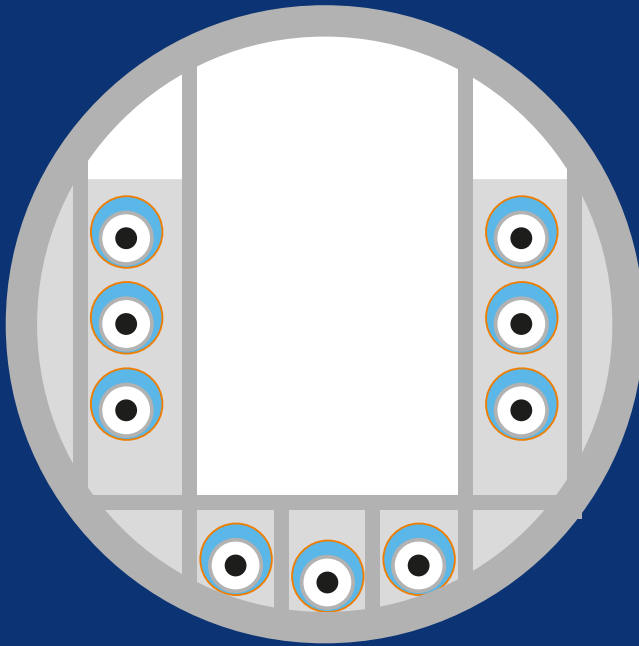
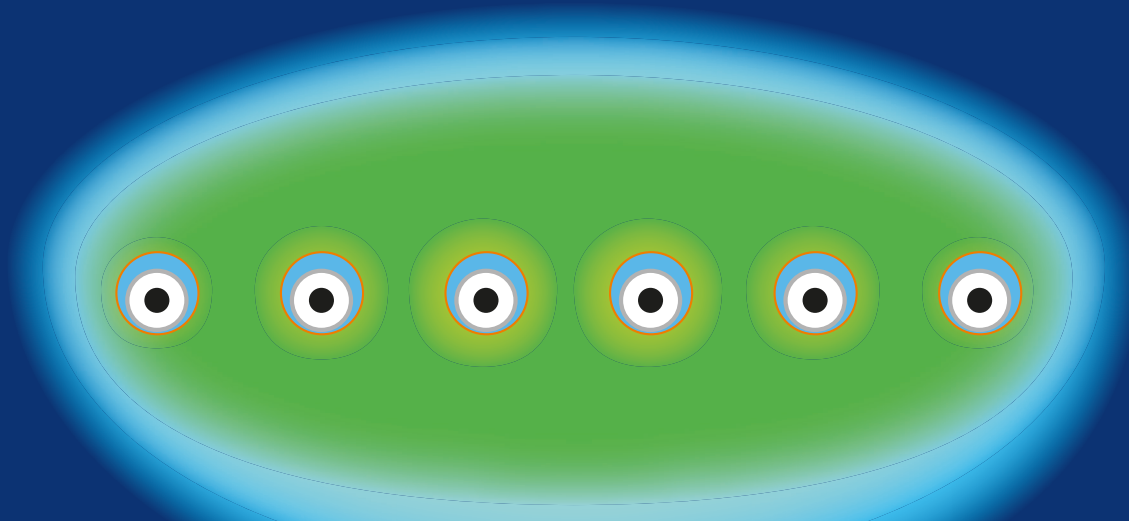


**H. BRAKELMANN  
L.J. JARASS**



# **Erdkabel für den Netzausbau**

**Höchstspannungskabel  
Drehstrom und Gleichstrom  
Minimaltrassen  
Zuverlässigkeit  
Kosten**



H. BRAKELMANN, L.J. JARASS

# Erdkabel für den Netzausbau

Höchstspannungskabel, Drehstrom und Gleichstrom,  
Minimaltrassen, Zuverlässigkeit, Kosten

Das könnte Sie besonders interessieren .....	4
Inhaltsverzeichnis .....	7
Teil I : Netzausbau für die Energiewende .....	22
1 Energiewende – erneuerbare statt konventionelle Stromproduktion .....	23
2 Grundlagen des Netzausbaus .....	45
3 Reduzierung des Netzausbaus durch Abregelung von Einspeisespitzen .....	61
4 Maßnahmen für den Netzausbau .....	79
Teil II : Netzausbau mit Drehstrom-Höchstspannungskabeln .....	94
5 Technische Grundlagen von Drehstrom-Höchstspannungskabeln .....	95
6 Kabelanlagen mit Reservekabeln oder Reservesystem – PowerTubes .....	130
7 Übertragungsleistungen von Drehstrom-Höchstspannungskabeln .....	142
8 Zuverlässigkeit von Drehstrom-Höchstspannungskabeln – PowerTubes .....	165
9 Minimaltrassen mit störungsorientierter Zusatzkühlung der Kabel .....	177
10 Minimaltrassen mit störungsorientierter Abregelung von Einspeisespitzen .....	211
11 Umweltaspekte von Drehstrom-Höchstspannungskabeln .....	231
12 Kosten von Drehstrom-Höchstspannungskabeln .....	250
Teil III : Netzausbau mit Gleichstrom-Höchstspannungskabeln .....	273
13 Technische Grundlagen von Gleichstrom-Höchstspannungskabeln .....	274
14 Übertragungsleistungen von Gleichstrom-Höchstspannungskabeln .....	287
15 Zuverlässigkeit von Gleichstrom-Höchstspannungskabeln – PowerTubes .....	299
16 Umweltaspekte von Gleichstrom-Höchstspannungskabeln .....	319
17 Kosten von Gleichstrom-Höchstspannungskabeln .....	323
Quellen .....	347

## Das könnte Sie besonders interessieren

Die Umstellungen bei der elektrischen Energieerzeugung mit zunehmendem Anteil von Kraftwerken für erneuerbare Energien verlagern die Erzeugungsschwerpunkte und erzwingen zusätzliche Energietransporte von Nord nach Süd. Bis 2030 sollen in Deutschland mehr als 6.200 km Drehstrom-Höchstspannungsleitungen und mehr als 2.800 km Gleichstrom-´Autobahnen´ gebaut werden, von denen Anfang 2019 rund ein Achtel realisiert waren. Wegen der Widerstände gegen Freileitungen wurden bei Drehstromleitungen Verkabelungen deutlich erleichtert und bei Gleichstromleitungen ein genereller Verkabelungsvorrang eingeführt.

Wie kann nun dieser Netzausbau versorgungssicher, umweltfreundlich, kostengünstig und v.a. zeitnah realisiert werden? Inwieweit ist es möglich, mit Hilfe von Voll- oder Teilverkabelungen günstigere und besser akzeptierte Trassen schneller durch die Genehmigungsverfahren zu bringen? Und v.a. auch: Gibt es Chancen, hierdurch die geplanten Investitionskosten von mehr als 50 Mrd. € zu verringern?

Das vorliegende Buch versucht, in allgemeinverständlicher Form die Problemstellungen und technischen, ökonomischen und ökologischen Parameter dieser gesellschaftlichen Herausforderung darzustellen. Es zeigt neben Verbesserungsmöglichkeiten bestehender Ansätze eine Vielzahl von innovativen Vorschlägen und Lösungen, wobei verbesserte Möglichkeiten von Teilverkabelungen in kritischen Bereichen im Vordergrund der Diskussion stehen.

### Teil I : Netzausbau für die Energiewende

Die erneuerbare Kraftwerksleistung soll in Deutschland von 113 GW in 2017 auf 223 GW in 2035 verdoppelt werden bei einer typischerweise benötigten Stromleistung von gut 60 GW. Dies führt zu wachsenden momentanen Leistungsüberschüssen. ▶ Tab. 1.1, Tab. 1.2

Die Stromproduktion aus Sonne und Wind fluktuiert extrem. Anstiege innerhalb eines Tages von fast Null auf sehr hoch und dann wieder innerhalb eines Tages auf fast Null sind nicht selten. Es gibt deutschlandweit immer wieder einige Tage hintereinander ohne nennenswerte Stromproduktion aus Wind und Sonne (Dunkelflauten), die aber dann von Tagen mit deutlich stärkerer Produktion abgelöst werden. ▶ Kap. 1.2

Viele Maßnahmen zum Ausgleich von Stromangebot und Stromnachfrage erfordern grundsätzlich wenig überregionalen Netzausbau, hingegen erfordern verbrauchsferne Stromproduktion, produktions- oder verbrauchsferne Stromspeicher sowie internationaler Stromhandel viel überregionalen Netzausbau. ▶ Tab. 1.7

Rund ein Drittel des geplanten Netzausbaus wird als Erdkabel realisiert werden verglichen mit nur rund 2% im Bestandsnetz. ▶ Tab. 2.3

Durch eine störungsorientierte statt einer generellen Abregelung von Einspeisespitzen kann der erforderliche Netzausbau deutlich stärker verringert werden. ▶ Tab. 3.1

Leitertemperaturmonitoring kombiniert mit Hochtemperaturleiterseilen erhöht die Versorgungssicherheit und verringert kostengünstig den Neubau von Leitungen. ▶ Kap. 4.1.3(2)

380-kV-Kabel sind Stand der Technik, die Zusatzkühlung von 380-kV-Kabeln ist langjährig erprobt. ▶ Kap. 4.2.2

## Teil II : Netzausbau mit Drehstrom-Höchstspannungskabeln

PowerTubes-Kabelsysteme haben mindestens ein Reservekabel, das ein ausgefallenes Kabel vorübergehend ersetzen kann und damit die Zuverlässigkeit des Übertragungssystems und die Akzeptanz eines Netzausbaus entscheidend erhöht. ▶ Tab. 6.1

Die Übertragungsleistung kann durch leistungsoptimierte Kabel mit erhöhtem Leiterquerschnitt deutlich erhöht werden. ▶ Tab. 7.2

Bei Kabeln ist vorübergehend eine Überschreitung der Übertragungsnennleistung möglich, insbesondere auch bei Netzstörungen. Dies verringert den erforderlichen Netzausbau und erhöht zudem Netzstabilität und Versorgungssicherheit. ▶ Abb. 7.6

Bei einer 10 km langen Teilverkabelung mit zwei 380-kV-Drehstromkabelsystemen ist mindestens ein System rund 18 Stunden pro Jahr ungeplant nicht verfügbar. Durch Einsatz von umschaltbaren Reservekabeln (PowerTubes-Prinzip) und einem mechanischen Schutz der Kabel wird die Verfügbarkeit des Kabelsystems ganz entscheidend erhöht und – bei Umschaltung mit Trennschaltern – sogar die Verfügbarkeit von Freileitungen spürbar übertroffen. ▶ Tab. 8.3

Eine störungsorientierte Zusatzkühlung ermöglicht Minimaltrassen mit nur 2 statt 4 Kabelsystemen und damit gerade in kritischen Bereichen Teilverkabelungen mit umweltschonenden schmalen und kurzen Trassen. ▶ Kap. 9.2

Nur bei mehr als einer Woche andauernden Einspeisungen mit Höchstlast sowie bei mehrstündigen Netzstörungen muss die Zusatzkühlung bei Standardkabeln mit 2.500 mm<sup>2</sup>-Kupferleitern eingeschaltet werden, bei leistungsoptimierten Kabeln mit 3.500 mm<sup>2</sup>-Kupferleitern noch deutlich seltener oder – je nach Ausführung – gar nicht. ▶ Abb. 9.14

Während durch eine Zusatzkühlung der Kabel die Übertragungsleistung vorübergehend erhöht wird, wird durch eine störungsorientierte Abregelung die erforderliche Übertragungsleistung vorübergehend verringert. Auch durch diese Maßnahme werden Minimaltrassen mit nur 2 statt 4 Kabelsystemen möglich bei einem Abregelungsbedarf deutlich unterhalb der gesetzlichen Abregelungsgrenze von 3%. ▶ Tab. 10.4

Der Boden wird durch Drehstrom-Höchstspannungskabel in den relevanten Wurzelbereichen um weniger als 1°C erwärmt. Mit einer für die Vegetation signifikanten Beeinflussung ist deshalb nicht zu rechnen. ▶ Abb. 11.3

Magnetfelder von Drehstrom-Höchstspannungskabeln können deutlich unter dem gesetzlichen Grenzwert gehalten und durch Kompensationleiter weiter reduziert werden. ▶ Abb. 11.12

Wird eine zweissystemige 380-kV-Freileitung auf 2 km mit 4 Kabelsystemen verkabelt, sind die Investitionskosten gut fünfmal so hoch wie bei einer Freileitungsausführung, als Minimaltrassenausführung mit 2 Kabelsystemen und Reservekabel nur gut dreimal so hoch. ▶ Abb. 12.1

Die Gesamtkosten (inkl. Betriebskosten) steigen wegen der bei Kabeln niedrigeren Übertragungsverluste weniger stark: Bei einer Verkabelung mit 4 Kabelsystemen sind sie knapp dreimal so hoch, als Minimaltrassenausführung mit 2 Kabelsystemen und Reservekabel nur knapp zweimal so hoch. ▶ Abb. 12.4

Bezogen auf die Gesamtkosten einer neuen Trasse fallen für eine 5%ige Teilverkabelung nur Mehrkosten von weniger als einem Zehntel an. ▶ Abb. 12.6, untere 3 Linien

### Teil III : Netzausbau mit Gleichstrom-Höchstspannungskabeln

Eine Erhöhung der Übertragungsleistung durch störungsorientierte Zusatzkühlung von Gleichstrom-Höchstspannungskabeln ist nur bei thermischen Engpässen sinnvoll. ► Kap. 14.3.2

Durch Reservekabel kann die Zuverlässigkeit eines Kabelsystems um einen Faktor 10 erhöht werden, bei zusätzlicher Verlegung in einem Mantelrohr um einen Faktor 40. ► Abb. 15.8

Die Ersparnis an Netzverlustkosten durch PowerTubes-Kabelanlagen mit Reservekabel ist weit aus höher als der nötige Zusatzaufwand. ► Kap. 15.3.2

Der Boden wird durch Gleichstrom-Höchstspannungskabel in den relevanten Wurzelbereichen um weniger als 1°C erwärmt. Mit einer für die Vegetation signifikanten Beeinflussung ist deshalb nicht zu rechnen. ► Kap. 16.1.2

Magnetfelder von Gleichstrom-Höchstspannungskabeln liegen weit unter dem gesetzlichen Grenzwert. ► Abb. 16.2

Die Investitionskosten einer Gleichstromleitung sind bei einer Vollverkabelung über 750 km maximal um die Hälfte höher als bei einer Freileitungsausführung. ► Abb. 17.1

Die Gesamtkosten (inkl. Betriebskosten) sind bei einer Vollverkabelung über 750 km wegen der bei Kabeln niedrigeren Übertragungsverluste nur maximal ein Viertel höher als bei einer Freileitungsausführung. ► Abb. 17.3a

Bei einer Auslegung mit Reservekabel muss ein Kabelsystem viel seltener störungsbedingt abgeschaltet werden, was die störungsbedingt nicht übertragbare Energie deutlich verringert. Dies führt z.B. bei zwei 750 km langen Gleichstromsystemen über 40 Jahre zu Kostenvorteilen von bis zu 2,6 Mrd. €. ► Kap. 17.3.3

Wer Genaueres über die Fakten und die daraus resultierenden Ergebnisse erfahren will, findet diese Informationen in den entsprechenden Kapiteln. Für kritische Kommentare, Fehlerhinweise und Verbesserungsvorschläge an MAIL@JARASS.COM sind wir dankbar.