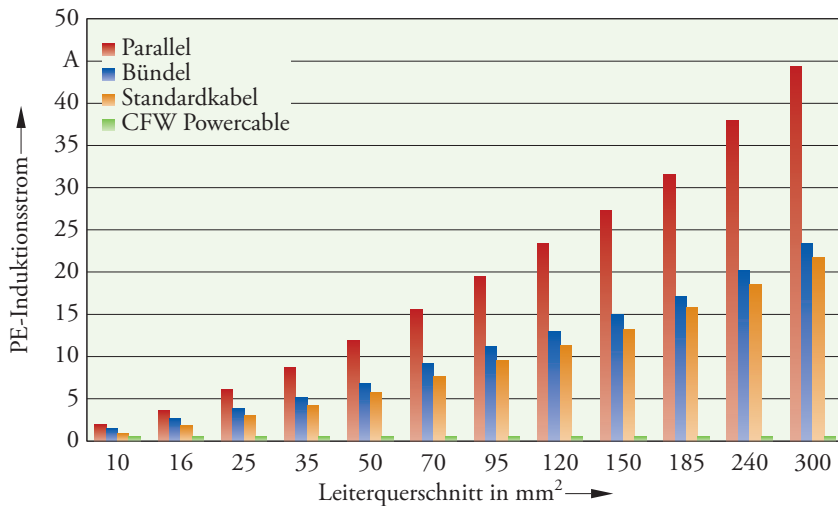
Genau genommen existieren zwei Induktionsprobleme, einerseits wenn der PE geometrisch unterschiedliche Abstände zu den Außenleitern aufweist (Induktion), andererseits wenn der PE parallel zu den Außenleitern angeordnet ist (Gegeninduktion). Diese, physikalisch wichtige Erkenntnis erklärt, warum der PE auch in einem 5-Leiter-Standardkabel nicht induktionsfrei ist, selbst wenn alle Leiter miteinander verseilt sind. Bild 8 zeigt die Induktionsproblematik an den abgebildeten Leiteranordnungen.

Die immer noch weitverbreitete Einzeladerverlegung erweist sich auch in dieser Betrachtung als ungünstigste Variante, sowohl in Bezug auf das magnetische Streufeld (Bild 6) als auch in Bezug auf die induzierten PE-Ströme (Bild 8). Auch Dipl.-Ing. Karl-Heinz Otto, öffentlich bestellter und vereidigter Sachverständiger für Elektrotechnik, rät dringend von einer Einzeladerverlegung ab.





Auch Standardkabel lösen das PE-Induktionsproblem nicht, weil der geometrische Abstand zu den Außenleitern unterschiedlich ist (Bild 5). Ab einem Leiterquerschnitt von 35 mm^2 liegen die PE-Induktionsströme im Bereich von 5 A. Alle Berechnungen wurden mit dem Simulationsprogramm EFC 400EP von der Forschungsgesellschaft für Umwelttechnik (FGEU) Berlin erstellt und bestätigen die praktischen Erfahrungswerte in jeder Beziehung.

Fazit

Nur die zentrische Anordnung des PE (Bild 5, rechts) verhindert induktive Einkopplungen und somit die gefürchteten Erdschleifenströme. Wer-



08 PE-Induktionsströme der betrachteten Leiteranordnungen bezüglich Querschnitt und Nennstrom

Leitungsart	B[μ T] d = 1.0m	I _{PE} [A] Induktionsstrom	I _{Diff} [%] bei Parallelbetrieb	Auswirkungen
	6.17	19.5	bis zu 100 %	Korrosionsschäden, Störeinflüsse auf Daten- und Signalleitungen, aufwendige Abschirmungsmassnahmen, unwirtschaftliche Leitungsverluste, gesundheitliche Risiken, etc.
	3.41	11.2	bis zu 75 %	dito
	1.39	9.5	bis zu 25 %	dito
	0.02	0.5	max. 3 %	keine

09 Vergleich der Installationsarten

den die Außenleiter zusätzlich mit der optimalen Schlaglänge um den PE verseilt („CFW PowerCable-Technologie“), reduziert sich das magnetische Streufeld exponentiell. Müssen große Ströme übertragen werden, so dürfen mehrere Kabel parallel geschaltet werden. Im Gegensatz zu Einleiterkabel teilen sich bei Parallelschaltung die Ströme gleicher Leiter völlig gleichmäßig auf: Leiterüberhitzungen als Folge ungleicher Stromverteilung sind ausgeschlossen. Die elementaren Aussagen werden in der Tabelle in **Bild 9** zusammengefasst. Induktionsfreie, streufeld- und verlustarme Starkstromkabel gehören heute definitiv zum Stand der Technik. (hz)

Literatur

- [1] Rudnik, S.: EMV-Fibel für Elektroniker, Elektroinstallateure und Planer. Berlin Offenbach: VDE VERLAG, 2015 (ISBN 978-3-8007-4007-9)
- [2] CFW EMV Consulting AG, Reute/Schweiz: www.cfw.ch

Autor

Christian Fischbacher ist Geschäftsleiter der CFW EMV Consulting AG in Reute/Schweiz.
ch.fischbacher@cfw.ch