

## Anwendungsbeginn

Anwendungsbeginn dieser Norm ist ...

### Inhalt

	Seite
Nationales Vorwort.....	7
Einleitung .....	8
1 Anwendungsbereich .....	9
2 Begriffe .....	9
3 Elektrisches Feld und Ionenstrom .....	10
3.1 Beschreibung der physikalischen Phänomene .....	10
3.2 Rechenverfahren .....	13
3.2.1 Allgemeines .....	13
3.2.2 Semianalytisches Verfahren.....	14
3.2.3 Finite-Elemente-Methode .....	16
3.2.4 BPA-Verfahren .....	17
3.2.5 Empirische Verfahren des EPRI.....	17
3.2.6 Aktuelle Fortschritte.....	18
3.3 Experimentelle Daten .....	19
3.3.1 Allgemeines .....	19
3.3.2 Messausrüstung und Messverfahren .....	19
3.3.3 Versuchsergebnisse zum elektrischen Feld und zum Ionenstrom.....	21
3.3.4 Diskussion .....	21
3.4 Bedeutung für die menschliche und die natürliche Umwelt .....	23
3.4.1 Allgemeines .....	23
3.4.2 Statisches elektrisches Feld .....	23
3.4.3 Forschungen zur Raumladung .....	24
3.4.4 Wissenschaftliche Überprüfung.....	29
3.5 Entwurfspraxis in den verschiedenen Ländern .....	31
4 Magnetfeld .....	32
4.1 Beschreibung physikalischer Phänomene .....	32
4.2 Magnetfeld von HGÜ-Leitungen.....	32
5 Funkstörungen (hochfrequentes Rauschen).....	33
5.1 Beschreibung von Funkstörphänomenen bei HGÜ-Anlagen .....	33
5.1.1 Allgemeines .....	33
5.1.2 Physikalische Aspekte von Gleichstrom-Koronaentladungen.....	33
5.1.3 Prozess der Entstehung eines Geräuschfeldes bei Gleichstromleitungen .....	34
5.1.4 Eigenschaften der von einer Gleichstromleitung ausgehenden Funkstörung .....	34
5.1.5 Faktoren, die die von Gleichstromleitungen ausgehenden Funkstörungen beeinflussen .....	35
5.2 Rechenverfahren .....	38

	Seite	
5.2.1	Empirische Formel des EPRI .....	38
5.2.2	Empirisches Verfahren des IREQ .....	39
5.2.3	Vorhersageformel des CISPR für Funkstörungen an zweipoligen Leitungen .....	39
5.3	Experimentelle Daten .....	40
5.3.1	Messeinrichtung und Messverfahren .....	40
5.3.2	Versuchsergebnisse zu Funkstörungen .....	41
5.4	Kriterien der verschiedenen Länder .....	41
6	Hörbare Geräusche .....	42
6.1	Grundsätze zu den hörbaren Geräuschen .....	42
6.2	Beschreibung physikalischer Phänomene .....	43
6.2.1	Querprofile .....	44
6.2.2	Statistische Verteilung .....	46
6.2.3	Einflussfaktoren .....	48
6.2.4	Auswirkung der Höhe über dem Meeresspiegel .....	49
6.2.5	Abschließende Bemerkungen .....	50
6.3	Rechenverfahren .....	50
6.3.1	Allgemeines .....	50
6.3.2	Theoretische Analyse der Fortpflanzung von hörbaren Geräuschen .....	50
6.3.3	Empirische Formeln für die hörbaren Geräusche .....	51
6.3.4	Semi-empirische Formeln für die hörbaren Geräusche .....	51
6.3.5	Abschließende Bemerkungen .....	54
6.4	Experimentelle Daten .....	55
6.4.1	Messverfahren und Messausrüstung .....	55
6.4.2	Versuchsergebnisse zu den hörbaren Geräuschen .....	55
6.5	Entwurfspraxis in den verschiedenen Ländern .....	55
6.5.1	Allgemeines .....	55
6.5.2	Auswirkungen von hörbaren Geräuschen auf Menschen .....	56
6.5.3	Pegel der hörbaren Geräusche und dadurch hervorgerufene Beschwerden .....	56
6.5.4	Grenzwerte der hörbaren Geräusche von HGÜ-Leitungen in verschiedenen Ländern .....	60
6.5.5	Für die Geräuschpegel empfohlene Grenzwerte .....	60
Anhang A (informativ) Versuchsergebnisse zum elektrischen Feld und zum Ionenstrom .....		62
A.1	± 500-kV-HGÜ-Leitung der Bonneville Power Administration .....	62
A.2	FURNAS ± 600-kV-HGÜ-Leitung .....	62
A.3	Manitoba Hydro ± 450-kV-HGÜ-Leitung .....	63
A.4	Hydro-Québec-New England ± 450-kV-HGÜ-Leitung .....	65
A.5	IREQ-Prüfleitungsstudie der ± 450-kV-HGÜ-Leitungskonfiguration .....	66
A.6	HVTRC-Prüfleitungsstudie einer ± 400-kV-HGÜ-Leitungskonfiguration .....	67
A.7	Prüfungsstudie in China .....	68
Anhang B (informativ) Versuchsergebnisse zu den Funkstörungen .....		71

	Seite
B.1 1 100-kV-Gleichstrom-Prüfprojekt der Bonneville Power Administration .....	71
B.1.1 Allgemeines .....	71
B.1.2 Querprofil .....	71
B.1.3 Einfluss des Leitergradienten .....	72
B.1.4 Prozentuale kumulative Verteilung .....	73
B.1.5 Beeinflussung durch Wind .....	75
B.1.6 Spektrum .....	76
B.2 Hydro-Québec Institute of Research .....	77
B.2.1 Allgemeines .....	77
B.2.2 Kumulative Verteilung .....	77
B.2.3 Spektrum .....	78
B.2.4 Querprofile .....	78
B.2.5 Kumulative Verteilung bei unterschiedlichen Spannungen .....	79
B.3 Gleichstromleitungen in China .....	79
Anhang C (informativ) Versuchsergebnisse zu den hörbaren Geräuschen .....	83
Literaturhinweise .....	87
<b>Bilder</b>	
Bild 1 – Einpolige und zweipolige Raumladungsregionen einer HGÜ-Leitung [1] .....	11
Bild 2 – Querprofil des Magnetfeldes von ± 800-kV-HGÜ-Leitungen am Boden .....	33
Bild 3 – Koronaentladungsstrom und Funkstörfeld .....	34
Bild 4 – Funkstörtoleranzprüfungen: Empfangsqualität in Abhängigkeit vom Signal-Rausch-Verhältnis .....	41
Bild 5 – Dämpfung der verschiedenen für die Messung der hörbaren Geräusche genutzten Bewertungsschaltungen [16] .....	43
Bild 6 – Vergleich typischer Frequenzspektren von hörbaren Geräuschen [131] .....	44
Bild 7 – Querprofile der hörbaren Geräusche .....	45
Bild 8 – Querprofile der hörbaren Geräusche einer zweipoligen HGÜ-Leitung mit 8 × 4,6 cm(8 × 1,8 in)-Leiterbündeln, die mit ± 1 050 kV betrieben wird [34] .....	45
Bild 9 – Querprofile des A-bewerteten Schönwetter-Schallpegels .....	46
Bild 10 – Allwetterverteilung der hörbaren Geräusche (AN) und der Funkstörungen (RI) bei einem seitlichen Abstand zum Polspol von +15 m bei der erneuerten HGÜ-Leitung Pacific NW/SW HVDC Intertie[34] .....	47
Bild 11 – Statistische Verteilungen des bei Schönwetter im Frühling 1980 in einem seitlichen Abstand zur Leitung von 27 m gemessenen A-bewerteten Schallpegels .....	47
Bild 12 – Richtwerte zu Beschwerden über hörbare Geräusche [14] .....	57
Bild 13 – Gemessenes Querprofil der hörbaren Geräusche einer 330-kV-Drehstromübertragungsleitung[151] .....	57
Bild 14 – Subjektive Bewertung des hörbaren Geräuschs von Gleichstromübertragungsleitungen; Studie des EPRI Test Center, 1974[33] .....	58
Bild 15 – Subjektive Bewertung des hörbaren Geräuschs von von Gleichstromübertragungsleitungen; OSU-Studie, 1975 [33] .....	58
Bild 16 – Ergebnisse der subjektiven Bewertung der hörbaren Geräusche (AN) von HGÜ-Leitungen	

	Seite
durch die Betreiber .....	59
Bild 17 – Ergebnisse der subjektiven Bewertung der hörbaren Geräusche (AN) von Gleichstromleitungen .....	60
Bild A.1 – Verteilung des elektrischen Feldes und des Ionenstroms an der Manitoba Hydro ± 450-kV-Leitung [39] .....	64
Bild A.2 – Kumulative Verteilung des elektrischen Feldes an der Manitoba Hydro ± 450-kV-Leitung [39] .....	64
Bild A.3 – Kumulative Verteilung der Ionenstromdichte an der Manitoba Hydro ± 450-kV-Leitung [39] .....	65
Bild A.4 – Prüfergebnisse für das gesamte elektrische Feld bei unterschiedlichen relativen Luftfeuchten [119] .....	69
Bild A.5 – Vergleich zwischen Rechenergebnis und Prüfergebnis für das gesamte elektrische Feld (bei einer Mindesthöhe des Leiters von 18 m) [119] .....	70
Bild B.1 – Schaltung von Gleichstrom-Prüfleitungen mit 3 Abschnitten [123] .....	71
Bild B.2 – Typisches RI-Querprofil bei ± 600 kV, bei 4 × 30,5 mm-Leitern, einem Mastabstand von 11,2 m und einer durchschnittlichen Höhe von 15,2 m [14] .....	72
Bild B.3 – Gleichzeitige Funkstörungen, lateral und in Feldmitte, bei klarem Wetter und leichtem Wind für drei Konfigurationen, zweipolig ± 400 kV [123] .....	72
Bild B.4 – Funkstörungen bei 0,834 MHz als Funktion der zweipoligen Netzspannung bei 4 × 30,5 mm Leitern, einem Mastabstand von 11,2 m und einer durchschnittlichen Höhe von 15,2 m .....	73
Bild B.5 – Prozentuale kumulative Verteilung für Schönwetter bei 2 × 46 mm, einem Mastabstand von 18,3 m und ± 600 kV .....	73
Bild B.6 – Prozentuale kumulative Verteilung für Regenwetter bei 2 × 46 mm, einem Mastabstand von 18,3 m und ± 600 kV .....	74
Bild B.7 – Prozentuale kumulative Verteilung für Schönwetter bei 4 × 30,5 mm, einem Mastabstand von 13,2 m und ± 600 kV .....	74
Bild B.8 – Prozentuale kumulative Verteilung für Regenwetter bei 4 × 30,5 mm, einem Mastabstand von 13,2 m und ± 600 kV .....	75
Bild B.9 – Funkstörfrequenzspektrum .....	76
Bild B.10 – Funkstörung über der Frequenz bei ± 400 kV [123] .....	76
Bild B.11 – Kumulative Verteilung der in einem Abstand von 15 m zum Pluspol gemessenen Funkstörungen [124] .....	77
Bild B.12 – Frequenzspektrum der leitungsgeführten Funkstörungen bei der Messung an einer an einem Ende abgeschlossenen Leitung [124] .....	78
Bild B.13 – Querprofil der Funkstörungen [124] .....	79
Bild B.14 – Jährliche kumulative Verteilung der in einem Abstand von 15 m zum Pluspol gemessenen Funkstörungen [124] .....	79
Bild B.15 – Vergleich der Rechenergebnisse und der Prüfergebnisse für das laterale Funkstörungsverlaufsprofil [119] .....	80
Bild B.16 – Kurve der mit der Höhe über NN schwankenden Funkstörungen von positiven Prüfleitungen in verkleinertem Maßstab .....	81
Bild C.1 – Beispiele für die statistischen Verteilungen der bei Schönwetter in einem Abstand von 27 m zum Leitungsmittelpunkt einer zweipoligen HGÜ-Prüfleitung gemessenen hörbaren Geräusche, in dB(A) [16] .....	84
Bild C.2 – Hörbare Geräusche unter den Prüfleitungen positiver Polarität in Abhängigkeit von der Höhe über NN .....	86

**Tabellen**

Tabelle 1 – Grenzwerte für das elektrische Feld und den Ionenstrom von ± 800-kV-Gleichstromleitungen in China .....	31
Tabelle 2 – Grenzwerte für das elektrische Feld von Gleichstromleitungen in den Vereinigten Staaten von Amerika [121] .....	31
Tabelle 3 – Grenzwerte für das elektrische Feld und den Ionenstrom von Gleichstromleitungen in Kanada .....	31
Tabelle 4 – Grenzwerte für das elektrische Feld von Gleichstromleitungen in Brasilien .....	31
Tabelle 5 – Parameter der IREQ-Anregungsfunktion (einpolig) [122].....	39
Tabelle 6 – Parameter der Anregungsfunktion des IREQ (zweipolig) [122].....	39
Tabelle 7 – Parameter zur Festlegung der Regressionsgleichung für die erzeugte Schalleistungsdichte .....	54
Tabelle 8 – Typische Schalldämpfung durch Gebäude (in Dezibel) [157] .....	61
Tabelle A.1 – BPA ± 500-kV -Leitung: Statistische Zusammenfassung der Intensität des elektrischen Feldes in Bodennähe und der Ionenstromdichte für alle Witterungsbedingungen [34].....	62
Tabelle A.2 –FURNAS ± 600-kV-Leitung: Statistische Zusammenfassung der Intensität des elektrischen Feldes in Bodennähe und der Ionenstromdichte [38] .....	63
Tabelle A.3 – Hydro-Québec-New England ± 450-kV-HGÜ-Leitung. Bath, NH; 1990–1992 (Schönwetter), 1992 (Regen), Ganzjahresmessungen des statischen elektrischen E-Feldes, in kV/m [41].....	66
Tabelle A.4 – Hydro-Québec-New England ± 450-kV-HGÜ-Leitung. Bath, NH; 1990–1992, Schönwetter-Ganzjahresmessungen der Ionenkonzentrationen, in kions/cm <sup>3</sup> [41].....	66
Tabelle A.5 – IREQ ± 450-kV-Prüfleitung: Statistische Zusammenfassung der Intensität des elektrischen Feldes in Bodennähe und der Ionenstromdichte [43] .....	67
Tabelle A.6 – HVTRC ± 400-kV-Prüfleitung: Statistische Zusammenfassung der Spitzenwerte des elektrischen Feldes und der Ionenströme [44] .....	68
Tabelle A.7 – Statistische Ergebnisse für die Prüfdaten des gesamten elektrischen Feldes am Boden (50%-Wert) [119].....	69
Tabelle B.1 – Beeinflussung der Funkstörung durch Wind .....	75
Tabelle B.2 – Statistische Darstellung des Langzeit-RI-Betriebsverhaltens des geprüften Leiterbündels [124] .....	78
Tabelle B.3 – Funkstörungen bei 0,5 MHz in einem seitlichen Abstand zum Pluspol von 20 m (bei Schönwetter) .....	80
Tabelle B.4 – Parameter der Prüfleitungen .....	81
Tabelle B.5 – Messergebnisse der Funkstörungen bei 0,5 MHz für die vollmaßstäblichen Prüfleitungen in unterschiedlichen Höhen über NN .....	82
Tabelle C.1 – Pegel der hörbaren Geräusche von HGÜ-Leitungen nach [121] und [152].....	85
Tabelle C.2 – Prüfergebnisse der 50%-Statistiken für die hörbaren Geräusche (AN) von vollmaßstäblichen Prüfleitungen .....	86