



OECOS GmbH, Räumliche Planung + Umweltuntersuchungen, www.oecos.com

Umweltauswirkungen unterschiedlicher Netzkomponenten

Im Auftrag der Bundesnetzagentur

September 2012

Bearbeiter: apl. Prof. Dr.-Ing. Karsten Runge
Dr. Sarah Baum
Dipl. Geogr. Philipp Meister
Dipl. Geogr. Elena Rottgardt

Inhaltsverzeichnis

| | | |
|------------|---|-----------|
| 0.1 | Abkürzungsverzeichnis | 7 |
| 1. | Einleitung | 10 |
| 2. | Schutzgut „Mensch“ | 14 |
| 2.1 | Auswirkungen von 380-kV-Höchstspannungsdrehstrom-Freileitungen..... | 14 |
| 2.1.1 | Beeinträchtigungen durch elektrische und magnetische Felder | 14 |
| 2.1.2 | Beeinträchtigungen durch Koronaentladungen | 23 |
| 2.1.3 | Beeinträchtigungen durch Unfälle | 24 |
| 2.1.4 | Vermeidungs- und Minderungsmaßnahmen | 25 |
| 2.2 | Auswirkungen von 380-kV-Höchstspannungsgleichstrom-Freileitungen..... | 26 |
| 2.2.1 | Beeinträchtigungen durch elektrische und magnetische Felder | 26 |
| 2.2.2 | Beeinträchtigungen durch Koronaentladungen | 28 |
| 2.2.3 | Beeinträchtigungen durch Unfälle | 29 |
| 2.2.4 | Vermeidungs- und Minderungsmaßnahmen | 29 |
| 2.3 | Nebenanlagen bei Freileitungen..... | 30 |
| 2.4 | Auswirkungen von 380-kV-Höchstspannungsdrehstrom-Erdkabeln | 30 |
| 2.4.1 | Übersicht | 30 |
| 2.4.2 | Beeinträchtigungen durch magnetische Felder | 30 |
| 2.4.3 | Beeinträchtigungen durch Unfälle | 32 |
| 2.4.4 | Vermeidungs- und Minderungsmaßnahmen | 32 |
| 2.5 | Auswirkungen von 380-kV-Höchstspannungsgleichstrom-Erdkabeln | 33 |
| 2.5.1 | Übersicht | 33 |
| 2.5.2 | Beeinträchtigungen durch magnetische Felder | 33 |
| 2.5.3 | Beeinträchtigungen durch Unfälle | 34 |
| 2.5.4 | Vermeidungs- und Minderungsmaßnahmen | 34 |
| 2.6 | Nebenanlagen bei Erdleitungen | 34 |
| 2.7 | Auswirkungen von gasisolierten Leitungen | 35 |
| 2.8 | Zusammenfassung Schutzgut „Mensch“ | 35 |
| 3. | Schutzgüter „Pflanzen und Tiere“ | 40 |
| 3.1 | Auswirkungen von 380-kV-Höchstspannungsdrehstrom-Freileitungen..... | 40 |
| 3.1.1 | Gefährdungsfaktoren für Tiere und Pflanzen durch Freileitungen | 40 |
| 3.1.2 | Auswirkungen von Freileitungen auf bestimmte Artengruppen | 43 |
| 3.1.3 | Vermeidungs- und Minderungsmaßnahmen | 56 |
| 3.2 | Auswirkungen von 380-kV-Höchstspannungsgleichstrom-Freileitungen..... | 60 |
| 3.2.1 | Gefährdungsfaktoren für Tiere und Pflanzen durch Freileitungen | 60 |
| 3.2.2 | Schädigung von Pflanzenbeständen..... | 61 |
| 3.2.3 | Gefährdung der Avifauna..... | 61 |
| 3.2.4 | Vermeidungs- und Minderungsmaßnahmen | 62 |
| 3.3 | Nebenanlagen bei Freileitungen..... | 62 |
| 3.4 | Auswirkungen von 380-kV-Höchstspannungsdrehstrom-Erdkabeln | 62 |
| 3.4.1 | Übersicht | 62 |
| 3.4.2 | Gefährdungsfaktoren | 62 |

| | | |
|-----------|---|-----------|
| 3.4.3 | Auswirkungen von Erdkabeln auf bestimmte Artengruppen | 64 |
| 3.4.4 | Vermeidungs- und Minderungsmaßnahmen | 67 |
| 3.5 | Auswirkungen von 380-kV-Höchstspannungsgleichstrom-Erdkabeln | 69 |
| 3.6 | Nebenanlagen bei Erdleitungen | 70 |
| 3.7 | Auswirkungen von gasisolierten Leitungen | 70 |
| 3.8 | Zusammenfassung Schutzgüter „Pflanzen und Tiere“ | 70 |
| 4. | Schutzgut „Biologische Vielfalt“ | 74 |
| 4.1 | Auswirkungen von 380-kV-Höchstspannungsdrehstrom-Freileitungen..... | 74 |
| 4.1.1 | Übersicht | 74 |
| 4.1.2 | Schutzgebiete..... | 75 |
| 4.1.3 | Biotope | 76 |
| 4.1.4 | Vermeidungs- und Minderungsmaßnahmen | 83 |
| 4.2 | Auswirkungen von 380-kV-Höchstspannungsgleichstrom-Freileitungen..... | 84 |
| 4.3 | Nebenanlagen bei Freileitungen..... | 84 |
| 4.4 | Auswirkungen von 380-kV-Höchstspannungsdrehstrom-Erdkabeln | 84 |
| 4.4.1 | Übersicht | 84 |
| 4.4.2 | Schutzgebiete..... | 85 |
| 4.4.3 | Biotope | 85 |
| 4.4.4 | Vermeidungs- und Minderungsmaßnahmen | 87 |
| 4.5 | Auswirkungen von 380-kV-Höchstspannungsgleichstrom-Erdkabeln | 88 |
| 4.6 | Nebenanlagen bei Erdleitungen | 88 |
| 4.7 | Auswirkungen von gasisolierten Leitungen | 88 |
| 4.8 | Zusammenfassung Schutzgut „Biologische Vielfalt“ | 88 |
| 5. | Schutzgut „Boden“ | 91 |
| 5.1 | Auswirkungen von 380-kV-Höchstspannungsdrehstrom-Freileitungen..... | 91 |
| 5.1.1 | Übersicht | 91 |
| 5.1.2 | Bodenverdichtung..... | 92 |
| 5.1.3 | Bodenerosion | 94 |
| 5.1.4 | Funktionsverlust, Versiegelung und Austrocknung | 94 |
| 5.1.5 | Bodeneintrag | 94 |
| 5.1.6 | Vermeidungs- und Minderungsmaßnahmen | 95 |
| 5.2 | Auswirkungen von 380-kV-Höchstspannungsgleichstrom-Freileitungen..... | 96 |
| 5.3 | Nebenanlagen bei Freileitungen..... | 96 |
| 5.4 | Auswirkungen von 380-kV-Höchstspannungsdrehstrom-Erdkabeln | 96 |
| 5.4.1 | Übersicht | 96 |
| 5.4.2 | Bodenverdichtung..... | 97 |
| 5.4.3 | Bodenerosion | 98 |
| 5.4.4 | Störung des Bodengefüges durch Aushub, Zwischenlagerung und Wiedereinbau | 98 |
| 5.4.5 | Auswirkungen auf den Bodenwasserhaushalt..... | 98 |
| 5.4.6 | Einbringung von Fremdstoffen..... | 100 |
| 5.4.7 | Bodenerwärmung im Betrieb | 100 |
| 5.4.8 | Vermeidungs- und Minderungsmaßnahmen | 102 |

| | | |
|-----------|--|------------|
| 5.5 | Auswirkungen von 380-kV-Höchstspannungsgleichstrom-Erdkabeln | 103 |
| 5.5.1 | Übersicht | 103 |
| 5.5.2 | Bodenverdichtung, Störung des Bodengefüges und des Bodenwasserhaushaltes | 104 |
| 5.5.3 | Einbringung von Fremdstoffen | 104 |
| 5.5.4 | Bodenerwärmung im Betrieb | 104 |
| 5.5.5 | Vermeidungs- und Minderungsmaßnahmen | 104 |
| 5.6 | Nebenanlagen bei Erdleitungen | 105 |
| 5.7 | Auswirkungen von gasisolierten Leitungen | 105 |
| 5.8 | Zusammenfassung Schutzgut „Boden“ | 106 |
| 6. | Schutzgut „Wasser“ | 109 |
| 6.1 | Auswirkungen von 380-kV-Höchstspannungsdrehstrom-Freileitungen..... | 109 |
| 6.1.1 | Auswirkungen von Freileitungen auf Grundwasser | 109 |
| 6.1.2 | Auswirkungen von Freileitungen auf Oberflächengewässer..... | 111 |
| 6.1.3 | Vermeidungs- und Minderungsmaßnahmen | 111 |
| 6.2 | Auswirkungen von 380-kV-Höchstspannungsgleichstrom-Freileitungen..... | 111 |
| 6.3 | Nebenanlagen bei Freileitungen..... | 111 |
| 6.4 | Auswirkungen von 380-kV-Höchstspannungsdrehstrom-Erdkabeln | 112 |
| 6.4.1 | Auswirkungen von Erdkabel auf das Grundwasser..... | 112 |
| 6.4.2 | Auswirkungen von Erdkabel auf Oberflächengewässer | 113 |
| 6.4.3 | Vermeidungs- und Minderungsmaßnahmen | 114 |
| 6.5 | Auswirkungen von 380-kV-Höchstspannungsgleichstrom-Erdkabeln | 114 |
| 6.6 | Nebenanlagen bei Erdleitungen | 114 |
| 6.7 | Auswirkungen von gasisolierten Leitungen | 114 |
| 6.8 | Zusammenfassung Schutzgut „Wasser“ | 114 |
| 7. | Schutzgüter „Klima“ und „Luft“ | 117 |
| 7.1 | Auswirkungen von 380-kV-Höchstspannungsdrehstrom-Freileitungen..... | 117 |
| 7.1.1 | Auswirkungen während der Bauphase..... | 117 |
| 7.1.2 | Auswirkungen während Anlage und Betrieb | 117 |
| 7.1.3 | Vermeidungs- und Minderungsmaßnahmen | 118 |
| 7.2 | Auswirkungen von 380-kV-Höchstspannungsgleichstrom-Freileitungen..... | 118 |
| 7.2.1 | Auswirkungen während der Bauphase..... | 118 |
| 7.2.2 | Auswirkungen während Anlage und Betrieb | 118 |
| 7.2.3 | Vermeidungs- und Minderungsmaßnahmen | 119 |
| 7.3 | Nebenanlagen bei Freileitungen..... | 119 |
| 7.4 | Auswirkungen von 380-kV-Höchstspannungsdrehstrom-Erdkabeln | 119 |
| 7.4.1 | Auswirkungen während der Bauphase..... | 119 |
| 7.4.2 | Auswirkungen durch Anlage und Betrieb | 119 |
| 7.4.3 | Vermeidungs- und Minderungsmaßnahmen | 119 |
| 7.5 | Auswirkungen von 380-kV-Höchstspannungsgleichstrom-Erdkabeln | 120 |
| 7.6 | Nebenanlagen bei Erdleitungen | 120 |
| 7.7 | Auswirkungen von gasisolierten Leitungen | 120 |

| | | |
|------------|---|------------|
| 7.8 | Zusammenfassung Schutzgüter „Klima und Luft“ | 120 |
| 8. | Schutzgut „Landschaft“ | 122 |
| 8.1 | Auswirkungen von 380-kV-Höchstspannungsdrehstrom-Freileitungen..... | 122 |
| 8.1.1 | Auswirkungen während der Bauphase..... | 122 |
| 8.1.2 | Auswirkungen durch Anlage und Betrieb | 122 |
| 8.1.3 | Vermeidungs- und Minderungsmaßnahmen | 127 |
| 8.2 | Auswirkungen von 380-kV-Höchstspannungsgleichstrom-Freileitungen..... | 128 |
| 8.3 | Nebenanlagen bei Freileitungen..... | 128 |
| 8.4 | Auswirkungen von 380-kV-Höchstspannungsdrehstrom-Erdkabeln | 129 |
| 8.4.1 | Auswirkungen während der Bauphase..... | 129 |
| 8.4.2 | Auswirkungen durch Anlage und Betrieb | 129 |
| 8.4.3 | Vermeidungs- und Verminderungsmaßnahmen..... | 130 |
| 8.5 | Auswirkungen von 380-kV-Höchstspannungsgleichstrom-Erdkabeln | 130 |
| 8.6 | Nebenanlagen bei Erdleitungen | 131 |
| 8.7 | Auswirkungen von gasisolierten Leitungen | 131 |
| 8.8 | Zusammenfassung Schutzgut „Landschaft“ | 131 |
| 9. | Schutzgut „Kultur- und Sachgüter“ | 134 |
| 9.1 | Auswirkungen von 380-kV-Höchstspannungsdrehstrom-Freileitungen..... | 134 |
| 9.1.1 | Auswirkungen während der Bauphase..... | 134 |
| 9.1.2 | Auswirkungen durch Anlage und Betrieb | 134 |
| 9.1.3 | Vermeidungs- und Minderungsmaßnahmen | 134 |
| 9.2 | Auswirkungen von 380-kV-Höchstspannungsgleichstrom-Freileitungen..... | 134 |
| 9.3 | Nebenanlagen bei Freileitungen..... | 134 |
| 9.4 | Auswirkungen von 380-kV-Höchstspannungsdrehstrom-Erdkabeln | 135 |
| 9.4.1 | Auswirkungen während der Bauphase..... | 135 |
| 9.4.2 | Auswirkungen durch Anlage und Betrieb | 135 |
| 9.4.3 | Vermeidungs- und Minderungsmaßnahmen | 135 |
| 9.5 | Auswirkungen von 380-kV-Höchstspannungsgleichstrom-Erdkabeln | 135 |
| 9.6 | Nebenanlagen bei Erdleitungen | 135 |
| 9.7 | Auswirkungen von gasisolierten Leitungen | 135 |
| 9.8 | Zusammenfassung Schutzgut „Kultur- und Sachgüter“ | 135 |
| 10. | Wechselwirkungen | 137 |
| 10.1 | 380-kV-Höchstspannungsdrehstrom-Freileitungen..... | 137 |
| 10.2 | 380-kV-Höchstspannungsgleichstrom-Freileitungen | 138 |
| 10.4 | Nebenanlagen bei Freileitungen..... | 138 |
| 10.5 | 380-kV- Höchstspannungsdrehstrom-Erdkabel | 138 |
| 10.6 | 380-kV-Höchstspannungsgleichstrom-Erdkabel..... | 138 |
| 10.7 | Nebenanlagen bei Erdleitungen | 139 |
| 10.8 | Auswirkungen von gasisolierten Leitungen | 139 |
| 10.9 | Zusammenfassung Wechselwirkungen | 139 |

| | |
|--|------------|
| 11. Vorhabensbündelungen..... | 141 |
| 11.1 380-kV-Höchstspannungsdrehstrom-Freileitungen..... | 141 |
| 11.1.1 Auswirkungen während der Bauphase..... | 141 |
| 11.1.2 Auswirkungen durch Anlage und Betrieb | 141 |
| 11.2 380-kV-Höchstspannungsgleichstrom-Freileitungen | 142 |
| 11.3 Nebenanlagen bei Freileitungen..... | 142 |
| 11.4 380-kV-Höchstspannungsdrehstrom-Erdkabel | 142 |
| 11.4.1 Auswirkungen während der Bauphase..... | 142 |
| 11.4.2 Auswirkungen durch Anlage und Betrieb | 142 |
| 11.5 380-kV-Höchstspannungsgleichstrom-Erdkabel | 143 |
| 11.6 Nebenanlagen bei Erdleitungen | 143 |
| 11.7 Gasisolierten Leitungen..... | 143 |
| 11.8 Zusammenfassung Vorhabensbündelungen | 143 |
| 12. Empfehlungen für den Netzausbau aus Umweltsicht | 144 |
| 13. Literaturverzeichnis..... | 146 |

0.1 Abkürzungsverzeichnis

| | |
|--------------------------|--|
| $\mu\text{g}/\text{m}^3$ | Milligramm pro Kubikmeter |
| μT | Mikrotesla ($1 \mu\text{T} = 10^{-6} \text{T}$) |
| A | Ampere |
| $^{\circ}\text{C}$ | Grad Celcius |
| dB(A) | Dezibel (A); Messgröße des Schalldruckpegels |
| ha | Hektar |
| K | Kelvin |
| kV | Kilovolt |
| m | Meter |
| m^2 | Quadratmeter |
| mG | Milligauss |
| mm | Millimeter |
| m/s | Meter pro Sekunde |
| mT | Millitesla ($1 \text{mT} = 10^{-3} \text{T}$) |
| MVA | Megavoltampere |
| nA | Nanoampere ($1\text{nA} = 10^{-9} \text{A}$) |
| ppb | Parts per billion, Teile pro Milliarde |
| ppm | Parts per million, Teile pro Million |
| t | Tonne |
| T | Tesla |
| Vol % | Volumenprozent |
| W/mK | Watt pro Meter und pro Kelvin |
| AC | Alternating current |
| ALS | Arc-Location-System; Lichtbogen-Lokalisierungssystem |
| ATKIS | Amtliches Topographisch-Kartographisches Informationssystem |
| AWZ | Ausschließliche Wirtschaftszone |
| BauGB | Baugesetzbuch |
| BBodSchG | Bundesbodenschutzgesetz |
| BBP | Bundesbedarfsplanung |
| BfN | Bundesamt für Naturschutz |
| BFP | Bundesfachplanung |
| BfS | Bundesamt für Strahlenschutz |
| BImSchV | Bundesimmissionsschutzverordnung |
| BNatSchG | Bundesnaturschutzgesetz |
| BUWAL | Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft, Schweiz |
| BVerwG | Bundesverwaltungsgericht |
| CIGRE | Conseil International des Grands Reseaux Électriques; Gremium für den Informationsaustausch für Hochspannungstechnik |
| CO | Kohlenmonoxid |
| DC | Direct current |
| EK | Erdkabel |
| ELF | niederfrequent (extremely low frequency) |
| EMF | Elektrische und magnetische Felder |
| EnLAG | Energieleitungsausbaugesetz |
| EnWG | Energiewirtschaftsgesetz |
| EOK | Erdoberkante |
| EU | Europäische Union |
| EVU | Energieversorgungsunternehmen |
| FFH-Gebiet | Europäisches Schutzgebiet gem. FFH-RL |
| FFH-RL | Flora-Fauna-Habitat-Richtlinie der EU |
| FL | Freileitung |

| | |
|-----------------|---|
| GEO | Gesellschaft für Energie u. Ökologie mbH |
| GFK | Glasfaserkunststoff |
| GIL | Gasisolierte Leitungen |
| HDD | Horizontal Directional Drilling |
| HDPE | High-density polyethylene |
| HDÜ | Höchstspannungs-Drehstromübertragung |
| HGÜ | Höchstspannungs-Gleichstromübertragung |
| HVAC | High-Voltage Alternating Current (Hochspannungs-Drehstromtechnik) |
| HVDC | High-Voltage Direct Current (Hochspannungs-Gleichstromtechnik) |
| Hz | Hertz |
| IBA | Important Bird Area |
| ICNIRP | International Commission for Non-Ionising Radiation Protection |
| IGBT | Insulated Gate Bipolar Transistor |
| IG-L | Immissionschutzgesetz-Luft |
| KKW | Kernkraftwerk |
| KÜA | Kabelübergangsanlagen |
| LANA | Bund/Länderarbeitsgemeinschaft Naturschutz, Landschaftspflege und Erholung |
| LBEG | Landesamt für Bergbau, Energie und Geologie |
| LBP | Landschaftspflegerischer Begleitplan |
| LCC | Line Commutated Converter |
| LEP | Landesentwicklungsplan |
| LROP | Landesraumordnungsprogramm |
| LSG | Landschaftsschutzgebiet |
| MAK | Maximale Arbeitsplatz-Konzentration |
| N ₂ | Stickstoff |
| Nds. GVBl. | Niedersächsisches Gesetz- und Verordnungsblatt |
| NIEHS | National Institute of Environmental Health Sciences |
| NLT | Niedersächsischer Landkreistag |
| NLWKN | Niedersächsischer Landesbetrieb für Wasserwirtschaft, Küsten- und Naturschutz |
| NNatG | Niedersächsisches Naturschutzgesetz |
| NO _x | Oxide |
| NSG | Naturschutzgebiet |
| NWG | Niedersächsisches Wassergesetz |
| O ₃ | Ozon |
| OVG | Oberverwaltungsgericht |
| PAH | Polyzyklische aromatische Kohlenwasserstoffe |
| PAK | Polyzyklische aromatische Kohlenwasserstoffe |
| PCDD/F | polychlorierte Dibenzodioxine/polychlorierte Dibenzofurane |
| PM | Particulate matter; Feinstaub |
| PVC | Polyvinylchlorid |
| Ramsar | Feuchtgebiete gemäß Ramsarkonvention |
| ROG | Raumordnungsgesetz |
| ROV | Raumordnungsverfahren |
| SF ₆ | Schwefelhexafluorid |
| SSK | Strahlenschutzkommission |
| TRK | Technische Richtkonzentration |
| ÜNB | Übertragungsnetzbetreiber |
| UVPG | Gesetz über die Umweltverträglichkeitsprüfung |
| UW | Umspannwerk |
| VPE | Vernetztes Polyethylen |
| VRL | Vogelschutzrichtlinie der EU |
| VSC | Voltage Source Converter |



| | |
|-----------|---------------------------|
| VS-Gebiet | Vogelschutzgebiet |
| WEA | Windenergieanlage |
| WHG | Wasserhaushaltsgesetz |
| WHO | World Health Organisation |
| WRRL | Wasserrahmenrichtlinie |
| XLPE | Cross Linked Polyethylene |

1. Einleitung

Die Umweltwirkungen von Höchstspannungsfreileitungen und Höchstspannungskabeln auf Drehstrom- und Gleichstrombasis werden in diesem Bericht maßgeblich als Ergebnis einer Literatursynopse dargestellt. Aus Gründen der Übersichtlichkeit gliedern sich die Darstellungen nach dem Schutzgüterkatalog des Umweltverträglichkeitsprüfungsgesetzes (UVPG §2). Berücksichtigt wurden die Schutzgüter: Mensch (insbes. Gesundheit), Tiere, Pflanzen, biologische Vielfalt (Biotope u. Schutzgebiete), Boden, Wasser, Luft, Klima, Landschaft, Kulturgüter und sonstige Sachgüter sowie Wechselwirkungen zwischen den vorgenannten Schutzgütern. Die zu erwartenden Umweltwirkungen lassen sich schwerpunktmäßig entweder der Bauphase (einschl. Rückbau) oder der Betriebsphase (einschl. der dauerhaften anlagebedingten Wirkungen) zuordnen. Entsprechend gliedert sich die Diskussion der möglichen Projektwirkungen in jedem Unterabschnitt. Letztlich ist eine realistische Projektbewertung erst möglich, wenn auch die denkbaren Vermeidungs- und Minderungsmaßnahmen mit bedacht werden. Auch diese Aspekte werden daher in jedem Unterabschnitt behandelt.

Mit einer möglichst dichten Zitation der Literaturquellen soll im Rahmen der Literatursynopse ein hohes Maß an Nachvollziehbarkeit sichergestellt werden. Abgesehen von landschaftsökologischer, umweltplanerischer und umweltrechtlicher Standardliteratur wurden nationale und internationale Quellen zu Erdkabeln und Freileitungen ausgewertet. Hierzu zählten sowohl Forschungsarbeiten und Zeitschriftenveröffentlichungen als auch Umweltverträglichkeitsstudien aus abgeschlossenen und laufenden Zulassungsverfahren. Aufgrund einer bisher erst geringen Realisierung von Erdkabelleitungen auf der Höchstspannungsebene wurden auch Darstellungen aus Kabelprojekten anderer Spannungsebenen und Darstellungen aus vergleichbaren Projekten, wie z.B. Erdgasleitungen (bezüglich der Umweltwirkungen der Bauphase) mitverwendet.

Eine konkrete Bewertung der zu erwartenden Umweltfolgen bei Bau und Betrieb von Freileitungen sowie von Erdkabeln erfolgt im Rahmen der Umweltverträglichkeitsuntersuchungen der konkreten Zulassungsverfahren bzw. auf den Entwurf des Bundesbedarfsplanes bezogen im Rahmen des Umweltberichtes zum Bundesbedarfsplan. Im Rahmen des Umweltberichtes zum Bundesbedarfsplan bzw. Umweltverträglichkeitsuntersuchungen der konkreten Zulassungsverfahren können die tatsächlich zu erwartenden Umweltwirkungen näher eingegrenzt werden, während in der vorliegenden Literatursynopse allgemein mögliche Auswirkungen ohne konkreten Raumbezug beschrieben werden. Dabei muss beachtet werden, dass aufgrund der enormen Bandbreite möglicher Umweltauswirkungen nicht alle Aspekte erschöpfend bearbeitet werden konnten. Auch besteht in einigen Punkten noch Forschungsbedarf. Im Folgenden wird kurz auf die berücksichtigten Techniken und Übertragungssysteme eingegangen. Für eine ausführlichere Darstellung des technischen Hintergrundes sei vor allem auf die Publikation von HOFMANN et al. (2012) verwiesen sowie auf den Abschnitt 5.2 des ‚Netzentwicklungsplan Strom‘ (FEIX et al. 2012).

Höchstspannungs-Übertragungssysteme

Als Höchstspannungs-Übertragungssysteme kommen Freileitungen, Erdkabel sowie gasisolierte Leitungen (GIL, gas-insulated lines) in Frage. Aufgrund vergleichsweise niedriger Investitionskosten, schneller Errichtbarkeit und eines robusten elektrischen Betriebsverhaltens sowie im Schadensfall kurzer Reparaturzeiten haben sich Freileitungen als die meistgebräuchlichste Übertragungsvariante im kontinentalen europäischen 380-kV-Übertragungsnetz etabliert (HOF-

MANN et al. 2012, S. 6). Die Betriebserfahrung mit Freileitungen der 380 kV-Ebene beträgt über 50 Jahre (DENA 2006, S. 2). Eine im Höchstspannungsnetz weniger erprobte Übertragungsmöglichkeit sind Erdkabel. Ihr Anteil am 380-kV-Übertragungsnetz macht derzeit in Deutschland noch weniger als 0,3 % aus. Mit dem Energieleitungsausbaugesetz (21.8.2009, geänd. 7.3.2011) wurde jedoch ein rechtlicher Rahmen für eine gezielte Erprobung dieser Übertragungsvariante in unterschiedlichen Pilotprojekten geschaffen. GIL sind bisher nur für wenige Strecken von wenigen hundert Metern verwendet worden (DENA 2006, S. 2).

Freileitungen haben aus heutiger Sicht eine Lebenserwartung von etwa 80 Jahren, während für Kabel 30 bis 40 Jahre gerechnet werden. Bei GIL wird von 50 Jahren ausgegangen (DENA 2006, S. 2). Im Gegensatz zu Kabeln und GIL sind Freileitungen der Witterung ausgesetzt, was zu Fehlfunktionen führen kann. Allerdings können Freileitungen meist schnell und einfach behoben werden, während Schäden an Kabeln und GIL aufgrund notwendiger Erdbauarbeiten mit einem höheren Zeit- und Kostenaufwand verbunden sind (DENA 2006, S. 2).

Hinsichtlich der Investitionskosten sind Freileitungen günstiger als Erdkabel und GIL. Anders sieht es bei den Betriebskosten aus: Vor allem aufgrund der geringeren Verluste bei der Energieübertragung schneiden Erdkabel und GIL hier günstiger ab als Freileitungen. Die auf eine Nutzungsdauer von 40 Jahren hochgerechneten Gesamtkosten sind für Freileitungen am geringsten (DENA 2006, S. 2). Hierbei muss zwischen den Übertragungstechnologien unterschieden werden: FEIX et al. 2012 (S. 92) zufolge wird die Höchstspannungs-Gleichstrom-Übertragungstechnologie (HGÜ) bei Freileitungen aufgrund der hohen Investitionskosten für Konverterstationen erst ab ca. 400 km Freileitungslänge wirtschaftlich. Für VSC-HGÜ (VSC: Voltage Source Converter)-Erdkabel geben HOFMANN et al. (2012, S. 306) eine Wirtschaftlichkeit ab Längen von 130–280 km an.

Die drei Übertragungssysteme unterscheiden sich hinsichtlich ihres Flächenverbrauchs. Bei 380-kV-Freileitungen beträgt die Masthöhe 50–60 m mit etwa 30 m breiten Auslegern und einer Trassenbreite von ca. 70 m (DENA 2006, S. 3). Derzeit sind alle 300–400 m Fundamente für Maststandorte notwendig (HOFMANN et al. 2012, S. 316). Für die Errichtung von Freileitungsmasten ist eine Arbeitsfläche von 40 m x 40 m notwendig, wo die einzelnen Bauteile vormontiert und mit Hilfe eines Autokrans aufgestellt werden. Für Masten in Frage kommende Fundamente sind Bohrfundamente, Ramppfahlgründungen oder vor Ort aus Fertigbeton gegossene Stufenfundamente sowie, in Sonderfällen wie beispw. Bergsenkungsgebieten, Plattenfundamente (HOFMANN et al. 2012, S. 16). Für das Fundament des Mastes ist eine Aushubtiefe von 3–4 m notwendig (BET GMBH et al. (2011, S. 36).

Die für unterirdisch verlegte Kabel und GIL benötigte Kabeltrasse mit Schutzstreifen darf nicht bebaut werden und muss von tiefwurzelnden Pflanzen, deren Wurzeln die Erdkabel möglicherweise beschädigen, freigehalten werden. Je nach Anzahl der verlegten Systeme sind die Schutzstreifen bei Drehstromkabeln etwa 13–21 m und bei Gleichstromerdkabeln etwa 11–20 m breit (jeweils bei vier Systemen; HOFMANN et al. 2012, S. 320). Bei GIL beträgt die Trassenbreite ca. 12–15 m (DENA 2006, S. 3). Die Verlegung von Erdkabeln und GIL ist deutlich aufwändiger als die von Freileitungen. Bei Erdkabeln werden aufgrund der zum heutigen Zeitpunkt liefer- bzw. transportierbaren Kabellängen alle 600–900 m Erdkabelabschnitte mit Kabelverbindungsmuffen in Muffengruben oder Muffenbauwerken montiert (HOFMANN et al. 2012, S. 316). Die Muffenlänge beträgt ca. 3 m (HOFMANN 2012, S. 17). Bei Drehstromkabeln werden an diesen Stellen die Kabelschirme ausgekreuzt (Cross-Bonding), um die gewünschte Übertragungsleistung sicher zu stellen und um Überspannungen zu verhindern (POLSTER et al. 2009, S. 30). Das

Cross-Bonding-System kann in Muffenbauwerken direkt neben die Muffen montiert werden, während sie bei Muffengruben oberirdisch z.B. in einem Kabelverteilerschrank oder einem Cross-Bonding-Bauwerk (ca. 1,8 m breit, 2,9 m lang und 1,35 m hoch) oder oberflächennah in einem Schacht montiert werden (POLSTER et al. 2009, S. 30 und S. 59). Muffengruben werden nach der Montage wieder verfüllt, während Muffenbauwerke dauerhaft erhalten bleiben und für Prüfung und Wartung zugänglich sein müssen (POLSTER et al. 2009, S. 58). Muffenbauwerke haben eine Grundfläche von ca. 3 m x 10 m (TENNET 2011, S. 29). Bei GIL ist alle 1,2 km die Anlage eines Zugangsschachtes notwendig (DENA 2006, S. 3).

Zur Herstellung einer Verbindung zwischen einer Freileitung und einem Erbkabel sind Übergangsbauwerke notwendig. Für 380-kV-Leitungen werden Abspannportale errichtet, in denen die Freileitungsseile auf Überspannungsableitern über Stromumwandler hin zu den Kabelendverschlüssen führen. Der Gesamtflächenbedarf für ein Übergangsbauwerk beträgt etwa 30 m x 70 m (POLSTER et al. 2009, S. 27) bzw. 50 m x 50 m (HOFMANN 2012, S. 23).

Drehstrom

Drehstrom wird im europäischen Verbundnetz in der Regel als Dreiphasen-Drehstrom mit einer Frequenz von 50 Hz übertragen (HOFMANN et al. 2012, S. 4). Der ohmsche Widerstand ist bei der Drehstromübertragung höher als bei der Gleichstromübertragung, da beim Drehstrom die sog. Stromverdrängung durch das Magnetfeld auftritt (HOFMANN et al. 2012, S. 51).

Blindleistung bezeichnet den von Induktivitäten und Kapazitäten verursachten Leistungsanteil. Dieser pendelt zwischen den Kapazitäten und Induktivitäten im Netz und bewirkt, dass die maximal übertragene Leistung mit zunehmender Länge der Leitung absinkt. Um die Übertragungsleistung zu vergrößern, werden längere Kabel in Abschnitte unterteilt, an deren Enden sich Kompensationsdrosselspulen in sog. Kompensationsanlagen befinden (HOFMANN et al. 2012, S. 53–54). Bei Drehstrom-Erdkabeln sind schon bei kurzen Leitungslängen (nach ca. 25–30 km, HOFMANN et al. 2012, S. 57) Blindleistungskompensationsdrosselspulen notwendig, während bei Freileitungen erst bei großen Distanzen Längskompensation mit Reihen Kondensationen zur Blindleistungskompensation erforderlich ist (HOFMANN et al. 2012, S. 318). Ohne Kompensation des Ladestroms wird die maximale Länge der Leitung zusätzlich durch den Ferranti-Effekt begrenzt. Dieser tritt an den Leitungsenden auf, wenn Leitungen ohne Last betrieben werden. Der Ladestrom bewirkt hierbei eine betriebsbedingte Spannungserhöhung am Ende der Leitung (HOFMANN et al. 2012, S. 55). Kompensationsdrosselspulen mit einer Leistung von 150 Mvar sind ca. 9 m lang, 6 m breit und 9,2 m hoch. Zu Kompensationsanlagen gehören neben Kompensationsdrosselspulen auch Kabelendverschlüsse, Portale für die Zurückführung zu den Anschlußklemmen der Spule, Überspannungsableiter sowie ggf. Leistungsschalter, Trenner und Strom- und Spannungswandler (HOFMANN et al. 2012, S. 55). Bei der Drehstromübertragung entstehen niederfrequente elektrische und magnetische Wechselfelder (HOFMANN et al. 2012, S. 229).

Für Freileitungen der Höchstspannungs-Drehstromübertragung (HDÜ)- können Hochtemperaturseile verwendet werden, die auf betriebliche Belastungsspitzen im Netz ausgelegt sind. Ihr Einsatz ist jedoch durch die Verluste, die bei dauerhaftem Betrieb mit hoher Leistung entstehen, unwirtschaftlich. Weiter wird der Hochtemperaturbetrieb durch die Spannungs-Blindleistungssituation eingeschränkt, wodurch sie gerade auf langen Übertragungsstrecken nur bedingt verwendet werden können (REHTANZ 2011, S. 528).

Gleichstrom

Gleichstromübertragungen sind sowohl durch Freileitungen, als auch durch Kabel möglich. Gleichstromleiter haben für große Leitungslängen bessere Übertragungseigenschaften als Drehstromleiter und haben sich für Seekabelverbindungen sowie Energieübertragungen über große Entfernungen etabliert (HOFMANN et al. 2012, S. 5). Anders als beim Drehstrom sind beim Gleichstrom die Leitungsinduktivitäten und -kapazitäten unwirksam, so dass die damit verbundenen Effekte wie induktiver Längsspannungsabfall und Ferranti-Effekt nicht auftreten. Die maximale Länge einer Höchstspannungsgleichstrom (HGÜ)-Leitung wird nur durch den ohmschen Spannungsabfall begrenzt, welcher bei HGÜ aufgrund des fehlenden Stromverdrängungseffektes geringer als bei HDÜ ist (HOFMANN et al. 2012, S. 42–49). Auch die Stromwärmeverluste sind geringer als beim Drehstrom, da kein Blindleistungsbedarf entsteht (FEIX et al. 2012, S. 92). Bei der Gleichstromübertragung entstehen statische Gleichfelder (HOFMANN et al. 2012, S. 230).

Beim Gleichstrom ist zwischen der klassischen/netzgeführten und der selbstgeführten HGÜ (LCC-HGÜ; LCC: Line Commutated Converter) zu unterscheiden. Im Gegensatz zur netzgeführten HGÜ mit Thyristor-Stromrichtern kommen bei der selbstgeführten HGÜ (VSC-HGÜ; VSC: Voltage Source Converter) IGBT-Stromrichter (IGBT: Insulated-Gate Bipolar Transistor) zum Einsatz, die in jeder Netzperiode mehrmals ein- und wieder ausgeschaltet werden können. Anders als die netzgeführten HGÜ besitzt die selbstgeführte HGÜ die Fähigkeit zum Schwarzstart, was bedeutet, dass sie in der Lage ist, beim Netzaufbau aus dem spannungslosen Zustand mitzuwirken. Dies macht ihren Einsatz auch bei der Anbindung von Offshore-Windenergieparks möglich (HOFMANN et al. 2012, S. 46). Da die Systemeigenschaften der netzgeführten HGÜ ungünstiger als die der selbstgeführten HGÜ sind, wird erstere nicht weiter im Netzentwicklungsplan Strom Deutschlands berücksichtigt (FEIX et al. 2012, S. 94).

Bei der Gleichstromübertragung sind Konverterstationen zur Kupplung mit dem Drehstromnetz notwendig, die den Gleichstrom in Drehstrom umwandeln. Diese sind an den Leitungsenden der HGÜ-Leitungen sowie an zusätzlichen Abgängen entlang der HGÜ-Trasse notwendig (HOFMANN et al. 2012, S. 85). Zu den zu errichtenden Hauptelementen einer Konverterstation gehören eine bis zu 30 m hohe Ventilhalle, Stromrichtertransformatoren sowie ein Kontrollhäuschen (AECOM U. INTERTEC-METOC 2011, S. 8). Die Grundfläche einer VSC-HGÜ-Konverterstation wird mit ca. 100 m x 50 m bei einer Höhe von 12–25 m angegeben (bei 1000 MW, HOFMANN 2012, S. 27).

2. Schutzgut „Mensch“

2.1 Auswirkungen von 380-kV-Höchstspannungsdrehstrom-Freileitungen

Der folgende Abschnitt beschränkt sich auf die zentralen Diskussionsbereiche, elektrische und magnetische Felder, Koronaentladungen und Unfälle als Teil der Auswirkungen durch Anlage und Betrieb von Freileitungen. Wirkungen der Bauphase wie etwa Emissionen von Lärm, Staub und Luftschadstoffen sowie Erschütterungen und Störungen auf die Wohn- und Erholungsqualität bleiben an dieser Stelle unberücksichtigt (vgl. z.B. GEO et al. 2009, S. 88), werden aber im Abschn. 2.1.4 behandelt. Für Staubemissionen sei auf Abschn. 7.1.1 sowie 7.1.3 verwiesen.

Unter anderem haben die STRAHLENSCHUTZKOMMISSION (SSK 2001, 2004, 2008, 2008a), das BUNDESAMT FÜR STRAHLENSCHUTZ (BFS 2009) die WELTGESUNDHEITSORGANISATION (WHO 2010), INTERNATIONAL COMMISSION ON NON-IONIZING RADIATION PROTECTION (ICNIRP 2010) das SCHWEIZER BUNDESAMT FÜR UMWELT, WALD UND LANDSCHAFT (BUWAL 2005), die NIEDERSÄCHSISCHE STAATSKANZLEI (2007), BRAKELMANN (2004), SCHÜZ U. MICHAELIS (2000) sowie SILNY et al. (2001–2011) jeweils synoptisch über die Auswirkungen von Freileitungen auf den Menschen berichtet. Wirkungsprognosen für konkrete Fälle sind u.a. ENVIRONMENTAL RESOURCES MANAGEMENT (ERM 2008), FBG FREILEITUNGSBAU GMBH (2008) sowie OBERFELD (2006) zu entnehmen.

2.1.1 Beeinträchtigungen durch elektrische und magnetische Felder

2.1.1.1 Übersicht

Hochspannungsleitungen sind Quellen niederfrequenter elektrischer und magnetischer Felder. Die elektrischen und magnetischen Feldstärken in der Nähe von Freileitungen sind von der Spannungsebene, der Masthöhe und -form, der Anordnung der Leiterseile, der Anzahl und dem Durchhang der Leiterseile, der Spannung bzw. Stromstärke sowie von der Umgebungstemperatur abhängig (vgl. HOFMANN et al. 2012, Teil III). Die bei der Höchstspannungsdrehstromübertragung (HDÜ) entstehenden elektrischen Felder unterliegen nur geringen Schwankungen, da es sich um niederfrequente Wechselströme mit quasistatischen Verhältnissen handelt. Die magnetische Feldstärke ist vom Lastfluß abhängig und weist daher zeitlich größere Schwankungen auf (HOFMANN et al. 2012, S. 229). Die möglichen Beeinträchtigungen durch elektrische und magnetische Felder, insbesondere von Freileitungen, werden in Wissenschaft und Öffentlichkeit kontrovers diskutiert. Die weltweit sehr unterschiedlichen Grenzwerte, Vorschriften und Empfehlungen zum Schutz der Bevölkerung vor niederfrequenten und statischen elektrischen und magnetischen Feldern sind ein bereiteter Ausdruck einer noch offenen und intensiv geführten Fachdiskussion (vgl. Tabelle 1).

Tabelle 1: Auszug aus den nationalen Regelungen der Immissionsbeiträge durch einzelne ortsfeste Feldquellen (nach SSK 2008, S. 26)

| Land | Immissionswert bei 50 Hz | Bereich |
|-------------|--------------------------|---|
| Deutschland | 100 μ T | Bevölkerung, gewerblich genutzte Anlagen, Dauerausstellung |
| Niederlande | 0,4 μ T | Bereiche mit längerem Aufenthalt von Kindern; Wert für 30 %ige Auslastung |
| Schweiz | 1 μ T | Orte mit empfindlicher Nutzung |
| Italien | 10 μ T | Bereiche mit Aufenthaltsdauern > 4 h/d |
| | 3 μ T | Bereiche mit dauerndem Aufenthalt |
| Irland | 16 μ T (22 m) | Schulen oder Wohnhäuser |

Die STRAHLENSCHUTZKOMMISSION (SSK) DES BUNDESMINISTERIUMS FÜR UMWELT, NATURSCHUTZ UND REAKTORSICHERHEIT hat sich erstmals ausführlich 2001 mit wissenschaftlich nachgewiesenen Reaktionen und Gesundheitsbeeinträchtigungen durch niederfrequente magnetische Felder unter dem Titel „Grenzwerte und Vorsorgemaßnahmen zum Schutz der Bevölkerung vor elektromagnetischen Feldern“ befasst. Die darin enthaltenen Empfehlungen wurden auf Grundlage neuer veröffentlichter wissenschaftlicher Studien zu biologischen Auswirkungen von elektrischen und magnetischen Feldern überarbeitet und 2008 herausgegeben. Die SSK (2008, S. 5) gibt u.a. folgende vorsorgende Empfehlungen zum Schutz der Bevölkerung vor elektrischen und magnetischen Feldern ortsfester Anlagen zur Energieversorgung:

- Berücksichtigung aller vorhandenen Feldquellen bei der Bewertung der Immissionen ortsfester Anlagen zur Energieversorgung, was z. B. auch die Beiträge der Immissionen der häuslichen Feldquellen mit einbezieht,
- Maßnahmen ergreifen, um Expositionen durch elektrische und magnetische Felder im Rahmen der technischen und wirtschaftlich sinnvollen Möglichkeiten zu minimieren,
- Einhaltung empfohlener Grenzen für durch ortsfeste Anlagen emittierte magnetische Felder auch bei höchster betrieblicher Auslastung, um Personen mit aktiven Implantaten vor Störungen zu schützen,
- die Grenzwerte nicht vollständig ausschöpfen, insbesondere nicht Wohnbereichen und Räumlichkeiten, die für den nicht nur vorübergehenden Aufenthalt der Allgemeinbevölkerung vorgesehen sind.

Für ortsfeste Hochspannungsanlagen (< 1000 Volt) mit einer Frequenz von 50 Hertz gelten in Deutschland seit 1997 die in der 26. BImSchV (Verordnung zum Bundes-Immissionsschutzgesetz) für die Effektivwerte festgelegten Grenzwerte von 100 μ T für die magnetische Flussdichte und 5 kV/m für die elektrische Feldstärke. Nach § 3 26. BImSchV gilt die Einhaltung dieser Werte zum Schutz vor schädlichen Umwelteinwirkungen „in Gebäuden oder auf Grundstücken, die zum nicht nur vorübergehenden Aufenthalt von Menschen bestimmt sind, bei höchster betrieblicher Anlagenauslastung und unter Berücksichtigung von Immissionen durch andere Niederfrequenzanlagen“. Unter der Voraussetzung, dass im Einzelfall keine hinreichen-

den Anhaltspunkte für insbesondere durch Berührungsspannungen hervorgerufene, für die Nachbarschaft unzumutbare Belästigungen bestehen, sind kurzzeitige Überschreitungen dieser Grenzwerte um nicht mehr als 100 % für insgesamt nicht länger als 5 % eines Beurteilungszeitraums von einem Tag zulässig. Dies gilt auch für kleinräumige Überschreitungen der elektrischen Feldstärke um nicht mehr als 100 % außerhalb von Gebäuden.

Die 26. BImSchV enthält Anforderungen zur Vorsorge (§ 4), insofern der maximale Effektivwert „in der Nähe von Wohnungen, Krankenhäusern, Schulen, Kindergärten, Kinderhorten, Spielplätzen oder ähnlichen Einrichtungen in diesen Gebäuden oder auf diesen Grundstücken“ auch nicht kurzzeitig die Grenzwerte von 100 μ T für die magnetische Flussdichte und 5 kV/m für die elektrische Feldstärke überschreiten darf.

Die sichere Einhaltung der in der 26. BImSchV festgelegten Immissionsgrenzwerte ist bei der Anlagenzulassung nachzuweisen. Die Grenzwerte der 26. BImSchV beruhen auf Empfehlungen der Internationalen Kommission für den Schutz vor nichtionisierender Strahlung (ICNIRP), welche die Weltgesundheitsorganisation (WHO) berät. Nach Bewertung aktueller wissenschaftlicher Literatur liegen der STRAHLENSCHUTZKOMMISSION DES BUNDESMINISTERIUMS FÜR UMWELT, NATURSCHUTZ UND REAKTORSICHERHEIT (SSK) keine ausreichend belastbaren Erkenntnisse vor, die auf eine mögliche Beeinträchtigung der Gesundheit durch niederfrequente elektrische und magnetische Felder schließen lassen und eine Änderung der bestehenden Grenzwertregelung der 26. BImSchV rechtfertigen würden (SSK 2008, S. 3). Vor dem Hintergrund des aktuellen Wissensstandes über die Erregung von Körperzellen durch niederfrequente elektrische und magnetische Felder hält die SSK (SSK 2008, S. 16) die bestehenden Grenzwertempfehlungen auch unter Berücksichtigung besonders empfindlicher Personen für ausreichend, um Schutz vor Nervenregung zu bieten.

Das BUNDESAMT FÜR STRAHLENSCHUTZ (BFS 2009) empfiehlt ergänzend zur 26. BImSchV Maßnahmen zum Schutz der Bevölkerung, um den wissenschaftlichen Unsicherheiten, die die gesundheitlichen Auswirkungen der elektrischen und magnetischen Felder betreffen, Rechnung zu tragen. Dies beinhaltet u.a., dass die niederfrequenten Felder, denen die Bevölkerung ausgesetzt ist, so gering wie möglich sein sollten. Außerdem soll die Bevölkerung über bekannte und vermutete Auswirkungen von Feldern und über die Feldintensitäten relevanter Feldquellen informiert werden. Als Möglichkeiten zur Verringerung der Exposition soll bereits bei der Planung und Genehmigung von Gebäuden auf einen ausreichenden Abstand zu Hochspannungsleitungen geachtet werden (BFS 2009).

Angesichts der steigenden Anzahl von Personen mit aktiven Implantaten sieht die SSK darüber hinaus Handlungsbedarf, Störbeeinflussungssituationen im Alltag durch gerätetechnische und regulatorische Maßnahmen zu verringern bzw. zu vermeiden. Zur Vermeidung der Störbeeinflussung von elektronischen Implantaten (z.B. Herzschrittmachern oder Defibrillatoren) sind u.a. ortsfeste Anlagen zur Energieversorgung mit der Frequenz 50 Hz der SSK zufolge so zu planen, zu errichten und zu betreiben, dass auch bei höchster betrieblicher Auslastung die von einer Anlage emittierten magnetischen Induktionen die empfohlenen Grenzen nicht überschreiten (vgl. NEITZKE u. OSTERHOFF 2010). Die Induktionen sollten in Bereichen, die Implantatträgern zugänglich sind, und bei denen Feldquellen, die nicht sichtbar bzw. bei denen ein Expositionvermeidendes Verhalten nicht möglich oder nicht zumutbar ist, folgende Werte nicht überschreiten (SSK 2008, S. 5):

- 10 μT (50 Hz) bzw. 30 μT (16 2/3 Hz) in Bereichen, in denen mit zusätzlichen Feldquellen gerechnet werden muss (z.B. in Wohnanlagen, Seniorenheimen, Krankenhäusern)
- 15 μT (50 Hz) bzw. 45 μT (16 2/3 Hz) in Bereichen, in denen Einträge zusätzlicher Feldquellen nicht zu erwarten und Feldquellen (z.B. Erdkabel) nicht sichtbar bzw. nicht entsprechend gekennzeichnet sind.

Vorsorgeorientierte Maßstäbe gegenüber magnetischen Feldern sowie des allgemeinen Wohnumfeldschutzes für den Freileitungsbau sind in Niedersachsen auch in das Planungsrecht eingeflossen. Das Landesraumordnungsprogramm (LROP) Niedersachsen (2008) legte als Ziel fest, dass Hoch- und Höchstspannungsleitungen nicht als Freileitung, sondern als Erdkabel verlegt werden, wenn ein Mindestabstand von 400 m im Innenbereich entsprechend § 34 BauGB und 200 m zu Wohngebäuden im Außenbereich entsprechend § 35 BauGB unterschritten wird (Niedersächsisches Gesetz- und Verordnungsblatt (Nds. GVBl.) 2008, 132; vgl. WEYER et al. 2012, Abschn. 4.1.5.2.3 1). Nach dem Entwurf zur Änderung der Verordnung über das LROP Niedersachsens (NIEDERSÄCHSISCHER LANDTAG 2012, S. 11 Punkt 9) kann dieser Abstand ausnahmsweise unterschritten werden, wenn ein „gleichwertiger vorsorgender Schutz der Wohnumfeldqualität gewährleistet ist oder keine geeignete energiewirtschaftlich zulässige Trassenvariante die Einhaltung der Mindestabstände ermöglicht“. Die festgelegten Mindestabstände leiten sich aus der Erkenntnis ab, dass bei einem Abstand von rd. 100 m zu den Leitungen die gesetzlichen Anforderungen hinsichtlich der elektrischen und magnetischen Feldwirkungen zwar voll erfüllt seien, die Belastungen allerdings noch über dem Niveau der anzunehmenden Grundbelastung lägen (ML 2008, Abschn. 4.2 Ziffer 07, Sätze 6-8). Bei einem Abstand von 200 m zu den Leitungen liegen die elektromagnetischen Auswirkungen der Begründung des Landesraumordnungsprogramms Niedersachsen (ML 2008, Abschn. 4.2 Ziffer 07, Sätze 6-8 LROP) zufolge auf dem Niveau der allgegenwärtigen Grundbelastung und seien insoweit nicht mehr messbar (vgl. auch BUWAL 2005, S. 23). Bei einer 380-kV-Leitung üblicher Bauart sei davon auszugehen, dass bei einem Abstand von 200 m von der Trassenmitte bis zum Wohngebäude gesundheitliche Beeinträchtigungen vermieden werden. Die Verdoppelung des Abstands der Leitung zur Wohnbebauung auf 400 m im Innenbereich berücksichtigt darüber hinaus typische wohnumfeldnahe Aktivitäten wie die Nutzung von Spiel- oder Sportplätzen sowie ortsrandnaher Wanderwege und soll damit vorsorgend auch zum Schutz und Erhalt des nahen Wohnumfeldes beitragen (ML 2008, Abschn. 4.2 Ziffer 07, Sätze 6-8 LROP). Ebenfalls Abstände von 200 m und 400 m zu Wohnbebauung für eine mögliche Erdverkabelung auf den Strecken der EnLAG-Piloten wurden in § 2 Abs. 2 des Energieleitungsausbaugesetzes (EnLAG) übernommen (vgl. WEYER et al. 2012, Abschn. 4.1.5.1). Diese EnLAG-Pilotprojekt-Strecken mit möglicher Teilverkabelung sind der Abschnitt Ganderkesee – St. Hülfe der Leitung Ganderkesee – Wehrendorf, die Leitungen Diele – Niederrhein, Wahle – Mecklar sowie der Abschnitt Altenfeld – Redwitz der Leitung Lauchstädt – Redwitz (vgl. EnLAG § 2 (1)).

2.1.1.2 Elektrische Felder

Die elektrischen Felder von Gleichstromleitungen halten sich im Schwankungsbereich natürlicher Ereignisse. Grenzwerte für elektrische Felder beziehen sich in Deutschland daher ausschließlich auf Wechselfelder. Der nach der 26. BImSchV zugelassene Effektivwert der elektrischen Feldstärke beträgt bei einer Frequenz von 50 Hz 5 kV/m und gilt in Gebäuden und auf Grundstücken,

die zum nicht nur vorübergehenden Aufenthalt von Menschen gedacht sind. Eine kurzzeitige Überschreitung ist nur außerhalb der Vorsorgebereiche zulässig (vgl. Abschn. 2.1.1.1). Die elektrische Feldstärke nimmt mit zunehmendem Abstand zum Leitungssystem ab (HOFMANN et al. 2012, S. 229).

Die Immissionen durch elektrische Wechselfelder nehmen nach Berechnungen mit zunehmender Distanz zu den Freileitungen rasch ab und liegen je nach Masttyp ab einer seitlichen Entfernung von 15–30 m unterhalb von 5 kV/m in 1 m über der Erdoberkante (EOK) bei einer Spannung von 380 kV (HOFMANN et al. 2012, Teil III, Abschn. 2.2). Aus Berechnungen, in denen unabhängig von Immissionsorten der 26. BImSchV elektrische Felder für typische Mastformen von Freileitungen ermittelt wurden, geht hervor, dass der zugelassene Effektivwert der elektrischen Feldstärke in wenigen Extremfällen bei Vollaustlastung in Aufpunkthöhe von 1 m EOK unter der Leitung überschritten werden kann (HOFMANN et al. 2012, S. 235). Nach Angaben von GEO et al. (vgl. 2009, S. 23 zit. nach DAVID 1997) sowie BRAKELMANN (2004, S. 40) betragen die höchsten gemessenen Feldstärken direkt unterhalb von Freileitungen und im Bereich des stärksten Seildurchhangs weniger als 6 kV/m (vgl. ähnlich FBG-Freileitungsbau GmbH 2008, S. 13 zur ehemals geplanten 380-kV-Leitung Maade–Conneforde). NEITZKE et al. (2010, S. 0–4) geben für auf maximale Anlagenauslastung extrapolierte Immissionen von 380-kV-Freileitungen ein elektrisches Feld von fast 9 kV/m im Bereich der Freileitungstrassen an.

BRAKELMANN (2004, S. 40) stellt fest, dass Gebäudemauern und andere Hindernisse das elektrische Feld erheblich abschirmen, so dass für die Dauerexposition von Menschen keine Gefährdung durch das elektrische Feld von Freileitungen zu erwarten ist. Ein von außen wirkendes elektrisches Feld wird im Inneren eines Gebäudes um 90 % oder mehr abgeschwächt (BUWAL 2005, S. 25). Auch die BET GMBH et al. (2011, S. 35) geht von einer Abschwächung elektrischer Felder durch Hindernisse wie Bäume oder Wände aus. NEITZKE et al. (2010, S. 0–4) berichten, dass Hochspannungsfreileitungen in benachbarten Wohnungen zu mittleren Expositionen deutlich über denen in Wohnungen fernab solcher Trassen führen können. Expositionen in der Nähe häuslicher Stromversorgungsanlagen oder von in Betrieb befindlichen Elektrogeräten können weit über dem allgemeinen Haushintergrund liegen und deutlich höher sein als die Beiträge von Hochspannungsfreileitungen.

Die bestehenden Grenzwerte für elektrische Felder werden kontrovers diskutiert. So folgern etwa KÜHLING (2011) und BUND (2011), dass bei unzureichendem Wissen über Wirkungszusammenhänge das im BImSchG verankerte Vorsorgeprinzip wirksamer anzuwenden sei. KÜHLING u. MÜLLER (2002) halten die in der 26. BImSchV verankerte Vorsorge für unzureichend, weil sie nicht in Form eines Grenz- oder Zielwertes konkretisiert sei und fordern zur Umweltvorsorge zum Schutz vor gesundheitlichen Beeinträchtigungen einen Schutzstandard von 0,5 V/m für 50-Hz-Felder. Das Bundesamt für Strahlenschutz (BfS) verweist demgegenüber darauf, dass die 26. BImSchV sehr wohl ausreichende Ansätze zur Vorsorge enthalte, die jedoch strahlungsspezifisch seien und nicht mit anderen Schutzgütern des Immissionsschutzrechts vergleichbar seien (ARMUS 2012).

2.1.1.3 Magnetische Felder

Jeder von Strom durchflossene Leiter ist von einem magnetischen Feld umgeben. Die bei Niederfrequenzanlagen entstehenden Magnetfelder können sowohl organische als auch anorganische Stoffe durchdringen. Dabei gilt, dass die magnetische Flussdichte sich mit zunehmender

Stromstärke erhöht. Die Stärke der Felder nimmt mit zunehmender seitlicher Entfernung exponentiell ab (vgl. HOFMANN et al. 2012, Teil III Abschn. 3.4).

Der in der 26. BImSchV festgelegte Grenzwert für den Effektivwert des magnetischen Feldes beträgt 100 μT bei 50 Hz. Dieser Wert ist in Gebäuden und auf Grundstücken, die nicht nur zum vorübergehenden Aufenthalt von Menschen bestimmt sind, einzuhalten. Innerhalb der Vorsorgebereiche ist selbst eine kurzzeitige Überschreitung unzulässig (vgl. Abschn. 2.1.1.1). Da die magnetische Feldstärke vom Stromfluss abhängig ist, ändert sie sich im Gegensatz zum elektrischen Feld mit den tageszeitlichen Schwankungen des Strombedarfs (HOFMANN et al. 2012, S. 229).

Die Auswirkung der magnetischen Felder von Niederfrequenzanlagen auf den Menschen wird international kontrovers erörtert (vgl. u.a. SSK 2008–2009; ICNIRP 2010; NIEHS 2002; WHO 2001; BUWAL 2005; GEO et al. 2009; SCHÜZ u. MICHAELIS 2000; SCHÜZ et al. 2001; BERNHARDT 2002). Das Spektrum der diskutierten Auswirkungen auf den Menschen umfasst dabei u.a.:

- Vermehrtes Auftreten von kindlicher Leukämie und anderen Krebserkrankungen,
- Veränderung der Melatoninproduktion,
- Vermehrtes Auftreten von Alzheimer, Auftreten von Kopfschmerzen, Erschöpfungszuständen und Allergien,
- Störbeeinflussung auf aktive Implantate, z.B. Herzschrittmacher.

Die INTERNATIONAL COMMISSION ON NON-IONIZING RADIATION PROTECTION (ICNIRP), ein Beratungsgremium der WHO, fasst den aktuellen Forschungsstand 2010 so zusammen, dass aufgrund der bisherigen Forschungsarbeiten zwar von einer möglichen Beeinflussung auszugehen ist, dass gesundheitliche Auswirkungen aber noch nicht ausreichend belegt sind, um obere Grenzwerte nennenswert herabzusetzen (ICNIRP 2010). Die mit der WHO assoziierte Internationale Agentur für Krebsforschung (IARC) hat diese Felder als „möglicherweise krebserregend“ eingestuft (WHO 2010).

Vor dem Hintergrund der bestehenden Wissensunsicherheiten fallen die Grenzwerte weltweit sehr unterschiedlich aus, ebenso wie ihre Berechnungsmethoden. Die Grenzwerte werden vielerorts mit hohen Vorsorgemargen versehen (vgl. NEITZKE u. OSTERHOFF 2010, S.1). Nach der 26. BImSchV von 1996 (§ 3 i.V.m. Anhang 2) liegt der Immissionsgrenzwert der magnetischen Flussdichte in Deutschland bei 100 μT (50 Hz) und gilt für alle Orte, an denen Menschen sich nicht nur vorübergehend aufhalten können sowie für sensible Bereiche wie Kindergärten und Schulen.

In der Schweiz gilt ebenfalls 100 μT als Grenzwert. Darüber hinaus setzt die NIS-Verordnung der Schweiz (Verordnung zum Schutz vor nichtionisierender Strahlung) eine vorsorgliche Emissionsbegrenzung für Frei- und Kabelleitungen zur Übertragung von elektrischer Energie fest, die für Wechselstrom-Anlagen (Freileitung und Erdkabel) mit einer Nennwertspannung von mehr als 1000 V gilt. Hierin wird der Anlagegrenzwert für den Effektivwert (=quadratischer Mittelwert der zeitlich veränderlichen magnetischen Flussdichte) der magnetischen Flussdichte auf 1 μT vorgeschrieben (Punkt 14 der Verordnung). Dieser Wert gilt auch für Anlagen zur Transformation von Hoch- auf Niederspannung (Punkt 24 der NISV). Hierbei ist der Anlagegrenzwert eine Emissionsbegrenzung für die von einer Anlage allein erzeugte Strahlung (SCHWEIZERISCHER BUNDESRAT 2009). Weitere Regelungen in anderen Ländern sind Tabelle 1 zu entnehmen, wobei darauf

hingewiesen sei, dass diese Werte aufgrund unterschiedlicher Immissionsorte und Bemessungsgrundlagen nicht direkt miteinander vergleichbar sind.

Einige Bundesländer geben Empfehlungen zur weitergehenden Gesundheitsvorsorge, die hinsichtlich ihrer Verbindlichkeit und der Anwendungsfälle im Einzelfall zu bewerten sind. In Bremen (2004) empfiehlt der Senator für Arbeit, Frauen, Gesundheit, Jugend und Soziales die Einhaltung von $0,3 \mu\text{T}$ in 180 m Entfernung von der Trassenmitte (KÜHLING 2011, S. 273). Hier ist jedoch darauf hinzuweisen, dass Werte in dieser Größenordnung zumindest kurzzeitig in der Nähe allgegenwärtiger Haushaltsgeräte (Mixer, Heizdecken etc.) weit überschritten werden

Die STRAHLENSCHUTZKOMMISSION (SSK), deren Empfehlungen (2001 u. 2008) als richtungsweisend und orientierend gelten, hat die in Deutschland geltenden Grenzwerte nach der 26. BImSchV wiederholt bestätigt, empfiehlt jedoch vor dem Hintergrund möglicher, ggf. noch nicht nachgewiesener Wirkungen, die bestehenden Expositionsgrenzwerte nicht völlig auszuschöpfen und unnötige Expositionen zu vermeiden oder zumindest zu minimieren. Unter Vorsorgegesichtspunkten sollen die geltenden Grenzwerte nicht ausgeschöpft werden. Auch das BUNDESAMT FÜR STRAHLENSCHUTZ (BFS 2012) betont in einem Positionspapier zu Freileitungen und Erdkabeln, dass Expositionen auch unterhalb der Grenzwerte aus Vorsorgegründen und wissenschaftlichen Unsicherheiten bzgl. möglicher Gesundheitsrisiken zu minimieren sind. Das Vorsorgeniveau sollte sich hierbei an der natürlichen bzw. zivilisatorischen Hintergrundbelastung orientieren, die durch neue Leitungen zur Energieversorgung nicht wesentlich erhöht werden sollten.

KÜHLING (2011) weist darauf hin, dass bei unzureichendem Wissen über Wirkungszusammenhänge das in der BImSchV verankerte Vorsorgeprinzip gelte (vgl. auch DI FABIO 1991) und fordert zur Umweltvorsorge in Anlehnung an die Vorsorgepraxis bei Luftschadstoffen zum Schutz vor gesundheitlichen Beeinträchtigungen den Schutzstandard von $0,01 \mu\text{T}$ als zu unterschreitende Zusatzbelastung magnetischer Felder. Daraus leitet KÜHLING (2011) ab, dass bei 380-kV-Freileitungen ein Schutzabstand von ca. 600 m zu den Leitungen einzuhalten sei (KÜHLING 2011, S. 275; vgl. auch BUND 2011, S. 14; Stromstärke nicht angegeben). Demgegenüber macht das BUNDESAMT FÜR STRAHLENSCHUTZ (BFS) deutlich, dass die Grenzwerte für magnetische Felder durchaus bereits Vorsorgeanteile enthalten. Vorsorgemargen, wie sie bei Luftschadstoffen üblicherweise angewendet werden, seien jedoch nicht 1:1 auf magnetische Felder übertragbar (AßMUS 2012).

Die zwischen 1993 und 1997 durchgeführte epidemiologische EMF II-Studie (EMF: elektrische und magnetische Felder), die das ganze frühere West-Deutschland einbezog, ergab einen statistisch signifikanten Zusammenhang zwischen im Kindesalter auftretender Leukämie und der Exposition magnetischer Felder von $\geq 0,2 \mu\text{T}$ (Medianwert über Nacht; 22–6 Uhr). Für eine durchschnittliche Exposition von $\geq 0,2 \mu\text{T}$ während 24 Stunden ergab sich lediglich eine schwache Assoziation mit dem Auftreten von Leukämie bei Kindern. Dabei waren die Assoziationen für durchschnittliche Magnetflussdichten von $\geq 0,4 \mu\text{T}$ deutlich stärker als für Magnetfelder zwischen $0,1$ und $0,4 \mu\text{T}$ (SCHÜZ U. MICHAELIS 2000; SCHÜZ et al. 2001). Hochspannungsleitungen waren im Rahmen der Studie für weniger als ein Drittel aller Magnetfelder $\geq 0,2 \mu\text{T}$ verantwortlich. Als Quellen für Magnetfelder $\geq 0,2 \mu\text{T}$ wurden Hausanschlüsse für 380 kV-Versorgungsleitungen (Dachständer oder Erdkabel) sowie Feldquellen innerhalb der Häuser identifiziert (SCHÜZ U. MICHAELIS 2000, S. 8).

Auch das BUNDESAMT FÜR UMWELT DER SCHWEIZ (BAFU 2009) fand in epidemiologischen Studien eine begrenzte Evidenz für ein erhöhtes Leukämierisiko bei Kindern, die zu Hause einem Langzeitmittelwert der magnetischen Flussdichte von über 0,3 bis 0,4 μT ausgesetzt waren.

AHLBOM et al. (2000) werteten neun epidemiologische Studien aus, bei denen das Magnetfeld entweder über 24 oder 48 Stunden gemessen oder berechnet wurde und stellten fest, dass das Leukämie-Risiko für Kinder, die zu Hause einer magnetischen Flussdichte von über 0,4 μT ausgesetzt sind, doppelt so hoch sei wie das für Kinder, die einem Magnetfeld von weniger als 0,4 μT exponiert sind.

Eine Metastudie des NATIONAL INSTITUTE OF ENVIRONMENTAL HEALTH SCIENCES (NIEHS 2002) betrachtet die Ergebnisse weltweiter epidemiologischer Untersuchungen zu einem möglichen Zusammenhang zwischen häuslichen Magnetfeldbelastungen und einem erhöhten Krebsrisiko. In Studien zu kindlicher Leukämie wurde die Hochspannungskonfiguration in Hausnähe untersucht sowie die Magnetfeldexpositionen in Häusern gemessen. Unter beiden Untersuchungsansätzen wurde in einigen Studien ein Zusammenhang gefunden, in anderen Untersuchungen jedoch keine Verbindung festgestellt. NIEHS erkennt im Ergebnis keine nachweisbare Verbindung zwischen kindlicher Leukämie und Hochspannungskonfiguration, jedoch eine schwache Kohärenz von kindlicher Leukämie und häuslicher Magnetfeldexposition ohne dass dabei eine Ursache-Wirkung-Beziehung nachweisbar sei (NIEHS 2002, S. 16–19). Zu anderen Krebsformen, die aufgrund erhöhter häuslicher Magnetfeldbelastungen bei Kindern auftreten können sowie zu Krebserkrankungen bei Erwachsenen, wird basierend auf den bisherigen epidemiologischen Studien kein Zusammenhang gesehen (NIEHS 2002, S. 20, 23). Auch konnten anhand epidemiologischer Studien bisher keine ausreichenden Beweise dafür gefunden werden, dass EMF-Aussetzungen am Arbeitsplatz ein erhöhtes Risiko für Leukämie oder Gehirntumore darstellen (NIEHS 2002, S. 22–23).

Die SSK (2008, S. 16 f) wertete 229 Laborstudien aus, die der Bewertung der ICNIRP und WHO zugrunde liegen (s. oben), wobei in Abhängigkeit von der Expositionsbedingung und -dauer zwischen keinen gefundenen Effekten und Effekten unterschieden wurde. Es konnten weder in Abhängigkeit von der Expositionsstärke noch in der Expositionsdauer klare Einsatzschwellen eines Effektes festgestellt werden. Vielmehr ergaben sich widersprüchliche Ergebnisse, die als Nachweis von Ursache-Wirkungsbeziehungen bei Expositionen unterhalb der Grenzwerte nicht belastbar sind.

Die vom NATIONAL INSTITUTE OF ENVIRONMENTAL HEALTH SCIENCES (NIEHS 2002, S. 23–24) zusammengefassten Ergebnisse weltweiter Laborstudien ergaben, dass es aufgrund der Exposition von EMF für die Dauer der Exposition zu einer leicht verringerten Herzschlagfrequenz kommen kann. Bei sehr hohen Expositionen von ca. 300 mG (= 30 μT) wurden in einigen, nicht reproduzierbaren Fällen Herzschlagunregelmäßigkeiten festgestellt. Des Weiteren ergaben klinische Studien keine konsistenten Auswirkungen auf den Hormonhaushalt, das Immunsystem oder die Blutchemie. In Laborstudien an Menschen, die nächtlichen EMF-Emissionen ausgesetzt wurden, konnte keine reduzierte Melatoninbildung belegt werden. Das Hormon Melatonin wird überwiegend nachts ausgeschüttet und kann das Krebszellwachstum verlangsamen, wie Laborexperimente an Tieren und Zellen zeigten. Einige epidemiologische Studien an Menschen bei der Arbeit oder zu Hause berichten von einer Reduzierung der Melatoninbildung.

Das NATIONAL INSTITUTE OF ENVIRONMENTAL HEALTH SCIENCES (NIEHS 2002, S. 25–26) wertete auch die Ergebnisse weltweit durchgeführter Versuche an Zellen und Tieren aus. Laborstudien

an Zellen werden meistens bei einer Magnetflussdichte von 100 μT und mehr durchgeführt und ergaben (NIEHS 2002, S. 25) zufolge bisher keine reproduzierbaren Ergebnisse, durch die sich biologische Auswirkungen durch EMF sicher belegen ließen. In 15 Studien, die überwiegend an Nagetieren durchgeführt wurden, konnte ein Zusammenhang zwischen Magnetfeldexposition und Leukämie nicht sicher nachgewiesen werden. Analysen, ob EMF-Expositionen ein chemisch induziertes Brustkrebsrisiko bei Ratten steigern, zeigten unterschiedliche Resultate, während eine ohne chemische krebserregende Substanzen durchgeführte Langzeitstudie keine Auswirkungen von EMF-Expositionen auf das Brustkrebsrisiko ergab. Ähnlich unklar liefen Tierversuche zu EMF-Expositionen und Hautkrebs, Leberkrebs oder Gehirntumoren aus. Zwar wiesen die Ergebnisse von drei Studien, in denen Mäuse EMF in Verbindung mit krebserregenden Chemikalien ausgesetzt waren, auf einen positiven Zusammenhang zwischen EMF-Exposition und Hautkrebs hin, jedoch konnten diese Ergebnisse nicht reproduziert werden. Auch andere Gesundheitsbeeinträchtigungen, z.B. Geburtsfehler, Fruchtbarkeitsverlust, Immunsystemfehler, Veränderungen des Genmaterials oder Verhaltensänderungen konnten bei Tierversuchen nicht auf EMF-Expositionen zurück geführt werden. Versuche an Zellen lassen den Verdacht zu, dass EMF-Expositionen die Fähigkeit der Zellen zur DNA-Reparatur hemmen können. Ein Nachweis dafür steht jedoch noch aus (NIEHS 2002, S. 25–27).

Auch das BUNDESAMT FÜR UMWELT DER SCHWEIZ (BAFU 2009) untersuchte das Krebsrisiko im Zusammenhang mit niederfrequenten Magnetfeldern anhand von Tierversuchen und Experimenten mit isolierten Zellen in Kultur. Zelleexperimente ergaben eine begrenzte Evidenz dafür, dass niederfrequente Magnetfelder die Wirkung bekannter Kanzerogene verstärken könnten. Tierversuche hingegen belegten keine tumorinduzierende Wirkung einer Magnetfeldexposition. Die BAFU-Studie unterstützt die Beurteilung der WHO aus dem Jahr 2007, wonach niederfrequente Magnetfelder möglicherweise kanzerogen für Menschen sind (BAFU 2009, S. 5). Entsprechend geht auch OBERFELD in der umweltmedizinischen Prüfung für das Vorhaben der „380-kV-Salzburgleitung“ davon aus, dass die Exposition gegenüber magnetischen Wechselfeldern unter anderem mit einer Risikoerhöhung für bestimmte Krebsformen und neurodegenerative Krankheiten einhergehen kann (OBERFELD 2006, S. 78 zit. nach STEVENS u. DAVIS 1996, ERREN 2001, IARC 2001, CDH 2001, HENSHAW u. REITER 2005).

Die SSK (2008) stellt fest, dass es nach wie vor weder Laborstudien noch Wirkungsmodelle gibt, die die Ergebnisse epidemiologischer Studien zu möglichen Zusammenhängen zwischen kindlicher Leukämie und Magnetfeldexposition hinreichend absichern, um die Emissionen durch aufwändige Maßnahmen um mehrere Größenordnungen zu reduzieren (SSK 2008, S. 4). In diesem Sinne betonen auch BET GMBH et al. (2011, S. 35–36), dass es trotz zahlreicher statistischer Hinweise aus epidemiologischen, tierexperimentellen Studien sowie In-Vitro-Untersuchungen hinsichtlich der Wirkungen magnetischer Felder von Freileitungen und einem erhöhten Risiko bei Kinderleukämie, Hirntumoren und Brustkrebs bisher kein wissenschaftlich nachgewiesener Ursache-Wirkungs-Zusammenhang bekannt ist und deswegen nach heutigem Wissensstand unterhalb der Grenzwerte negative Wirkungen von Freileitungen auf den Menschen durch elektromagnetische Felder nicht belegt seien.

Nach der 26. BImSchV beträgt der für den Effektivwert festgelegte Grenzwert der magnetischen Flussdichte bei höchster betrieblicher Auslastung und unter Berücksichtigung anderer Niederfrequenzanlagen 100 μT und gilt für Bereiche, die nicht nur für den vorübergehenden Aufenthalt von Menschen bestimmt sind (vgl. Abschn. 2.1.1.1). Zu Zeiten der Höchstlast wurden auch Berechnungen unabhängig von den Immissionsorten der 26. BImSchV durchgeführt, die im Fol-

genden zur Orientierung angegeben werden. BRAKELMANN (2004, S. 41) und GEO et al. (2009, S. 25) zufolge können die magnetischen Felder bis ca. 30 μT in 1 m Höhe EOK direkt unter einer 380-kV-Freileitung betragen. Auch HOFMANN et al. (2012, Teil III, Abschn. 3) errechneten Werte deutlich unter dem Grenzwert der 26. BImSchV. Entsprechend wird auch in den Planfeststellungsunterlagen der 380-kV-Freileitung Krümmel-Görries (sog. Windsammelschiene; IBU 2007, S. 254) sowie der einst geplanten (jedoch nicht realisierten) 380-kV-Leitung Maade-Conneforde (vgl. ERM 2008, S. 6.1-27 u. S. 2.6.1-4; TRANSPOWER 2010, S. 70) davon ausgegangen, dass die Grenzwerte der 26. BImSchV an jeder beliebigen Stelle der Freileitungstrasse in 1 m Höhe EOK unterschritten werden. Nach Berechnungen von ENTSOE U. EUROPACABLE (2011, S. 16) beträgt die Magnetflussdichte einer 400-kV-Freileitung (maximale Leistung: 2 x 2.500 MW, maximaler Strom: 7.200 A) mit einem Mindestabstand der Leiterseile zum Boden von 8 m in 1 m Höhe ca. 70 μT .

NEITZKE et al. (2010, S. 0-4) zeigten, dass Freileitungen das Magnetfeld in benachbarten Wohnungen deutlich erhöhen können. In an 380-kV-Freileitungstrassen benachbarten Wohnungen (17–85 m Entfernung zur Trassenmitte) wurde für die aktuelle Stromlast ein Mittelwert der Wohnungsmittelwerte von 0,81 μT ermittelt; der maximale Einzelwert lag bei 3,39 μT und wurde von NEITZKE et al. (2010, S. 374 f) in einer Wohnung in 30 m Entfernung zur Trassenmitte gemessen. Dabei wurde in jeder der fünf Wohnung in drei Räumen in Raummitte in einem Meter über dem Fußboden gemessen, sowie in einem Referenzraum (meist das Wohnzimmer) an vier weiteren Messpunkten. Die Messung erfolge über mind. eine Minute, wobei alle fünf Sekunden Einzelwerte gemessen und anschließend Wohnungsmittelwerte berechnet wurden (vgl. NEITZKE et al. 2010, S.329). Für diese Wohnungen wurden Maximallasten ohne Geräteeinfluss ermittelt, woraus sich ein errechneter Wohnungsmittelwert von 8,9 μT bei Maximalwerten bis 16,3 μT ergab (NEITZKE et al. 2010, S.0-4, S. 375). Der Vergleichsmittelwert der Wohnungsmittelwerte für Wohnungen fernab von Freileitungen wurde mit 0,05 μT bei einem Mindestabstand von 1 m zu eingeschalteten Geräten angegeben, der maximale Einzelwert mit 0,19 μT , was deutlich unter den Werten der Wohnungen in Trassennachbarschaft lag. Am Rande erwähnen NEITZKE et al. (2010, S. 0-4, S. 375), dass die Expositionen gegenüber niederfrequenten Magnetfeldern mit der Wohnungsdichte zunehmen und somit in Mehrfamilienhäusern höher als in Einfamilienhäusern sind.

2.1.2 Beeinträchtigungen durch Koronaentladungen

In den hohen elektrischen Feldstärken zwischen den Leiterseilen einer Freileitung kommt es zur stoßweisen Ionisierung von Luftmolekülen, der sogenannten Koronaentladung. Es handelt sich dabei um sehr schwache Entladungen, die in Feldstärken unterhalb der Leuchtbogen- bzw. Funkenentladung stattfinden und sich bei Freileitungen mit Brummtönen, Knacken oder Surren bemerkbar machen können (GEO et al. 2009; IBU 2007, S. 254; OBERFELD 2006, S. 84; TRANSPOWER 2010, S. 70).

Die durch Koronaentladung verursachten Geräusche entstehen durch hohe Feldstärken an den Leiteroberflächen und hängen von der Betriebsspannung, der Leitergeometrie, dem Leiterzustand und der Witterung ab (BET GMBH et al. 2011, S. 34). Besonders feuchte Witterungsbedingungen wie Nebel oder Raureif verstärken die Effekte. Die Geräuschentwicklung ist bei HVAC-Freileitungen bei trockener Wetterlage geringer (ca. 28–30 dB(A)) als bei Regen, wo je nach Bündelung 42, 50 oder 59 dB(A) auftreten (FRÖHLICH 2009). Die akustischen Störungen durch Koronaentladungen wirken erst in unmittelbarer Nähe von Freileitungen beeinträchtigend

(BRAKELMANN 2004, S. 42). Andererseits werden Koronageräusche nur schlecht von Gebäudehüllen absorbiert und treten nachts, zu den Ruhezeiten, in denen andere Geräuschquellen selten sind, besonders deutlich hervor. Somit sind sie als eine im Nahbereich beeinträchtigende akustische Auswirkung auf den Menschen zu beachten.

Anhand zweier 380-kV-Freileitungen in Österreich wurde mittels Partikelspektrometer untersucht, ob sich die Größenverteilung und der Ladungszustand der Partikel lee- und luvseitig der Leitung ändern. Der Anteil der Partikel unter 100 nm am Gesamtaerosol, der sich nicht im Ladungsgleichgewicht befand, lag bei allen Messungen bei ca. 30–40 %, ohne dass lee- und luvseitig signifikante Unterschiede festgestellt werden konnten. Es bestand demnach kein nachweisbarer Einfluss auf den Ladungszustand des atmosphärischen Aerosols (OBERFELD 2006, S. 87). Die Messungen wurden bei trockenem Schönwetter mit sehr geringem Ionisationspotential vorgenommen. Der Autor betont, dass daher eine umweltmedizinische Beurteilung für Wetterlagen mit hohem Ionisierungspotential (Regen, Nebel, Raureif) noch aussteht (OBERFELD 2006, S. 88).

Die Ionisierung von Luftpartikeln durch Koronaeffekte steht im Verdacht, die Wirkung von Luftschadstoffen zu verstärken. FEWS et al. (1999) modellierten in einer Studie das Verhalten von durch Koronaentladungen geladenen Aerosolen mit Radon-Zerfallsprodukten in einem Drehstromfeld unter einer Höchstspannungsleitung (400 kV). Es fand sich eine 2–3fache Zunahme der Deposition von Schmutzpartikel-Aerosolen auf einer den menschlichen Kopf simulierenden Oberfläche. FEWS et al. (1999) vermuten über Umweltschadstoffe, die vor allem aus Autoabgasen stammen, eine Kausalverknüpfung zwischen kindlicher Leukämie und Höchstspannungsleitungen (vgl. unterschiedliche Ergebnisse epidemiologischer Untersuchungen zu einem möglichen Zusammenhang zwischen Leitungsexposition und Leukämie in Abschn. 2.1.1.3 sowie Abschn. 2.2.2).

2.1.3 Beeinträchtigungen durch Unfälle

Unfälle durch Stromschlag, die meist mit schweren Verbrennungen oder Tod einhergehen, stellen an Freileitungen die häufigste Beeinträchtigung der menschlichen Gesundheit dar. Die Gefahr eines Stromschlages ist bei Wartungsarbeiten und insbesondere auch beim Unterqueren der Leitungen mit hohen landwirtschaftlichen Maschinen, sofern die Sicherheitsabstände nicht eingehalten werden, oder bei der Nutzung von Heißluftballons, Gleitschirmen oder Flugdrachen gegeben. Auch Zugang durch Unbefugte (z.B. Erklettern der Maste durch Kinder) und das Arbeiten in der Nähe einer Freileitung (Sturzgefahr, ungewollte Kontaktierung durch Arbeitsgeräte u. ä.) führt von Zeit zu Zeit zu schwerwiegenden Unfällen (BRAKELMANN 2004, S. 42).

Als weitere mögliche Beeinträchtigungen der menschlichen Gesundheit sind Abstürze bei Wartungsarbeiten zu bedenken (GEO et al. 2009, S. 139). Ferner kann es im Bereich der Umspannwerke sowohl bei Kabeln wie bei Freileitungen im Falle von Explosionen zu einer Freisetzung von Luftschadstoffen kommen (vgl. OBERFELD 2006, S. 89). Naturkatastrophen (Stürme, Brände, Fluten) können schwere Schäden an Freileitungen verursachen (FEIX 2012), wobei auch Menschen verletzt werden können.

2.1.4 Vermeidungs- und Minderungsmaßnahmen

Während der Bauphase wird der Mensch hauptsächlich durch Lärm- und Schadstoffemissionen beeinträchtigt, welche sich durch eine optimierte Arbeits- und Bauplanung sowie durch eine zügige Baudurchführung minimieren lassen. Mögliche Trenn- und Barrierewirkung der Baustelle können durch eine zeitliche Minimierung der Bauarbeiten gering gehalten werden. Die Erreichbarkeit von Siedlungen, z.B. durch Krankenwagen und Feuerwehr, muss gewährleistet sein. Der Einsatz von schadstoffarmen Fahrzeugen kann die Beeinträchtigung durch Schadstoffe der Baustellenfahrzeuge und -geräte reduzieren.

Die Höhe der Immissionen der elektrischen und magnetischen Felder hängt von der Spannung sowie stark von konstruktiven und betrieblichen Parametern ab. NEITZKE et al. (2010, S. 0–3) nennen folgende kritische Parameter: die Stärke des übertragenen Stroms, der sich direkt auf die Magnetfeldstärke auswirkt und bei Freileitungen auch den Durchhang der Leiterseile beeinflusst (was wiederum das magnetische und elektrische Feld am Boden verändert), die Zahl der aufgelegten Systeme und deren Anordnung/Abstände zueinander an den Masten, die Aufhänge- bzw. Masthöhe und der Durchhang von Freileiterseilen sowie die relative Anordnung der Phasenleitungen der Systeme und deren Strombelegung. Die Verwendung horizontaler anstelle vertikaler Kettenisolatoren bewirkt eine Erhöhung der Bodenabstände der Leitungen und reduziert das Magnetfeld am Boden, ohne dabei größere visuelle Auswirkungen zu haben (COLE et al. 2008, S. 44).

Belastungen durch elektrische oder magnetische Felder lassen sich grundsätzlich durch eine Vergrößerung von Wirkabständen minimieren, sei es durch die Erhöhung des Bodenabstands (vgl. HOFMANN et al. 2012, Teil III, Abschn. 3.4, COLE et al. 2008, S. 43) oder durch die Vergrößerung des seitlichen Abstands.

Eine nachhaltige Reduzierung der Feldstärken von 380-kV-Freileitungen wird aktuell von TENNET in den westlichen Niederlanden (Bleiswijk) auf einer ca. 20 km langen Strecke entlang der A12 erprobt (Projekt ‚Randstad‘). Im Rahmen des Projekts ‚Wintrack‘ werden neue, schlankere Mastformen entwickelt, um magnetische Felder auf dem Wege einer dichten Leitungsführung und Optimierung der Phasenbelegung nachhaltig zu reduzieren (vgl. HOFMANN et al. 2012, Teil I, Abschn. 1.3.2.2). Indem die Leiterseile in einer schmalen Zone nebeneinander aufgehängt werden, soll die Magnetfeldzone um mehr als 60 % verringert werden (TENNET 2007). Betriebsergebnisse sind z.Z. jedoch noch nicht bekannt. COLE et al. (2008) nennen als weitere Möglichkeiten zur Minimalisierung der elektrischen und magnetischen Felder von Freileitungen die Transposition von drei Phasen in Bezug auf drei andere Phasen sowie Teilung von Phasen. In der direkten Nähe der Leitung ist die Transposition weniger effizient als eine Erhöhung der Leitung, erzielt aber eine starke Reduktion der Breite des EMF-Korridors (COLE et al. 2008, S. 43). Bei einer Teilung der Phasen wird die Stromstärke optimal über mehrere Leiter verteilt, was eine Reduktion des Magnetfeldes zur Folge hat, v.a. unterhalb der Leitung (COLE et al. 2008, S. 44).

Es gibt unterschiedliche Möglichkeiten der Verminderung von Koronaentladungen. Sie beruhen entweder auf einer Verringerung der elektrischen Feldstärke auf der Oberfläche der Leiterseile (Vergrößerung der Leiterradien, Einsatz von Bündelleitern) oder auf einer Beschichtung der Leiterseile, die eine schnellere Trocknung nach Niederschlagsereignissen ermöglicht (GEO et al. 2009; vgl. HOFMANN et al. 2012, Teil I, Abschn. 1.3.2.2).

2.2 Auswirkungen von 380-kV-Höchstspannungsgleichstrom-Freileitungen

2.2.1 Beeinträchtigungen durch elektrische und magnetische Felder

2.2.1.1 Übersicht

Anders als bei der Drehstromtechnik handelt es sich bei der Höchstspannungsgleichstromübertragung (HGÜ) um statische elektrische und magnetische Felder. Wie beim Drehstrom nimmt auch beim Gleichstrom die Feldstärke mit zunehmendem Abstand zum Leitersystem ab und ist bei Freileitung dort am größten, wo der Abstand zum Boden am geringsten ist (HOFMANN et al. 2012, S. 229). Statische Gleichfelder kommen auch natürlicherweise vor. Das elektrische Gleichfeld der unteren Atmosphäre liegt unter normalen Bedingungen zwischen 0,12–0,15 kV/m und kann bei Sturm mehrere kV/m erreichen (ORNL 1997, S. 22). Das statische Magnetfeld der Erde beträgt etwa 50 μT (NRL 2008, S. 23).

Im Gegensatz zur Drehstromtechnik sind bei der Gleichstromtechnik nur zwei anstatt drei Leiter pro Stromkreis notwendig (bipolares System, HOFMANN et al. 2012, S. 38–39). Erfolgt die Rückleitung über den Boden, ist ein Leiter pro Stromkreislauf ausreichend (monoplares System). Bei Neubauten werden allerdings nur noch bipolare Systeme eingesetzt (HOFMANN et al. 2012, S. 40).

2.2.1.2 Elektrische Felder

Das elektrische Feld tritt aufgrund der Spannung auf der Leitung sowie der Produktion von Luftionen im Umfeld der Leitungen auf. Die Produktion und Bewegung von Luftionen ist stark von Wetterbedingungen abhängig, insbesondere von Wind und Regen, so dass das elektrische Feld unterhalb der Leitungen variiert. Luftionen entstehen auch bei Stürmen, Wasserfällen und Flammen als Resultat von Luftbewegungen (NRL 2008, S. 22–23). Bei schönem Wetter beträgt die elektrische Feldstärke des natürlich auftretenden statischen Feldes der unteren Atmosphäre etwa 0,15 kV/m und kann bei Gewittern zwischen der Erdbodenoberfläche und der Wolkendecke auf einige zehn kV/m ansteigen.

Elektrische Gleichfelder können ab etwa 25–30 kV/m vom Menschen wahrgenommen werden, aber nicht in den Organismus eindringen. So können bspw. Haare elektrisch aufgeladen werden (ORNL 1997, S. 22) oder elektrische Ladungen durch Reibung von Kleidung entstehen, die sich bei Berührung metallischer Oberflächen entladen. Diese Entladung kann vom Menschen wahrgenommen werden, ist dem NRL zufolge aber unbedenklich, auch wenn elektrische Spannungen von bis zu 20 kV erreicht werden können (NRL 2008, S. 22).

Da statische Felder keine Spannungen oder Stromstärken im Körper induzieren, können direkte biologische Auswirkungen nach dem bisherigen Kenntnisstand ausgeschlossen werden. Die bereits erwähnten indirekten Auswirkungen wie Wahrnehmung und Funkenentladung beim Berühren geladener Objekte kommen vor, sind aber schwach ausgeprägt und auf den Bereich direkt unter der Leitung begrenzt (HEALTH SCIENCE GROUP 2011, S. 22). Die WHO schreibt in ihrer Forschungsagenda für statische Felder, dass eine weitere Erforschung von möglichen Gesundheitsbeeinträchtigungen durch statische elektrische Felder wenig Nutzen bringen dürfte, da keine der bisher durchgeführten Studien einen nachteiligen Effekt ergeben hat, wenn man von möglichem Stress durch wiederholte Elektroschocks geringer Intensität absieht (WHO 2006, S. 1). Auch das NATIONAL RADIATION LABORATORY (NRL) Neuseelands weist darauf hin, dass „extensi-

ve Überseestudien“ bisher keine Belege zu gesundheitsschädlichen Effekten von elektrischen Gleichstromfeldern oder Luftionen, die durch HVDC-Freileitungen auftreten, nachgewiesen werden konnten (NRL 2008, S. 23).

Unter HVDC (high-voltage direct current)-Freileitungen ist das statische elektrische Feld mit bis zu 30 kV/m im Offenland am größten. In bewaldeten oder bebauten Gebieten kann das Feld durch die Abschirmung statischer Felder durch Bäume, Vegetation und Gebäude wesentlich schwächer sein (NRL 2008, S. 22; ATCO ELECTRIC 2010, S. 9).

Das OAK RIDGE NATIONAL LABORATORY (ORNL 1997, S. 22) gibt für die elektrische Spannung unter einer „repräsentativen“ HGÜ-Leitung (± 450 kV) einen Wert von 13 kV/m an und nennt als Vergleichswert die Entladung von bis zu 20 kV/m, die man erfahren kann, wenn man über einen Teppich geht.

2.2.1.3 Magnetische Felder

Bei der HGÜ treten statische Gleichfelder auf, deren Magnetfeldstärke bei HGÜ-Freileitungen größer ist als HGÜ-Erdkabeln, da die Hin- und Rückleiter größere Abstände zueinander haben als üblicherweise beim Kabel. Für statische Gleichfelder existieren keine gesetzlichen Grenzwerte und die Grenzwerte für niederfrequente Magnetfelder, wie sie bei der HDÜ auftreten, können nicht angewendet werden (HOFMANN et al. 2012, S. 230).

Die INTERNATIONALE KOMMISSION FÜR DEN SCHUTZ VOR NICHTIONISIERENDER STRAHLUNG (INTERNATIONAL COMMISSION ON NON-IONIZING RADIATION PROTECTION, ICNIRP) nennt in ihren Richtlinien zur Exposition gegenüber statischen Magnetfeldern 400 mT als Grenzwert zum Ausschluss direkter biologischer Auswirkungen für die allgemeine Bevölkerung und merkt an, dass zur Vermeidung negativer indirekter Auswirkungen auf die Gesundheit für Personen mit implantierten elektromedizinischen Geräten und ferromagnetisches Material enthaltenden Implantaten sowie zur Vermeidung von Körperschäden aufgrund fliegender ferromagnetischer Objekte wesentlich niedrigere Grenzwerte von 0,5 mT notwendig sein könnten (ICNIRP 2009, S. 511).

Für den Schutz von Arbeitnehmern gibt die EU Direktive 2004/40/EC einen Grenzwert von 200 mT für statische Magnetfelder an; der Berufsgenossenschaftlichen Vorschrift BGV B11 ist ein minimaler Grenzwert von 21,22 mT zu entnehmen, der allerdings ebenfalls nur für den Schutz von Arbeitnehmern gilt (HOFMANN et al. 2012, S. 230). Die ICNIRP empfiehlt für Arbeitnehmer den Grenzwert von 2 T bzgl. der Exposition des Kopfes sowie des Rumpfs und den Grenzwert von 8 T hinsichtlich der Exposition der Gliedmaßen nicht zu überschreiten (ICNIRP 2009, S. 511).

Die Stärke des statischen Magnetfeldes unterhalb einer HGÜ-Leitung liegt unterhalb der des magnetischen Erdfeldes, die bei etwa 50 μ T liegt (NRL 2008, S. 23). Das statische Magnetfeld unterhalb der HVDC-Freileitung, die die Nord- und Südinself Neuseelands verbindet, wird mit ca. 25 μ T angegeben, was den Werten in elektrischen Oberleitungsbussen und im S-Bahnnetz entspricht, während Patienten bei der Kernspintomographie magnetischen Feldern ausgesetzt sind, die etwa 50.000 mal stärker als die unter HGÜ-Freileitungen sind (NRL 2008, S. 23). ICNIRP (2009, S. 505) gibt für den Bereich unter HGÜ-Freileitungen eine magnetische Flussdichte in der Größenordnung von 20 μ T an.

Statische Magnetfelder treten auch bei magnetischen Verschlüssen und Magnetbefestigungen wie z.B. an Taschen, Broschen, magnetischen Halsketten, Armbändern und Gürteln sowie Magnetspielzeug auf und liegen über dem Wert von 0,5 mT (= 500 μ T; ICNIRP 2009, S. 505).

Es wird davon ausgegangen, dass keine gesundheitsschädigenden Auswirkungen durch HGÜ-Magnetfelder von Freileitungen ausgehen (NRL 2008, S. 23). Allerdings betont die WHO in ihrer Forschungsagenda für statische Felder, dass bisherige Studien zur Erforschung möglicher negativer Auswirkungen statischer Magnetfelder nicht systematisch und ohne geeignete Methoden und ohne Expositionsangaben durchgeführt wurden und sieht hier Nachholbedarf, der in ihrer Agenda näher und mit Prioritätsangabe beschrieben wird (WHO 2006, S. 1 ff.).

2.2.2 Beeinträchtigungen durch Koronaentladungen

Bei Gleichspannungs-Freileitungen sind die Verluste durch Koronaentladungen wesentlich geringer als bei einer gleich hohen Wechselspannung (NEITZKE et al. 2010, S.6), allerdings neutralisieren sich die ionisierten Partikel nicht in gleichem Maße (HEALTH SCIENCE GROUP 2011, S. 24). Die durch Koronaentladung entstandenen Luftionen besitzen dieselbe Polarität wie der Leiter: ein positiver Leiter bewirkt positiv geladene Luftpartikel, ein negativ geladener negativ geladene Luftionen. Da sich die Polarität beim Gleichstrom im Gegensatz zum Drehstrom nicht ändert, werden beim Gleichstrom Luftionen nicht schon am Entstehungsort neutralisiert, sondern erst durch mögliche Drift zum anderen Leiter (ORNL 1997; HEALTH SCIENCE GROUP 2011, S. 24). Die nicht neutralisierten, d.h. weiterhin geladenen Ionen können ORNL (1997) zufolge bis zu einer halben Meile (804,7 m) vom Leiter entfernt verdriften und mit Menschen, Tieren und Pflanzen in Kontakt kommen. HENDRICKSON (2005) detektierete darüber hinaus eine Verdriftungsentfernung der Luftionenwolken bis 1600 m.

Die HEALTH SCIENCE GROUP (2011, S. 25) gibt für die geplante HGÜ-Leitung „Western Alberta Transmission Line“ direkt unter der Leitung eine Luftionen-Konzentration von 93.000 Ionen/cm³ bei bipolarer Leitung und 118.000 Ionen/cm³ bei monopolarer Leitung an, während in 27,5 m Entfernung vom Mittelpunkt der Leitung, also am Rand der Trasse, noch 5.000–32.000 Ionen/cm³ bei der monopolaren und 16.000–25.000 Ionen/cm³ bei der bipolaren Leitung vorkommen können (Schönwetter-Mediane). Als Referenzwerte geben sie u.a. für große Städte bis zu 80.000 Ionen/cm³ für eine Entfernung von ca. 610 m vom Highway (30 Fahrzeuge pro Minute) 6.900–15.000 Ionen/cm³ und für ca. 152 m Entfernung in Lee von Fahrzeugabgasen 34.500–69.000 Ionen/cm³ an. Für eine maximal zulässige Luftionen-Exposition existieren keine Richtlinien (ORNL 1997).

Einer Studie von FEWS et al. (1999a) zufolge erfahren Luftpartikel durch Gleichstrom-Hochspannungsleitungen eine elektrische Ladung, wodurch sich die Deposition eingeatmeter Schadstoffe in den Lungen der nahe an Freileitungen lebenden Menschen erhöht. Gesundheitliche Beeinträchtigungen durch Autoabgase, die Atemwegs- sowie Herz-Kreislauf-Erkrankungen hervorrufen, seien gut belegt. Eine erhöhte Lungendeposition dieser Schadstoffe als Ergebnis geladener Aerosole aus Hochspannungsleitungen würde diese Gesundheitsbeeinträchtigungen verstärken. Auch kindliche Leukämie wird in epidemiologischen Studien sowohl mit Schadstoffen aus Autoverkehr, als auch mit der Exposition elektrischer Felder in Verbindung gebracht. Für letzteres werden mögliche Kausalzusammenhänge bekanntlich kontrovers diskutiert wird (vgl. Abschn. 2.1.1.3). FEWS et al. (1999a) zufolge sind die durch Hochspannungsleitungen gelade-

nen Aerosole die bis dahin unbekannte Ursache von Gesundheitsbeeinträchtigungen und insbesondere erhöhtem Krebsrisiko an Hochspannungsleitungen.

Andere Untersuchungen gehen von keinen gesundheitsschädigenden Auswirkungen durch über Luftionen zusätzlich geladene Aerosole aus. Die zusätzliche Ladung sei so gering, dass von keiner gesundheitlichen Beeinträchtigung durch HVDC-Leitungen ausgegangen werden könne (ORNL 1997, S. 13–14). Die HEALTH SCIENCE GROUP (2011, S. 25) zitiert Messergebnisse von CARTER U. JOHNSON (1988) für Aerosolladungen in 70, 150 und 300 m Entfernung einer ± 500 -kV monopolen Testleitung. Unter Schönwetterbedingungen waren die Konzentrationen 70 m leewärts der Leitung am höchsten und drastisch niedriger für 150 m und 300 m Entfernung. Von HGÜ-Freileitungen erzeugte Konzentrationen an geladenen Aerosolen unterscheiden sich HEALTH SCIENCE GROUP (2011, S. 26–27) zufolge nicht bedeutend von den Ionenkonzentrationen in andere Umgebungen. Dies ergäbe eine Literaturlauswertung, wonach durch HGÜ-Leitungen geladenen Luftionen oder Aerosolen keine Auswirkungen auf das menschliche Respirationssystem nachgewiesen werden können (HEALTH SCIENCE GROUP 2011, S. 32). Über die Auswirkung von Luftionen auf die Stimmung und das Verhalten (Entspannung, Schlaflosigkeit, persönliches Wohlempfinden und Stimmungslagen) lägen keine konsistenten Ergebnisse vor. Festgestellte Veränderungen überstiegen nicht jene von Feuchtigkeits- und Temperaturänderungen hervorgerufenen Schwankungen. Zusammenfassend schließt die HEALTH SCIENCE GROUP für die geplante Western Alberta Transmission Line, dass durch die hervorgerufene Luftionen-Konzentration nach heutigem Kenntnisstand von keinen Auswirkungen auf die Gesundheit ausgegangen werden könne (HEALTH SCIENCE GROUP 2011, S. 36). Auch das NATIONAL RADIATION LABORATORY (NRL) Neuseelands weist darauf hin, dass bisher keine Belege zu gesundheitsschädlichen Effekten von elektrischen Gleichstromfeldern oder Luftionen, die durch HVDC-Freileitungen auftreten, nachgewiesen werden konnten (NRL 2008, S. 23, vgl. Abschn. 2.2.1.2).

Koronaeffekte an HVDC-Freileitungen verursachen bei trockener Wetterlage weniger Geräusche (ca. 36–40 dB(A)) als bei Regen (ca. 42 dB(A), FRÖHLICH 2009). Das ORNL gibt an, dass HGÜ-Leitungen bei gutem Wetter etwa 13–15 dB leiser als HDÜ-Leitungen seien (ORNL 1997, S. 62). Die Lautstärke der Umgebung wird mit etwa 32 dB(A) angegeben (FRÖHLICH 2009).

2.2.3 Beeinträchtigungen durch Unfälle

Größere Metallobjekte wie Fahrzeuge oder lange Zaundrähte, die sich unterhalb einer HGÜ-Freileitung befinden, können ausreichend elektrische Ladung aufnehmen, um bei Berührung leichte Schocks auszulösen, die jedoch meistens durch Autoreifen oder Zaunpfähle soweit abgeführt wird, so dass es lediglich zu minimalen Effekten käme (NRL 2008, S. 23). Diese leichten Elektroschocks seien gesundheitlich unbedenklich (vgl. Abschn. 2.2.1.2).

2.2.4 Vermeidungs- und Minderungsmaßnahmen

Die im Abschnitt 2.1.4 für HDÜ-Freileitungen geschilderten Maßnahmen können für HGÜ-Freileitungen übernommen werden.

2.3 Nebenanlagen bei Freileitungen

Sowohl Transformatoren, als auch die für ihre Kühlung notwendigen Lüfter sowie Schaltvorgänge von Hochspannungsschaltern verursachen Geräuschimmissionen, die Wohnstandorte beeinträchtigen können (ML 2011, S. 32–33). Auch Kompensationsanlagen verursachen Geräusche, die bei der Planung berücksichtigt werden müssen (REHTANZ 2011, S. 519).

2.4 Auswirkungen von 380-kV-Höchstspannungsdrehstrom-Erdkabeln

2.4.1 Übersicht

Der folgende Abschnitt ist dem aktuellen Forschungsstand zu den Themenfeldern „*Magnetische Feldwirkungen*“ und „*Auswirkungen von Unfällen*“ gewidmet. Auf „*Elektrische Feldwirkungen*“ wird in diesem Abschnitt nicht näher eingegangen, da elektrische Felder durch die metallischen Kabelmäntel komplett abgeschirmt werden (vgl. FBG-FREILEITUNGSBAU GMBH 2008, S. 7 u. BRAKELMANN 2004, S. 40, vgl. HOFMANN et al. 2012, Teil III). Es handelt sich hierbei ausschließlich um Wirkungen aus Anlage und Betrieb. Wirkungen der Bauphase wie etwa Emissionen von Lärm, Staub und Luftschadstoffen sowie Erschütterungen und Störungen auf die Wohn- und Erholungsqualität bleiben an dieser Stelle unberücksichtigt (vgl. z.B. GEO et al. 2009, S. 88), werden aber in den Abschn. 2.4.4 sowie 2.5.4 behandelt. Für Staubemissionen sei auf Abschn. 7.4.1 verwiesen.

Die Auswirkungen von 380-kV-Erdleitungen auf das Schutzgut Mensch werden u.a. von SSK 2008, SSK 2009, WHO 2001, ICNIRP 2010, BUWAL 2005, BERNHARDT 2002, BRAKELMANN 2004, FBG-FREILEITUNGSBAU GMBH 2008, GEO et al. 2009, und SILNY et al. 2001–2011 synoptisch diskutiert.

Magnetfelder der Höchstspannungsebene sind im Nahbereich von Erdkabeln hoch, fallen aber zu den Seiten hin schnell ab (vgl. HOFMANN et al. 2012, Teil III, Abschn. 2.1). Erdkabel emittieren keine elektrischen Felder, da diese durch die metallische Kabelumhüllung abgeschirmt werden. In der Öffentlichkeit wird daher der Einsatz der Erdkabeltechnologie als Alternative zu Freileitungen vielfach präferiert. Das Landesraumordnungsprogramm Niedersachsen (LROP 2008, z. Z. in Überarbeitung) legt für Neutrassen bei Unterschreitung eines Mindestabstands von 400 m zu Wohngebäuden im Geltungsbereich eines Bebauungsplans oder im unbeplanten Innenbereich nach § 34 BauGB und 200 m zu Wohngebäuden im Außenbereich nach § 35 BauGB die Erdverkabelung als Ziel der Raumordnung fest (Nds. GVBl. 2008, 132, Abschn. 4.2 Ziffer 07, Sätze 6-8; nähere Begründung in Abschn. 3.3.1). Ähnlich wurden diese Werte ebenfalls in § 2 Abs. 2 des Energieleitungsausbaugesetzes (EnLAG) übernommen. Seit der EnLAG-Novelle vom 7.3.2011 kann im Falle des Neubaus eines der im EnLAG namentlich genannten Pilotvorhabens die für die Zulassung des Vorhabens zuständige Behörde verlangen, eine Höchstspannungsebene auf einem technisch und wirtschaftlich effizienten Teilabschnitt als Erdkabel zu errichten und zu betreiben oder zu ändern, wenn die Leitung in den o.g. Abständen von 200 m bzw. 400 m zu Wohngebäuden verlaufen soll (vgl. WEYER et al. 2012, Abschn. 5.5.1.2).

2.4.2 Beeinträchtigungen durch magnetische Felder

Für ortsfeste Hochspannungsanlagen (< 1000 Volt) mit einer Frequenz von 50 Hertz gelten in Deutschland seit 1997 die in der 26. BImSchV (Verordnung zum Bundes-Immissions-

schutzgesetz) für die Effektivwerte festgelegten Grenzwerte von 100 μT für die magnetische Flussdichte und 5 kV/m für die elektrische Feldstärke (vgl. Abschn. 2.1.1.1).

Im Bereich der Erdkabeltrassen treten die stärksten Felder an den Orten mit der geringsten Bodenüberdeckung auf. Die Stärke der Felder nimmt mit zunehmender seitlicher Entfernung exponentiell ab (vgl. HOFMANN et al. 2012, Teil III Abschn. 3.4). Die Höhe der Magnetfeld-Immissionen von Erdkabeln ist abhängig von konstruktiven und betrieblichen Parametern: von der Stärke des übertragenen Stroms, die sich direkt auf die Magnetfeldstärke auswirkt, von der Verlegetiefe, der relativen Anordnung der Phasenleitungen der Systeme sowie deren Strombelegung (NEITZKE et al. 2010, S. 0–3).

HOFMANN et al. (2012, S. 255) geben an, dass die Maximalwerte der magnetischen Gesamtduktion bei Drehstrom-Freileitungen kleiner als bei Drehstrom-Erdkabeln sind (bei einer Leistungsübertragung von jeweils 3000 MW, Erdkabelverlegetiefe 1,5 m). Bei den von ihnen berechneten Feldstärken für drei verschiedene Verlegetechniken überschritt nur Drehstrom-Kabel-Variante 1 (äquidistante Verlegung der Kabel) mit einem Maximalwert von 139,5 μT im (n-1)¹-Betrieb den Grenzwert von 100 μT . In einer Studie an mehreren 380-kV-Freileitungen (Maximalstrom: 2520 A; bei Messung 608 A) wurde eine magnetische Feldstärke von 0,1 μT bei einem Abstand von maximal 466 m unterschritten (NEITZKE et al. 2010, S. 320), während der entsprechende Abstand bei 380-kV-Erdkabeln (Maximalstrom: 1620 A; bei Messung 54 A bzw. 110 A) mit maximal 74 m sechsmal geringer war (NEITZKE et al. 2010, S. 376). Der BUND (2011, S. 14) fordert einen Vorsorgewert für magnetische Wechselfelder von 0,01 μT und rechnet dafür mit einem erforderlichen Abstand von 150 m zu einer 380-kV-Erdkabelung (keine Angabe zur Stromstärke). Für in 1,5 m Bodentiefe direkt im Boden verlegte 400-kV-Erdkabel (maximale Leistung: 4x1.250 MW; maximaler Strom: 7.200 A) wurde für 0,2 m über dem Boden eine Magnetfeldstärke von ca. 65 μT berechnet (ENTSOE U. EUROPACABLE 2011, S. 16). Nach Angaben von NEITZKE et al. (2010, S. 0–4) beträgt die auf maximale Anlagenauslastung extrapolierte magnetische Immission im Bereich des Normalverlaufes von Erdkabeltrassen mit einer Verlegetiefe von mindestens 1,5 m maximal 168 μT (in 0,2 m Höhe) bzw. 86 μT (in 1,0 m Höhe). Ist die Verlegetiefe geringer, sind höhere Immissionen möglich. Bei ihren Berechnungen war der für Erdkabel ermittelte Maximalwert höher als die entsprechenden Werte an Freileitungstrassen. Die Immissionen nähmen allerdings bei Erdkabeln wesentlich schneller als bei der Freileitungen mit dem Abstand zur Trassenmitte ab. Für Wohnungen fernab von Höchstspannungsleitungen wurden (bei einem Mindestabstand zu eingeschalteten Geräten von 1,0 m) Magnetfeldstärken von 0,05 μT ermittelt mit einem Maximalwert von 0,19 μT (NEITZKE et al. 2010, S. 0-4, S. 375; vgl. Abschn. 2.1.1.3). Erdkabeltrassen beeinflussten die Expositionen in Wohnungen nicht über die Variationsbreite der Expositionen in Wohnungen fernab solcher Trassen hinaus (NEITZKE et al. 2010, S. 0–4).

Studien von GEO et al. (2009, S. 170) zufolge werden die Grenzwerte von 100 μT bei 380-kV-Erdleitungen im oberirdischen Bereich nicht überschritten. In Abhängigkeit von der Verlegetechnik geben sie bei einer Stromstärke von 2x1000 A bzw. 2x190 MW magnetische Flussdichten von ca. 8–38 μT direkt über der Kabeltrasse und Werte zwischen 1,5–7,5 μT für 5 m Entfernung von der Trassenmitte in 1 m über dem Erdboden an. Für 10 m Entfernung werden Flussdichten zwischen 0,5–2 μT angegeben. Direkt am Erdboden liegen die Werte zwischen ca. 20–96 μT in der Trassenmitte und unter 2,5 μT in 10 m Entfernung (GEO et al. 2009, S. 169).

¹ Als (n-1)-Fall ist der Ausfall eines Stromkreises definiert (HOFMANN et al. 2012, S. 123).

2.4.3 Beeinträchtigungen durch Unfälle

GEO et al. (2009, S. 140) zufolge kam es in Deutschland in den vergangenen zehn Jahren im Durchschnitt jährlich zu drei bis vier Unfällen an Hochspannungserdkabeln (ab einer Spannungsebene von 110 kV). Technisch betrachtet sind während des Betriebs von Erdkabelleitungen Störungen durch mechanische Einwirkung, durch Korrosion, durch Überspannung oder durch mechanisch thermische Überbeanspruchung möglich (vgl. GEO et al. 2009, S. 54). Die Gefahr eines Stromschlages besteht zwar im Zusammenhang mit Erdarbeiten in der Nähe von Kabeln, jedoch besteht bei Arbeiten an Erdkabeln eine hohe Wahrscheinlichkeit, dass der Kurzschlussstrom eher über die Baumaschinen abgeleitet wird, als über den menschlichen Körper.

Im Zusammenhang mit Unfällen an Erdkabeln werden in der Literatur weniger die Schäden an Leib und Leben als vielmehr die zumeist aufwendigen Reparaturen thematisiert. Hierbei sei nach GEO et al. (2009, S. 54) mit einer durchschnittlichen Reparaturzeit von ein bis zwei Wochen zu rechnen; andere Autoren gehen von drei bis vier Wochen aus (vgl. HOFMANN et al. 2012, Teil I). Potentielle Unfallrisiken können von Bränden und Explosionen der Endverschlüsse der Muffen ausgehen (FEIX 2012).

2.4.4 Vermeidungs- und Minderungsmaßnahmen

Der Mensch wird während der Bauphase hauptsächlich durch Lärm- und Schadstoffemissionen beeinträchtigt. Diese lassen sich durch eine optimierte Arbeits- und Bauplanung sowie durch eine zügige Baudurchführung minimieren. Durch eine zeitliche Minimierung der Bauarbeiten kann auch die mögliche Trenn- und Barrierewirkung der Baustelle gering gehalten werden. Grundsätzlich muss die Erreichbarkeit von Siedlungen, z.B. durch Krankenwagen und Feuerwehr, gewährleistet sein, notfalls mittels der Unterpressung von Verkehrswegen. Die Beeinträchtigung durch Schadstoffe der Baustellenfahrzeuge und -geräte kann mit Hilfe eines Einsatzes von schadstoffarmen Fahrzeugen und der Einhaltung von Emissionsschutzwerten auf ein geringes Maß begrenzt werden.

Die metallische Kabelumhüllung von Erdkabeln verhindert die Emission elektrischer Felder. Auch das Magnetfeld lässt sich u.a. durch die Anordnung und Lage der Kabel (möglichst enge Bündelung der Leiter eines Systems, Verlegung in größerer Bodentiefe) erheblich reduzieren. Bestehen in bestimmten Bereichen hohe Anforderungen an die Minimierung des Magnetfeldes, so kann dieses durch technische Maßnahmen zusätzlich eingeschränkt werden. BRAKELMANN U. ERLICH (2010, S. 33 ff.) stellen dazu verschiedene Isolationstechniken vor, mit denen auf der 220-kV-Trasse Bad Schwartau – Lübeck (8 km) des Projekts Baltic Cable erstmals auch in Deutschland eine Magnetfeldabschirmung auf 0,2 μT erreicht wurde. Dabei wurden betongefüllte Stahlrohre verwendet, in denen drei Kabel so dicht geführt wurden, dass das Magnetfeld weitestgehend gegenseitig aufgehoben worden ist – was allerdings einen thermischen Engpass zur Folge hat. Der Aufbau ist vergleichsweise aufwendig, bedingt Restriktionen im technischen Betrieb und ist daher nur für kurze Strecken geeignet. Auch Kompensationsleiter, die parallel über dem Kabel geführt werden, können das Magnetfeld minimieren. Sie werden BRAKELMANN (mdl.) zufolge standardmäßig im Muffenbereich eingesetzt. Eine weitere Möglichkeit der Abschirmung des Magnetfeldes wird ggf. eine in das Kabel eingearbeitete permeable Spezialfolie bieten (BRAKELMANN U. ERLICH 2010, S. 33 ff.). COLE et al. (2008, S. 46) nennen vier Möglichkeiten zur EMF-Reduzierung: eine geeignete Kabelkonfiguration wie die Kleeblattkonfiguration reduziert das EMF etwa um den Faktor 3. Durch Transponierung kann zwar nicht die Spitze über dem

Kabel, aber die Breite des Magnetfeldes verringert werden. Mittels passiver Kompensationsstromkreise kann der Lenzschen Regel zufolge die Kompensationsstromstärke in einem zusätzlichen passiven Stromleiter induziert werden. Dieser Stromleiter wird in der Nähe der aktiven Leitung aufgestellt. Außerdem ist eine Metallabschirmung zur Reduktion des EMF-Feldes durch die Verwendung ferromagnetischer Werkstoffe oder leitfähiger Werkstoffe möglich (COLE et al. 2008, S. 46).

Die GRUPPE „POWER TUBES“ (2012) empfiehlt für sensibel Räume und Ballungsgebiete die Verwendung eines kombinierten Röhren-Kabel-Installationssystems mit Kapselung in metallischen Rohren (vgl. BRAKELMANN et al. 2011, BRAKELMANN U. WASCHK 2011), wodurch magnetische Felder nahezu vollständig abgeschirmt werden können. Die Leitungen können in bestehenden Tunneln oder Leitungskanälen montiert werden, was die Naturbeanspruchung gering hält.

2.5 Auswirkungen von 380-kV-Höchstspannungsgleichstrom-Erdkabeln

2.5.1 Übersicht

Wie bereits in Abschn. 2.4.1 für Drehstrom-Erdkabel beschrieben, erfolgt ebenso bei Gleichstrom-Erdkabeln die Abschirmung elektrischer Felder durch den metallischen Kabelmantel, so dass im Folgenden nur auf Magnetfelder eingegangen wird. Beim Gleichstrom treten statische Felder auf (vgl. Abschn. 2.2.1.1). Das statisch Magnetfeld nimmt mit zunehmendem Abstand vom Leitersystem schnell ab (HOFMANN et al. 2012, S. 229).

2.5.2 Beeinträchtigungen durch magnetische Felder

Die gesetzlichen Grenzwerte, die für niederfrequente Magnetfelder gelten, können nicht auf statische Gleichfelder angewendet werden (HOFMANN et al. 2012, S. 230). Nach der EU Direktive 2004/40/EC gilt für den Schutz von Arbeitnehmern ein Grenzwert von 200 mT für statische Magnetfelder. In der Berufsgenossenschaftlichen Vorschrift BGV B11 ist ein minimaler Grenzwert von 21,22 mT angegeben, der ebenfalls für den Schutz von Arbeitnehmern gilt (HOFMANN et al. 2012, S. 230). Die Internationale Kommission für den Schutz vor nichtionisierender Strahlung (INTERNATIONAL COMMISSION ON NON-IONIZING RADIATION PROTECTION, ICNIRP) empfiehlt für Arbeitnehmer den Grenzwert von 2 T bzgl. der Exposition des Kopfes sowie des Rumpfs und den Grenzwert von 8 T hinsichtlich der Exposition der Gliedmaßen (ICNIRP 2009, S. 511). Näheres zur Diskussion von Grenzwerten für statische Felder ist Abschn. 2.2.1.3 zu entnehmen.

HOFMANN et al. (2012, S. 255) verglichen magnetische Flussdichten in verschiedenen Verlegevarianten von HGÜ- und HDÜ-Erdkabeln und stellten fest, dass die magnetischen Induktionen der HGÜ-Erdkabel deutlich unter den Werten der Drehstrom-Erdkabel lagen. Die Maximalwerte der magnetischen Feldstärken lagen je nach Variante zwischen 39,48 und 74,71 μT (3000 MW) und somit wesentlich unterhalb der Vorsorgewerte von 200 bzw. 21,22 mT. FRICKE (2008, S. 20) ist zu entnehmen, dass Berechnungen für eine Kabeltrasse zur Anbindung von Offshore-Windparks im Bereich Norderney maximale magnetische Flussdichten im Bereich der Inselquerung zwischen 14,44 und 32,77 μT ergaben. Die Berechnungen erfolgten auf Grundlage der Annahme einer Kabellegetiefe von 1,5 m für 300-kV-DC-Kabelsysteme mit einer Stromstärke von 1333 A. Für die Übergangsbereiche (Uferzonen der Insel Norderney und des Festlandes) wurden Werte zwischen 178,5 und 203,1 μT ermittelt, was mit großen Abständen zwischen den Einzelkabeln erklärt wird (Verlegetiefen von 1,5 m bzw. 3 m).

Da die magnetischen Feldstärken der HGÜ-Erdkabel weit unter den Vorsorgewerten für statische Magnetfelder (u.a. EU Direktive 2004/40/EC: 200 mT; Berufsgenossenschaftliche Vorschrift BGV B11: 21,22 mT für den Schutz von Arbeitnehmern; vgl. Abschn. 2.2.1.3) und maximal im Bereich der in Deutschland auftretenden magnetischen Flussdichte des Erdmagnetfeldes liegen (HOFMANN et al. 2012, S. 258), kann davon ausgegangen werden, dass keine Beeinflussung des Menschen erfolgt. Eine Ausnahme stellen Kabellegungen dar, bei denen die Einzelkabel (Hin- und Rückleiter) große Abstände zueinander aufweisen, was aufgrund hoher Strahlungswerte des Magnetfeldes grundsätzlich vermieden werden sollte.

2.5.3 Beeinträchtigungen durch Unfälle

Für HGÜ-Erdkabel können die gleichen Risiken wie für Drehstrom-Erdkabel angenommen werden, die unter 2.4.3 aufgeführt sind.

2.5.4 Vermeidungs- und Minderungsmaßnahmen

Wie in Abschn. 2.4.4 für Drehstrom-Erdkabel beschrieben, wird der Mensch während der Bauphase hauptsächlich durch Lärm- und Schadstoffemissionen beeinträchtigt, was sich durch eine optimierte Arbeits- und Bauplanung sowie durch eine zügige Baudurchführung minimieren lässt.

Das Magnetfeld kann durch die Anordnung und Lage der Kabel reduziert werden: ein Vergleich dreier Verlege-Varianten ergab, dass zwei getrennte Kabelgräben sowie ein Graben, in dem 2x2 Kabelsysteme äquidistant verlegt waren, geringere Magnetfeldstrahlungswerte als äquidistant angeordnete Kabel in einem Graben aufwiesen (HOFMANN et al. 2012, S. 255 und S. 262–263). Ein geringerer Kabelabstand sowie technische Kompensationseinrichtungen (z.B. Kompensationsleiter) bewirken eine Verringerung der magnetischen Gesamtinduktion (HOFMANN et al. 2012, S. 258).

Da bei HGÜ-Leitungen im Vergleich zu den Drehstrom-Kabeln zwei statt drei Kabel pro Übertragungssystem benötigt werden, ist die HGÜ-Trasse etwas schmaler, was einen entsprechend geringeren Aufwand an Bauarbeiten und geringere spätere Nutzungseinschränkungen bedeutet (HOFMANN et al. 2012, S. 85). Ein Vergleich dreier Verlegevarianten für HDÜ- und HGÜ-Erdkabel zeigte die unterschiedlichen Trassenbreiten: bei äquidistanter Verlegung der Kabel benötigt die Drehstromtrasse ca. 28,1 m, während es bei der Gleichstromtrasse ca. 24,9 m sind. Für 2x2 Systeme äquidistant verlegt ergeben sich ca. 27,0 m bei HDÜ und ca. 26,4 m bei HGÜ. Werden zwei Doppelsysteme in getrennten Kabelgräben verlegt, sind ca. 20,8 m für die HDÜ und ca. 19,8 m für die HGÜ notwendig (vgl. HOFMANN et al. 2012, S. 97–98).

Kabel können eine Isolierung aus getränkten Papierisolationen (Masse- oder Ölkabel) oder Kunststoffen wie beispielsweise vernetztes Polyethylen haben. Aus Umweltschutzgründen haben sich Kunststoffkabel für Neubauten durchgesetzt (HOFMANN et al. 2012, S. 23), so dass es nicht mehr zu einem Ölaustritt kommen kann.

2.6 Nebenanlagen bei Erdleitungen

Durch Transformatoren, die für ihre Kühlung notwendigen Lüfter sowie durch Schaltvorgänge der Hochspannungsschalter kommt es zu Geräuschmissionen, die Wohnstandorte beeinträchtigen können (ML 2011, S. 32–33). Auch Kompensationsanlagen verursachen Geräusche, die bei der Planung berücksichtigt werden müssen (REHTANZ 2011, S. 519).

2.7 Auswirkungen von gasisolierten Leitungen

GIL werden als starr geerdete Systeme betrieben. Aufgrund der niedrigen Impedanz des Mantelleiters kommt es zu einem fast 100 %igem Rückstrom über den Mantelleiter, so dass sich das Magnetfeld nahezu vollständig aufhebt. An der GIL-Übertragungsstrecke PALEXPO am Genfer Flughafen wurde bei einem Nennstrom von 2500 A direkt oberhalb des Tunnels ein Magnetfeld von etwa 0,5 μT gemessen, womit der in der Schweiz gesetzlich verankerte Grenzwert von 1 μT eingehalten wird (KOCH 2002). Bei einem 400-kV-Zweistromkreissystem mit einer Belastung von 2x1000 MVA hat das magnetische Feld eine Stärke von ca. 1 μT (COLE et al. 2008, S. 47). Dies stimmt mit Angaben der SIEMENS AG (2010, S. 3) überein. Weitere Angaben sind FRÖHLICH (2009) zu entnehmen: die magnetische Flussdichte einer GIL beträgt bei einer Verlegetiefe von 1,5 m in 1 m Höhe über dem Erdboden ca. 2,5 μT (1x2000 A) und ist somit niedriger als die einer 2x1000 A-Freileitung (ca. 4,2 μT) und eines 2x1000 A-Erdkabels (ca. 6,3 μT). Die magnetische Feldstärke fällt zu den Seiten hin ab, so dass die Magnetfelder der GIL und Erdkabel in ca. 5 m Entfernung von der Leitungsachse den Vorsorgewerte der Schweiz von < 1 μT erreichen. Bei der Freileitung ist dieser Vorsorgewert erst nach über 30 m Entfernung erreicht (FRÖHLICH 2009).

Selbst unter Annahme extrem ungünstiger Bedingungen wie einer minimalen Verlegetiefe von 1 m und einem maximalen Strom von 4600 A hat das Magnetfeld direkt am Boden über der erdverlegten GIL eine Stärke von < 10 μT (KOCH U. BRACHMANN 1997, S. 633). Direkt am Außenmantel eines dreiphasigen GIL-Systems (500 kV, 4000 A) liegt die Magnetfeldstärke unter 250 μT und beträgt somit 50 % des in der EU-Richtlinie zum Arbeitsschutz festgelegten Grenzwertes (ALSTOM GRID 2010, S. 16).

Eine GIL besteht aus einem Aluminiumrohr, dass in einem Metallrohr eingeschlossen und mit Isoliergas gefüllt ist. Während die erste GIL-Generation noch zu 100 % mit dem Isoliergas Schwefelhexafluorid (SF_6) gefüllt war, wird für die in den 1990ern von Siemens entwickelte zweite Generation ein N_2 - SF_6 -Gemisch verwendet (SCHÖFFNER et al. 2006). Laut Hersteller Siemens (SIEMENS AG 2010) sind die GIL-Systeme mit einem Isoliergasgemisch gefüllt, dass zu 80 % aus Stickstoff (N_2) und zu 20 % Schwefelhexafluorid (SF_6) besteht. Für weitere Informationen wird auf Kapitel 7 verwiesen.

2.8 Zusammenfassung Schutzgut „Mensch“

Bei der Betrachtung des Schutzguts „Mensch“ stehen mögliche Auswirkungen magnetischer und elektrischer Felder im Fokus. Die möglichen Beeinträchtigungen durch diese Felder, insbesondere von Freileitungen, werden in Wissenschaft und Öffentlichkeit kontrovers diskutiert. Die weltweit sehr unterschiedlichen Grenzwerte, Vorschriften und Empfehlungen zum Schutz der Bevölkerung vor niederfrequenten und statischen elektrischen und magnetischen Feldern sind ein beredter Ausdruck einer noch offenen und intensiv geführten Fachdiskussion.

Bei der Drehstromübertragung entstehen elektrische und magnetische Wechselfelder, die sowohl organische als auch anorganische Stoffe durchdringen können. Nach der 26. BImSchV gelten für ortsfeste Niederfrequenzanlagen (50 Hz, < 1000 V) in Deutschland für die Effektivwerte die Grenzwerte 100 μT für die magnetische Flussdichte und 5 kV/m für die elektrische Feldstärke in Bereichen, die nicht nur für den vorübergehenden Aufenthalt von Menschen bestimmt sind (BImSchG, § 3). Kurzzeitige Überschreitungen dieser Grenzwerte um nicht mehr als 100 % für insgesamt nicht länger als 5 % eines Beurteilungszeitraums von einem Tag sind unter der Voraussetzung, dass im Einzelfall keine hinreichenden Anhaltspunkte für insbesondere durch

Berührungsspannungen hervorgerufene, für die Nachbarschaft unzumutbare Belästigungen bestehen, zulässig. Dies gilt auch für kleinräumige Überschreitungen der elektrischen Feldstärke um nicht mehr als 100 % außerhalb von Gebäuden. Des Weiteren enthält die 26. BImSchV Anforderungen zur Vorsorge (§ 4), wonach der maximale Effektivwert „in der Nähe von Wohnungen, Krankenhäusern, Schulen, Kindergärten, Kinderhorten, Spielplätzen oder ähnlichen Einrichtungen in diesen Gebäuden oder auf diesen Grundstücken“ auch nicht kurzzeitig die Grenzwerte von 100 μT für die magnetische Flussdichte und 5 kV/m für die elektrische Feldstärke überschreiten darf. Darüber hinaus sieht die Strahlenschutz-kommission des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (SSK) angesichts der steigenden Anzahl von Personen mit aktiven Implantaten (z.B. Herzschrittmacher, Defibrillatoren) Handlungsbedarf, Störbeeinflussungssituationen im Alltag durch gerätetechnische und regulatorische Maßnahmen zu verringern bzw. zu vermeiden. Die SSK empfiehlt, dass die Induktionen in Bereichen, die Implantatträgern zugänglich sind, und bei denen Feldquellen, die nicht sichtbar bzw. bei denen ein Exposition-vermeidendes Verhalten nicht möglich oder nicht zumutbar ist, 10 μT (50 Hz) in Bereichen, in denen mit zusätzlichen Feldquellen gerechnet werden muss (z.B. in Wohnanlagen, Seniorenheimen, Krankenhäusern) bzw. 5 μT (50 Hz) in Bereichen, in denen Einträge zusätzlicher Feldquellen nicht zu erwarten und Feldquellen (z.B. Erdkabel) nicht sichtbar bzw. nicht entsprechend gekennzeichnet sind, nicht überschreiten.

Das Landesraumordnungsprogramm (LROP) Niedersachsen 2008 berücksichtigte vorsorgeorientierte Maßstäbe gegenüber magnetischen Feldern für den Freileitungsbau und legte das Ziel fest, dass Hoch- und Höchstspannungsleitungen nicht als Freileitung, sondern als Erdkabel verlegt werden, wenn ein Mindestabstand von 400 m im Innenbereich entsprechend § 34 BauGB und 200 m zu Wohngebäuden im Außenbereich entsprechend § 35 BauGB unterschritten wird. Dieser Abstand kann nach dem Entwurf einer Verordnung zur Änderung des LROP vom 10.04.2012 ausnahmsweise unterschritten werden, wenn ein „gleichwertiger vorsorgender Schutz der Wohnumfeldqualität gewährleistet ist oder keine geeignete energiewirtschaftlich zulässige Trassenvariante die Einhaltung der Mindestabstände ermöglicht“.

Mit zunehmender seitlicher Distanz zu den Freileitungen nehmen die Immissionen durch elektrische Wechselfelder rasch ab. Je nach Masttyp liegen sie bei einer Spannung von 380 kV ab einer seitlichen Entfernung von 15–30 m unterhalb von 5 kV/m in 1 m über der Erdoberkante (EOK). Gebäudemauern und andere Hindernisse schirmen das elektrische Feld erheblich ab, so dass für die Dauerexposition von Menschen keine Gefährdung durch das elektrische Feld von Freileitungen zu erwarten ist.

Die Auswirkung der magnetischen Felder von Niederfrequenzanlagen auf den Menschen wird international kontrovers erörtert. Dabei umfasst das Spektrum der diskutierten Auswirkungen auf den Menschen ein vermehrtes Auftreten kindlicher Leukämie und anderen Krebserkrankungen, eine Veränderung der Melatoninproduktion, ein vermehrtes Auftreten von Alzheimer, Kopfschmerzen, Erschöpfungszuständen und Allergien sowie eine Störbeeinflussung auf aktive Implantate. Epidemiologische Studien geben zwar Anlass zur Annahme einer möglichen gesundheitlichen Beeinträchtigung, v.a. hinsichtlich kindlicher Leukämie, allerdings haben Laborstudien bisher keine Ursache-Wirkungsbeziehung zwischen Magnetfeldexpositionen und gesundheitlichen Beeinträchtigungen absichern können. Die International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection (ICNIRP), fasst den aktuellen Forschungsstand (2010) so zusammen, dass aufgrund der bisherigen Forschungsarbeiten zwar von einer möglichen Beeinflussung auszugehen ist, dass gesundheitliche Auswirkungen aber noch nicht ausreichend belegt sind, um obere

Grenzwerte nennenswert herabzusetzen. Vor dem Hintergrund der bestehenden Wissensunsicherheiten fallen Grenzwerte wie ihre Berechnungsmethoden weltweit sehr unterschiedlich aus. Grenzwerte werden vielerorts mit hohen Vorsorgemargen versehen. So legt bspw. die Schweiz einen Vorsorge-Grenzwert von $1 \mu\text{T}$ für Orte, an denen sich Menschen länger aufhalten, fest. In den Niederlanden darf die Belastung von Kindern durch Hochspannungsleitungen $0,4 \mu\text{T}$ in Bereichen mit längerem Aufenthalt bei 30 % Auslastung nicht überschreiten. In Italien darf in Bereichen, in denen sich Menschen dauerhaft aufhalten, die Magnetflussdichte $3 \mu\text{T}$ nicht überschreiten. An dieser Stelle gilt es zu beachten, dass diese Werte aufgrund unterschiedlicher Immissionsorte und Bemessungsgrundlagen nicht direkt miteinander vergleichbar sind.

Zwischen den Leiterseilen einer Freileitung kommt es zur stoßweisen Ionisierung von Luftmolekülen, der sogenannten Koronaentladung, die sich mit Brummtönen, Knacken oder Surren bemerkbar machen kann, wobei besonders feuchte Witterungsbedingungen wie Nebel oder Raureif diesen Effekt verstärken. Die Geräuschentwicklung kann bei Drehstromfreileitungen bei trockener Wetterlage ca. 28–30 dB(A) und bei Regen ca. 42–59 dB(A) betragen. Die akustischen Störungen durch Koronaentladungen wirken erst in unmittelbarer Nähe von Freileitungen beeinträchtigend, werden allerdings nur schlecht von Gebäudehüllen absorbiert und treten nachts besonders deutlich hervor. Somit sind sie als eine im Nahbereich beeinträchtigende akustische Auswirkung auf den Menschen zu beachten.

Bei Gleichspannungs-Freileitungen sind die Verluste durch Koronaentladungen zwar geringer als bei einer gleich hohen Wechselspannung. Allerdings neutralisieren sich die ionisierten Partikel in geringerem Maße und können mit dem Wind verdriften, wobei die Angaben zur möglichen Verdriftungsentfernung variieren.

Verschiedentlich wird die Ionisierung von Luftpartikeln durch Koronaeffekte mit einer verstärkten Wirkung von Luftschadstoffen in Verbindung gebracht. Über koronale Entladungen und die elektrische Aufladung von Aerosolen wird dabei ein Zusammenhang zu epidemiologisch festgestellten gesundheitlichen Beeinträchtigungen geknüpft, der über Magnetfeld- oder elektrische Feldexpositionen nicht nachweisbar ist. Dabei wird davon ausgegangen, dass Schmutzpartikel aufgrund ihrer Ladung leichter am Lungengewebe anhaften und damit u.a. das Krebsrisiko von in Trassennähe lebenden Menschen erhöhen. Koronaentladungen können z.B. durch einer Verringerung der elektrischen Feldstärke auf der Oberfläche der Leiterseile (Vergrößerung der Leiterradien, Einsatz von Bündelleitern) oder durch eine Beschichtung der Leiterseile, die eine schnellere Trocknung nach Niederschlagsereignissen ermöglicht, vermindert werden.

Anders als bei der Drehstromtechnik handelt es sich bei der Gleichstromübertragung um statische elektrische und magnetische Felder. Statische Gleichfelder kommen auch natürlicherweise vor. Das elektrische Gleichfeld der unteren Atmosphäre liegt unter normalen Bedingungen zwischen $0,12\text{--}0,15 \text{ kV/m}$. Ab ca. $25\text{--}30 \text{ kV/m}$ können elektrische Gleichfelder vom Menschen zwar wahrgenommen werden, allerdings nicht in den Organismus eindringen, so dass biologische Auswirkungen durch leitungsinduzierte Gleichfelder ausgeschlossen werden. Indirekte Auswirkungen wie Wahrnehmung und Funkenentladung beim Berühren geladener Objekte kommen vor, sind aber schwach ausgeprägt und auf den Bereich direkt unter der Leitung begrenzt. Das statische elektrische Feld ist mit bis zu 30 kV/m im Offenland am größten und kann durch Bauung und Bäume u.ä. erheblich abgeschirmt werden. Für statische Gleichfelder existieren keine gesetzlichen Grenzwerte. Die EU Richtlinie 2004/40/EC gibt für den Schutz von Arbeitnehmern einen Grenzwert von 200 mT für statische Magnetfelder an. Die Stärke des statischen

Magnetfeldes unterhalb einer HGÜ-Leitung liegt ca. zwischen 20–25 μT und somit unterhalb der des magnetischen Erdfeldes, die bei etwa 50 μT liegt.

Da die Höhe der Immissionen der elektrischen und magnetischen Felder einer Freileitung neben der Spannung stark von konstruktiven und betrieblichen Parametern abhängt, können geeignete Maßnahmen reduzierend auf die Emissionen wirken. Belastungen durch elektrische oder magnetische Felder lassen sich grundsätzlich durch eine Vergrößerung von Wirkabständen minimieren.

Anders als Freileitungen emittieren Erdkabel ausschließlich magnetische und keine elektrischen Felder, da diese durch die metallische Kabelumhüllung abgeschirmt werden. Im Bereich der Erdkabeltrassen treten die stärksten Magnetfeldstärken an den Orten mit der geringsten Bodenüberdeckung auf. Die Stärke nimmt mit zunehmendem seitlichen Abstand zur Trassenmitte exponentiell ab (wesentlich schneller als bei Freileitungen) und ist abhängig von konstruktiven und betrieblichen Parameter wie der Stärke des übertragenen Stroms, der Verlegetiefe, der relativen Anordnung der Phasenleitungen der Systeme sowie deren Strombelegung. Die Maximalwerte der magnetischen Gesamtinduktion sind bei Drehstrom-Erdkabeln größer als bei Drehstrom-Freileitungen, liegen aber direkt über dem Kabel i. Allg. deutlich unterhalb des Grenzwertes von 100 μT .

Das Magnetfeld eines Kabels lässt sich u.a. durch die Anordnung und Lage (möglichst enge Bündelung der Leiter eines Systems, Verlegung in größerer Bodentiefe) erheblich reduzieren. Bestehen in bestimmten Bereichen hohe Anforderungen an die Minimierung des Magnetfeldes, so kann dieses durch technische Maßnahmen (verschiedene Isolationstechniken, parallel über dem Kabel geführte Kompensationsleiter, eingearbeitete Spezialfolie) zusätzlich eingeschränkt werden. In sensiblen Räumen und Ballungsgebieten kann ein kombiniertes Röhren-Kabel-Installationssystem mit Kapselung in metallischen Rohren verwendet werden, was zu einer nahezu vollständigen Abschirmung der magnetischen Felder führt.

Die magnetischen Induktionen der Gleichstrom-Erdkabel liegen bei gleicher Verlegetechnik deutlich unter den Werten der Drehstrom-Erdkabel zwischen ca. 39 und 75 μT (bei 3000 MW). Da die magnetischen Flussdichten der Gleichstrom-Erdkabel weit unter den Vorsorgewerten für statische Magnetfelder der EU Direktive 2004/40/EC liegen, die 200 mT für den Schutz von Arbeitnehmern angibt, sowie maximal im Bereich der in Deutschland auftretenden magnetischen Flussdichte des Erdmagnetfeldes liegen, werden Beeinträchtigungen des Menschen i. Allg. ausgeschlossen.

Eine Reduzierung des Magnetfeldes ist auch bei Gleichstrom-Erdkabeln durch die Anordnung und Lage der Kabel möglich. Ein geringerer Kabelabstand sowie technische Kompensations-einrichtungen wie z.B. Kompensationsleiter bewirken eine Verringerung der magnetischen Gesamtinduktion. Da bei Gleichstromleitungen zwei statt wie bei Drehstromleitungen drei Kabel pro Übertragungssystem benötigt werden, ist die Trasse der Gleichstromerdkabel schmaler. Hierdurch ist der Aufwand bei den Bauarbeiten geringer und die Nutzungseinschränkungen auf der Kabeltrasse fallen weniger ins Gewicht.

Die Übersicht in Tabelle 2 fasst die Wirkungen der elektrischen und magnetischen Felder der Drehstrom- und Gleichstromübertragung zusammen.

Tabelle 2: Vergleich der Feldwirkungen und Ionisierung der Luft bei Drehstrom- und Gleichstromleitungen (eigene Darstellung)

| | HDÜ-Freileitung | HDÜ-Kabel | HGÜ-Freileitung | HGÜ-Kabel |
|--|------------------------------|------------------------------|--|---|
| Magnetisches Feld | durch Abstand tole- rabel | durch Abstand tole- rabel | induziert keine Strö- me in Organismen | induziert keine Strö- me in Organismen |
| Elektrisches Feld | durch Abstand tole- rabel | nicht relevant | überschreitet nicht den Rahmen natürli- cher Quellen | nicht relevant |
| Ionisierung von Luftpartikeln | gering, weil wech- selnd | nicht relevant | höher als bei HDÜ, Wirkung umstritten | nicht relevant |

3. Schutzgüter „Pflanzen und Tiere“

3.1 Auswirkungen von 380-kV-Höchstspannungsdrehstrom-Freileitungen

3.1.1 Gefährdungsfaktoren für Tiere und Pflanzen durch Freileitungen

Pflanzen und Tiere können auf unterschiedliche Weise beeinträchtigt werden. Optimalerweise werden mögliche Auswirkungen von Höchstspannungstrassen bereits bei Planungsbeginn beachtet und fließen in die Entscheidung der Trassenfindung ein, damit Beeinträchtigungen vermieden oder vermindert werden können. Bei Freileitungen sind es anders als bei Erdkabeln neben Bauwirkungen vor allem die Betriebswirkungen, die als Beeinträchtigung bestimmter Artengruppen ins Gewicht fallen, aber auch Wartungsarbeiten stellen eine Störung dar. Die rechtlichen Anforderungen enthalten dazu unterschiedlich strenge Maßstäbe. Viele Beeinträchtigungen der gefährdeten und geschützten Tiere und Pflanzen werden bspw. nach § 30 BNatSchG auf der Basis des Biotopschutzes untersagt (vgl. Kapitel 4.1.2.1). Nach der im BNatSchG verankerten Eingriffsregelung sollen negative Auswirkungen von Eingriffen in Natur und Landschaft vermieden und minimiert werden. Unvermeidbare Beeinträchtigungen sind durch Ausgleichs- oder Ersatzmaßnahmen zu kompensieren (BNatSchG § 15). Des Weiteren regelt Kapitel 5 des BNatSchG (§§ 37–55) den „Schutz der wildlebenden Tier- und Pflanzenarten, ihrer Lebensstätten und Biotope“. Unabhängig von den Regimen des Gebietsschutzes und der Eingriffsregelung definieren der allgemeine und der besondere Artenschutz wichtige Rechtsvorgaben für große Infrastrukturvorhaben.

Der allgemeine Artenschutz bestimmt in § 39 BNatSchG generelle Schutzvorschriften für wild lebende Tiere und Pflanzen, dabei insbesondere auch Schutzzeiten, in denen Schnitt- und Rodungsarbeiten nicht stattfinden dürfen. Der besondere Artenschutz nach §§ 44, 45 BNatSchG bezieht sich auf Tier- und Pflanzenarten nach Anhang IV der FFH-Richtlinie sowie auf europäische Vogelarten. Um die Arten nach Anhang IV der FFH-Richtlinie sowie die europäischen Vogelarten gemeinsam zu benennen, wird im Folgenden auch der Begriff „europäisch geschützte Arten“ verwendet. Gemäß § 44 Abs. 1 BNatSchG ist generell zu unterlassen:

1. wildlebenden Tieren der besonders geschützten Arten nachzustellen, sie zu fangen, zu verletzen, zu töten oder ihre Entwicklungsformen aus der Natur zu entnehmen, zu beschädigen oder zu zerstören,
2. wild lebende Tiere der streng geschützten Arten und der europäischen Vogelarten während der Fortpflanzungs-, Aufzucht-, Mauser-, Überwinterungs- und Wanderzeiten erheblich zu stören; eine erhebliche Störung liegt vor, wenn sich durch die Störung der Erhaltungszustand der lokalen Population einer Art verschlechtert,
3. Fortpflanzungs- oder Ruhestätten der wild lebenden Tiere der besonders geschützten Arten aus der Natur zu entnehmen, zu beschädigen oder zu zerstören,
4. wild lebende Pflanzen der besonders geschützten Arten oder ihre Entwicklungsformen aus der Natur zu entnehmen, sie oder ihre Standorte zu beschädigen oder zu zerstören.

Wenn die o.g. Beeinträchtigungen nicht vermeidbar sind, dann können gem. § 45 BNatSchG Ausnahmen zugelassen werden, wenn u.a. zumutbare Alternativen nicht gegeben sind und sich

der Erhaltungszustand der jeweiligen Tier- oder Pflanzenpopulation nicht verschlechtert. Der „Erhaltungszustand der Population“, d.h. nicht der des Einzelindividuums, ist gem. § 45 BNatSchG ausschlaggebend für die Beurteilung der bei großen Bauvorhaben oft unvermeidlichen einzelnen Tötungen oder Störungen von Tieren und Pflanzen (LANA 2010, S. 16; FEHRENSSEN 2009, S. 17). Die für Naturschutz und Landschaftspflege zuständigen Behörden können im Einzelfall weitere Ausnahmen zulassen, z.B. wenn zwingende Gründe des überwiegenden öffentlichen Interesses dieses gebieten. Zwingende Gründe des überwiegenden öffentlichen Interesses liegen vor, wenn durch öffentliche oder private Vorhaben grundsätzlich dem Wohl der Allgemeinheit gedient wird (LANA 2010, GELLERMANN 2009).

Ein artenschutzrechtliches Ausnahmeverfahren kann vermieden werden, wenn bestimmte Sonderregelungen zutreffen bzw. angewendet werden können (§ 44 Abs. 5 BNatSchG). So werden bei Arten nach Anhang IV der FFH-Richtlinie (Richtlinie 92/43/EWG) sowie bei europäischen Vogelarten Tötungs- und Verletzungsverbote (Nr. 1) oder Verbote zur Zerstörung oder Beschädigung von Fortpflanzungs- und Ruhestätten (Nr. 3) nicht gewertet, soweit die ökologische Funktion im räumlichen Zusammenhang der von dem Eingriff oder Vorhaben betroffenen Fortpflanzungs- oder Ruhestätten durch geeignete und in ausreichendem Umfang vorhandene Habitatflächen weiterhin erfüllt wird. Zur Gewährleistung dieser Funktion können auch „vorgezogene Ausgleichsmaßnahmen“ bzw. „funktionserhaltende Maßnahmen“ durchgeführt werden (EUROPÄISCHE KOMMISSION 2007, Nr. 73), wie in Abschn. 3.1.3.1 näher beschrieben wird.

Die artenschutzrechtlichen Regelungen weisen eine hohe Verfahrensrelevanz auf, da sie nicht der Abwägung unterliegen und LANA (2010) zufolge striktes Recht markieren. Ggf. erforderliche Abweichungsverfahren führen zwangsläufig auch zur Erwägung alternativer Trassenvarianten.

Generell ist das zu untersuchende Artenspektrum auf die potentiell vom Eingriff betroffenen geschützten Arten einzugrenzen (LANA 2006, S. 10). Auswahlkriterien für planungsrelevante geschützte Arten sind nach LANA (2006, S. 10):

- In Deutschland heimische Art nach § 10 Abs. 2 Nr. 5 BNatSchG,
- Vorkommen bzw. Verbreitung der Art im Bezugsraum (lokale Population ist maßstabgebend),
- (Potenzielles) Vorkommen der Art in den Lebensräumen des Planungsraumes,
- Empfindlichkeit in Bezug auf das Vorhaben und seine Wirkfaktoren,
- Naturschutzfachliche Bedeutung (z.B. Gefährdungsgrad der Art nach Roter Liste),
- Begrenzte Population/Unterart,
- „Allerweltsarten“ bei möglicher Gefährdung isolierter lokaler Population,
- Verantwortlichkeit Deutschlands/des Bundeslands für die Art (aufgrund ihrer Verbreitung).

Aufgrund des geringeren Tiefbauanteils werden Tiere während der Bauphase von Freileitungen im Offenland in geringerem Maße als bei Erdkabeln betroffen, in Waldgebieten aufgrund der i. Allg. breiteren Schneisen jedoch in höherem Maße. Hierbei kommt es insbesondere bei der Freimachung von Trassen und der Errichtung der Fundamente für Freileitungsmasten in der Regel zur Beseitigung von Bäumen und Sträuchern sowie zu Veränderungen der Bodenhorizonte (Versiegelung, Verdichtung). Dabei können Habitate von Tieren oder Exemplare und Standorte von Pflanzen beschädigt oder zerstört werden (vgl. Tabelle 3).

Während der Betriebsphase sind es unter den europäischen Tierartengruppen vor allem die europäischen Vogelarten, die durch die Anlage von Freileitungen gefährdet sind. Es besteht insbesondere die Gefahr, dass Individuen durch Vogelschlag getötet werden. Aber auch die Entwertung von Brut-, Rast- und Nahrungshabitaten ist anzuführen, soweit diese durch eine Trasse zerschnitten oder aufgrund der Masten von Arten gemieden werden (vgl. Tabelle 3).

Tabelle 3: Gefährdung europäisch geschützter Arten durch Freileitung (eigene Darstellung)

| Vorhaben | Wirkbereiche | Farne | Samenpflanzen | Weichtiere | Libellen | Käfer | Schmetterlinge | Rundmäuler und Fische | Amphibien | Reptilien | Fledermäuse | Gesch. Säugtiere | Rast- und Brutvögel |
|--------------------|---------------|-------|---------------|------------|----------|-------|----------------|-----------------------|-----------|-----------|-------------|------------------|---------------------|
| Bau-phase | 1 Tötung | | | x | x | x | x | - | - | - | x | - | - |
| | 2 Störung | | | - | - | - | - | - | x | x | x | x | x |
| | 3 Fortpflanz. | | | - | - | - | - | - | - | - | x | x | x |
| | 4 Zerstörung | x | x | | | | | | | | | | |
| Anlage/ Betrieb | 1 Tötung | | | | | | | | | | - | | x |
| | 2 Störung | | | | | | | | | | - | - | x |
| | 3 Fortpflanz. | | | | | | | | | | - | - | x |
| | 4 Zerstörung | - | - | | | | | | | | | | |

Legende: leer = kein Risiko; - = Risiko; x = erhöhtes Risiko

Bei Bau und Betrieb von Freileitungstrassen dürfen nach § 44 Abs. 1 Nr. 1 BNatSchG keine Fortpflanzungs- oder Ruhestätten der wild lebenden Tiere der besonders geschützten Arten aus der Natur entnommen, beschädigt oder zerstört werden. Während die Fortpflanzungs- und Ruhestätte bei einer Zerstörung unmittelbar ihre Funktion verliert, liegt eine Beschädigung vor, wenn eine Verminderung des Fortpflanzungserfolges oder der Ruhemöglichkeiten des betroffenen Individuums oder der betroffenen Individuengruppe wahrscheinlich ist. Falls die Beeinträchtigung sukzessive zu einem Verlust der ökologischen Funktion führt, tritt ebenfalls der Verbotsstatbestand ein. An den Maststandorten sind vor allem Fortpflanzungs- und Ruhestätten von Tieren mit einem kleinen Aktionsradius, z.B. Reptilien, betroffen. So weist die Zauneidechse (*Lacerta agilis*) einen dauerhaften Aktionsraum von 5 bis 99 m² auf, der durch einen Masten durchaus zerstört werden kann. Eine Störung kann grundsätzlich durch Beunruhigungen und Scheuchwirkungen z.B. infolge von Bewegung, Lärm oder Licht eintreten. Unter das Verbot fallen im Einzelfall auch Störungen, die durch Zerschneidungs- oder optische Wirkungen hervorgerufen werden können, z. B. durch Schneisen oder die Silhouettenwirkung von Masten. Bei Freileitungen können sowohl Bauphase wie Betriebsphase (u.a. Schallemissionen durch Koronaentladungen) mit Störungen verbunden sein, bspw. Zerschneidungs- und Barrierewirkungen für bestimmte Vogelarten (vgl. Abschn. 3.1.2.6).

Je nach Art und Häufigkeit des Schneisenmanagements werden Pflanzen und Tiere unterschiedlich stark beeinträchtigt. Ein seltener Eingriff, der sich auf die Kappung hoher Gehölze be-

grenzt und die übrige Vegetation weitestgehend verschont, ist zu empfehlen. Hierdurch kann der Lebensraum zwischenzeitlich etablierter Tier- und Pflanzenarten erhalten bleiben.

3.1.2 Auswirkungen von Freileitungen auf bestimmte Artengruppen

3.1.2.1 Geschützte Pflanzen

Bei Bau und Betrieb von Freileitungen ist es gemäß § 44 Abs. 1 Nr. 4 BNatSchG verboten, wild lebende Pflanzen der besonders geschützten Arten oder ihre Entwicklungsformen aus der Natur zu entnehmen, sie oder ihre Standorte zu beschädigen oder zu zerstören. Bei den Bauarbeiten ist daher darauf zu achten, dass keine Individuen oder Standorte von wild lebenden Pflanzen der streng oder besonders geschützten Arten beschädigt oder zerstört werden. Höher wachsende Pflanzen wie Büsche oder Bäume sind i. Allg. nicht streng oder besonders geschützt.

Vor Beginn der Bauarbeiten wird üblicher Weise auf der gesamten Trassenlänge auf der vollen Schutzstreifenbreite der hohe Bewuchs (Bäume) entfernt. Deren Durchmesser beträgt bei 380-kV-Freileitungen mit Donaumasten etwa 70 m (vgl. HOFMANN et al. 2012, Teil I, Abschn. 1.3). Mit anderen Masten und kürzeren Spannfeldlängen kann sich die Breite auf 40 m bis 60 m reduzieren (vgl. TRANSPower 2010). Im Zuge der Bauarbeiten kommt es insbesondere an den Maststandorten zur Zerstörung von Farnen und Samenpflanzen. Abgesehen von den Maststandorten kann niedriger Bewuchs (Gebüsche) auf der überspannten Fläche erhalten bleiben. In den baumfreien Leitungstrassen besteht eine erhöhte Windwurf- und Bruchgefährdung der Randbäume durch düsenartige Windbeschleunigung (INSTITUT FÜR ELEKTRISCHE ANLAGEN UND HOCHSPANNUNGSTECHNIK – ABTEILUNG FÜR HOCHSPANNUNGSTECHNIK 2001, S. 32).

3.1.2.2 Weichtiere, Libellen, Käfer und Schmetterlinge

Im Hinblick auf den Bau und Betrieb von Freileitungen ist nach § 44 Abs. 1 Nr. 1 BNatSchG grundsätzlich zu gewährleisten, dass keine wildlebenden Tiere der besonders geschützten Arten verletzt, getötet oder ihre Entwicklungsformen aus der Natur beschädigt oder zerstört werden. Vor allem bei den Mastbauarbeiten ist darauf zu achten, dass schutzwürdige Tiere und insbesondere auch wenig mobile Weichtiere oder Käfer durch bspw. Absammlung und Umsiedlung geschont werden.

Weichtiere, Libellen, Käfer und Schmetterlinge können im Zuge der Bauphase grundsätzlich durch allgemeine Bautätigkeit, die Entfernung von Bäumen und Sträuchern, die Anlage von Schutzstreifen sowie die Emission von Lärm, Licht und Erschütterungen beeinträchtigt werden. Dies gilt vor allem für die Bereiche der Mastfußerrichtungen. Da Weichtiere und Insekten im Vergleich zu anderen Tieren sehr geringe bis keine Fluchtdistanzen aufweisen, kann es aufgrund ihrer kleinräumigen Aktionsradien durch die Beschädigung von Habitaten gleichzeitig auch zu Tierverlusten und Verlusten von Fortpflanzungsstadien kommen.

3.1.2.3 Amphibien und Reptilien

Insbesondere für geschützte Landtiere mit geringer Mobilität besteht eine besondere Gefährdung während der Bauarbeiten, durch die sie gestört, verletzt, getötet oder ihre Wanderwege, Aufenthalts- und Fortpflanzungsstätten beschädigt oder vernichtet werden können. Amphibien und Reptilien sind hiervon gleichermaßen betroffen. Während der Bauarbeiten kann es durch visuelle

Störungen, Lärmemissionen, Erschütterungen und die Entfernung von Vegetation zu Beeinträchtigungen kommen.

Da Amphibien in Abhängigkeit des Jahreszyklus sowohl aquatische als auch terrestrische Lebensräume beanspruchen, sind in der Bauphase entlang der Trasse und an den Baustellenzufahrten Tierverluste auf den Wanderkorridoren sowie in den Sommer- und Winterlebensräumen möglich, wenngleich in geringerem Ausmaß als bei den Bauarbeiten für Kabeltrassen.

3.1.2.4 Fledermäuse

Durch Bautätigkeiten, Emission von Lärm, Licht und Erschütterungen sowie durch die Entfernung von Bäumen und Sträuchern, welche den Fledermäusen als Unterschlupf dienen, können die Tiere beeinträchtigt werden. Vor allem ältere Bäume dienen baumbewohnenden Fledermäusen als Quartierstandorte und potenzielle Wochenstuben bzw. Winterquartiere. Wenn nicht im Zuge vorgezogener Kompensationsmaßnahmen gegengesteuert werden kann, können negative Auswirkungen auf den Erhaltungszustand lokaler und regionaler Populationen durch die dauerhafte Entfernung von Quartierstandorten nicht ausgeschlossen werden.

3.1.2.5 Geschützte Landsäugetiere

Landsäugetiere können durch Bautätigkeiten, die Anlage von Schutzstreifen sowie Emission von Lärm, Licht, Erschütterungen sowie durch die Entfernung von Bäumen und Sträuchern beeinträchtigt werden.

3.1.2.6 Gefährdung der Avifauna

Alle europäischen Vogelarten (Avifauna) gehören zu den Arten, die nach §§ 44, 45 BNatSchG unter das Schutzregime des besonderen Artenschutzes fallen. Aus diesem Grund müssen Beeinträchtigungen der Avifauna und ihrer Lebensräume bei Bau und Betrieb von Freileitungen vermieden werden. Mit Ausnahme denkbarer Folgen durch Lärm und Scheuchwirkung während der Errichtung, sind die maßgeblichen Auswirkungen von Freileitungen auf Vögel der Betriebsphase zuzuordnen.

Die Auswirkungen von Freileitungskonstruktionen auf die Avifauna sind bislang vor allem im Zusammenhang mit Freileitungen der 20–220-kV-Klasse untersucht und beschrieben worden (BALLASUS U. SOSSINKA 1997; BERNSHAUSEN et al. 1997; GFN 2009; HAAS U. NIPKOW 2008; HAAS et al. 2003; HÖLZINGER 1987; HÜPPOP 2004; RICHARZ 2001; SOSSINKA 2000). Für den o.g. Spannungsbereich weisen die Autoren vor allem auf folgende Gefährdungsfaktoren für Vögel hin:

- Stromschlag (Elektrokution): Mortalität durch Stromschlag infolge von Kurzschluss oder Erdschluss,
- Vogelschlag: Mortalität durch Leitungs- oder Mastenanflug,
- Entwertung und Gefährdung von Habitaten: Zerschneidung von Brut-, Rast- und Nahrungshabitaten sowie Wanderkorridoren, Vergrämung von Vögeln.

Eine untergeordnete Rolle kommt elektrischen oder magnetischen Feldern in der ornithologischen Diskussion zu. Die Wirkung der von Freileitungen ausgehenden Felder auf Vögel wird u.a.

von ALTEMÜLLER U. REICH (1997), HAMANN et al. (1998) und SILNY (1997) beschrieben. Dabei wird auch eine mögliche Beeinflussung der Erdmagnetfeld-Orientierung von Zugvögeln betrachtet: Das von Vögeln wahrgenommene statische Erdmagnetfeld ist ein Gleichfeld mit einer magnetischen Flussdichte von 30 bis 65 μT (in Europa, siehe auch Abschn. 3.2.3).

Verhaltensexperimente haben zwar gezeigt, dass ziehende Rotkehlchen durch schwache Magnetfelder ($< 1/50$ der Stärke des Erdmagnetfeldes) in der Radiofrequenz (1–50 MHz) desorientiert werden. Es gibt jedoch keine Hinweise darauf, dass ziehende Vögel, die sich am Erdmagnetfeld orientieren, durch niederfrequente Wechselfelder, wie sie bei Hochspannungsleitungen auftreten, in ihrer Zugarientierung beeinflusst werden (MOURITSEN U. RITZ 2005). Die Felder würden, falls überhaupt, auch nur beim Überfliegen der Leitungen wirksam sein. Nach heutigem Wissensstand kann die Wirkung der von Freileitungen ausgehenden elektrischen und magnetischen Felder auf Vögel folglich als vernachlässigbar eingestuft werden.

Leiterseile von Freileitungen erreichen im Normalbetrieb bei Dauerlast eine Temperatur von 70 °C bis 80 °C. Durch die Verwendung von Hochtemperatur-Leiterseilen, so genannten Heißleiterseilen, kann die Übertragungskapazität von Freileitungen auf eine Temperatur von bis zu 150 °C gesteigert werden. Schädigungen bei auf den Seilen rastenden Tieren können die Folge sein (GEO et al. 2009, S. 139; HEYNEN 2008). Da Vögel auf Höchstspannungsleitungen das Erdseil als Sitz bevorzugen, ist die Frage der Hochtemperaturseile in diesem Spannungsbereich für die Avifauna voraussichtlich nur von randlichem Interesse. Allerdings besteht noch Ungewissheit darüber, ob nicht doch Verbrennungen durch Kurzkontakte bei vermehrtem Einsatz der Heißleiterseile im Höchstspannungsbereich zunehmen.

3.1.2.6.1 Vogelschlag

Vor dem Hintergrund, dass wild lebende Tiere der besonders geschützten Arten gemäß § 44 Abs. 1 Nr. 1 BNatSchG nicht verletzt oder getötet werden dürfen, ist relevant, dass alle flugfähigen Vögel unabhängig von ihrer Größe durch Leitungs- oder Mastenanflug potenziell kollisionsgefährdet sind (HAAS et al. 2003, SCHUMACHER 2002). Kollisionen gelten von allen Gefährdungen durch Hochspannungsfreileitungen für Vögel als die bei weitem größte Bedrohung (HAAS et al. 2003, S.16).

Unabhängig vom Masttyp, den Masthöhen und den Teilleiterabständen können sich Kollisionen generell bei jeder Art von Freileitung ereignen, da Vögel insbesondere die Entfernungen zu den unnatürlichen horizontalen Strukturen schlecht abschätzen können (RICHARZ 2001). Die meisten Kollisionen erfolgen an den zuoberst angeordneten, einzeln hängenden und besonders dünnen Erd- oder Blitzschutzseilen (HAAS et al. 2003; HOERSCHELMANN et al. 1988). Die Masten von Freileitungen sind tagsüber – unter normalen Sichtbedingungen – für die Vögel gut erkennbar und bergen allenfalls eine geringe Kollisionsgefahr (KAHLERT et al. 2005). Kollisionen ereignen sich am häufigsten, wenn Vögel bei dem Versuch, die relativ gut erkennbaren Leitungsbündel zu überfliegen, nach oben ausweichen und aufgrund der hohen Fluggeschwindigkeit mit dem schlecht sichtbaren Erdseil zusammenstoßen (BEVANGER U. BRØSETH 2004; HAAS et al. 2003; RICHARZ 2001; SOSSINKA 2000). Nachts oder bei schlechter Sicht, bspw. Nebel, besteht sowohl an Leitungs- bzw. Erdseilen als auch an Masten prinzipiell ein höheres Kollisionsrisiko (BERNSHAUSEN et al. 1997; HÖLZINGER 1987; KAHLERT et al. 2005).

Das Zustandekommen von Kollisionen an Leiterseilen wird somit beeinflusst durch die optische Wahrnehmung der Konstruktionen durch die Vögel, die Lage der Erdseile, die Hindernis-

beherrschung der Vögel im Luftraum und ein artspezifisches bzw. saisonales Verhalten der Vögel (nach HOERSCHELMANN et al. 1988). Aus diesen Faktoren resultiert die Flug- bzw. Nahreaktion der Vögel beim Anflug auf die Konstruktionen. Zum Reaktionsverhalten von fliegenden Vögeln an 380-kV-Freileitungen wurden von BERNSHAUSEN et al. (1997) und SELLIN (2000) die im Folgenden zusammengefassten Studien durchgeführt.

BERNSHAUSEN et al. (1997) untersuchten einen 1,5 km langen Abschnitt einer 380-kV-Freileitungstrasse in Erftstadt, Nordrhein-Westfalen, im Zeitabschnitt zwischen Morgen- und Abenddämmerung. Der Trassenabschnitt befand sich zwischen einer ackerbaulich genutzten, offenen Agrarlandschaft und einem Wäldchen bzw. einem naturfernen Stillgewässer. Die häufigste Reaktion, die fliegende Vögel bei Erreichen der Leitung zeigten, war in etwa 57 % der Fälle das Überfliegen des Erdseils. Zu dieser inhomogenen Vogelgruppe gehörten vor allem Graureiher, Enten, Stare, Greifvögel, Limikolen, Lerchen und Drosseln. Für eine deutlich geringere Individuenzahl wurde das Unterfliegen der stromführenden Leitungen (17 %) registriert. Bei diesen Vögeln handelte es sich ausschließlich um Singvogelarten (Goldammer, Amsel, Rauch- und Mehlschwalbe), die relativ klein und wendig sind. Das Überfliegen der Leiterseile unterhalb des Erdseils wurde in 13 % der Fälle festgestellt, das betreffende Artenspektrum setzte sich aus kleinen bis mittelgroßen, wendigen Arten zusammen (Pieper, Sperlinge, Finken, Kiebitze). Nur in 6 % der Fälle durchquerten Vögel die Leiterseile. Es handelte sich um kleinere Singvogelarten, im Wesentlichen um Finken. Weitere 6 % der Vögel reagierten mit frühzeitigem Abdrehen und anschließendem Parallelflug. Dieses Verhalten zeigten verstärkt Tauben, Feldlerchen, Wiesenpieper und Stockenten. Dabei stellten BERNSHAUSEN et al. (1997) fest, dass über 70 % der Flugreaktionen sogenannte Nahreaktionen in einem Abstand von unter 30 m zur Trasse waren. Unter diesen wurde für 55 % die Änderung der Flughöhe festgestellt und für weitere 11 % eine „kritische Nahreaktion“ durch Ändern des Verhaltens „im letzten Augenblick“ (BERNSHAUSEN et al. 1997). Von diesen kritischen Nahreaktionen waren besonders Tauben, Pieper, Finken, Feldlerchen und Schafstelzen betroffen. Zu den meisten kritischen Nahreaktionen kam es am dünnen, für die Vögel erst spät erkennbaren Erdseil. In den Dämmerungsstunden zeigten Graureiher einen hohen Anteil an kritischen Reaktionen, was die Problematik der schlechten Erkennbarkeit der Drähte verdeutlicht. Totfunde wurden bei den Untersuchungen am Standort Erftstadt nicht gemacht.

SELLIN (2000) führte Untersuchungen an einer 380-kV-Freileitung nahe des Kernkraftwerkes (KKW) Lubmin am EU-Vogelschutzgebiet Greifswalder Bodden und südlicher Strelasund im Zeitabschnitt zwischen Morgen- und Abenddämmerung durch. Die untersuchte Fläche befand sich in Küstennähe und war überwiegend von intensiv beweidetem Grasland bedeckt. Ein Teil der Trasse führte über den Kühlwasserkanal des KKW. Etwa 49 % der erfassten Vögel querte die Trasse in einem Bereich von maximal 50 m oberhalb der Erdseile. Dabei handelte es sich überwiegend um Stare und Möwen. Bei den Möwen, die die Trasse auf ihrem Brut- und winterlichen Schlafplatzflug täglich querten, war aufgrund ihres zielstrebigem und knappen Überfliegens des Erdseils im Bereich des stärksten Durchhangs ein Gewöhnungseffekt festzustellen, der vermutlich während der Brutzeit entstanden ist (SELLIN 2010). 17 % unterflogen die Leiterseile, bei denen es sich überwiegend (73 %) um Kleinvögel handelte. 11 % der registrierten Vögel schwamm unterhalb der Freileitung im Einlaufkanal. Im kritischen Bereich zwischen Leiterseil und Erdseilen wurden 7 % aller Individuen erfasst. Beim Durchqueren dieses Raumes beobachtete SELLIN (2000 S. 62) „zum Teil panikartige Flugmanöver im Form von schreckhaftem

Ausweichen nach oben oder unten“. In vier Fällen kam es zu direkter Berührung der Leiterseile, was in einem Fall für den Vogel sofort tödlich endete (Gänsesäger).

Hinsichtlich des von Kollisionen betroffenen Artenspektrums sind Hoch- und Höchstspannungsleitungen trotz unterschiedlicher konstruktiver Merkmale unter weitgehend gleichen Gesichtspunkten zu betrachten. Von Kollisionen an diesen Freileitungstypen betroffen sind nach BERNSHAUSEN et al. (1997), HAAS et al. (2003) und JANSSEN U. FERRER (1997) vor allem Vögel mit einer geringen bzw. trägen Wendigkeit, kritischer Nahreaktion (s.o.) bzw. einem eingeschränktem Sehfeld (eingeschränktem binokularem Sehvermögen durch seitliche Anordnung der Augen). Während das letztgenannte Merkmal auf die meisten Vogelarten – mit Ausnahme von Greifvögeln und Eulen – zutrifft, zählen zu den Arten mit geringer Wendigkeit und kritischer Nahreaktion vor allem größere Vögel wie Trappen, Hühnervögel, Reiher, Störche, Kraniche, Rohr- und Zwergdommeln, Gänse, Kormorane, See- und Lappentaucher, Säger, Enten und Schwäne.

Vor dem Hintergrund einer möglichen Adaption der Vögel an die Gefahrenquelle und daraus möglicherweise resultierenden Meidung der kollisionskritischen Trassenbereiche ist die Raumnutzung bzw. Aufenthaltsdauer der Vögel in einem Gebiet eine wesentliche Einflussgröße (BEVANGER U. BRØSETH 2004). Dabei wird im Folgenden zwischen Brut-, Rast- und Zugvögeln unterschieden.

Die Häufigkeit des Vogelschlags oder des Stromschlags hängt stark von der Lage der Freileitung ab. Besonders hohe Verlustzahlen sind in Durchzugs- und Rastgebieten mit großen Vogelzahlen zu verzeichnen. Neben den unmittelbaren Küstenstreifen und küstennahen Niederungen sind für das Binnenland in dieser Hinsicht große Gewässer und Feuchtgebiete als bedeutsame Rast- und Brutplätze sowie Talzüge als „vogelkritische“ Zonen zu nennen (HOERSCHELMANN 1997; RICHARZ 2001). HEIJNIS (1980) gibt für eine 380-kV-Höchstspannungsleitung, die durch zwei bedeutende Rastgebiete in Holland führt, 700 verunglückte Vögel pro Jahr und Kilometer an. Die meisten Schlagopfer wurden in den Zugmonaten April bis Mai (Heimzug) sowie August und September (Wegzug) gefunden. SCOTT et al. (1972) untersuchten über sechs Jahre (188 Suchgänge) zwei parallele 380-kV-Höchstspannungsleitungen von etwa 1,5 km Länge an der Küste von Kent in einem für die Dichte des Singvogelzuges bekannten Gebiet. Insgesamt wird für den Untersuchungszeitraum von mehr als 6.000 Opfern ausgegangen, was etwa 600 verunglückten Vögeln pro Leitungskilometer und Jahr entspricht. Die von HOERSCHELMANN et al. (1988) untersuchte 380-kV-Leitung über die Marschen der Unterelbe in der Nähe des NSG Haseldorfer Binnenelbe ist, sowohl was die Geländestruktur als auch was die Vogelhäufigkeit anbelangt, mit den Untersuchungen von SCOTT und HEIJNIS zu vergleichen (HOERSCHELMANN 1997, S. 166). In zwei Frühjahrs- und zwei Herbstzugperioden wurden auf einer Strecke von etwa 4,5 Kilometer insgesamt 867 tote Vögel bzw. deren Reste gefunden. Nach Ermittlung einer Abtragsrate und eines Korrekturfaktors ergab sich eine jährliche Unfallrate von ca. 400 Vögeln pro Leitungskilometer.

SELLIN (2000) untersuchte den Vogelschlag an einem 930 m langen Abschnitt einer 380-kV-Leitung am EU-Vogelschutzgebiet Greifswalder Bodden und südlicher Strelasund. Im zwölfmonatigen Untersuchungszeitraum wurden 56 Tode und Rupfungen gemacht, die sich „erwartungsgemäß“ (SELLIN 2000 S. 63) überwiegend aus Feuchtgebietsvögeln (81 %) zusammensetzten. Der größte Anteil der verunglückten Vögel entfiel auf Höckerschwäne, gefolgt von Gänsesäger, Stock- und Krickenten. „Nach vorsichtiger Schätzung“ (SELLIN 2000 S. 65) wird der tatsächliche Verlust von Vögeln für den untersuchten Einjahreszeitraum unter Berücksichtigung des Abtrags durch Aasfresser auf 500–1.000 Anflugopfer beziffert.

Eine vergleichsweise niedrige Kollisionsrate ermittelte PIPER (1992), zitiert in HOERSCHELMANN (1997), an einer etwa zwei Kilometer langen 380-kV-Leitung zwischen Lüneburg und Krümmel. Die Leitung durchzieht ein trockenes von Hecken und Gehölzen durchsetztes Acker- und Grünlandgebiet. Größere Ansammlungen rastender oder nahrungssuchender Vögel konnten nicht festgestellt werden. Innerhalb von zwei Jahren wurden nur 16 Vögel bzw. deren Reste gefunden. Nach Berücksichtigung einer empirisch ermittelten Abtrage rate durch Aasfresser wird jährlich von etwa 20 toten Vögeln pro Leitungskilometer ausgegangen.

Im Unterschied zu den oben genannten Untersuchungen gibt es auch Studien, bei denen keine Totfunde gemacht wurden. Die von BERNSHAUSEN et al. (1997) an einem 1,5 km langen Abschnitt einer 380-kV-Freileitungstrasse in Erfstadt, Nordrhein-Westfalen durchgeführten Untersuchungen erbrachten keine Totfunde. Der Trassenabschnitt befand sich zwischen einer ackerbaulich genutzten, offenen Agrarlandschaft und einem Wäldchen bzw. einem naturfernen Stillgewässer.

Fasst man die Ergebnisse der zitierten Untersuchungen an Höchstspannungstrassen mit hohen Vogelverlusten zusammen, so lässt sich folgern, dass in feuchten, vorwiegend von Grünland beherrschten Niederungsgebieten mit starkem Vogelzug und hohen Rastbeständen jährlich zwischen 200 und 700 Vögel pro Leitungskilometer durch Leitungsanflug verunglücken. Von ähnlichen Verhältnissen ist an anderen Konzentrationspunkten des Vogelzuges, z.B. an Gebirgspässen, Talzügen und Küsten auszugehen. Die stark variierenden Kollisionsraten deuten darauf hin, dass in „gewöhnlichen“ Landschaften ohne besondere Bedeutung für den Vogelschutz eine geringere Gefährdung durch Höchstspannungsleitungen für Vögel besteht. Zu einem ähnlichen Fazit kommen HAVELKA et al. (1997), die im Rahmen einer dreijährigen Studie das Drahtanflugrisiko für Vögel an vier Freileitungen in verschiedenen typischen Landschaftsräumen Baden-Württembergs untersuchten. Im Ergebnis wurde für die Verlustrate durch Leitungsanflug in Leitungsabschnitten ohne typisches konzentriertes Zuggeschehen keine Relevanz für den Artenschutz festgestellt. Die folgende Tabelle 4 fasst die Ergebnisse der zitierten Untersuchungen zusammen.

Tabelle 4: Kollisionsoffer an Höchstspannungsleitungen (380–400 kV)

| Quelle | Untersuchungsgebiet | Gebietsmerkmale | Masttyp | Leitungstyp | Anflugopfer je km und Jahr |
|-----------------------------|--|--|-------------------------|--|--|
| BERNSHAUSEN et al. (1997) | Erfstadt, Nordrhein-Westfalen | Ackerbaulich genutzte, offene Agrarlandschaft mit kleinem Wald und naturfernem Stillgewässer | Keine Angabe | 380-kV | 0 |
| HAVELKA et al. (1997) | Verschiedene, typische Landschaftsräume in Baden-Württemberg | 3 Gebiete primär terrestrisch geprägt (Agrarlandschaften), 1 Gebiet primär limnisch geprägt (Staubecken) | Keine Angabe | 380-kV | terrestrisch geprägte Gebiete: 0,83–1,5; limnisch geprägtes Gebiet: 0,17 |
| HEIJNIS (1980) | NSG Westerzijderveld / de Reef (NL) | Sumpfige Feuchtwiesen mit sehr hohem Rastvogelbestand | Donaumasten | 380-kV: 6 dreier-Bündelleiter und 2 Erdseile | 700 |
| HOERSCHELMANN et al. (1988) | Untere Elbe Haseldorfer Marsch (westlich von Hamburg) | Marschland in unmittelbarer Flussnähe | Tonnen- und Donaumasten | 380-kV, 6 doppelte Leiterseile, 2 Erdseile | mind. 400 |
| PIPER et al. (1992) | Lüneburg - Krümmel (Niedersachsen) | Trockenes, von Hecken und Gehölzen durchsetztes Acker- und Grünlandgebiet | Keine Angabe | 380-kV | max. 20 |
| SCOTT et al. (1972) | Dungeness (Küste von Kent) | hohe Singvogelzugdichte | Tonnenmasten | 2 x 380-kV-Leitungen nebeneinander | 600 |
| SELLIN (2000) | Küste bei Lubmin, Mecklenburg-Vorpommern | Intensiv beweidetes Grasland nahe Greifswalder Bodden | Keine Angabe | 3 x 380-kV nebeneinander | 500 – 1.000 |

Vogelschlag bei Brutvögeln

Brutvögel können sich prinzipiell über die verhältnismäßig lange Dauer ihrer Anwesenheit an einem Ort an bestehende Strukturen und bauliche Veränderungen in ihrem Lebensraum gewöhnen und sich ihrer Umgebung anpassen (BERNSHAUSEN et al. 1997). Für bestimmte Arten gilt, dass brütende Individuen deshalb seltener Opfer von Freileitungen werden als gebietsfremde rastende oder ziehende Individuen (HAAS et al. 2003). Für Flächen, in denen sich überwiegend eingesessene Brutvögel und langfristig anwesende Nahrungsgäste aufhalten, setzt HOERSCHELMANN (1997, S. 168) die Zahl der Anflugopfer bei Freileitungen „zumindest um das Zehnfache geringer“ an als in rastvogelreichen Niederungen, deren Bestände über kürzere Dauer in einem Gebiet verweilen. Möglicherweise erhöht die hohe Frequenz des Leitungsüberfliegens (mehrmals täglich) in einem mehrmonatigen Zeitraum bei anderen Brutvogelarten jedoch das Kollisionsrisiko.

FANGRATH (2003) stellte in verhaltensbiologischen Untersuchungen von Leitungsanflügen in einem Brutgebiet des Weißstorchs fest, dass Altvögel bei 12 % und Jungvögel bei 18 % der Querungen einer Hochspannungsleitungen (Typ Tanne) einer Gefahr ausgesetzt waren. Bei den

Weißstörchen führten unter anderem die träge Wendigkeit und der Gaukelflug mit hängenden Beinen zu Kollisionen. Zu berücksichtigen ist für alle Arten, dass die noch unerfahrenen Jungvögel in den Brutlebensräumen generell kollisionsgefährdeter sind als Altvögel.

Bestimmte Arten können auch bei der Flugbalz mit den Leitungen kollidieren (bspw. Kolkrabe, Schwarzmilan, Seeadler, Großer Brachvogel, Kiebitz, Waldschnepfe, Bekassine), was insbesondere solche Arten betrifft, die auch in der Dämmerung oder nachts balzen (wie die drei letztgenannten) (ALTEMÜLLER U. REICH 1997; RICHARZ 2001). Bei den in Deutschland stark rückläufigen Wiesenbrütern lässt sich dieser anzunehmende Effekt aufgrund der vergleichsweise geringen Siedlungsdichten „jedoch kaum nachweisen“ (ALTEMÜLLER U. REICH 1997 S. 125) und muss vor diesem Hintergrund in der Literatur als unterrepräsentiert angesehen werden. Hinweise auf eine erhöhte Kollisionsgefährdung von Kiebitz, Uferschnepfe und Bekassine während der Brutzeit finden sich jedoch in HEIJNIS (1976) und HOERSCHELMANN et al. (1988). ALTEMÜLLER U. REICH (1997 S. 124) führen den Widerspruch zwischen dem konstatierten Meideverhalten dieser Arten gegenüber Freileitungen im Brutgebiet (vgl. Kap. 3.1.3.3) und der erhöhten Kollisionsgefahr während der Brutzeit darauf zurück, dass es möglicherweise erst durch hohe Mortalitätsraten an Freileitungen zu einer „Entvölkerung“ – und damit Meidung – des unmittelbaren Trassenbereichs kommt.

Eine erhöhte Gefährdung besteht möglicherweise auch für Brutvogelarten mit großflächigen offenen Nahrungshabitaten bzw. Arten, die zwischen Brut- und Nahrungshabitat weitere Strecken zurücklegen und dabei in größeren Höhen fliegen. Zu dieser als Großvögel bezeichneten Gruppe zählen Weiß- und Schwarzstorch, Löffler, Graureiher, Kormoran, Gänse, Mittel- und Gänseäger, Möwen, Seeschwalben, Greifvögel und Eulen. Andererseits gibt es Hinweise darauf, dass Greifvögel durch ihr gut ausgeprägtes räumliches Sehvermögen einer relativ geringen Gefährdung durch Drahtanflug unterliegen (BERNSHAUSEN et al. 1997; LANGGEMACH 1997). Bei Wander- und Baumfalken sowie Fischadlern, die in einigen Bundesländern erfolgreich auf Freileitungen brüten (LÄNDERARBEITSGEMEINSCHAFT NATURSCHUTZ LANA 2010; MEYBURG et al. 1995) (vgl. Abschn. 3.1.3.3), kann eine verminderte Kollisionsgefährdung durch Freileitungen im Brutgebiet angenommen werden.

Prädestiniert für Leitungsanflug durch Schwarzstörche sind Freileitungsbereiche in Waldschneisen, wo sich die Leiterseile für den fliegenden Vogel optisch nicht genug von dem dunklen Hintergrund (Wald) abheben (RYSILAVY U. PUTZE 2000).

Eine bestandsgefährdende Wirkung durch Kollisionen an Hoch- und Höchstspannungsfreileitungen ist generell für solche Brutvogelarten zu befürchten, deren Vorkommen selten bzw. deren Brutbestandssituation ohnehin kritisch ist. Nach HÖTKER (2004), LITZBARSKI U. LITZBARSKI (1996), RYSILAVY U. PUTZE (2000) bzw. ALTEMÜLLER U. REICH (1997) trifft dies in Deutschland insbesondere auf Schwarzstorch, Großtrappe und Wiesenweihe zu. Weitere durch Kollisionen an Freileitungen besonders betroffene und als besonders schützenswert geltende Brutvogelarten des Anhang I der Vogelschutzrichtlinie (79/409/EWG) sind Weißstorch, See-, Fisch- und Schreiadler, Korn- und Rohrweihe, Wespenbussard, Rotmilan, Uhu und Kranich (ALTENKAMP et al. 2001; HÖTKER 2004; LANGGEMACH 1997; MLUR 2006; NLWKN 2009). Angesichts der gravierenden Bestandseinbrüche der Wiesenbrüter kann Leitungsanflug gerade bei lokalen Restpopulationen dieser Arten ebenfalls eine hohe Gefährdung bedeuten (ALTEMÜLLER U. REICH 1997). Zu diesem Artenspektrum gehören Kiebitz, Großer Brachvogel, Rotschenkel, Bekassine, Wachtel-

könig, Kampfläufer (BOSCHERT 2005) und im weiteren Sinne auch das Tüpfelsumpfhuhn (NLWKN 2009).

Vogelschlag bei Rastvögeln

Rastvögel unterliegen aufgrund fehlender Ortskenntnisse gegenüber Brut- bzw. Standvögeln einer erhöhten Kollisionsgefahr (BERNSHAUSEN et al. 1997; HOERSCHELMANN 1997). Wenn Freileitungstrassen Schlafgebiete und Nahrungsflächen von Rastvögeln voneinander trennen – das ist z.B. oft bei Kranichen, nordischen Gänsen oder Schwänen der Fall – müssen die Leitungen mindestens zweimal täglich von den Rastvögeln überquert werden (MUGV 2003).

Insbesondere an größeren Rastplätzen legen Kraniche aufgrund des entstehenden Nahrungsbedarfs und Fraßdrucks im unmittelbaren Umfeld des Schlafgewässers täglich Entfernungen bis zu 20 km zu ihren Nahrungsflächen zurück. Dadurch kommt es regelmäßig zu Flugbewegungen in vollständiger Dunkelheit, die darüber hinaus an starken Zugtagen bis weit in die Nacht anhalten können. Hieraus ergibt sich ein hohes Kollisionsrisiko (vgl. MUGV 2003). Zudem kann es auch bei guten Sichtbedingungen zum Leitungsanflug kommen, wenn Vögel durch Störungen fluchtartig losfliegen und unkontrolliert in die Leitungsseile geraten (KAHLERT et al. 2005).

Einen Gewöhnungseffekt stellte SELLIN (2000) bei Silbermöwen fest, die einen außerhalb der Brutzeit regelmäßig genutzten Schlafplatz täglich zielsicher und in knapper Höhe über eine 380-kV-Freileitung hinweg ansteuerten. Bei diesen Möwen, von denen ein Teil auch im Gebiet brütete, kam es aber vermutlich bereits während der Brutzeit zu einem Gewöhnungseffekt an die Freileitung (SELLIN 2010).

Vogelschlag bei Zugvögeln

Bei Zugvögeln kommt es im Gegensatz zu Brut- und in einem gewissen Maße auch Rastvögeln aufgrund der höchstens kurzzeitigen Verweildauer in einem Gebiet, nicht zu einem Gewöhnungseffekt an Freileitungen. Vor diesem Hintergrund gelten sie generell als besonders von Kollisionen betroffen (BERNSHAUSEN et al. 1997; HAAS et al. 2003; HÖLZINGER 1987).

Einige Arten fliegen je nach Topographie, Wetterverhältnissen (v.a. Windstärke und Windrichtung) und artspezifischer Charakteristik tagsüber in den kritischen Höhenbereichen von 20–65 m, in denen sich die Seile befinden. In der Nacht sind die Flughöhen von Zugvögeln bei guter Witterung meist höher, jedoch bei schlechter Witterung wieder im kritischen Bereich der Leiterseile (GATTER 2000).

Die Häufigkeit der Drahtanflüge fällt nachts und in der Dämmerung im Verhältnis zu tagsüber größer aus und spiegelt sich in einer Häufigkeitsverteilung von etwa 85:15 % wieder (HAAS et al. 2003; HÖLZINGER 1987). Dies ist vor allem darauf zurückzuführen, dass die Mehrzahl der Vögel nachts zieht und die Leitungen in der Nacht für die Vögel schlecht zu erkennen sind. Bestimmte Wetterlagen, z.B. Niederschläge und starker Wind, erhöhen die Unfallhäufigkeit (HÖLZINGER 1987; KAHLERT et al. 2005). Für Langstreckenzieher, die auf ihrem Zugweg zahlreiche Trassen queren müssen, besteht darüber hinaus ein erhöhtes Kollisionsrisiko (HAAS et al. 2003).

3.1.2.6.2 Stromschlag

Die Gefahr eines Stromschlages geht von Leitungen der Mittelspannung, nicht aber von Leitungen der Höchstspannung aus. Stromschlag entsteht durch die Überbrückung von Spannungs-

potenzialen (RICHARZ 2001), was durch Erdschluss zwischen spannungsführenden Leitern und geerdeten Bauteilen oder als Kurzschluss zwischen Leiterseilen verschiedener Spannung geschehen kann. Hierbei überbrückt der Vogel mit seinem Körper, oder in seltenen Fällen mittels Harnstrahl, Leitungen verschiedener Spannungen oder geerdete Bauteile (Erdseile, Masten und Isolatoren) und Leiterseile, wodurch ein Kurzschluss/Erdschluss ausgelöst wird (HÖLZINGER 1987; HÜPPOP 2004). Der Vogel erfährt dabei schwere bis tödliche Verletzungen. Zudem besteht die Möglichkeit, dass sich ein Lichtbogen zwischen Tier und Leiterseil bildet und ebenfalls zu tödlichen Verletzungen führt (HAAS U. NIPKOW 2005).

Kurzschlüsse werden an Freileitungen verursacht, deren Leiterseile dicht beieinander liegen (Abstand weniger als 130 cm) oder nur sehr kurze oder aufrechtstehende Stützisolatoren aufweisen. Dies kann bei Tragmasten mit Stützisolatoren, gewissen Abspannmasten, Maststationen mit Transformator und Schaltermasten der Fall sein (FIEDLER U. WISSNER 1989, BREUER 2007), die vorzugsweise bei älteren Mittelspannungsfreileitungen (bis 60 kV) verwendet wurden. Bei höheren Spannungen (110 bis 380 kV) ist der Abstand zwischen Leiterseilen und Mast bzw. zwischen den einzelnen Seilen größer und eine zum Stromtod führende Überbrückung kann vermieden werden (RICHARZ 2001). Freileitungsmasten gelten als vogelsicher, wenn der Abstand zwischen einem möglichen Sitzplatz der Vögel und den unter Spannung stehenden Teilen mehr als 60 cm beträgt (HAAS U. NIPKOW 2008, S. 9). Die in HOFMANN et al. (2012, Teil I, Abschn. 1.3.2.2) aufgeführten konventionellen Höchstspannungsmasten zeigen einen Leiterabstand von mind. 6,6 m.

3.1.2.6.3 Habitatbeeinträchtigung

Die artenschutzrechtlich zu schützenden Fortpflanzungs- oder Ruhestätten (Schlaf-, Mauser- und Rastplätze) der europäischen Vogelarten sind beispielsweise Balzplätze, Paarungsgebiete, Neststandorte, Brutplätze oder -kolonien. Entscheidend für das Vorliegen einer Beeinträchtigung ist die Feststellung, dass eine Verminderung des Fortpflanzungserfolges oder der Ruhemöglichkeiten des betroffenen Individuums oder der betroffenen Individuengruppe wahrscheinlich ist. Dieser funktional abgeleitete Ansatz bedingt, dass sowohl unmittelbare Wirkungen der engeren Fortpflanzungs- und Ruhestätte als auch graduell wirksame und/oder „schleichende“ mittelbare Beeinträchtigungen zu werten sind.

Mit der Errichtung von Höchstspannungsfreileitungen treten baubedingte Wirkungen lokal und temporär im Baubereich auf und beziehen sich sowohl auf die eigentlichen Baumaßnahmen mit Baugeräten und Baufahrzeugen einschließlich der Lärm-, Licht- und sonstigen Emissionen, als auch auf den Bauzulieferverkehr mit LKW. Während der Bauphase ist durch menschliche Anwesenheit, Maschineneinsatz und Lärm in erster Linie von akustischen und visuellen Störungen auf Vögel, einer kleinräumigen Verschlechterung der Nahrungsbedingungen durch Flächenumwandlung (Zuwegung, Material- und Gerätelager) sowie möglicherweise der mechanischen Zerstörung von Brutstandorten auszugehen. Betroffen davon sind Brut- und Rastvögel sowie Nahrungsgäste.

Je nach Intensität der Störung und artspezifischer Störempfindlichkeit kann nicht ausgeschlossen werden, dass es während der Bauphase zu einmaliger Scheuchwirkung, höheren Fluchtdistanzen oder endgültiger Vergrämung, insbesondere von kulturflüchtenden Arten kommt. Finden Baumaßnahmen während der Brutzeit statt, sind prinzipiell Verluste von Gelegen und flugfähigen Jungvögeln denkbar.

In durch Schall- bzw. Lärmemissionen und Bewegung vorbelasteten Gebieten ist anzunehmen, dass sich die vorkommenden Vogelarten durch eine relativ große Störungstoleranz auszeichnen.

Neben den baubedingten Wirkungen kann es zu Beeinträchtigungen während des Betriebs kommen. Als potenzielle Beeinträchtigung der Vogelwelt durch Höchstspannungsfreileitungen ist die Habitatentwertung durch Habitatzerschneidung, Scheuchwirkung und Vergrämung/permanente Meidung zu betrachten. Zudem kann es durch Ausweichmanöver und „Hindernisflüge“ bei den Vögeln zu energetischen Engpässen kommen, die sich auf die Überlebens- bzw. Reproduktionschancen auswirken (HÜPPOP 2004).

Für einige Vogelarten wurden verminderte Raumnutzungsintensitäten bzw. Meidungen im Nahbereich von Leitungstrassen festgestellt. Je nachdem, ob sich die Vögel länger in einem Gebiet aufhalten oder es nur kurzzeitig frequentieren, unterscheiden sich die Auswirkungen in ihrem quantitativen und qualitativen Ausmaß. Im Folgenden wird zwischen Brut-, Nahrungs- und Rasthabitaten sowie Wanderkorridoren von ziehenden Vögeln unterschieden.

Beeinträchtigung von Bruthabitaten

Insbesondere freibrütende Arten des Offenlandes wie Wiesenbrüter und Vögel der Agrarlandschaft sind durch Scheuch- und Silhouettenwirkung betroffen. Die genannten Artengruppen sind auf offene, optisch weite Landschaften, u.a. zum Schutz vor Fressfeinden (Greif- und Rabenvögeln), angewiesen. Da Freileitungsmasten von diesen Prädatoren gerne als Ansitzwarten genutzt werden, können unter Umständen Vergrämungseffekte und Eingriffe in das Räuber-Beute-Verhältnis auftreten (ALTEMÜLLER U. REICH 1997).

Eine Zunahme der Prädation durch auf Strommasten sitzende Greif- und Rabenvögel wurde bei Wiesenvögeln (bspw. Kiebitz, Rotschenkel, Großer Brachvogel) festgestellt. Während fliegende Beutegreifer oft erfolgreich durch Luftangriffe aus der Nestumgebung vertrieben werden können, versagt diese Abwehrstrategie gegen ansitzenden Prädatoren. Vielmehr haben diese die Möglichkeit, die brütenden Limikolen ausdauernd zu beobachten und eine passende Gelegenheit abzuwarten. Eine einzige Störung (z.B. durch Menschen) kann dann ausreichen, um dem Beutegreifer den Weg zum Gelege zu ermöglichen (ALTEMÜLLER U. REICH 1997; ALTENKAMP et al. 2001). Bei kritischen Bestandsgrößen kann dies zum Erlöschen von Populationen führen.

Von verschiedenen Limikolenarten und der Feldlerche ist bekannt, dass sie in der Nähe von Freileitungen nicht mehr brüten. In Baden-Württemberg wurde nachgewiesen, dass ehemals besetzte Brutplätze von Kiebitz, Bekassine und Großem Brachvogel nach der Errichtung von Hochspannungsleitungen gemieden wurden (HÖLZINGER 1987). Allerdings konnte in dieser Studie nicht abschließend geklärt werden, ob die Brutaufgaben ausschließlich auf die Wirkung der Freileitungstrasse zurückzuführen waren.

ALTEMÜLLER U. REICH (1997) fanden in ihrer Untersuchung im Haseldorfer Altpolder westlich von Hamburg zwar heraus, dass der Kiebitz die dortigen Leitungen (380 und 110 kV) nicht meidet, doch fanden auch sie keine Brutnachweise innerhalb eines beidseitigen 100-Meter-Korridors entlang der Leitungen. Demgegenüber brütete der Große Brachvogel auch in unmittelbarer Nähe der Leitung.

In Westzijderveld und De Reef (Niederlande) nutzten Kiebitze, Uferschnepfen, Bekassinen und Kampfläufer die Bereiche entlang von Hochspannungsleitungen (150–380 kV) auf einer beidseitigen Breite von ca. 100 m nicht mehr als Brutplätze. Lediglich Austernfischer brüteten noch

innerhalb der Hochspannungstrasse (HEIJNIS 1980). Bei Untersuchungen im Elbe-Weser-Dreieck konnte hingegen kein Einfluss von Hochspannungsleitungen auf das Brutverhalten von Kiebitz und Großem Brachvogel beobachtet werden. Dagegen konnte für die Feldlerche eine signifikante Bevorzugung leitungsferner Bereiche und eine Meidung von etwa 100 m zu den Freileitungstrassen nachgewiesen werden (ALTEMÜLLER U. REICH 1997).

Schreiadler gehören zu den Arten mit der größtmöglichen Sensibilität gegenüber anthropogen bedingten Störwirkungen wie Freileitungen, Verkehrswegen oder Windkraftanlagen. Freileitungen können die Altvögel von Nahrungsflächen fernhalten und dadurch direkt den Bruterfolg beeinflussen, die Luftbalz und andere interspezifische Beziehungen zwischen benachbarten Paaren beeinträchtigen bzw. möglicherweise komplett unterbinden. Bereits kleine Störwirkungen des Brutverlaufs infolge störungsbedingter Meidung von wichtigen Nahrungsflächen können zur Aufgabe eines Brutplatzes führen (MUGV 2003). Eine entgegengesetzte Wirkung geht gerade in baumlosen bzw. strukturarmen Landschaften auf bestimmte Vogelarten aus, die Hochspannungsfreileitungsmasten als Niststandort nutzen. Kolkraben und Rabenkrähen bauen Nester auf Gittermasttraversen, die später oft in Folgenutzung durch Turm- und Baumfalken übergehen. Regional brüten manchmal mehr Individuen einer Art auf Masten als an ihren ursprünglichen Standorten, wie bspw. Baumfalken im Altenburger und Kohrener Land oder Fischadler in Nordostdeutschland. Der Reproduktionserfolg der Mastbrüter kann dabei höher ausfallen als bei den Baumbrütern (LÄNDERARBEITSGEMEINSCHAFT NATURSCHUTZ (LANA) 2010; MEYBURG et al. 1995).

Weißstorchhorste sind hingegen bereits auf 110-kV-Freileitungsmasten in Mitteleuropa verhältnismäßig selten. In Österreich siedelte sich im Rheintal bei Hohenems/Vorarlberg ein Storchenpaar auf einem mit 220/380 kV bespannten Tragmast (Typ Tonne) der Vorarlberger Illwerke an und hielt den Brutplatz von 1983 bis mindestens 2004 (ZEHFUß 2005).

Beeinträchtigung von Rasthabitaten

Rastvögel reagieren in ihren Rastgebieten mit mehr oder weniger ausgeprägtem Meideverhalten gegenüber Freileitungen. Bei überwinterten arktischen Gänsen wurde in Nordrhein-Westfalen in Trassennähe (220 kV) vermehrtes Sichern (erhöhte Wachsamkeit, kürzere Fraßphasen) und weniger Komfortverhalten (Ruhen) festgestellt, was auf erhöhten Stress hindeutet und die Nahrungsaufnahmerate beeinträchtigt. In den leitungsnahe Bereichen (40–60 m Abstand) grasten deutlich weniger Gänse als in trassenfernen Bereichen, auch wurden kleine Weideflächen, die durch Freileitungen von der restlichen Fläche getrennt waren, kaum noch genutzt (BALLASUS U. SOSSINKA 1997; SOSSINKA 2000). Dieses Phänomen ist generell auch für 380-kV-Freileitungen anzunehmen, die in Habitaten rastender Vögel errichtet werden. Bei Untersuchungen in der Niederlausitz, Brandenburg, wurde bei rastenden Gänsen, Kiebitzen, Goldregenpfeifern, Kornweihen, Merlinen und Raufußbussarden ein deutliches Meideverhalten gegenüber einer 380-kV-Freileitungstrasse festgestellt (MÖCKEL U. WIESNER 2007, S. 37–38).

Durch den „Kammerungseffekt“ (RICHARZ 1998, S. 157) von Leitungstrassen können je nach Art wichtige Nahrungsflächen entwertet werden. Nach BORBACH-JAENE (2002) entwertet eine lineare Störquelle auf einer Länge von 1 km bei Randlage mehrere Hektar Nahrungsfläche. Ein nur um 10 m größerer Abstand der Vögel zur Trasse führt bei gleicher Streckenlänge zu einer Entwertung von einem weiteren Hektar. Zerschneidet die Struktur eine Nahrungsfläche, so verdoppelt sich dieser Wert. Dies ist bei Gänsen, Schwänen und einigen Entenarten insofern kritisch zu be-

urteilen, da für diese Vögel „aufgrund ihrer herbivoren Ernährungsweise Fläche gleich Nahrungsangebot“ (BORBACH-JAENE 2002) bedeutet.

Auch für Rastvögel wie Kraniche, die in ihren traditionellen Herbstrastgebieten zwischen Schlafgewässer und Nahrungsfläche Strecken von bis zu über 20 km zurücklegen (AGNL – ARBEITSGRUPPE FÜR NATURSCHUTZ UND LANDSCHAFTSPFLEGE 2006), bedeuten Freileitungen nicht nur ein erhöhtes Kollisionsrisiko, sondern auch eine Reduzierung des nutzbaren Raumes. Dadurch wird das Angebot an Ausweichmöglichkeiten bei Störungen eingeschränkt, wodurch sich die Störanfälligkeit insgesamt erhöht (AGNL – ARBEITSGRUPPE FÜR NATURSCHUTZ UND LANDSCHAFTSPFLEGE 2006).

3.1.2.6.4 Flächenkonfliktpotenziale für die Avifauna

Aus den in den Abschn. 3.1.3.1 bis 3.1.3.3 dargestellten Konfliktpotenzialen durch Draht- oder Mastenanflug, Stromschlag und Habitatbeeinträchtigung wurden zwecks Operationalisierung für die vorgreifende Planung in den nachfolgenden Tabellen Flächenkategorien mit Konfliktpotenzialen zusammengefasst. Dabei wird unterschieden, ob es sich um Planungsvorhaben im Tiefland (T) oder im Mittelgebirge (M) handelt, da sich diesbezüglich die Konfliktpotenziale leicht unterscheiden.

Tabelle 5: Sehr hohe Flächenkonflikte mit Avifauna bei Bau und Betrieb von Freileitungen

| Flächenkategorie | Beschreibung | Raumbezug |
|--|--|-----------|
| EU-Vogelschutzgebiet | Brut-, Nahrungs-, Rast- oder Zuggebiete von seltenen bzw. bedrohten Arten (Anhang I VSchRL) | T,M |
| Ramsar-Gebiet | Brut-, Nahrungs-, Rast- oder Zuggebiete von seltenen bzw. bedrohten Arten (Anhang I VSchRL) | T,M |
| Brutreviere kollisionsgefährdeter Großvögel mit seltenem / bedrohten Vorkommen (Anhang I VSchRL) | insb. Brutreviere von Schwarzstorch, Uhu, Seeadler, Kranich, Brutkolonien von Löffler, Schwarzkopfmöwe und ggf. Seeschwalben | T,M |
| Schwerpunkträume kollisionsgefährdeter Wiesenbrüter (teilweise Anhang I VSchRL) | insb. Brutreviere von Kiebitz, Bekassine, Rot-schenkel, Großer Brachvogel, Bekassine, Kampfläufer, Wachtelkönig | T |
| Flussmündungen im Gezeitenbereich | Zugtrichter und Nahrungsfläche insb. für durchziehende Limikolen, Enten und Gänse | T |
| Etablierte Schlafgewässer kollisionsgefährdeter Großvögel mit seltenem / bedrohten Vorkommen (Anhang I VSchRL), sofern außerhalb von VS/Ramsar-Gebieten | Insb. Schlafgewässer von Kranich, Nonnen-gans, Sing- und Zwergschwan | T |
| Etablierte Nahrungsflächen kollisionsgefährdeter Rastvögel mit seltenem / bedrohten Vorkommen (Anhang I VSchRL), sofern außerhalb von VS/Ramsar-Gebieten | Etablierte Grünland-Äsungsflächen von insb. überwinternden Sing- und Zwergschwänen, Nahrungsflächen von insb. rastenden Goldre-genpfeifern in den Marschen | T |

Legende: T: Tiefland, M: Mittelgebirge

Tabelle 6: Hohe Flächenkonflikte mit Avifauna bei Bau und Betrieb von Freileitungen

| Flächenkategorie | Beschreibung | Raumbezug |
|--|---|-----------|
| Küstenstreifen | Leitlinie und Rastgebiet für ziehende Land- und Wasservögel | T |
| Fließgewässer | Leitlinie und Nahrungsfläche für ziehende Land- und Wasservögel | T,M |
| Nahrungs- und Rastflächen seltener / bedrohter Großvogelarten (Anhang I VSchRL), | Bspw. Nahrungsflächen von Graugänsen | T,M |
| Etablierte Schlafgewässer kollisionsgefährdeter Vogelarten mit häufigem Vorkommen | Schlafgewässer von überwinternden Reiher- und Tafelenten, Grau-, Bläss- und Saatgänsen | T,M |
| Brutkolonien und –plätze kollisionsgefährdeter Großvögel mit häufigem Vorkommen | Insb. Brutkolonien von Graureiher, Kormoran und Möwen (mit Ausnahme Schwarzkopfmöwe) | T,M |
| Großräumige Brut- und Nahrungshabitatkomplexe seltener / bedrohter Großvogelarten (Anhang I VSchRL), (Scheuchwirkung, Segmentierung) | Großräumige Lebensraumkomplexe von insb. Schwarz- und Weißstorch, Schreiadler, Seeadler | T,M |
| Bruthabitate seltener / bedrohter Vogelarten (teilweise Anhang I VSchRL) (Scheuchwirkung, Vergrämung) | Lebensräume insb. von Wiesenbrütern | T,M |

Legende: T: Tiefland, M: Mittelgebirge

Tabelle 7: Erhöhte Flächenkonflikte mit Avifauna bei Bau und Betrieb von Freileitungen

| Flächenkategorie | Beschreibung | Raumbezug |
|---|---|-----------|
| Nahrungs- und Rastflächen häufiger Vogelarten (Habitatsegmentierung, Scheuchwirkung oder Vergrämung) | insb. Nahrungsflächen von Grau- und Blässgänsen | T,M |
| Zeitweilige Nahrungsflächen kollisionsgefährdeter Vögel mit häufigem bis seltenem / bedrohten Vorkommen (teilweise Anhang I VSchRL) | Äcker und anderen Flächen, deren Nahrungsangebot sich in Abhängigkeit der Bewirtschaftungsform verändert (insb. für Kranich, nordische Schwäne und Gänse, Kiebitze, Goldregenpfeifer) | T,M |
| Talzüge als Leitlinien des Vogelzuges | Leitlinien für ziehende Landvögel | M |

Legende: T: Tiefland, M: Mittelgebirge

3.1.3 Vermeidungs- und Minderungsmaßnahmen

3.1.3.1 Übersicht

Eine generell wirkungsvolle Methode der Vermeidung oder Verminderung negativer Auswirkungen ist die Wahl eines konfliktarmen Trassenverlaufs. Insbesondere bei den Mastbauarbeiten ist darauf zu achten, dass schutzwürdige und wenig mobile Tiere geschont werden, bspw. durch Absammlung und Umsiedelung. Verletzungen oder Tötungen lassen sich in der Regel dadurch vermeiden, dass die potenziellen Habitate rechtzeitig auf das Vorkommen schutzwürdiger Arten geprüft werden. Durch die Feinplatzierung der Maststandorte können so Standorte gemieden werden, die wichtige Lebensraumfunktionen, v.a. für Käferarten, Reptilien, Vögel und Land-

säugetiere, erfüllen. Auch eine Bauzeitbeschränkung auf Jahreszeiten mit geringer Aktivität geschützter Arten kann das Verletzungs- und Tötungsrisiko mindern. Durch eine Mahd vor Beginn der Brutzeit kann die Ansiedlung von Bodenbrütern vermieden werden, so dass diese nicht von den Bauarbeiten beeinträchtigt werden.

Nach dem Artenschutzrecht können „vorgezogene Ausgleichsmaßnahmen zur Sicherung der ökologischen Funktion im räumlichen Zusammenhang“ (§ 44 Abs. 5 BNatSchG) durchgeführt werden, die auf eine aktive Verbesserung oder Erweiterung einer Fortpflanzungs- oder Ruhestätte abzielen und sich insofern von den klassischen Vermeidungsmaßnahmen, die lediglich die Schonung der Fortpflanzungs- und Ruhestätte im Blick haben, unterscheiden. Geeignete funktionserhaltene Maßnahmen, die bereits zum Eingriffszeitpunkt wirksam sind, können der Erhaltung lokaler Populationen dienen eine vorhabensbedingte Störung von Individuen einer Art dann nicht als erheblich im Sinne des § 44 Abs. 1 Nr. 2 BNatSchG anzusehen ist (BVerwG, Urteil v. 12.3.2008, Rdnr. 259; dazu kritisch GELLERMANN 2009, S. 12). Als eine geeignete vorgezogene Ausgleichsmaßnahme ist beispielsweise die qualitative und quantitative Verbesserung bestehender Lebensstätten oder die Anlage neuer Lebensstätten in räumlichem Zusammenhang zur betroffenen Lebensstätte zu werten. Die funktionserhaltenden Maßnahmen müssen bereits zum Eingriffszeitpunkt wirksam sein. Die Sonderregelung greift vor allem bei Arten mit kleinräumlichen Ansprüchen und/oder bei Arten, die ihre Fortpflanzungs- und Ruhestätten regelmäßig wechseln und nicht erneut nutzen (LANA 2010, S. 10f.).

Da die Eingriffe in den Boden auf die Mastfundamente (ca. 50 qm) beschränkt sind, ist zu erwarten, dass sich bei Habitatverlusten die ökologische Funktionsfähigkeit häufig im räumlichen Zusammenhang zu den Maststandorten aufrechterhalten lässt, so dass keine vorgezogenen Ausgleichsmaßnahmen notwendig werden. Bei Inanspruchnahme von Waldflächen kann die ökologische Funktionsfähigkeit aufgrund der für Freileitungen notwendigen breiten Schneisen beeinträchtigt werden. Dies kann durch ein geeignetes Schneisenmanagement mit niedrigen Gehölzen während der Betriebsphase wieder abgeschwächt werden.

Auch wird an der Entwicklung neuer Masttypen geforscht, bei denen sich die Trassenbreite aufgrund neuer Aufhängesysteme verringern lässt. Mittels Zwischenaufhängungen soll der Leiterseildurchhang verkleinert werden, wodurch auch eine Reduzierung der Masthöhe möglich ist (POHLMANN 2012).

3.1.3.2 Amphibien und Reptilien

Die Tiere können durch die Bauarbeiten gestört, verletzt oder getötet werden. Des Weiteren können ihre Wanderwege, Aufenthalts- und Fortpflanzungsstätten beschädigt oder vernichtet werden. Die Baufeldfreimachung kann durch visuelle Störungen, Lärmemissionen, Erschütterungen und der Entfernung von Vegetation zu Beeinträchtigungen führen.

Im Vergleich zu Erdkabeltrassen ist an Waldstandorten aufgrund der freizuschlagenden breiteren Schneisen bei Freileitungen mit erhöhten Verminderungsmaßnahmen, ggf. Ausgleichsmaßnahmen zu rechnen. Im Offenland ist es aufgrund der im Wesentlichen nur punktuellen Eingriffe an den Maststandorten von Freileitungen umgekehrt.

Amphibienleiteinrichtungen und Fanggefäße sind lediglich in Baustellennähe zu errichten bzw. aufzustellen. Gewässer werden in der Regel von den Baumaßnahmen ausgespart und dienen nicht als Maststandorte, daher müssen in der Regel keine Maßnahmen zur Erhaltung des Wasserstandes und der Uferstruktur ergriffen werden.

Zur Vermeidung einer Beeinträchtigung von Reptilien ist im Rahmen der Feintrassenplanung darauf zu achten, dass die von Reptilien beanspruchten Lebensräume umgangen werden und nicht durch Mastfundamente zerstört werden.

3.1.3.3 Fledermäuse

Beeinträchtigungen von Fledermäusen können durch vorangestellte Untersuchungen vermieden und vermindert werden. Auch sind fachgerechte Umsiedlungen möglich, wodurch Tötungs- und Störungsrisiken mit Auswirkungen auf die Fortpflanzung während der Bauphase sowie später im Betrieb abgewendet werden können.

Mit Waldüberspannungen kann vermieden werden, dass von Fledermäusen bewohnte Bäume auf breiter Trasse beeinträchtigt werden. Da die Störung von Fledermäusen in den meisten Fällen die Vernichtung von Habitatbäumen/Quartierbäumen (Sommer-, Wochen- oder Winterstuben) beinhaltet, sollten Altholzbestände geschont (ERM 2010, S. C 4.2-93) und ggf. Ersatzhabitate im Rahmen vorgezogener Ausgleichsmaßnahmen bereitgestellt werden. Über Bauzeitenregelungen können ggf. aktiv genutzte Wochenstuben geschont werden.

Durch die Schaffung von Waldschneisen im Zuge der Freileitungserrichtung können Fledermausarten begünstigt werden, da Waldränder neben Wäldern und Bestandeslücken regelmäßiger Bestandteil des Jagdgebietes fast aller heimischen Fledermausarten sind (RICHARZ 2004, S. 35).

Bei Fledermäusen kann eine Kollision mit den Leitungsseilen ausgeschlossen werden, weil die einzelnen Arten die Hindernisse durch die Ultraschallorientierung identifizieren und so meiden können. Im Gegensatz zu Windenergieanlagen (WEA) führen die Stromseile von Freileitungen keine Drehbewegungen aus, so dass sich das Kollisionsrisiko von WEA nicht auf Freileitungen übertragen lässt (OVG Münster, Urteil vom 19.3.2008).

3.1.3.4 Geschützte Landsäugetiere

Vermeidungs- und Minderungsmaßnahmen für geschützte Landsäugetiere können artenspezifisch sehr unterschiedlich ausfallen. Zur Vermeidung von Verlusten geschützter Landtiere kann eine sorgfältige Voruntersuchung sowie eine ggf. optimierte Trassenführung beitragen. Kollisionen von Baufahrzeugen mit ausweichenden Tieren lassen sich durch Abzäunungen der Baustellen vermeiden. Nächtliche Bauarbeiten sollten insbesondere bei der Querung von Fließgewässern mit Biber- und Fischotterbesatz nur nach sorgfältiger Prüfung durchgeführt werden (IBNI 2008a, S. 45 ff.). Vorgezogene Ausgleichsmaßnahmen sowie großräumige Kompensationsmaßnahmen zur Sicherung des Erhaltungszustandes können sich vorteilhaft auf die Beeinträchtigung von Landsäugetieren auswirken.

Bei der Errichtung von Freileitungen bleibt stärker als bei einer Erdkabeltrasse ein gewisser Spielraum zur Wahl der punktuellen Maststandorte. Dieser sollte besonders beim Auftreten von kleinräumigen schutzwürdigen Lebensraumtypen im Bereich der Trassenführung ausgenutzt und der Standort möglichst konfliktfrei gewählt werden. In Bereichen mit Wuchshöhenbeschränkung bietet sich die niederwaldartige Nutzung von Waldbiotopen an (ERM 2010, S. C 4.2-161).

In waldarmen Regionen sollte eine Trassenführung durch Wälder möglichst vermieden werden. Ist dies nicht möglich, können Trennwirkungen für waldbewohnende Tiere und Windbruchgefahr

durch ein sog. Trassenmanagement, d.h. eine naturnahe gestufte Waldrandgestaltung und die Pflanzung von Büschen im Nahbereich der Leitung reduziert werden. Hierzu bedarf es während des Betriebs allerdings regelmäßiger Kontrollen und Pflegemaßnahmen.

3.1.3.5 Avifauna

Über Bauzeitenregelungen kann ggf. vermieden werden, dass lärm- und störungsempfindliche Vogelarten in sensiblen Entwicklungsstadien bzw. Lebenszyklen (Brut, Aufzucht, Mauser) durch Bauarbeiten für Freileitungen beeinträchtigt werden (vgl. Abschn. 3.1.3.3).

Ist eine Verlegung der Bauarbeiten nicht auf einen Zeitraum außerhalb der Brutzeit möglich, können Brutvögel noch vor Beginn der Brutzeit vergrämt werden, wodurch eine Ansiedlung verhindert wird und es im Laufe der Baumaßnahmen nicht zu Brutverlusten kommt (GEO et al. 2009).

Vogelschlag

Bei Trassenabschnitten mit hoher bzw. erhöhter Kollisionsgefahr sollten optische Markierungen angebracht werden (DEUTSCHE UMWELTHILFE – FORUM NETZINTEGRATION ERNEUERBARE ENERGIEN 2010, S. 75). Der flächendeckende, verpflichtende Einsatz von Vogelschutzmarkierungen an den Erdleitern wurde 2010 in den Plan N aufgenommen, aber bis April 2012 noch nicht umgesetzt (DEUTSCHE UMWELTHILFE – FORUM NETZINTEGRATION ERNEUERBARE ENERGIEN 2012, S. 13). Die Abstände der Marker sollen sich hierbei an der Sensibilität der jeweiligen Gebiete orientieren (DEUTSCHE UMWELTHILFE – FORUM NETZINTEGRATION ERNEUERBARE ENERGIEN 2012, S. 51). Da das Erdseil aufgrund seiner oft schlechten Sichtbarkeit für die meisten Kollisionen verantwortlich ist, sind Markierungen am Erdseil die erste Wahl. Vogelschutzmarkierungen sollten aus technischer Sicht möglichst leicht sein und das Seil schonen – für den Vogelschutz steht Auffälligkeit im Vordergrund. Vornehmlich werden heute flexible Kunststoffbänder oder feste, abstehende Kunststoffstäbe als Markierungen verwendet. Für die nachträgliche Sicherung von Leitungsabschnitten hat sich das Anbringen von Markern mit Schwarz-Weiß-Blinkeffekten bewährt, die das Erkennen der Leitungen – insbesondere des Erdseils – erleichtern und die auch bei ungünstigen Lichtverhältnissen noch wahrgenommen werden können. Untersuchungen aus den Niederlanden zeigen, dass dadurch mit einer Reduzierung des Vogelschlagrisikos um bis zu 90 % zu rechnen ist (KOOPS 1997). In Spanien und Großbritannien hat sich der Einsatz farbiger *Flight Diverters*, etwa 30–100 cm langer spiralförmiger Markierungen, die auf die Seile gezogen werden, bewährt (FROST 2008; JANSS U. FERRER 1997). In Deutschland hat sich u. a. die RWE Rhein-Ruhr Netzservice GmbH auf entsprechende Dienstleistungen spezialisiert.

Da tagsüber die meisten Kollisionen nicht mit den Leiterseilen, sondern mit dem Erdseil stattfinden, sollte aus ornithologischer Sicht der Abstand zwischen Erdseil und Leiterseilen möglichst gering sein. Dieser Anspruch darf jedoch mit der Blitzschutzwirkung des Erdseils in Konflikt stehen. Das Kollisionsrisiko während der Dunkelphase kann alternativ durch Beleuchtung, Reflektoren und akustische Signale gesenkt werden (HOERSCHELMANN et al. 1988; KAHLERT et al. 2005).

Auch die Wahl des Masttyps kann zur Verminderung der negativen Auswirkungen der Freileitung auf die Avifauna beitragen, da bei Einebenen-Masten weniger Vogelanzüge zu erwarten sind als bei Mehrebenen-Masten (DEUTSCHE UMWELTHILFE – FORUM NETZINTEGRATION ERNEUERBARE ENERGIEN 2010, S. 75).

Stromschlag

Die Gefährdung von Vögeln durch Stromschlag an Höchstspannungsleitungen wird aufgrund großer Abstände zwischen Leiterseilen untereinander sowie dem Mast in der Literatur als sehr gering eingestuft. Diese Einschätzung wird auch indirekt durch das Bundesnaturschutzgesetz belegt, das in § 41 Vorschriften zum Vogelschutz für Mittelspannungsleitungen anführt, aber nicht für Hoch- oder Höchstspannungsleitungen. Weitere Maßnahmen zur Minimierung des Restrisikos erscheinen im Hinblick auf Stromschlag nicht notwendig.

Beeinträchtigung von Habitaten

Eine für Vogelschutzbelange optimierte Trassenplanung kann betriebsbedingte Beeinträchtigungen von Brut-, Nahrungs- und Rasthabitaten sowie Wanderkorridoren von Zugvögeln deutlich mindern. Vermeidungspotenziale liegen im Wesentlichen in der Meidung avifaunistischer Schwerpunktbereiche. Die Beeinträchtigung des Erhaltungszustandes der lokalen Populationen betroffener Vogelarten kann auf diese Weise weitgehend vermieden werden. Randvorkommen und Restbestände sind besonders sensibel gegenüber Beeinträchtigungen.

Störende Auswirkungen auf Vögel lassen sich beim Bau von Höchstspannungsleitungen besonders effektiv durch Bauzeitenfenster regeln. Das Zeitfenster wird zumeist durch die störepfindliche Brutzeit von März bis Ende August bestimmt. Regional, besonders in der Nähe von Rasthabitaten an Gewässern, sind sensible Zeitabschnitte (bspw. Mauser, Sammelschlafplätze von Wasservögeln im Herbst) zu berücksichtigen. In einigen Landesnaturschutzgesetzen sind von vornherein Sperrzeiten für Rodungsarbeiten festgelegt. Gemäß § 39 Abs. 5 BNatSchG dürfen vom 01. März bis 30. September keine Bäume außerhalb des Waldes, von Kurzumtriebsplantagen oder gärtnerisch genutzten Grundflächen sowie sonstigen Gehölzen beseitigt werden. Einige Landesgesetze machen weitergehende Angaben.

3.1.3.6 Geschützte Pflanzen

Durch eine Verschiebung der Maststandorte und eine veränderte Trassenführung lassen sich bekannte Standorte geschützter Pflanzenarten schonen. Falls dies nicht möglich ist, können in dafür geeigneten Fällen als vorgezogene Ausgleichsmaßnahme die bedrohten Bestände vor den Bauarbeiten entfernt und an anderer Stelle verpflanzt werden. Das Konfliktpotenzial geschützter Pflanzenarten ist bei der Errichtung von Freileitungen im Offenland auf der Ebene der Entwurfsplanung und Feintrassierung gut eingrenzbar. Bei der Errichtung von Freileitungen in ausgedehnten Waldbeständen ergibt sich im Falle breiter Schneisen ein erheblicher Ausgleichsbedarf.

3.2 Auswirkungen von 380-kV-Höchstspannungsgleichstrom-Freileitungen

3.2.1 Gefährdungsfaktoren für Tiere und Pflanzen durch Freileitungen

Die unter 3.1.1 für 380-kV-Höchstspannungs-Drehstrom-Freileitungen angeführten Gefährdungsfaktoren für Tiere und Pflanzen können auch für Höchstspannungs-Gleichstrom-Freileitungen angenommen werden.

Milchkühe gehören weder zu den wild lebenden Tieren, noch zu den europäisch geschützten Arten, doch sei an dieser Stelle kurz auf eine Studie verwiesen, die die Gesundheit und Produktivität von Milchkühen in der Nähe von einer 400-kV-HGÜ-Leitung in Minnesota untersuchte und

die ggf. Rückschlüsse auf andere Tierarten erlaubt. Die Studie erstreckte sich über sechs Jahre und umfasste die drei Jahre vor und die drei Jahre nach Errichtung der Leitung. Weder Gesundheit noch Produktivität wurden beeinflusst. Auch die Entfernung zur Leitung, untersucht für Abstände von weniger als 0,25 Meilen bis zu 10 Meilen, war nicht relevant (HEALTH SCIENCE GROUP 2011, S. 37 zit. nach MARTIN et al. 1983). Eine Untersuchung an Kälbern, die sich in Ställen direkt unterhalb oder 615 m entfernt von der Pacific Intertie ± 500 -kV-HGÜ-Leitung befanden, ergab innerhalb eines Untersuchungszeitraumes von drei Jahren keine Unterschiede hinsichtlich Fortpflanzung, Trächtigkeitsraten, Kalbungen, Kalbungsintervallen, Körpermasse bei der Geburt, Körpermasse nach der Entwöhnung oder Sterblichkeitsrate. Hierbei waren die Kälber unterhalb der Leitung im Mittel 5 kV/m und 13.000 Ionen/cm³ ausgesetzt (HEALTH SCIENCE GROUP 2011, S. 37 zit. nach ANGELL et al. 1990).

3.2.2 Schädigung von Pflanzenbeständen

Die unter 3.1.2 für 380-kV-Höchstspannungs-Drehstrom-Freileitungen angeführten Angaben zur Zerstörung von Pflanzenbeständen können auch für Höchstspannungs-Gleichstrom-Freileitungen angenommen werden.

Die HEALTH SCIENCE GROUP (2011, S. 38) berichtet von Untersuchungen zu von Luftionen hervorgerufenen Veränderungen an Pflanzen. Manche Studien berichten von erhöhtem Pflanzentrockengewicht bei Getreidearten, wenn die Pflanzen Konzentration zwischen 5.000 und 13.000 Ionen/cm³ ausgesetzt sind (KRUEGER et al. 1962, 1963 in HEALTH SCIENCE GROUP 2011, S. 38). Andere berichten von veränderten Frisch- aber unveränderten Trockengewichten, wobei gesteigertes Wachstum beobachtet wurde (WACHTER U. WIDMER 1976 in HEALTH SCIENCE GROUP 2011, S. 38). Eine Studie an Tomaten zeigte verstärktes Wachstum, höhere Fruchtzahl und Qualität bei Ionenkonzentrationen von etwa 10.000 Ionen/cm³ (YAMAGUCHI U. KRUEGER 1983 in HEALTH SCIENCE GROUP 2011, S. 38).

3.2.3 Gefährdung der Avifauna

In weiten Teilen kann das unter 3.1.3 für 380-kV-Höchstspannungs-Drehstrom-Freileitungen angeführte Gefährdungspotential für die Avifauna auch für Höchstspannungs-Gleichstrom-Freileitungen angenommen werden.

Anders als bei der Drehstromtechnik handelt es sich bei Gleichstrom um statische elektrische und magnetische Felder. Das von Vögeln wahrgenommene statische Erdmagnetfeld ist ein Gleichfeld mit einer magnetischen Flussdichte von 30 bis 65 μ T (in Europa, ALTEMÜLLER U. REICH 1997, HAMANN et al. 1998 und SILNY 1997). Die magnetischen Flussdichten unter HGÜ-Leitungen werden mit Werten deutlich unterhalb des Erdmagnetfeldes angegeben. ALTEMÜLLER U. REICH (1997) nennen 13 μ T in 1 m über dem Boden an einer 380-kV-Freileitung, während andere Quellen von 20 μ T (NRL 2008, S. 23) und 25 μ T (ICNIRP 2009, 505; NRL 2008, S. 23) ausgehen. Eine mögliche Beeinflussung der Erdmagnetfeld-Orientierung von Zugvögeln ist daher unwahrscheinlich und allenfalls auf den Bereich direkt über der Freileitung begrenzt (vgl. Anschn. 3.1.2.6).

Die DEUTSCHE UMWELTHILFE – FORUM NETZINTEGRATION ERNEUERBARE ENERGIEN (2010, S. 75) fordert, dass die Leiterseiltemperaturen 80 °C nicht überschreiten dürfen, um Verbrennungen bei Vögeln und Verendung an den Folgeverletzungen auszuschließen und betont, dass ein Moni-

toring von HGÜ-Pilotprojekten für Hochtemperaturseile notwendig zur Erforschung möglicher Auswirkungen von höheren Temperaturen auf den Vogelanzug ist.

3.2.4 Vermeidungs- und Minderungsmaßnahmen

Die im Abschn. 3.1.4 für 380-kV-Höchstspannungs-Drehstrom-Freileitungen angeführten Vermeidungs- und Minderungsmaßnahmen gelten auch für Höchstspannungs-Gleichstrom-Freileitungen.

3.3 Nebenanlagen bei Freileitungen

Bei Wechselstromleitungen erfolgt Leistungsauskopplung und Spannungstransformation über Transformatoren im Umspannwerk. Die Leistungsauskopplung von Gleichstrom-Leitungen ist komplexer, so dass zum Umspannwerk zusätzliche Konverterstationen hinzukommen (HOFMANN et al. 2012, S. 318). Umspannwerke und Konverterstationen nehmen Fläche ein, die als potentieller Lebensraum wegfällt. So wird die Grundfläche einer Konverterstation mit ca. 100 m x 50 m (5000 m²) angegeben (bei 1000 MW, HOFMANN 2012, S. 27), während Übergangsbauwerke zur Verbindung einer Freileitung und eines Erdkabels eine Grundfläche in einer Größenordnung von 2100–2500 m² haben (POLSTER et al. 2009, S. 27; HOFMANN 2012, S. 23).

3.4 Auswirkungen von 380-kV-Höchstspannungsdrehstrom-Erdkabeln

3.4.1 Übersicht

Die wildlebenden Arten nach Anhang IV der FFH-Richtlinie sowie die europäischen Vogelarten unterliegen dem Regime des besonderen Artenschutzes nach § 44 und 45 BNatSchG. Die Anforderungen wurden bereits in Abschn. 3.1.1 beschrieben. Ebenso wie von Freileitungen gehen auch von Erdkabeltrassen nachteilige Auswirkungen auf Tiere und Pflanzen aus. In der folgenden Übersicht (Tabelle 8) sind die Artengruppen wiedergegeben, aus denen europäisch geschützte Arten durch Bau und Betrieb von Freileitungstrassen gefährdet sind. Dabei ist ersichtlich, dass es bei Erdkabeln anders als bei Freileitungen v.a. durch die aufwändigen Tiefbauarbeiten zu Beeinträchtigungen bestimmter Artengruppen kommt.

3.4.2 Gefährdungsfaktoren

Bei Erdkabeln können vor allem in der Bauphase Tier- und Pflanzenarten gefährdet werden, da die Kabelverlegung umfangreiche Bodenbewegungen erfordert. In der Betriebsphase steht der Trassenbereich erneut als Standort für flachwurzeln Pflanzen oder als Habitat für Tierarten zur Verfügung. Eine mögliche Wärmeeinwirkung auf Boden u. Vegetation sowie eine ggf. erforderliche Trassenfreihaltung sind die Hauptfaktoren, die auf geschützte Arten im Betrieb einer Kabeltrasse einwirken können. Wartungsarbeiten, für die eine Aufgrabung der Erdkabeltrasse notwendig ist, führen lokal zur Beeinträchtigung von Pflanzen und Tieren, wenngleich in wesentlich geringerem Umfang als bei den zur Verlegung notwendigen Bauarbeiten. Zum Schutz der zwischenzeitlich etablierten Tier- und Pflanzenarten sind seltene Pflegeeingriffe, die sich auf das Notwendigste begrenzen und den Lebensraum weitestgehend erhalten, zu empfehlen. Zu den artenschutzrechtlich relevanten Hauptgefährdungsfaktoren während der umfangreichen Bauarbeiten zählen die unbeabsichtigte Tötung und Verletzung von Tieren und Pflanzen, Störung

von wildlebenden Tieren in empfindlichen Lebensphasen sowie die Vernichtung von Fortpflanzungs- und Ruhestätten.

Die unvermeidbare betriebsbedingte Tötung einzelner Individuen (z. B. Tierkollisionen nach Inbetriebnahme einer Straße) fällt in der Regel nicht unter die Verbote gem. § 44 Abs. 1 BNatSchG. Nach der Rechtsprechung (vgl. BVerwG Urteil v. 12.3.2008 A 3.06; 9.7.2008, Az. 9 A 14/07) muss sich durch ein Vorhaben das Risiko der Tötung (Tötung besonders geschützter Tiere) in signifikanter Weise erhöhen, damit ein Verbot greift (LANA 2010). Ebenso wenig greift der besondere Artenschutz, wenn trotz Vorsorgemaßnahmen die Tötung einzelner Tiere nicht ausgeschlossen werden kann, aber die für die Art zentralen Habitate erhalten bleiben (OVG Münster, Urteil vom 19.3.2008).

Damit die europäisch geschützte Arten insbesondere während der Fortpflanzungs-, Aufzucht-, Mauser-, Überwinterungs- und Wanderzeiten nicht erheblich gestört werden, ist darauf zu achten, dass in den entsprechenden Zeiten Beunruhigungen und Scheuchwirkungen z.B. infolge von Bewegung, Lärm oder Licht, sowie Zerschneidungswirkungen und Lichtemissionen minimiert werden (LANA 2010, S. 5). Eine erhebliche Störung liegt vor, wenn sich dadurch der „Erhaltungszustand der lokalen Population“ verschlechtert. Dies ist der Fall, wenn sich die Störung auf die Überlebenschancen, die Reproduktionsfähigkeit und den Fortpflanzungserfolg der lokalen Population auswirkt (LANA 2010, S. 5). Alle Orte im Gesamtlebensraum einer Tierart, die im Verlauf des Fortpflanzungsgeschehens benötigt werden, sind als Fortpflanzungsstätte geschützt. Dies sind z.B. Balzplätze, Paarungsgebiete, Neststandorte, Brutplätze oder -kolonien, Wurfbaue oder -plätze, Eiablage-, Verpuppungs- und Schlupfplätze oder Areale, die von den Larven oder Jungen genutzt werden (LANA 2010, S. 8). Regelmäßig genutzte Fortpflanzungs- oder Ruhestätten unterliegen auch dann dem Artenschutzregime, wenn sie gerade nicht besetzt sind (EUROPÄISCHE KOMMISSION 2007, Nr. 54). Andererseits ist die Zerstörung einer Fortpflanzungs- oder Ruhestätte nicht standorttreuer Tierarten, die ihre Lebensstätten regelmäßig wechseln und nicht erneut nutzen, außerhalb der Nutzungszeiten kein Verstoß gegen den besonderen Artenschutz.

Geschützte Ruhestätten umfassen alle Orte, die von Tieren regelmäßig zum Ruhen oder Schlafen aufgesucht werden oder an die sie sich zu Zeiten längerer Inaktivität zurückziehen. Als Ruhestätten gelten z.B. Schlaf-, Mauser- und Rastplätze, Sonnplätze, Schlafbaue oder -nester, Verstecke und Schutzbauten sowie Sommer- und Winterquartiere. Nahrungs- und Jagdbereiche sowie Flugrouten und Wanderkorridore unterliegen als solche nicht dem Verbot des § 44 Abs. 1 Nr. 3 BNatSchG.

In der Tabelle 8 werden Gefährdungen europäisch geschützter Arten durch Erdkabelprojekte eingeschätzt. Die dabei weit verbreiteten Artengruppen werden in den folgenden Abschnitten gesondert vorgestellt. Eine Reihe von Leitfäden und Handbüchern zum besonderen Artenschutz des BfN und der entsprechenden Landesämter spezifizieren die in diesen Abschnitten nur kurzrassisch aufgeführten Hinweise (z.B. GEISLER 2007; NLWKN 2009; TRAUTNER 2008). Erwähnenswert sind u.a. der Leitfaden der Europäischen Kommission (EUROPÄISCHE KOMMISSION 2007) und die Auslegungshinweise der Länderarbeitsgemeinschaft Naturschutz (LANA 2010).

Tabelle 8: Gefährdung europäisch geschützter Arten durch Erdkabel (eigene Darstellung)

| Vorhaben | Wirkbereiche | Farne | Samenpflanzen | Weichtiere | Libellen | Käfer | Schmetterlinge | Rundmäuler und Fische | Amphibien | Reptilien | Fledermäuse | Geschützte Säugetiere | Rast- und Brutvögel |
|--------------------|---------------|-------|---------------|------------|----------|-------|----------------|-----------------------|-----------|-----------|-------------|-----------------------|---------------------|
| Bauphase | 1 Tötung | | | x | x | x | x | - | - | - | x | - | - |
| | 2 Störung | | | - | - | - | - | - | x | x | x | x | x |
| | 3 Fortpflanz. | | | - | - | - | - | - | - | - | x | x | x |
| | 4 Zerstörung | x | x | | | | | | | | | | |
| Anlage/ Betrieb | 1 Tötung | | | | | | | | | | | | |
| | 2 Störung | | | | | | | | | | - | - | - |
| | 3 Fortpflanz. | | | | | | | | | | - | - | - |
| | 4 Zerstörung | - | - | | | | | | | | | | |

Legende: leer = kein Risiko; - = Risiko; x = erhöhtes Risiko

3.4.3 Auswirkungen von Erdkabeln auf bestimmte Artengruppen

3.4.3.1 Geschützte Pflanzen

Grundsätzlich ist mit potenziellen Vorkommen geschützter Pflanzenarten im Trassenbereich zu rechnen. Gemäß § 44 Abs. 1 Nr. 4 BNatSchG ist es verboten, wild lebende Pflanzen der besonders geschützten Arten oder ihre Entwicklungsformen aus der Natur zu entnehmen, sie oder ihre Standorte zu beschädigen oder zu zerstören. Nach § 19 BNatSchG sind Eingriffe für den Fall, dass keine europäisch geschützten Arten betroffen sind, jedoch zulassungsfähig.

Durch die Rodung im Trassenbereich im Zuge der Bauarbeiten kommt es zur Zerstörung der Vegetationsdecke. Diese kann sich, mit Ausnahme von tiefwurzelnden Arten, deren Wurzeln die Erdkabel möglicherweise beschädigen könnten, nach Beendigung der Bauarbeiten wieder einstellen.

Kälteliebende Pflanzenarten, die bevorzugt an Nordhängen und Senken siedeln, werden, soweit vom direkten Verlauf einer Erdkabeltrasse betroffen, hinsichtlich ihrer Wärmetoleranz zu beurteilen sein. Wenn seltene Ausnahmesituationen mit über lange Zeit andauernder, deutlich erhöhter Wärmeemission und phänologisch empfindlichen Entwicklungsphasen, z.B. Frühjahrsaustrieb, auf schlecht ableitenden Böden zusammentreffen, können Beeinträchtigungen, bspw. durch Spätfrost, nicht ausgeschlossen werden (vgl. Uther et. al. 2009).

3.4.3.2 Weichtiere, Libellen, Käfer und Schmetterlinge

Während der Bauphase können Weichtiere, Libellen, Käfer und Schmetterlinge grundsätzlich durch allgemeine Bautätigkeit, die Entfernung von Bäumen und Sträuchern, die Anlage von Schutzstreifen sowie die Emission von Lärm, Licht und Erschütterungen beeinträchtigt werden. Aufgrund der im Vergleich zu anderen Tieren sehr geringen oder nicht vorhandenen Fluchtdistanzen von Weichtieren und Insekten stellt der Baubetrieb eine erhöhte Tötungsgefahr dar. Weichtiere, Libellen, Käfer und Schmetterlinge haben klein räumige Aktionsradien und bewohnen eng beieinander liegende Teillebensräume. Mit der Beschädigung von Habitaten können daher gleichzeitig auch Tierverluste bzw. Verluste von Fortpflanzungsstadien einher gehen. IBNI

(2008a, S. 55) berichtet bspw. vom Vorkommen eines Altholz bewohnenden Käfers, des Großen Eichenbocks, in bestimmten Trassenabschnitten. Die Entfernung entsprechend besetzter Bäume kann mitunter zu Auswirkungen auf der Populationsebene führen. *„Aufgrund des geringen Ausbreitungspotenzials Altholz bewohnender Käfer können mehrere Generationen auf ein und demselben Baum angetroffen werden. In Abhängigkeit der Entfernung zu den nächsten als Lebensraum geeigneten Baumstandorten kann dies dazu führen, dass ein Baum eine gesamte Metapopulation beherbergt. Die Entfernung eines als Wohnstätte genutzten Baumes kann somit zur Extinktion der lokalen Käferpopulation führen“* (IBNI 2008a, S. 55).

3.4.3.3 Amphibien und Reptilien

Aufgrund der umfangreichen Tiefbauarbeiten besteht bei Erdkabelvorhaben insbesondere für geschützte Landtiere mit geringer Mobilität eine besondere Gefährdung, da sie durch die Bauarbeiten gestört, verletzt, getötet oder ihre Wanderwege, Aufenthalts- und Fortpflanzungsstätten beschädigt oder vernichtet werden können. Dies trifft gleichermaßen auch für Lurche (Amphibien) und Kriechtiere (Reptilien) zu. Im Einzelnen kann es während der Bauarbeiten durch visuelle Störungen, Lärmemissionen, Erschütterungen und der Rodung von Vegetation zu Beeinträchtigungen kommen.

Amphibien beanspruchen in Abhängigkeit des Jahreszyklus sowohl aquatische als auch terrestrische Lebensräume. Daher sind auch terrestrisch in der Bauphase entlang der gesamten Kabeltrasse und an den Baustellenzufahrten Tierverluste auf den Wanderkorridoren sowie in den Sommer- und Winterlebensräumen möglich.

3.4.3.4 Fledermäuse

Fledermäuse können durch unterschiedliche Projektwirkungen im Zuge der Bauphase beeinträchtigt werden. Hierzu gehören neben der Bautätigkeit selbst die Entfernung von Bäumen und Sträuchern, die von den Fledermäusen als Unterschlupf dienen, die Anlage von Schutzstreifen sowie die Emission von Lärm, Licht und Erschütterungen.

Quartierstandorte und potenzielle Wochenstuben bzw. Winterquartiere für baumbewohnende Arten befinden sich insbesondere in älteren Bäumen, die artgerechte Aushöhlungen und Spalten aufweisen. Die Entfernung von Quartierstandorten ist dauerhaft, soweit nicht im Zuge vorgezogener Kompensationsmaßnahmen gegengesteuert werden kann. Negative Auswirkungen auf den Erhaltungszustand lokaler und regionaler Populationen können nicht ausgeschlossen werden.

Durch die Schaffung von Waldschneisen im Zuge der Trassenfreimachung können Fledermausarten begünstigt werden, da Waldränder neben Wäldern und Bestandeslücken regelmäßiger Bestandteil des Jagdgebietes fast aller heimischen Fledermausarten sind (RICHARZ 2004, S. 35).

3.4.3.5 Geschützte Landsäugetiere

Landsäugetiere können durch unterschiedliche Projektwirkungen im Zuge der Bauphase beeinträchtigt werden. Hierzu gehören neben der Bautätigkeit selbst die Entfernung von Bäumen und Sträuchern, die Anlage von Schutzstreifen sowie die Emission von Lärm, Licht und Erschütterungen.

3.4.3.6 Avifauna

Vögel sind hochmobile Tiere, die in der Regel mit einem guten Seh- und Hörvermögen ausgestattet sind und eine artspezifische Fluchtdistanz gegenüber Störquellen einhalten. Während der Bauphase treten durch anthropogene Präsenz und den Einsatz von Baufahrzeugen und -maschinen optische Reize, Schall, und ggf. mechanische Beanspruchung als Wirkfaktoren auf.

Aufgrund des Fluchtinstinktes der Vögel sind bei Rast- und Zugvögeln sowie bei adulten Brutvögeln folglich keine Verluste von Individuen durch Bautätigkeiten zu erwarten, zudem bei den Baumaschinen und Transportfahrzeugen relativ niedrige Fortbewegungsgeschwindigkeiten sowohl im Baustellenbereich als auch in den Baustellenzufahrten anzunehmen sind.

Im Zuge der Baufeldfreimachung ist zur entsprechenden Jahreszeit jedoch mit Verlusten von Entwicklungsformen (Eier und Jungvögel) zu rechnen. In Abhängigkeit der artspezifischen Empfindlichkeitsprofile können regionale Auswirkungen auf den Erhaltungszustand bestimmter Arten nicht ausgeschlossen werden (IBNI 2008a, S. 33).

Durch Lärm, Erschütterungen und optische Reize kann es zu Störungen von Vögeln kommen. Die Auswirkungen können generell von der temporären Meidung des entsprechenden Gebietes bis hin zur dauerhaften Aufgabe von bspw. Brutplätzen reichen (vgl. FLADE 1994, GARNIEL et al. 2007). Entscheidend für das Ausmaß der Beeinträchtigungen sind die artspezifische Empfindlichkeit der betroffenen Arten, die Intensität und Dauer der Störungen sowie die Jahreszeit, in der diese stattfinden. Bei störungssensiblen Arten ist mit signifikanten Veränderungen des Raumnutzungsverhaltens zu rechnen. So können potenziell geeignete Brutstandorte im Zuge von vorhabensbedingten Scheuch- und Vergrämungswirkungen von empfindlichen Arten während der Bauzeiten gemieden werden. Bauzeitliche Funktionsverluste in Brutvogellebensräumen sind somit möglich. Während der Reproduktionsphase kann die optische und akustische Beeinträchtigung des Weiteren zum Verlassen des Geleges bzw. zur Unterversorgung der Jungen führen, was sich negativ auf den Reproduktionserfolg betroffener Vogelpopulationen auswirken kann (IBNI 2008a, S. 39–40).

In der Betriebsphase kann es über Veränderungen von Biotopen zu Veränderungen des Nahrungs-, Nist- und Schlafplatzangebotes für Vögel kommen. Verschiedene Vogellebensräume sind dabei in unterschiedlichem Ausmaß betroffen.

Brutvogelhabitate der offenen Kulturlandschaft (Ackerschläge, Intensivgrünland) sind aufgrund der landwirtschaftlichen Bewirtschaftung ohnehin einem regelmäßigen Wandel ausgesetzt (Ackerumbruch, Ansaat und Wechsel von Feldfrüchten, Beweidung, Mahd). Die Lebensraumverluste auf Ackerflächen sind insofern marginal, als aufgrund der hohen Regenerierbarkeit der Ackerwildkrautflora sowie aufgrund der durch regelmäßige Bewirtschaftung begründeten jährlichen Veränderung des Bodengefüges eine rasche Wiederherstellung der Lebensraumfunktionen zu erwarten ist. Auf Grünlandflächen ist davon auszugehen, dass je nach Intensivierungsgrad und Entwicklungspotenzial die Beeinträchtigungen der Brutvogellebensräume durch Entfernung der Vegetation und Bodenveränderung maximal zwei bis drei Vegetationsperioden anhalten. Spätestens nach diesem Zeitraum sind die ursprünglichen Lebensraumstrukturen wieder hergestellt (IBNI 2008a, S. 35).

In Lebensräumen von Waldvögeln sind während der Betriebsphase unter Umständen Beeinträchtigungen zu erwarten. Waldschneisen, die in einem engeren Bereich (bis ca. 100 m) um Horste von störepfindlichen Großvogelarten wie See-, und Schreiadler, Wanderfalke,

Schwarzstorch, Kranich und Uhus angelegt werden, können auf dem Wege von Veränderungen des Gebietscharakters zur Aufgabe des Brutstandortes führen (LAND BANDENBURG 1997, NLWKN 2010b, RYSLAVY U. PUTZE 2000).

Andere Vogelarten können auf unterschiedliche Weise von Waldschneisen profitieren. Oft ist im Bereich der Schneisen eine Zunahme der Kleinsäugerarten und -abundanzen und somit eine Verbesserung des Nahrungsangebotes für bspw. Greifvögel und Eulen zu beobachten (ABERLE U. PARTL 2005, vgl. NLWKN 2010c, NLWKN 2010d, GLUTZ VON BLOTZHEIM 1994). Schneisen können als künstliche Lichtungen in dichten Wäldern die Funktion als Lebensraum für Ameisen einnehmen, die Bestandteil der Nahrung von waldbewohnenden Arten wie bspw. des Schwarzspechts sind (NLWKN 2010e).

Innerhalb von geschlossenen Waldbereichen besiedeln manche Arten v. a. die lichten Übergangsbereiche zu Schneisen, wie bspw. der Trauerschnäpper (LFUG u. FÖA 1997). Hinsichtlich des Vogelartenspektrums ist eine Verschiebung hin zu Arten der Waldränder und Hecken wie bspw. Goldammer, Baumpieper, Neuntöter und Wendehals möglich (GEO et al. 2009). Insgesamt können Waldschneisen somit zur Lebensraum- und Artenvielfalt beitragen.

Betriebsbedingte Störwirkungen durch Wartungs- und Kontrollarbeiten treten nur sporadisch im Jahresverlauf auf und es wird nicht davon ausgegangen, dass sie das Brutgeschehen im Untersuchungsraum signifikant beeinträchtigen (IBNI 2008a, S. 39–40).

3.4.4 Vermeidungs- und Minderungsmaßnahmen

3.4.4.1 Übersicht

Grundsätzlich können auch bei europäisch geschützten Arten die klassischen Vermeidungs- und Minderungsmaßnahmen und insbesondere auch die der naturschutzrechtlichen Eingriffsregelung dazu dienen, Beeinträchtigungen abzumildern. Durch eine optimierte Trassenführung lassen sich schon frühzeitig Beeinträchtigungen vermeiden. Bauzeitbeschränkungen auf Jahreszeiten mit einer geringen Aktivität der geschützten Arten können darüber hinaus das Verletzungs- und Tötungsrisiko signifikant reduzieren. Daneben führt das Artenschutzrecht noch spezielle Regelungen für eine Vermeidung und Minderung ein. So können ggf. „vorgezogene Ausgleichsmaßnahmen zur Sicherung der ökologischen Funktion im räumlichen Zusammenhang“ (§ 44 Abs. 5 BNatSchG) durchgeführt werden. Sie zielen auf eine aktive Verbesserung oder Erweiterung einer Fortpflanzungs- oder Ruhestätte ab und sind insofern von den klassischen Vermeidungsmaßnahmen, die lediglich die Schonung der Fortpflanzungs- und Ruhestätte im Blick haben, zu unterscheiden.

Falls vorgezogene Ausgleichsmaßnahmen vor Baubeginn durchgeführt werden, können ausnahmsweise auch großräumige Kompensationsmaßnahmen im Zuge der Eingriffsregelung dazu führen, den Erhaltungszustand einer lokalen Population zu wahren. Eine vorhabensbedingte Störung von Individuen einer Art ist dann nicht als erheblich im Sinne des § 44 Abs. 1 Nr. 2 BNatSchG anzusehen (BVerwG, Urteil v. 12.3.2008, Rdnr. 259; dazu kritisch GELLERMANN 2009, S. 12). Ein Beispiel für eine geeignete vorgezogene Ausgleichsmaßnahme ist in Abschn. 3.1.3.1. geschildert worden.

Weiterhin können standortspezifische Maßnahmen zur Sicherung des Erhaltungszustands – bspw. die Anlage einer neuen Lebensstätte – dazu dienen, eine artenschutzrechtliche Aus-

nahme zu begründen und eine Verschlechterung des Erhaltungszustands der Population der betroffenen Art zu vermeiden. Die Festlegung solcher Maßnahmen ist in jedem Fall verpflichtend, wenn der günstige Erhaltungszustand einer betroffenen Population nicht ohne (zusätzliche) Maßnahmen gewährleistet ist. Im Gegensatz zu den vorgezogenen Ausgleichsmaßnahmen kann bei den Erhaltungsmaßnahmen der Bezug von Maßnahme zum Eingriffsort weiträumig gelockert sein. Eine direkte funktionale Verbindung zur betroffenen Lebensstätte ist nicht erforderlich (LANA 2010, S. 17 f).

3.4.4.2 Amphibien und Reptilien

Tierverluste an Wanderungswegen lassen sich durch Amphibienleiteinrichtungen erheblich reduzieren. Diese Maßnahmen dienen dazu, die Tiere vom Kabelgraben sowie von den Baustellenzufahrten fortzuleiten. Zur Hauptwanderzeit der Amphibien im Frühjahr sind in entsprechenden Schwerpunkträumen zusätzlich im Abstand von 20 bis 30 m Fanggefäße empfehlenswert, aus denen die Tiere regelmäßig umzusetzen sind (vgl. IBNI 2008a, S. 49 ff.). Beeinträchtigungen im Raumnutzungsverhalten durch die Amphibienleiteinrichtungen sind bei regelmäßiger Wartung nicht artenschutzrelevant.

Gewässer und Feuchtbereiche dienen Amphibien als Fortpflanzungsstätten. Im Gewässerbereich ist insbesondere der Amphibienlaich gefährdet. Bei offenen Gewässerquerungen für Erdkabeltrassen ist daher darauf zu achten, dass die beeinträchtigten Bereiche schmal gehalten werden und es zu keiner wesentlichen qualitativen Veränderung von Gewässern oder zu einer Verminderung des Wasserstands kommt. Falls eine Trasse durch Feuchtgebiete verlegt wird, sind Maßnahmen zur Sicherung des Wasserstands in den ggf. benachbarten Oberflächengewässern zu ergreifen. Laut IBNI (2008a, S. 49 ff.) können eventuelle bauzeitliche Einbußen des Reproduktionserfolgs bei Amphibien aufgrund des hohen Reproduktionspotenzials bereits in der darauffolgenden Laichperiode wieder kompensiert werden.

Für Reptilien gelten sowohl hinsichtlich der Bedrohungen als auch hinsichtlich der Vermeidung von Tierverlusten im Zuge bauzeitlicher Zerschneidungswirkungen weitgehend analog die zu den für Amphibien gemachten Ausführungen. Als Kaltblüter sind Reptilien auf sonnige Lebensräume angewiesen, die ihnen Unterschlupf und Möglichkeiten der Eiablage gewähren. Im Rahmen der Trassenplanung ist deshalb darauf zu achten, dass entsprechende Standorte gemieden werden. Verbreitungsangaben und artspezifische Angaben zum Lebensraum finden sich in den Informationssystemen der Länder.

Zur Sicherung der ökologischen Funktion von Fortpflanzungs- oder Ruhestätten bei Amphibien und Reptilien führt der Hessische Leitfaden für die artenschutzrechtliche Prüfung mehrere Beispiele an, die auch für den Bau von Erdkabeltrassen relevant sind. Hierzu gehören u.a. die vorgezogene Schaffung von Flutmulden als Ausweichlaichgewässer sowie die vorgezogene Schaffung von neuen Sonnenplätzen für Reptilien (HMUELV 2011, S. 40).

3.4.4.3 Fledermäuse

Vor der Rodung bedarf es einer Untersuchung des zu entfernenden Waldbestandes auf Fledermausvorkommen (IBNI et al. 2008, S. 187). Waldtrassen sind vor der Baufeldfreimachung auf das Vorhandensein potenzieller Höhlenbäume zu überprüfen. Verluste von Tieren lassen sich ggf. durch fachgerechte Umsiedlungsmaßnahmen vermeiden.

Da die Bauarbeiten i. Allg. tagsüber durchgeführt werden, werden die nachtaktiven Fledermausarten in ihren Ruhezeiten gestört. Durch Bauzeitenregelungen können erhebliche Störungen europäisch geschützter Fledermausarten v.a. in Wochenstubezeiten und Winterruhe vermieden werden (vgl. OVG Münster, Urteil hinsichtlich einer 380-kV-Hochspannungsfreileitung vom 19.3.2008, Az. 11 B 289/08.AK).

3.4.4.4 Geschützte Landsäugetiere

Vermeidungs- und Minderungsmaßnahmen für geschützte Landsäugetiere können artenspezifisch sehr unterschiedlich ausfallen. In den in Frage kommenden Gebieten kann durch eine vorherige Trassenbegehung und ggf. Umsiedlung von Tieren vermieden werden, dass im Zuge der Baufeldfreimachung aktuell genutzte Bauten von Landsäugetieren mit den sich darin befindlichen Tieren, insbesondere Jungtieren, vernichtet werden. Kollisionen von Baufahrzeugen mit ausweichenden Tieren lassen sich durch Abzäunungen vermeiden. Nächtliche Bauarbeiten sollten insbesondere bei der Querung von Fließgewässern mit Biber- und Fischotterbesatz nur nach sorgfältiger Prüfung durchgeführt werden (IBNI 2008a, S. 45 ff.).

3.4.4.5 Avifauna

Von den Bauarbeiten für Erdkabeltrassen können vor allem lärm- und störungsempfindliche Vogelarten beeinträchtigt werden, die in der Projektumgebung brüten oder ihre Jungen aufziehen. Um dies zu vermeiden, muss ein geeigneter Zeitraum für die Baumaßnahme festgelegt werden. Das Zeitfenster wird im Wesentlichen durch die störepfindliche Brutzeit von März bis Ende August bestimmt. Regional, besonders in der Nähe von Gewässern, die als Rasthabitat dienen, sind sensible Zeitabschnitte (bspw. Mauser, Sammelschlafplätze von Wasservögeln im Herbst) zu berücksichtigen.

Vor diesem Hintergrund ist im BNatSchG § 39 Abs. 5 eine Sperrzeit für Rodungsarbeiten festgelegt. So dürfen vom 01. März bis 30. September keine Gehölze außerhalb des Waldes beseitigt werden.

Ist absehbar, dass sich die Bauarbeiten nicht auf einen Zeitraum außerhalb der Brutzeit verlegen lassen, so lassen sich zumindest im Vorfeld Vorkehrungen treffen. Brutvögel können noch vor Beginn der Brutzeit vergrämt werden, so dass eine Ansiedlung verhindert wird und im Laufe der Baumaßnahmen keine Brutverluste zu verzeichnen sind (GEO et al. 2009).

3.4.4.6 Geschützte Pflanzen

Standorte geschützter Pflanzen können ggf. durch eine Feintrassierung geschont werden. Falls dies nicht möglich ist, kann die ökologische Funktion des betroffenen Pflanzenstandorts im räumlichen Zusammenhang ggf. durch vorgezogene Kompensationsmaßnahmen weiterhin erfüllt werden.

3.5 Auswirkungen von 380-kV-Höchstspannungsgleichstrom-Erdkabeln

Da bei der HGÜ im Gegensatz zur Drehstromtechnik nur zwei Leiter pro Stromkreis (bipolares System; bei Neubauten werden nur noch bipolare Systeme eingesetzt) notwendig sind (HOFMANN et al. 2012, S. 38–40), ist der Flächenverbrauch bei HGÜ-Erdkabeln geringer als bei HDÜ-Erdkabeln (vgl. Abschnitt 2.5.4 sowie HOFMANN et al. 2012, S. 97–98). Die im Kapitel 3.4 für

Höchstspannungsdrehstrom-Erdkabel genannten Aspekte können für Höchstspannungsgleichstrom-Erdkabel übernommen werden.

3.6 Nebenanlagen bei Erdleitungen

Wie auch bei den Freileitungen sind Umspannwerke (HDÜ, HGÜ) und Konverterstationen (HGÜ) notwendig. Durch deren Platzverbrauch geht potentieller Lebensraum verloren, der für Konverterstationen mit ca. 100 m x 50 m angegeben wird (bei 1000 MW, HOFMANN 2012, S. 27). Übergangsbauwerke zur Verbindung einer Freileitung und eines Erdkabels haben eine Grundfläche in einer Größenordnung von 2100–2500 m² (POLSTER et al. 2009, S. 27; HOFMANN 2012, S. 23). Neben Lebensraumverlust sind Barrierewirkungen möglich, die Austauschbeziehungen zwischen Teilhabitaten stören oder unterbrechen (ML 2011).

Um die Kabelleile miteinander zu verbinden, sind alle 600–900 m Verbindungsmuffen notwendig, die in Muffengruben oder Muffenbauwerken montiert werden (HOFMANN et al. 2012, S. 316). Bei Drehstromkabeln werden an diesen Stellen auch Cross-Bonding-Systeme installiert, entweder im Muffenbauwerk oder in oberirdischen Cross-Bonding-Bauwerken. Muffenbauwerke benötigen eine Grundfläche von etwa 3 m x 10 m (TENNET 2011, S. 29), Cross-Bonding-Bauwerke von etwa 1,8 m x 2,9 m (POLSTER et al. 2009, S. 30). Bei Drehstrom-Erdkabeln sind alle etwa 25–30 km Kompensationsanlagen notwendig (HOFMANN et al. 2012, S. 318). Durch die hier genannten Bauwerke werden Flächen beansprucht, die potentiellen Lebensraum markieren.

3.7 Auswirkungen von gasisolierten Leitungen

Bei Verlegung GIL im Boden sind die zu Erdkabeln beschriebenen Auswirkungen auf die Flora und Fauna übertragbar. Aufgrund der Vormontage der Rohrsegmente vor Ort ist eine breitere Baurasse notwendig als für Erdkabel.

Bei der Verlegung von GIL in bereits bestehenden Tunneln sind störende Auswirkungen während der Bauphase aufgrund von Anlieferung und Montage zu erwarten.

3.8 Zusammenfassung Schutzgüter „Pflanzen und Tiere“

Das Naturschutzrecht sieht über Schutzgebietssysteme und die Unterschutzstellung spezifischer Biotope hinaus insbesondere mit der Eingriffsregelung sowie dem allgemeinen und besonderen Artenschutz ein komplexes Reglement zur Vermeidung der Beeinträchtigung wildlebender Tiere und Pflanzen sowie der Inanspruchnahme ihrer Lebensräume vor.

Als mögliche Beeinträchtigungen der Schutzgüter „Pflanzen und Tiere“ durch Höchstspannungsleitungen sind Störung, Verletzung bzw. Beschädigung, Tötung, Lebensraumverlust, Zerschneidung von Brut-, Rast- und Nahrungshabitaten sowie Zerstörung von Fortpflanzungsstadien zu nennen. Während bei Freileitungen besonders die Betriebswirkungen als Beeinträchtigung bestimmter Artengruppen ins Gewicht fallen, sind es bei Erdkabeln aufgrund umfangreicher Erdbewegungen vor allem die Bauwirkungen.

Das Schutzgut „Pflanzen“ ist in der Bauphase vor allem durch die Trassenfreiräumung betroffen: Für Freileitungen muss vor Baubeginn der hohe Bewuchs (Bäume) auf der gesamten Trassenlänge auf der vollen Schutzstreifenbreite (ca. 40–70 m) entfernt werden, wobei außerhalb der Maststandorte niedriger Bewuchs (Gebüsche) erhalten bleiben kann. Für Erdkabeltrassenverlegung ist eine Rodung im Trassenbereich (ca. 13–21 m bei vier Drehstromsystemen, ca. 11–20 m bei Gleichstrom) notwendig, wobei die Vegetationsdecke zerstört wird. Mit Ausnahme tief-

wurzelnder Arten (bei Erdkabeln) und hochwachsender Arten (bei Freileitungen) kann sich die Vegetation nach Beendigung der Bauarbeiten wieder einstellen.

In der Bauphase kann es durch die Entfernung von Bäumen und Sträuchern sowie die Emission von Lärm, Licht und Erschütterungen beim Freileitungs- und besonders bei dem mit umfangreicheren Tiefbauarbeiten verbundenen Erdkabelbau zur Beeinträchtigung von bodenlebenden Tieren kommen. Da Weichtiere, Libellen, Käfer und Schmetterlinge sehr geringe Fluchtdistanzen aufweisen, besteht für die lokalen Populationen dieser Tierarten ein hohes Risiko für Beeinträchtigungen durch den Baubetrieb. Aufgrund ihrer kleinräumigen Aktionsradien sind neben der Beeinträchtigung von Habitaten auch Tierverluste und Verluste von Fortpflanzungsstätten und -stadien möglich. Auch Amphibien und Reptilien weisen eine geringe Mobilität auf und können daher während der Bauphase leicht gestört, verletzt oder getötet werden. Es besteht zudem das Risiko der Beeinträchtigung von Wanderwegen, Aufenthalts- und Fortpflanzungsstätten. Dabei ist zu beachten, dass Amphibien in Abhängigkeit ihrer Jahreszyklen sowohl aquatische als auch terrestrische Lebensräume beanspruchen.

Aufgrund des Fluchtinstinktes von Vögeln, die in der Regel mit einem guten Seh- und Hörvermögen ausgestattet sind und eine artspezifische Fluchtdistanz gegenüber Störquellen einhalten, sind folglich wenig Verluste von adulten Individuen durch Bautätigkeiten zu erwarten. Zudem sind bei den Baumaschinen und Transportfahrzeugen relativ niedrige Fortbewegungsgeschwindigkeiten sowohl im Baustellenbereich als auch in den Baustellenzufahrten anzunehmen. Im Zuge der Baufeldfreimachung ist zur entsprechenden Jahreszeit jedoch mit Verlusten von Entwicklungsformen (Eier und Jungvögel) zu rechnen. In Abhängigkeit der artspezifischen Empfindlichkeitsprofile können regionale Auswirkungen auf den Erhaltungszustand bestimmter Arten nicht ausgeschlossen werden.

Lärm- und störungsempfindliche Vogelarten, die in der jeweiligen Projektumgebung brüten oder ihre Jungen aufziehen, sind gegenüber Bauwirkungen besonders empfindlich. Bei möglichen Beeinträchtigungen der Avifauna ist stets der besondere Artenschutz zu beachten. Auch Fledermäuse sind generell durch den besonderen Artenschutz europarechtlich geschützt und können durch Bautätigkeiten, Emission von Lärm, Licht und Erschütterungen sowie durch die Entfernung von Bäumen und Sträuchern beeinträchtigt werden. Die Entfernung von Bäumen kann den Verlust des Unterschlupfes bedeuten, was ohne geeignete Ausweichmöglichkeiten Auswirkungen auf den Erhaltungszustand lokaler und regionaler Populationen haben kann.

Letztlich können Bautätigkeiten auch Landsäugetiere beeinträchtigen, insbesondere durch die Anlage von Schutzstreifen sowie Emission von Lärm, Licht, Erschütterungen und durch die Entfernung von Bäumen und Sträuchern.

Während der Betriebsphase von Höchstspannungsfreileitungen besteht ein hohes Beeinträchtigungsrisiko v.a. für die Avifauna, wobei die Kollisionen mit den Leitern und Masten als das bei weitem größte Risiko angesehen wird. Stromschläge und Stromtod sind aufgrund des Abstandes zwischen Leiterseilen und Masten bzw. zwischen den einzelnen Seilen nahezu ausgeschlossen. Unabhängig vom Masttyp, den Masthöhen und den Teilleiterabständen können sich Kollisionen generell bei jeder Art von Freileitung ereignen, da Vögel insbesondere die Entfernungen zu den unnatürlichen horizontalen Strukturen schlecht abschätzen können. Die meisten Kollisionen erfolgen an den zuoberst angeordneten, einzeln hängenden und besonders dünnen Erd- oder Blitzschutzseilen. Nachts oder bei schlechter Sicht, bspw. Nebel, besteht sowohl an Leitungs- bzw. Erdseilen als auch an Masten prinzipiell ein höheres Kollisionsrisiko. Die Häufigkeit

des Vogelschlags hängt stark von der Lage der Freileitung ab. Besonders hohe Verlustzahlen sind in Durchzugs- und Rastgebieten mit großen Vogelzahlen zu verzeichnen. Fasst man die Ergebnisse unterschiedlicher Untersuchungen an Höchstspannungstrassen mit hohen Vogelverlusten zusammen, so lässt sich folgern, dass in feuchten, vorwiegend von Grünland beherrschten Niederungsgebieten mit starkem Vogelzug und hohen Rastbeständen jährlich zwischen 200 und 700 Vögel pro Leitungskilometer durch Leitungsanflug verunglücken. Von ähnlichen Verhältnissen ist an anderen Konzentrationspunkten des Vogelzuges, z.B. an Gebirgspässen, Talzügen und Küsten auszugehen. In Landschaften ohne besondere Bedeutung für den Vogelschutz ist von einer deutlich geringeren Gefährdung durch Höchstspannungsleitungen für Vögel auszugehen. Für die Trassenplanung empfiehlt es sich aus avifaunistischer Sicht daher, frühzeitig bekannte Brut-, Nahrungs- und Rasthabitate von Vögeln sowie Wanderkorridore des Vogelzugs auszuschließen.

In Lebensräumen von Waldvögeln sind während der Betriebsphase von Höchstspannungsfreileitungen unter Umständen Beeinträchtigungen zu erwarten. Waldschneisen, die in einem engeren Bereich um Horste von störepfindlichen Großvogelarten angelegt werden, können auf dem Wege von Veränderungen des Gebietscharakters zur Aufgabe des Brutstandortes führen. Andere Vogelarten können jedoch auf unterschiedliche Weise, z.B. eine Verbesserung des Nahrungsangebotes, von Waldschneisen profitieren. Waldschneisen können somit auch zur Lebensraum- und Artenvielfalt beitragen.

Die für 380-kV-Höchstspannungs-Drehstrom-Freileitungen anzunehmenden Gefährdungsfaktoren für Tiere und Pflanzen unterscheiden sich nicht wesentlich von denen für Höchstspannungs-Gleichstrom-Freileitungen.

Über sechs Jahre laufende Untersuchungen der Gesundheit und Produktivität von an einer 400-kV-HGÜ-Leitung in Minnesota lebenden Milchkühen ergab keine Beeinträchtigungen. Ähnlich war der Befund einer anderen Untersuchung hinsichtlich Fortpflanzung, Trächtigkeitsraten, Kalbungen, Kalbungsintervallen, Körpermaßen und Sterblichkeitsrate von Kälbern.

Während der Betriebsphase kann es im Zuge von Wartungsarbeiten sowohl bei Freileitungen als auch bei Erdkabeln zu lokalen Beeinträchtigungen von Pflanzen und Tieren kommen. Verglichen mit den Bauarbeiten ist das Ausmaß jedoch wesentlich geringer. Betriebsbedingte Störwirkungen durch Wartungs- und Kontrollarbeiten treten zudem nur sporadisch im Jahresverlauf auf, so dass empfindliche Störungen eine Ausnahme darstellen.

Während der Betriebsphase von Erdkabeln ist in Abhängigkeit von Leiterquerschnitten, thermischen Eigenschaften von Bettungsmaterial und Boden sowie insbesondere der Auslastung des Kabels Wärmeeinwirkung möglich, die kleinräumig Vegetation und Bodenlebewesen beeinflussen kann. Grundsätzlich sind hierbei negative Folgen für kälteliebende Pflanzenarten denkbar, auch können Verschiebungen in phänologisch empfindlichen Entwicklungsphasen wie dem Frühjahrsaustrieb stattfinden.

Um mögliche Beeinträchtigungen des Schutzguts „Tiere“ während der Bauphase zu reduzieren bzw. zu vermindern, können gefährdete Arten vor Baubeginn abgesammelt, umgesiedelt oder in Ausnahmen vergrämt werden. Auch vorgezogene Ausgleichsmaßnahmen (§ 44 Abs. 5 BNatSchG), die der Sicherung ökologischer Funktion im räumlichen Zusammenhang dienen, indem sie eine aktive Verbesserung oder Erweiterung einer Fortpflanzungs- oder Ruhestätte abzielen, können vor Baubeginn durchgeführt werden. Über Bauzeitenregelungen kann ggf. vermieden werden, dass lärm- und störungsempfindliche Vogelarten in sensiblen Entwicklungs-

stadien bzw. Lebenszyklen (Brut, Aufzucht, Mauser) durch Bauarbeiten für Freileitungen beeinträchtigt werden. Das Zeitfenster wird z. B. bei Vögeln im Wesentlichen durch die stöempfindliche Brutzeit von März bis Ende August bestimmt. Vor diesem Hintergrund ist im BNatSchG § 39 Abs. 5 eine Sperrzeit für Rodungsarbeiten festgelegt. So dürfen vom 01. März bis 30. September keine Gehölze außerhalb des Waldes beseitigt werden. Regional, besonders in der Nähe von Rasthabitaten, sind sensible Zeitabschnitte (bspw. Mauser, Sammelschlafplätze von Wasservögeln im Herbst) zu berücksichtigen.

Ist absehbar, dass sich die Bauarbeiten nicht auf einen Zeitraum außerhalb der Brutzeit, bzw. anderen empfindlichen Zeitphasen verlegen lassen, so sind im Vorfeld andere Vorkehrungen zu treffen. Brutvögel können ggf. noch vor Beginn der Brutzeit vergrämt werden, so dass eine Ansiedlung verhindert wird und im Laufe der Baumaßnahmen keine Brutverluste zu verzeichnen sind.

Während der Betriebsphase von Freileitungen können durch ein ökologisches Schneisenmanagement, welches ein begrenztes Baumwachstum im Schneisenbereich gestattet, Auswirkungen auf Tiere und Pflanzen in Gehölzbiotopen gemindert werden. Je nach Art und Häufigkeit der Pflegeeingriffe werden Pflanzen und Tiere unterschiedlich stark beeinträchtigt. Ein seltener Eingriff, der sich auf das Notwendigste begrenzt und den Lebensraum weitestgehend erhält, hat die geringsten Auswirkungen auf die sich zwischenzeitlich etablierenden Tier- und Pflanzenarten.

Das Kollisionsrisiko für die Avifauna an den Leitern von Höchstspannungsfreileitungen lässt sich erprobter Weise durch unterschiedliche Seilmarkierungen abmindern.

4. Schutzgut „Biologische Vielfalt“

4.1 Auswirkungen von 380-kV-Höchstspannungsdrehstrom-Freileitungen

4.1.1 Übersicht

Nach § 7 Abs. 1 Nr. 1 des BNatSchG ist die biologische Vielfalt als „die Vielfalt der Tier- und Pflanzenarten einschließlich der innerartlichen Vielfalt sowie die Vielfalt an Formen von Lebensgemeinschaften und Biotopen“ definiert. Ein System von Schutzgebieten stellt ein zentrales Element für die nationalen Strategien zur Erhaltung der biologischen Vielfalt dar. Mögliche Auswirkungen von Höchstspannungsleitungen auf die biologische Vielfalt werden daher im Folgenden zunächst anhand von Schutzgebieten und anschließend anhand bestimmter Biotoptypen dargestellt.

Bei 380-kV-Freileitungen sind v.a. folgende Faktoren, die sich bau-, betriebs-, anlage- oder wartungsbedingt auswirken können, für die biologische Vielfalt relevant (vgl. IBU 2007; ERM 2008; TRANSPOWER 2010):

- Beeinträchtigung von Vegetation und Habitaten, Änderung von Struktur und Artenspektrum,
- Zeitweilige Beseitigung oder Schädigung von krautiger Vegetation im Bereich der Arbeitsflächen, Zufahrten und Lagerflächen,
- langfristige bzw. dauerhafte Beseitigung von Gehölzen bei der Anlage von Schneisen in Waldbereichen und der Entnahme einzelner Bäume innerhalb linearer Gehölzbestände,
- Bodenentnahme und Bodenverdichtung im Bereich der Mastfundamente,
- zeitweilige Veränderung des Boden-Wasser-Haushalts durch ggf. notwendige Wasserhaltungsmaßnahmen bei Feuchtgebieten,
- dauerhafter Biotopverlust im Bereich der Fundamentköpfe.

Aufgrund der gegenüber einer Erdkabelverlegung geringeren Tiefbauarbeiten sind die direkt auf den Boden bezogenen, baubedingten Auswirkungen weniger schwerwiegend als die später in Abschn. 4.4 besprochenen Eingriffsfolgen. Bei Freileitungen überwiegen jedoch die dauerhaften, anlagebedingten Auswirkungen, die sich mit der Schneisenfreihaltung auf eine deutlich größere Fläche erstrecken und die mit der Errichtung von Masten und der Verlegung oberirdischer Leitungen für Mensch und Tier dauerhaft wahrnehmbare Konstruktionen schaffen.

Die dauerhafte Beanspruchung von Schneisen, die als Schutzstreifen dem Schutz von Freileitungen dienen, gilt als die maßgebliche Auswirkung von Freileitungen auf Biotope (TRANSPOWER 2010, S. 25). Die Breite des Schutzstreifens steht bei Freileitungen in Abhängigkeit zu den Abständen der Masten (Spannfeldlängen). Die freizuhaltende Trassenbreite liegt deutlich über den Anforderungen für Erdkabel (vgl. GEO et al. 2009, S. 104). HOFMANN et al. (2012, Teil I, Abschn. 1.3.2.2) zufolge beträgt der Schutzstreifen bei dem üblichen 380-kV-Donaumast ca. 70 m. Bei der 380-kV-Leitung Wahle-Mecklar geht TRANSPOWER (2010, S. 26) von 40–60 m aus. Im Bereich dieser Schutzstreifen können sich Lebensräume drastisch und dauerhaft verändern. Auch umliegende Biotope werden durch die Trasse zerschnitten. Im Bereich der Mastfundamente ist im Falle einer Flächenversiegelung ein vollständiger Lebensraumverlust zu erwarten.

4.1.2 Schutzgebiete

4.1.2.1 Streng geschützte Gebiete

Biotope streng geschützter Gebiete (NSG, Nationalpark, FFH-/VS-Gebiet, Zone 1+2 Biosphärenreservat) können i.d.R. als hoch empfindlich gegenüber den oben skizzierten Eingriffen eingestuft werden. Die Schutzbedürftigkeit dieser speziellen Naturräume sollte zur Vermeidung späterer Planungskonflikte schon frühzeitig bei der Trassenplanung beachtet werden. Einem strengen gesetzlichen Pauschalschutz unterliegen darüber hinaus nach § 30 BNatSchG u.a. folgende Biotoptypen:

1. natürliche oder naturnahe Bereiche fließender und stehender Binnengewässer einschließlich ihrer Ufer und der dazugehörigen uferbegleitenden natürlichen oder naturnahen Vegetation sowie ihrer natürlichen oder naturnahen Verlandungsbereiche, Altarme und regelmäßig überschwemmten Bereiche,
2. Moore, Sümpfe, Röhrichte, Großseggenrieder, seggen- und binsenreiche Nasswiesen, Quellbereiche, Binnenlandsalzstellen,
3. offene Binnendünen, offene natürliche Block-, Schutt- und Geröllhalden, Lehm- und Lösswände, Zwergstrauch-, Ginster- und Wacholderheiden, Borstgrasrasen, Trockenrasen, Schwermetallrasen, Wälder und Gebüsche trockenwarmer Standorte,
4. Bruch-, Sumpf- und Auenwälder, Schlucht-, Blockhalden- und Hangschuttwälder, subalpine Lärchen- und Lärchen-Arvenwälder,
5. offene Felsbildungen, alpine Rasen sowie Schneetälchen und Krummholzgebüsche,
6. Fels- und Steilküsten, Küstendünen und Strandwälle, Strandseen, Boddengewässer mit Verlandungsbereichen, Salzwiesen und Wattflächen im Küstenbereich, Seegraswiesen und sonstige marine Makrophytenbestände, Riffe, sublitorale Sandbänke, Schlickgründe mit bohrender Bodenmegafauna sowie artenreiche Kies-, Grobsand- und Schillgründe im Meeres- und Küstenbereich.

Großräumige Vegetationsverluste sind durch Anlage der Schneisen unvermeidbar. Die Tötung von Individuen (§ 44 Abs. 1 Nr.1 BNatSchG) und die Beschädigung/Zerstörung von Lebensstätten (§ 44 Abs. 1 Nr.3 BNatSchG) können dabei voraussichtlich nicht vermieden werden. Darüber hinaus ist baubedingt von Störungen (§ 44 Abs. 1 Nr.2 BNatSchG) besonders bzw. streng geschützter Arten auszugehen, bspw. wenn der Eingriff in der Nähe ganzjährig frequentierter Wasservogellebensräume stattfindet. Da streng geschützte Gebiete häufig letzte Rückzugsmöglichkeiten für solche Arten sind, die außerhalb der Schutzgebiete kaum noch vorkommen, ist es nicht unwahrscheinlich, dass sich durch Störungen während der Bauphase der Erhaltungszustand der lokalen Population einer der betroffenen Arten maßgeblich verschlechtert.

Während der Betriebsphase kann die Tötung von Individuen (§ 44 Abs. 1 Nr.1 BNatSchG) zwar durch entsprechende Maßnahmen (bspw. Anbringung von Markern zum besseren Erkennen der Leitungen) gemindert, allerdings nicht vollständig vermieden werden. Die von § 44 Abs. 1 Nr.1 BNatSchG geforderte ökologische Funktion der vom Vorhaben betroffenen Lebensstätte wäre mit großer Wahrscheinlichkeit gefährdet.

Die oben nur kurz skizzierten Zusammenhänge machen zusammenfassend deutlich, dass die Planung von Freileitungen der Höchstspannungsebene dem angestrebten Schutz der Arten und Lebensräume streng geschützter Gebiete i. Allg. zuwiderläuft. Dem Landes-Raumordnungsprogramm Niedersachsen (LAND NIEDERSACHSEN (2008), Abschnitt 4.2, Ziffer 07, Satz 9, S. 149,

z.Z. in Überarbeitung) zufolge mussten diese Gebiete ohnehin unter rechtlichen Gesichtspunkten frühzeitig von einer Trassierung ausgeschlossen werden, weil Naturschutzgebiete und Natura-2000-Gebiete bereits aufgrund fachspezifischer naturschutzrechtlicher Regelungen so stark geschützt seien, dass in diesen Räumen die Verlegung von Freileitungen der Hoch- und Höchstspannungsebene grundsätzlich nicht in Betracht kommt. Ob diese Einschätzung als Erläuterung auch ohne ein Gebot der Verlegung von Erdkabeln in naturschutzrechtlich sensiblen Gebieten bestehen bleibt, ist abzuwarten.

4.1.2.2 Schwächer geschützte Gebiete

Gegenüber Biotopen in streng geschützten Gebieten kommt Biotopen in weniger streng geschützten Gebieten (LSG, Zone 3 in Biosphärenreservaten, Naturparke) eine abgeschwächte Lebensraumbedeutung zu. Doch auch die Schutzgüter in schwächer geschützten Gebieten wie Landschaftsschutzgebieten, Zone 3 in Biosphärenreservaten und Naturparke sind i.d.R. als hoch empfindlich gegenüber Eingriffen durch Freileitungen einzustufen, wobei sich das Ausmaß der Beeinträchtigungen durch Bau, Analge und Betrieb aus den Schutzzwecken der Gebiete ergibt. Großräumige Vegetationsverluste sind auch hier bei der Anlage der Schneisen unvermeidbar. Grundsätzlich dominieren die dauerhaft visuell wahrnehmbaren anlagebedingten Wirkungen gegenüber den baubedingten. Durch dauerhaft wahrnehmbare Konstruktionen und breite Schutzstreifen verbleibt eine Beeinträchtigung schützenswerter Landschaftsteile und Lebensräume, die trotz möglicher Minderungsmaßnahmen in der Regel weiterhin als erheblich eingeschätzt wird.

Um Konflikte durch Beeinträchtigung von Landschaftsschutzgebieten infolge neuer Freileitungen der Hoch- und Höchstspannungsebene zu vermeiden, formuliert das Landes-Raumordnungsprogramm Niedersachsen (LAND NIEDERSACHSEN 2008, S. 149, z.Z. in Überarbeitung) ein Querungsverbot zum Schutz dieser Gebiete als Ziel, was für vor dem 15.10.2007 ausgewiesene LSG gelten soll. Diesen Gebieten wird eine besondere Funktion für das Landschaftserleben sowie für Freizeit und Erholung in der Landschaft zugesprochen. Freileitungen brächten andererseits durch die Höhe der Masten und deren Zahl bzw. Aufstellung eine durchgängige und nicht vermeidbare Belastung des Landschaftsbildes.

4.1.3 Biotope

4.1.3.1 Gefährdungskriterien für Biotope

Zur ersten Einstufung des Konfliktpotenzials eines Biotoptyps gegenüber Eingriffen durch Höchstspannungstrassen wird die nationale Rote Liste der Biotoptypen (vgl. BfN 2006) herangezogen. Den Ausgangspunkt bildet dabei die „Einstufung der regionalen Gefährdung“. Entscheidend für die Einstufung auf einer 9-stufigen Skala entspr. BfN (2006, S. 11) ist im Einzelfall eine Zusammenschau der Gefährdung durch dauerhaften Flächenverlust sowie durch dauerhafte qualitative Veränderungen mit den Möglichkeiten der Regenerierbarkeit.

Grundsätzlich wird davon ausgegangen, dass Biotoptypen der Stufe 1, die von vollständiger Vernichtung bedroht sind, durch kein Vorhaben in Anspruch genommen werden dürfen. Stufe 2 bedeutet eine starke Gefährdung und damit i. Allg. ein sehr hohes Konfliktpotenzial gegenüber Eingriffen. Gefährdeten Biotoptypen mit der Stufe 3 wird ein hohes bis erhöhtes Konfliktpotenzial zugeordnet. Falls sich die Biotoptypen bedingt regenerieren lassen, vermindert dies das Konfliktpotenzial entsprechend. Unter „Regenerierbarkeit“ wird sowohl das biotopeigene Potenzial zur

selbständigen Regeneration nach Beendigung der Beeinträchtigungen als auch die Möglichkeit einer Wiederentwicklung durch gestaltendes Eingreifen des Menschen im Zuge von Maßnahmen zur Regeneration oder Neuentwicklung von Biotopen verstanden (BfN 2006, S. 15). Acker- und Grünflächen sind i. Allg. in der Lage, sich relativ schnell wieder zu regenerieren. Empfindlichere und hochwertige Biotope wie z.B. Gehölzbiotope und Feuchtgebietsbiotope bleiben dagegen langfristig geschädigt (GEO et al. 2009, S. 153).

Die Rote Liste der Biotope enthält weitere planungsrelevante Informationen, die zur Beurteilung der Eingriffsintensität durch Höchstspannungsleitungen (Freileitung und Erdkabel) hinzugezogen werden können (vgl. Tabelle 9). Hierzu gehören u.a. Angaben über aktuelle Bestandsentwicklungen und über die Grundwasserabhängigkeit im Sinne der Wasserrahmenrichtlinie (WRRL).

Tabelle 9: Bewertungsrahmen zur Klassifikation des Konfliktpotenzials von Biotoptypen gegenüber den baubedingten Auswirkungen von Höchstspannungsleitungen (Freileitungen und Erdkabel) (eigene Darstellung nach BfN 2006)

| Stufe | Gefährdungsstatus nach Roter Liste (BfN 2006) | Pauschaler Schutzstatus | Regenerierbarkeit | Konfliktpotenzial |
|-------|---|-------------------------|-------------------|-------------------|
| 1 | von vollständiger Vernichtung bedroht: Biotoptypen, von denen nur noch ein geringer Anteil der Ausgangsfläche bzw. der Ausgangsbestände vorhanden ist und mit deren vollständiger Vernichtung gerechnet werden muss, wenn die Gefährdungsursachen weiterhin einwirken oder bestandserhaltende Schutz- und Hilfsmaßnahmen nicht unternommen werden, nicht erfolgreich sind oder wegfallen. | § 30 BNatSchG | alle Werte | Ausschluss |
| 1 | von vollständiger Vernichtung bedroht (s.o.) | kein Status | alle Werte | Ausschluss |
| 2 | stark gefährdet: Biotoptypen, deren Flächen- bzw. Bestandsentwicklung in annähernd dem gesamten Betrachtungsraum stark rückläufig sind oder die bereits in mehreren Regionen ausgelöscht sind. | § 30 BNatSchG | alle Werte | sehr hoch |
| 2 | stark gefährdet (s.o.) | kein Status | N, K, S | hoch |
| 2 | stark gefährdet (s.o.) | kein Status | B | hoch |
| 3 | gefährdet: Biotoptypen, deren Flächen- bzw. Bestandsentwicklung in weiten Teilen des Betrachtungsraums negativ sind oder die bereits vielerorts lokal ausgelöscht sind. | § 30 BNatSchG | N, K, S | erhöht |
| 3 | gefährdet (s.o.) | § 30 BNatSchG | B | erhöht |
| 3 | gefährdet (s.o.) | kein Status | alle Werte | erhöht |
| r | rare, enge geographische Restriktion: Biotoptypen, die im Betrachtungsraum nur sehr regional verbreitet sind oder natürlicherweise nur in geringer Gesamtfläche bzw. Bestandszahl vorkommen, aktuell aber keine Gefährdung gemäß den Kategorien 1 bis 3 aufweisen. Eine potenzielle Gefährdung besteht immer und kann schon durch geringfügigen Flächenverlust in eine hohe Gefährdung umschlagen. | alle Werte | alle Werte | mäßig |
| V | Vorwarnliste. Biotoptypen, die eine Rückgangstendenz zeigen (auch langfristig), die aber bislang noch nicht im Sinne der Kategorie 1 bis 3 gefährdet sind. | alle Werte | alle Werte | mäßig |
| * | derzeit keine Gefahr erkennbar | alle Werte | alle Werte | kein |

Legende: N = nicht regenerierbar; K = kaum regenerierbar (> 150 Jahre); S = schwer regenerierbar (ca. 15–150 Jahre); B = bedingt regenerierbar (bis 15 Jahre).

4.1.3.2 Lineare Biotope

Bei der Querung bzw. Zerschneidung von linearen Biotoptypen wie Flüssen und Bächen, Hecken oder Baumreihen während der Errichtung einer Freileitung kommt es regelmäßig zu negativen Auswirkungen auf die vorhandenen Lebensräume. Die Rote Liste der gefährdeten Biotoptypen macht deutlich, dass vor allem naturnahe Fließgewässer vielfach als stark gefährdet bzw. als von der Vernichtung bedroht gelten (BFN 2006, S. 167 ff., vgl. Tabelle 10). Bei Hecken und Baumreihen (lineare Gehölzbiotope) sind Qualitätsminderung und Funktionsverlust des Lebensraums insbesondere für Kleinsäuger und Vögel zu erwarten.

Tabelle 10: Lineare Biotoptypen mit hohem bis sehr hohem Konfliktpotenzial gegenüber Höchstspannungsleitungen (Freileitungen und Erdkabel) (nach BfN 2006, S. 88 ff.)

| Biotoptyp (lineare Biotoptypen) | Gefährdungsstatus | Regenerierbarkeit | Tendenz | § 30 BNatSchG |
|--|-------------------|-------------------|-------------------------|---------------|
| Gebüsche mit überwiegend autochthonen Arten (Gebüsche nasser bis feuchter organischer Standorte) | 2 | S | positiv | |
| Gebüsche mit überwiegend autochthonen Arten (Gebüsche nasser bis feuchter organischer Standorte: Zwergbirkengebüsch) | 1 | S | negativ | |
| Gebüsche mit überwiegend autochthonen Arten (Gebüsche nasser bis feuchter organischer Standorte: Moor-Gebüsch) | 2 | S | positiv | |
| Gebüsche trocken-warmer Standorte (Buxus-Gebüsch) | 2 | S | stabil | § |
| Gebüsche trocken-warmer Standorte (trockenes Zwerg- und Weichselkirschen Gebüsch) | 1-2 | K | stabil | § |
| Feldgehölze mit überwiegend autochthonen Arten (Feldgehölze nasser bis feuchter u. trocken-warmer Standorte) | 2-3 | S | stabil | |
| Hecken mit überwiegend autochthonen Arten (Wallhecke, Knick) | 2 | S | stabil | |
| Hecken mit überwiegend autochthonen Arten (1. Hecke auf Lesesteinriegel, 2. Hecken auf ebenerdigen Rainen oder Böschungen) | 2-3 | S | 1. stabil 2. negativ | |
| Einzelbäume, Baumreihen und Baumgruppen (Kopfbäum) | 2 | S | negativ | |
| Einzelbäume, Baumreihen und Baumgruppen (Allee bzw. Baumreihe, einzelne Obstbaumreihe oder einzelner Obst- bzw. Nussbaum) | 2-3 | S | negativ | |
| Streuobstbestand [Komplex] (auf Grünland und Acker) | 2 | S | negativ | |
| Rebkultur und Rebbrachen (Rebkulturen in Steillage auf skelettreichem Boden) | 2 | S | negativ | § |

Legende: Gefährdung: 1 = von vollständiger Vernichtung bedroht, 2 = stark gefährdet; 3 = gefährdet. Regenerierbarkeit: N = nicht regenerierbar; K = kaum regenerierbar (> 150 Jahre); S = schwer regenerierbar (ca. 15–150 Jahre); B = bedingt regenerierbar (bis 15 Jahre). Tendenz: positiv = Bestandsentwicklung positiv, stabil = Bestand weitgehend stabil negativ = Bestandsentwicklung negativ ? = Entwicklungstendenz nicht abschätzbar. § 30 BNatSchG: § = gesetzlich geschütztes Biotop.

4.1.3.3 Gehölzbiotope

Gehölzbiotope wie Laub(Misch)- oder Nadel(Misch)wälder gelten als besonders schützenswerte Biotope (vgl. Tabelle 11) und sind aufgrund der für die Anlage von Schutzstreifen notwendigen Baufeldfreimachung besonders gefährdet. Die Errichtung einer Freileitung in einem geschlossenen Waldbereich geht mit Kahlschlag und mit einem somit erheblichen Vegetationsverlust einher (TRANSPower 2010, S. 43). Langfristig sind standortbezogen ABERLE U. PARTL (2005, S. 97) und TRANSPower (2010, S. 68) zufolge sowohl im Bereich des Schutzstreifens als auch im angrenzenden Waldbestand weitreichende Standortveränderungen und Destabilisierungerscheinungen zu erwarten. Aufgrund der ungehinderten Sonneneinstrahlung auf die Schlagfläche und auf das Bestandesinnere sind z.B. feinrindige Baumarten (z.B. Buche und Ahorn) durch Rindenbrand gefährdet. Eine verstärkte Austrocknung der Bäume und eine Zunahme von Schadpilzen und Schadinsekten können die Folge sein. Als weitere Auswirkungen werden Austrocknung des Oberbodens bzw. Bodenerosion und daraus resultierende Aushagerungerscheinungen im angrenzenden Waldbestand, insbesondere bei Fichtenmonokulturen, diskutiert (PARTL U. ABERLE 2006, S. 98 zit. nach FÜHRER 2001). Unter Berücksichtigung von Aufwuchsbeschränkungen ist eine reduzierte Wiederbewaldung im Bereich der Trassen möglich. Bei regelmäßiger Trassenpflege und intensiver forstlicher Nutzung können niederwaldähnliche Strukturen aufgebaut werden (vgl. IBU 2007, S. 257; TRANSPower 2010, S. 43). Bleibt die Schneise bestehen, kann es infolge der Zunahme von Sonneneinstrahlung und Windgeschwindigkeit zur Veränderung des Waldinnenklimas kommen, wodurch sich die Lebensbedingungen der Bodenfauna verschlechtern, was sich wiederum auch auf andere Organismen auswirkt (GEO et al. 2009, S. 104 zit. nach HASKELL 2000). Eine Barrierewirkung auf wandernde Tierarten wird von GEO et al. (2009, S. 105) zwar weder bei Freileitungen noch bei Erdkabeln erwartet. Dennoch sind standörtliche Einzelfallbetrachtungen notwendig, um sichere Aussagen treffen zu können. Als mögliche positive Auswirkung der neu entstandenen Waldschneisen kann die Zunahme von Waldränderbewohnenden Arten genannt werden, wie z.B. die mögliche Zunahme von Vogelarten der Waldränder und Hecken wie Goldammer, Baumpieper und Neuntöter (vgl. GEO et al. 2009, S. 105). Der Eingriff in Gehölzbiotope ist besonders schwerwiegend, wenn strukturreiche und naturnahe Laubholzbestände betroffen sind (vgl. IBU 2007, S. 258).

Feldgehölze sind in ähnlicher Weise negativ vom Bau von Freileitungen betroffen. Da der betroffene Gehölzanteil im Vergleich mit Waldbiotopen größer ist, sind Auswirkungen wie Gehölzverlust und Auswuchsbeschränkungen bei Feldgehölzen stärker zu gewichten. In den durch Anlage sowie Baumaßnahmen entstehenden Lücken gehen dauerhaft Lebensraumfunktionen wie z.B. spezielle Brutstätten verloren (IBU 2007, S. 259).

Tabelle 11: Gehölzbiotypen mit hohem bis sehr hohem Konfliktpotenzial gegenüber Höchstspannungsleitungen (Freileitungen und Erdkabel) (nach BfN 2006, S. 88 ff.)

| Biotyp (Gehölzbiotope) | Gefährdungsstatus | Regenerierbarkeit | Tendenz | § 30 BNatSchG |
|--|-------------------|-------------------|---------|---------------|
| (Nadel(misch)-)Moorwald (Fichten-Moorwälder, Waldkiefern-Moorwälder, Birken-Moorwälder, Latschen-Moorwälder) | 1-2 | N | negativ | § |
| (Nadel(misch)-)Moorwald (Birken-Moorwälder, Latschen-Moorwälder) | 2 | N | stabil | § |
| Natürliche bzw. naturnahe, trockene bis wechselfeuchte Kiefernwälder (trockene Sand-Kiefernwälder) | 1-2 | K | stabil | § |
| Birken-Moorwald (mit intaktem Wasserhaushalt) | 2 | K | negativ | § |
| Bruchwälder (Birken- und Birken-Erlenbruchwälder) | 2 | K | negativ | § |
| (Laub(misch)-)Auenwälder (Weichholzaunenwälder, Hartholzaunenwälder) | 2 | K | ? | § |
| (Laub(misch)-)Tideauenwälder (Weichholz-Tideauenwald) | 1 | K | positiv | § |
| (Laub(misch)-)Tideauenwälder (Hartholz-Tideauenwald) | 1 | K | stabil | § |
| Laub- und Mischwälder feuchter bis frischer Standorte (Eichen-Hainbuchenwald staunasser bis frischer Standorte, Birken-Eichenwald feuchter bis frischer Standorte) | 2 | K | negativ | |
| Laub- und Mischwälder feuchter bis frischer Standorte (montane buchen-Tannen-/Fichtenwälder (Buchenanteil > 50%)) | 2 | K | stabil | |
| Laub(misch)wälder trockener bzw. trocken-warmer Standorte (trockene Eichen-Hainbuchenwälder) | 2-3 | K | negativ | § |
| Laub(misch)wälder trockener bzw. trocken-warmer Standorte (Seggen-Buchenwald) | 2-3 | K | stabil | § |
| Laub(misch)wälder trockener bzw. trocken-warmer Standorte (Blaugras-Buchenwald) | 2 | K | stabil | § |
| Laub(misch)wälder trockener bzw. trocken-warmer Standorte (Eichen-Trockenwälder) | 2 | K | positiv | § |

Legende: Gefährdung: 1 = von vollständiger Vernichtung bedroht, 2 = stark gefährdet; 3 = gefährdet. Regenerierbarkeit: N = nicht regenerierbar; K = kaum regenerierbar (> 150 Jahre); S = schwer regenerierbar (ca. 15–150 Jahre); B = bedingt regenerierbar (bis 15 Jahre). Tendenz: positiv = Bestandsentwicklung positiv, stabil = Bestand weitgehend stabil negativ = Bestandsentwicklung negativ ? = Entwicklungstendenz nicht abschätzbar. § 30 BNatSchG: § = gesetzlich geschütztes Biotop.

4.1.3.4 Feuchtgebietsbiotope

Feuchtgebietsbiotope wie Mooregebiete (Hoch- und Niedermoore), Sümpfe und Auengebiete werden als sehr sensibel und schutzwürdig eingestuft, weisen somit eine hohe naturschutzfachliche Bedeutung auf (vgl. Tabelle 12). Naturnahe Moorböden gelten in ihrer Struktur als irreversibel vulnerabel bzw. nicht renaturierbar (GEO et al. 2009, S. 90). Die Errichtung von Masten hat im Bereich von Sümpfen und Niedermooren damit erhebliche und nachhaltige Beeinträchtigungen zur Folge (vgl. IBU 2007, S. 261). Intakte Mooregebiete sollten nach Möglichkeit schon frühzeitig in der Trassenplanung gemieden, im unvermeidlichen Fall großräumig überspannt werden.

Tabelle 12: Feuchtbiototypen mit hohem bis sehr hohem Konfliktpotenzial gegenüber Höchstspannungsleitungen (Freileitungen und Erdkabel) (nach BfN 2006, S. 88 ff.)

| Biotoptyp (Feuchtgebietsbiotope) | Gefährdungstatus | Regenerierbarkeit | Tendenz | § 30 BNatSchG |
|--|------------------|-------------------|---------|---------------|
| Waldfreie, oligo- bis mesotrophe Niedermoore und Sümpfe (oligo- bis mesotrophe, kalkarme Niedermoore; oligo- bis mesotrophe, kalkreiche Niedermoore) | 1 | K | negativ | § |
| Grünland nasser bis (wechsel-)feuchter Standorte (Pfeifengraswiesen; Brenndolden-Auenwiesen) | 1 | S | negativ | § |
| Salzgrünland des Binnenlandes | 1 | K | ? | § |
| Hochmoore (weitgehend intakt) | 1 | N | negativ | § |
| Übergangsmoore und Zwischenmoore | 1-2 | N | negativ | § |
| Nährstoffarme Großseggenriede | 2 | S | negativ | § |
| Schneidenröhricht | 1-2 | S | negativ | § |
| Schilfröhrichte (Schilf-Wasserröhricht) | 2-3 | S | ? | § |

Legende: Gefährdung: 1 = von vollständiger Vernichtung bedroht, 2 = stark gefährdet; 3 = gefährdet. Regenerierbarkeit: N = nicht regenerierbar; K = kaum regenerierbar (> 150 Jahre); S = schwer regenerierbar (ca. 15–150 Jahre); B = bedingt regenerierbar (bis 15 Jahre). Tendenz: positiv = Bestandsentwicklung positiv, stabil = Bestand weitgehend stabil negativ = Bestandsentwicklung negativ ? = Entwicklungstendenz nicht abschätzbar. § 30 BNatSchG: § = gesetzlich geschütztes Biotop.

4.1.3.5 Ackerbiotope

Landwirtschaftliche Nutzflächen wie Ackerbiotope gelten, soweit diese intensiv genutzt werden, bei der Errichtung von Freileitungen, bezogen auf das Schutzgut Biologische Vielfalt, als wenig empfindlich. Bei fachgemäß ausgeführten Bauarbeiten, bei denen auf die Vermeidung übermäßiger Bodenverdichtung geachtet wird, sind die Ackerflächen i. Allg. gut regenerierbar. Da bei diesen Ackerflächen das Lebensraumpotenzial relativ gering ist, beeinträchtigt der Flächenverlust im Bereich der Mastfußstandorte das Schutzgut oftmals nicht erheblich (vgl. IBU 2007, S. 262). In Einzelfällen gibt es jedoch schutzwürdige Äcker und Ackerbrachen, deren Zustand nur bedingt regenerierbar ist und die bei der Trassenwahl nach Möglichkeit umgangen werden sollten (vgl. Tabelle 13).

Im Bereich der Mastfußstandorte können sich kleinräumig neue Strukturelemente bzw. „Mastfußbiotope“ entwickeln, die von der Fauna als neues Rückzugsgebiet genutzt werden können (vgl. IBU 2007, S. 263). Aufgrund der Abstände zwischen den Mastfüßen und der jeweils gerin-

gen Flächenareale ist ein genetischer Austausch dieser Populationen aber nur wenigen Arten möglich.

Tabelle 13: Ackerbiototypen mit hohem bis sehr hohem Konfliktpotenzial gegenüber Höchstspannungsleitungen (Freileitungen und Erdkabel) (nach BfN 2006, S. 88 ff.)

| Biotoptyp (Äcker und Ackerbrachen) | Gefährdungstatus | Regenerierbarkeit | Tendenz | § 30 BNatSchG |
|---|------------------|-------------------|---------|---------------|
| Flachgründige, skelettreiche Kalkäcker und Kalkerbrache (extensiv bewirtschafteter flachgründiger und skelettreicher Kalkacker mit vollständiger Segetalvegetation) | 1-2 | B | negativ | |
| Flachgründige, skelettreiche Kalkäcker und Kalkerbrache (flachgründiger und skelettreicher Kalkacker mit artenreicher Segetalvegetation) | 2 | B | negativ | |
| Äcker und Ackerbrache auf flachgründigem, skelettreichem Silikatverwitterungsboden (extensiv bewirtschafteter Acker auf flachgründigem, skelettreichem Silikatverwitterungsboden mit vollständiger Segetalvegetation) | 1 | B | negativ | |
| Äcker und Ackerbrache auf flachgründigem, skelettreichem Silikatverwitterungsboden (flachgründiger und skelettreicher Kalkacker mit artenreicher Segetalvegetation) | 2 | B | stabil | |
| Äcker und Ackerbrache auf Sandboden (extensiv bewirtschafteter Acker auf Sandboden mit vollständiger Segetalvegetation) | 1 | B | negativ | |
| Äcker und Ackerbrache auf Sandboden (Acker auf Sandboden mit artenreicher Segetalvegetation) | 2 | B | stabil | |
| Äcker und Ackerbrachen auf Löss-, Lehm oder Tonboden (extensiv bewirtschafteter Acker auf Löss-, Lehm- oder Tonboden mit vollständiger Segetalvegetation) | 1-2 | B | negativ | |
| Äcker und Ackerbrachen auf Löss-, Lehm oder Tonboden (Acker auf Löss-, Lehm- oder Tonboden mit artenreicher Segetalvegetation) | 2-3 | B | positiv | |

Legende: Gefährdung: 1 = von vollständiger Vernichtung bedroht, 2 = stark gefährdet; 3 = gefährdet. Regenerierbarkeit: N = nicht regenerierbar; K = kaum regenerierbar (> 150 Jahre); S = schwer regenerierbar (ca. 15–150 Jahre); B = bedingt regenerierbar (bis 15 Jahre). Tendenz: positiv = Bestandsentwicklung positiv, stabil = Bestand weitgehend stabil negativ = Bestandsentwicklung negativ ? = Entwicklungstendenz nicht abschätzbar. § 30 BNatSchG: § = gesetzlich geschütztes Biotop.

4.1.3.6 Grünlandbiotope

Extensive Grünlandbiotope gelten als artenreich (vgl. Tabelle 14) und können punktuell durch die Errichtung von Freileitungsmasten in ihrer Lebensraumfunktion beeinträchtigt werden. Die Anlage von Freileitungen auf intensiv genutztem Grünland ist i. Allg. eher verträglich und kann durch Etablierung von Altgrasbestand am Mast zur Entstehung ökologisch funktionsträchtiger Strukturelemente führen (IBU 2007, S. 262). Auch ABERLE U. PARTL (2005, S. 132) sowie VATTENFALL (2005) heben als mögliche positive Auswirkung an Maststandorten das Entstehen von „Ersatzbiotopen“ bzw. „Mastfußbiotopen“ hervor, die in der derzeitigen Kulturlandschaft als rückläufig gelten sollen.

In ähnlicher Weise wird bei waldquerenden Trassenvarianten den bau- und anlagebedingten erheblichen Eingriffen eine mögliche Verbesserung der ökologischen Strukturvielfalt gegenübergestellt. So kann es z.B. im Bereich der Schutzstreifen zur Einwanderung typischer Offenlandbewohner, bspw. Kleinsäuger und Wirbelloser kommen. Die Entwicklung eines Biotopverbundes könnte gefördert werden. Ebenso ist aber auch die Vertreibung schutzbedürftiger Arten mög-

lich. Die sich für die Lebensraumqualität ergebenden Veränderungen können letztlich nur standortspezifisch bewertet werden.

Tabelle 14: Trockenrasen- und Grünlandbiotoptypen mit hohem bis sehr hohem Konfliktpotenzial gegenüber Höchstspannungsleitungen (Freileitungen und Erdkabel) (nach BfN 2006, S. 88 ff.)

| Biotoptyp (Trockenrasen und Grünland) | Gefährdungsstatus | Regenerierbarkeit | Tendenz | § 30 BNatSchG |
|--|-------------------|-------------------|---------|---------------|
| Trockenrasen | 1-2 | N | negativ | § |
| Halbtrockenrasen (subkontinentale Halbtrockenrasen auf karbonatischem oder sonstigem basenreichen Boden, beweidet) | 2 | S | negativ | § |
| Halbtrockenrasen (subkontinentale Halbtrockenrasen auf karbonatischem oder sonstigem basenreichen Boden, gemäht) | 1-2 | S | negativ | § |
| Halbtrockenrasen auf silikatischem Untergrund (subkontinentale auf silikatischem, basenarmen Boden, gemäht) | 1-2 | S | negativ | § |
| Halbtrockenrasen auf silikatischem Untergrund (subkontinentale auf silikatischem, basenarmen Boden, beweidet) | 2 | S | negativ | |
| Steppenrasen subkontinental, auf tiefgründigem Boden (gemäht u. beweidet) | 1-2 | N | negativ | § |
| Sandtrockenrasen (anueßer Sandtrockenrasen, Silbergrasrasen) | 2 | S | negativ | § |
| Sandtrockenrasen (ausdauernd mit geschlossener Narbe, gemäht/beweidet) | 1-2 | S | negativ | § |
| Borstgrasrasen (trockener bis feuchter Standorte) | 1-2 | S | negativ | § |
| Borstgrasrasen (feuchter Standorte der planaren bis submontanen Stufe) | 1 | S | negativ | § |
| Artenreiches Grünland frischer Standorte | 2 | S | negativ | |

Legende: Gefährdung: 1 = von vollständiger Vernichtung bedroht, 2 = stark gefährdet; 3 = gefährdet. Regenerierbarkeit: N = nicht regenerierbar; K = kaum regenerierbar (> 150 Jahre); S = schwer regenerierbar (ca. 15–150 Jahre); B = bedingt regenerierbar (bis 15 Jahre). Tendenz: positiv = Bestandsentwicklung positiv, stabil = Bestand weitgehend stabil negativ = Bestandsentwicklung negativ ? = Entwicklungstendenz nicht abschätzbar. § 30 BNatSchG: § = gesetzlich geschütztes Biotop.

4.1.4 Vermeidungs- und Minderungsmaßnahmen

Grundsätzlich gilt, dass eine Trassenführung außerhalb des Bereichs ökologisch wertvoller Biotope die effektivste Vermeidungs- und Minderungsmaßnahme ist (ERM 2010). Freileitungen sollten naturnahe Wälder, Feuchtgebiete, Gewässer- und Auenbiotope möglichst nicht tangieren (DEUTSCHE UMWELTHILFE 2010, S. 8; LAUKHUF 2007, S. 19). Im Rahmen der UVS für die 380-kV-Leitung Wahle-Mecklar (ERM 2010, S. C3-9) wird die Querung von Waldbeständen und wertvollen Gebieten für Natur und Landschaft (Naturschutzgebiete, Landschaftsschutzgebiete, Natura-2000-Gebiete u.a) auf Bereiche beschränkt, in denen „eine entsprechende Trassenführung auf Grund der großräumigen Trassenbündelung oder zur Vermeidung anderer erheblicher Raumkonflikte unumgänglich ist.“ Grundsätzlich besteht bei der Wahl der Maststandorte auf Grund der recht hohen Flexibilität (Überspannungen von 300–450 m Feldlänge) die Möglichkeit, wertvolle Biotope zu umgehen (ERM 2010).

Wertvolle Gehölzstandorte können ggf. mit Hilfe höherer Masten überspannt werden. Muss ein Schutzstreifen durch Gehölze angelegt werden, so ist grundsätzlich ein Zurückschneiden von Bäumen einer Baumentnahme vorzuziehen. Ist dies nicht möglich, so sind bei der Baufeldfreimachung von Gehölzen die Wurzelstöcke im Boden zu belassen (ERM 2010).

Es wird empfohlen, ein ökologisches Trassenmanagement im Sinne des „Plan N“ der DEUTSCHEN UMWELTHILFE (2010) durchzuführen. Für die beim Bau abgängigen Waldflächen (Waldkahlfächen) wird i. Allg. eine Wiederaufforstung im Verhältnis 1:1 gefordert (vgl. WEYER et al. 2012, Abschn. 5.7.2.1.). Die Maßnahmen der naturschutzrechtlichen und forstrechtlichen Kompensation können zumeist in der Umgebung des Eingriffs realisiert werden (ERM 2010, S. C6-7).

4.2 Auswirkungen von 380-kV-Höchstspannungsgleichstrom-Freileitungen

Die im Kapitel 4.1 für 380-kV-Höchstsspannungsdrehstrom-Freileitungen genannten bau-, betriebs- oder anlagebedingten Faktoren, die sich auf die biologische Vielfalt auswirken können, sowie die aufgeführten Vermeidungs- und Minderungsmaßnahmen gelten ebenso für 380-kV-Höchstspannungsgleichstrom-Freileitungen.

4.3 Nebenanlagen bei Freileitungen

Durch die Errichtung von Umspannwerken (bei Wechselstromleitungen und Gleichstromleitungen), Konverterstationen (nur bei Gleichstromleitungen) sowie von Übergangsbauwerken geht potentieller Lebensraum verloren (vgl. Abschn. 3.3).

4.4 Auswirkungen von 380-kV-Höchstspannungsdrehstrom-Erdkabeln

4.4.1 Übersicht

Vor Baubeginn werden sich auf dem geplanten Trassenverlauf befindende Gehölze gerodet. Während der Betriebsphase muss der direkte Trassenverlauf von tiefwurzelnden Pflanzen, deren Wurzeln die Erdkabel möglicherweise beschädigen könnten, freigehalten werden. Die weiteren maßgeblichen Auswirkungen von Erdkabeln auf Biotope und Schutzgebiete sind nahezu ausschließlich der Bauphase zuzuordnen. Aufgrund der umfassenden Tiefbauarbeiten, die mit dem Bau von Erdkabeltrassen notwendig werden, sind mögliche temporäre oder dauerhafte Gefährdungen empfindlicher Biotope nicht auszuschließen. Mögliche Auswirkungen auf Biotope ergeben sich aus der Verlegung des Kabels, aus der Rodung eines Schutzstreifens, aus der Anlage von Baustraßen und aus dem Bau von Nebenanlagen wie Muffenbauwerken, Cross-Bonding-Kästen sowie ggf. Kühlungs-, Steuerungs- und Kabelübergangsanlagen (KÜA). Als mögliche Auswirkungen sind dabei ggf. kleinflächige Veränderungen von Artenreichtum und -vielfalt, eine Störung ökologischer Ausgleichsbeziehungen sowie der Verlust und die Zerstörung von Habitaten denkbar (TRANSPower 2010; GEO et al. 2009, ERM 2008).

In weiten Bereichen ist der Lebensraumverlust temporär. So können z.B. Schutzstreifen und abgedeckte Kabelgräben wieder Lebensraumfunktionen erfüllen (u.a. ERM 2008, S. 6.2-4/5). Werden jedoch Trassen in Wäldern gerodet, geht dieser Lebensraum im Trassenbereich verloren, da der Wald aufgrund der Maßnahmen zur Trassenfreihaltung und dem Ausschluß tiefwurzelnder Arten dort nicht nachwachsen kann. Hierbei ist die von tiefwurzelnden Gehölzen freizuhaltende Trasse mit 13–21 m schmaler als bei Freileitungen, wo eine Trassenbreite von 40–70 m freigehalten wird. In vereinzelten Fundamentbereichen für Portale, Geräteträger etc. ist aufgrund teilweiser Flächenversiegelung ein vollständiger Verlust des Lebensraums zu erwarten.

4.4.2 Schutzgebiete

4.4.2.1 Streng geschützte Gebiete

Streng geschützte Gebiete (NSG, Nationalpark, FFH-/VS-Gebiet, Zone 1+2 Biosphärenreservat, Biototypen nach § 30 BNatSchG, vgl. Abschn. 4.1.2) sind in besonderem Maße mit empfindlichen Biotopen ausgestattet, für die hinsichtlich der Verlegung von Erdkabeln ein erhöhtes Risiko besteht. Zur Vermeidung späterer Planungskonflikte sollte die Schutzbedürftigkeit dieser speziellen Naturräume schon frühzeitig bei der Trassenplanung beachtet werden.

Da Schutzgebiete häufig letzte Rückzugsmöglichkeiten für solche Arten sind, die außerhalb dieser Gebiete kaum noch vorkommen, könnte sich der Erhaltungszustand der lokalen Population einer der betroffenen Arten insbesondere durch Störungen während der Bauphase maßgeblich verschlechtern. Streng geschützte Biotope stehen jedoch nicht grundsätzlich der Realisierung einer Kabeltrasse entgegen. So wurden bspw. Erdkabeltrassen durch die Wattenmeer-Nationalparks zugelassen. Zweifellos bedarf es zur Inanspruchnahme eines streng geschützten Gebietes jedoch einer besonderen Notwendigkeit.

4.4.2.2 Schwächer geschützte Gebiete

Auch schwächer geschützte Gebiete sind so gut es geht zu meiden, denn Vegetationsverluste, Bodenverdichtung und andere unerwünschte Nebenerscheinungen sind bei der Kabelverlegung auch in diesen Gebieten unvermeidbar. Bei besonderer Notwendigkeit ist zu prüfen, ob sich die Beeinträchtigungen nach standörtlicher Vorprüfung und mit Hilfe von Vermeidungs- und Minderungsmaßnahmen auf ein zuträgliches Maß abschwächen lassen.

Baubedingt kann es zu Störungen (§ 44 Abs. 1 Nr. 2 BNatSchG) besonders bzw. streng geschützter Arten kommen, bspw. wenn der Eingriff in der Nähe ganzjährig frequentierter Wasservogellebensräume stattfindet, doch ist die Verschlechterung des Erhaltungszustandes der lokalen Population einer der betroffenen Arten in diesen Gebieten deutlich unwahrscheinlicher als in den streng geschützten Gebieten. Durch Anlage und Betrieb eines Kabels fallen Störungen deutlich geringer aus als in der Bauphase.

4.4.3 Biotope

4.4.3.1 Gefährdungskriterien für Biotope

Die Einstufung des Konfliktpotentials eines Biototyps gegenüber Eingriffen durch Erdkabeltrassen kann für die Anwendung auf Freileitungen übernommen werden und ist in Abschn. 4.1.3 beschrieben worden.

Ein besonderes Augenmerk ist auf natürliche Standorte kälteliebender Arten (Nordhänge, Senken) zu richten. Hier ist im Zweifel zu prüfen, ob Pflanzen und Böden ausreichend wärmetolerant sind, um bei Erdkabeln auch Ausnahmesituationen mit höherer Wärmeemission zu überstehen.

4.4.3.2 Lineare Biotope

Wie im Abschn. 4.1.3.2 beschrieben, kann es bei der Querung bzw. Zerschneidung von linearen Biototypen wie Flüssen und Bächen, Hecken oder Baumreihen während der Errichtung einer

Erdkabeltrasse zu negativen Auswirkungen auf die vorhandenen Lebensräume kommen (vgl. Tabelle 10 in Abschn. 4.1.3.2). Eine Unterdükerung, die bei weichen Böden auch unter Baugrundgesichtspunkten empfehlenswert ist, kann temporären und dauerhaften Störungen der Biotopeigenschaften und des Artenspektrums vorbeugen (vgl. Abschn. 5.4.5).

4.4.3.3 Gehölzbiotope

Gehölzlebensräume sind durch die Verlegung von Erdkabeln in besonderem Maße betroffen, da die Kabeltrasse bei der zumeist üblichen freien, nicht getunnelten Verlegung des Kabels im Erdreich bzw. in Magerbeton auf Breite des Schutzstreifens von mittleren bis großen Gehölzen zu räumen und von tiefwurzelnden Gehölzen freizuhalten ist. Waldbiotope sind durch derartige Trassen von Zerschneidung bedroht. Insbesondere die seltenen Waldbiotope, die als „von der vollständigen Vernichtung bedroht“ eingestuft werden (vgl. Tabelle 11, Abschn. 4.1.3.3), sind von der Trassenwahl auszuschließen. Auch die in der Roten Liste als „stark gefährdet“ eingestuften Gehölze sollten bei der Trassenwahl möglichst ausgeschlossen werden.

Die Entstehung von Schneisen in geschlossenen Waldbeständen aufgrund der bei einem frei verlegten Kabel² notwendigen Entfernung aller tiefwurzelnden Pflanzen hat aufgrund einer daraus resultierenden Zunahme von Sonneneinstrahlung und Windgeschwindigkeit eine Veränderung des Waldinnenklimas zur Folge. Im Einzelnen können sich die Lebensbedingungen der Bodenfauna verschlechtern sowie die daraus resultierende Diversität der Organismen abnehmen (GEO et al. 2009, S. 104 zit. nach HASKELL 2000). Eine Barrierewirkung auf wandernde Tiere wird von GEO et al. (2009, S. 105) nicht erwartet. Die neu entstandenen Waldschneisen können auch positive Auswirkungen auf bestehende Gehölzbiotope haben, bspw. durch Zunahme von Vogelarten der Waldränder und Hecken wie Goldammer, Baumpieper und Neuntöter (vgl. GEO et al. 2009, S. 105).

4.4.3.4 Feuchtbiotope

Feuchtgebietsbiotope, insbesondere Moore, Riede und Auenwiesen (vgl. Tabelle 12 in Abschn. 4.1.3.4), stellen für die Verlegung von Erdkabeln nicht nur einen schlechten Baugrund dar, sondern sind auch in vielen ökologischen Faktoren sehr vulnerabel (vgl. u.a. ERM 2008, S. 6.2-138; GEO et al. 2009, S. 226). Feuchtbiotope sind u.a. auch bevorzugte Standorte kälteliebender Arten, die ggf. auch auf kurzfristige Erwärmungen reagieren. Waldfreie Niedermoore und Sümpfe sowie Grünland nasser bis feuchter Standorte sind der Roten Liste zufolge als „von der vollständigen Vernichtung bedroht“ einzustufen (BFN 2006, S. 220 ff.).

Baubedingt könnte es zu Schädigungen der Vegetationsdecke und der Bodenfunktion kommen (vgl. Abschnitt zum Schutzgut „Boden“). Die Standortbedingungen in der näheren Umgebung des Kabels können nicht nur infolge der Baumaßnahmen verändert werden, sondern auch aufgrund temporärer Bodenerwärmungen im Laufe der Betriebsphase eine dauerhafte Verschiebung des Artenspektrums herbeiführen. I. Allg. wird man solche Gebiete aus technischen und ökologischen Erwägungen frühzeitig von der Trasse ausschließen bzw. wenn unvermeidlich unterdükern, was bei angemessener Tiefe und Abstand der Dükereinlässe zumeist ökologisch unbedenklich ist (vgl. Abschn. 5.4.5).

² Bei der deutlich aufwendigeren Verlegung im Tunnel fällt der Schutzstreifen schmaler aus.

4.4.3.5 Ackerbiotope

Landwirtschaftlich genutzte Flächen, insbesondere Ackerflächen, sind nach fachgemäß ausgeführten Tiefbauarbeiten, die übermäßige Bodenverdichtungen vermeiden, i. Allg. gut regenerierbar. In Einzelfällen gibt es jedoch schutzwürdige Äcker und Ackerbrachen, deren Zustand nur bedingt regenerierbar ist und die bei der Trassenwahl nach Möglichkeit umgangen werden sollten. Diese sind in Tabelle 13 im Abschn. 4.1.3.5 aufgeführt.

Die Folgen möglicher Wärmeemission von Hochspannungskabeln auf den Getreideanbau wurden nach einem an der Universität Freiburg durchgeführten Freilandversuch von TRÜBY u. UTHER (2011) als marginal bezeichnet (vgl. auch UTHER et al. 2009). Belastbare Untersuchungen, die der Komplexität möglicher Bodentypen, Anbausorten und Kabelbelastungssituationen auf Höchstspannungsebene gerecht werden, fehlen jedoch noch weitgehend. PATIL et al. (2010) stellten in einem Feldversuch zum Klimawandel bei einer dauerhaften Bodenerwärmung um 5 K in 10 cm Tiefe eine Verschiebung von Wachstumsphasen zugunsten der Halmentwicklung und zu Ungunsten der Ährenentwicklung von Weizen fest. Viel hängt letztlich von der technischen Auslegung des jeweiligen Kabels ab. Wenn seltene Ausnahmesituationen einer über lange Zeit andauernden deutlich erhöhten Wärmeemission auf schlecht ableitenden Böden mit phänologisch empfindlichen Entwicklungsphasen (z.B. Frühjahrsaustrieb) zusammentreffen, können landwirtschaftliche Beeinträchtigungen, bspw. durch Spätfrost, nicht ausgeschlossen werden (vgl. UTHER et. al. 2009).

4.4.3.6 Trockenrasen und spezifische Grünlandstandorte

Trockenrasen und einige wenige spezifische Grünlandstandorte sind nur schwer regenerierbar und daher bei der Wahl einer Erdkabeltrasse nach Möglichkeit zu umgehen. Eine nähere Beschreibung der Trockenrasen- und Grünlandbiototypen mit hohem bis sehr hohem Konfliktpotential ist Tabelle 14 im Abschn 4.1.3.6 zu entnehmen.

4.4.4 Vermeidungs- und Minderungsmaßnahmen

Der Eingriff in schutzwürdige Biotope sollte möglichst gering gehalten werden. Vermeidungs- und Minderungsmaßnahmen können am effektivsten bei der Trassierung auf einem frühzeitigen Planungsstadium einsetzen, damit ökologisch wertvolle Biotope beim Bau gar nicht erst tangiert werden (ERM 2010). Durch eine wohlüberlegte Trassenführung lässt sich eine Vielzahl von Beeinträchtigungen vermeiden. Falls eine Verlegung der Trasse in schutzwürdigen Bereichen auch nach sorgfältiger Prüfung unvermeidlich ist, besteht die Möglichkeit, diese Biototypen zu unterdückern – dies ist allerdings mit hohen Kosten verbunden (vgl. Abschn. 5.4.5).

Vegetationsschutzmaßnahmen sind gemäß DIN 18920 durchzuführen. So ist z.B. stets zu prüfen, ob flach wurzelnde Biotopelemente neben dem Kabelgraben zwischengelagert werden können, um sie nach Beendigung der Bauarbeiten erneut am Standort wiederherzustellen. Gehölzeinschlag kann durch die Nutzung größerer Gehölzlücken minimiert werden. Ein schmal gehaltener Arbeitsstreifen kann Beeinträchtigungen verringern, ggf. sogar vollständig vermeiden (IBNI et al. 2008, S.162). Durch saisonal angepasste Bauzeitenregelungen und die Verkürzung der Inanspruchnahme wertvoller Biotope auf ein absolutes Minimum lassen sich auch im Fall eines unvermeidlichen Eingriffs noch Beeinträchtigungen verringern, bspw. im Bereich von Feuchtlebensräumen und Gewässern durch die Reduzierung notwendiger Wasserhaltungsmaßnahmen.

4.5 Auswirkungen von 380-kV-Höchstspannungsgleichstrom-Erdkabeln

Da bei der HGÜ im Gegensatz zur Drehstromtechnik nur zwei Leiter pro Stromkreis (bipolares System; bei Neubauten werden nur noch bipolare Systeme eingesetzt) notwendig sind (HOFMANN et al. 2012, S. 38–40), ist der Flächenverbrauch bei HGÜ-Erdkabeln geringer als bei HDÜ-Erdkabeln (vgl. Abschnitt 2.5.4 sowie HOFMANN et al. 2012, S. 97–98). Ansonsten können die im Kapitel 4.4 für Höchstspannungsdrehstrom-Erdkabel genannten bau-, betriebs- oder anlagebedingten Faktoren, die sich auf die biologische Vielfalt auswirken können, sowie die aufgeführten Vermeidungs- und Minderungsmaßnahmen für Höchstspannungsgleichstrom-Erdkabel übernommen werden.

4.6 Nebenanlagen bei Erdleitungen

Durch die Errichtung von Umspannwerken, Konverterstationen und von Übergangsbauwerken sowie – in geringerem Maßstab – Muffenbauwerken, Cross-Bonding-Bauwerken und Kompensationsanlagen, geht potentieller Lebensraum verloren (vgl. Abschn. 3.6).

4.7 Auswirkungen von gasisolierten Leitungen

Bei Verlegung GIL im Boden sind die zu Erdkabeln beschriebenen Auswirkungen auf die biologische Vielfalt übertragbar. Aufgrund der Vormontage der Rohrsegmente vor Ort ist eine breitere Bautrasse notwendig als für Erdkabel.

Bei der Verlegung von GIL in bereits bestehenden Tunneln sind keine Auswirkungen auf Biotope zu erwarten.

4.8 Zusammenfassung Schutzgut „Biologische Vielfalt“

Die biologische Vielfalt ist nach § 7 Abs. 1 Nr. 1 des BNatSchG als „die Vielfalt der Tier- und Pflanzenarten einschließlich der innerartlichen Vielfalt sowie die Vielfalt an Formen von Lebensgemeinschaften und Biotopen“ definiert. Ein System von Schutzgebieten stellt ein zentrales Element für die nationalen Strategien zur Erhaltung der biologischen Vielfalt dar. Mögliche Auswirkungen von Höchstspannungsleitungen auf die biologische Vielfalt wurden daher anhand von Schutzgebieten und bestimmter Biotoptypen dargestellt.

Bei Freileitungen sind für die biologische Vielfalt v.a. die sich bau-, betriebs-, anlage- oder wartungsbedingt ergebenden Beeinträchtigungen von Vegetation und Habitaten, Änderung von Struktur und Artenspektrum, Beseitigung von Gehölzen und einzelner Bäume bei der Anlage von Schneisen, Bodenentnahme und Bodenverdichtung im Bereich der Mastfundamente, zeitweilige Veränderung des Boden-Wasser-Haushalts sowie der dauerhafte Biotopverlust im Bereich der Fundamentköpfe relevant.

Die maßgeblichen Auswirkungen von Erdkabeln auf Biotope und Schutzgebiete sind nahezu ausschließlich der Bauphase zuzuordnen. Aufgrund der umfassenden Tiefbauarbeiten, die mit dem Bau von Erdkabeltrassen notwendig werden, sind mögliche temporäre oder dauerhafte Gefährdungen empfindlicher Biotope nicht auszuschließen. Bei Erdkabeln ist der Lebensraumverlust in weiten Bereichen temporär. Werden jedoch Trassen in Wäldern gerodet, geht dieser Lebensraum im Trassenbereich verloren, da dieser von tiefwurzelnden Pflanzen freigehalten werden muss.

Bei der Anlage der Schneisen für Freileitungen und Erdkabel sind großräumige Vegetationsverluste unvermeidbar. Auch können Tötung von Individuen (§ 44 Abs. 1 Nr.1 BNatSchG) und die

Beschädigung/Zerstörung von Lebensstätten (§ 44 Abs. 1 Nr.3 BNatSchG) während der Bauphase voraussichtlich nicht vermieden werden.

Auswirkungen auf das Schutzgut „Biologische Vielfalt“ sind bei Freileitungen vor allem betriebsbedingt, während sie bei Erdkabeln aufgrund umfangreicher Erdbewegungen überwiegend baubedingt sind. Die dauerhafte Beanspruchung von Schneisen, die als Schutzstreifen dem Schutz von Freileitungen dienen, gilt als die maßgebliche Auswirkung von Freileitungen auf Biotop. Im Bereich dieser ca. 40–70 m breiten Schutzstreifen können sich Lebensräume dauerhaft verändern. Umliegende Biotop werden durch die Trasse zerschnitten. Im Bereich der Mastfundamente ist im Falle einer Flächenversiegelung ein vollständiger Lebensraumverlust zu erwarten. Für Erdkabeltrassen ist eine Rodung im Trassenbereich (Breite ca. 13–21 m bei Drehstrom, ca. 11–20 m bei Gleichstrom) notwendig. Die Vegetationsdecke wird hierbei zerstört, kann sich aber, mit Ausnahme tiefwurzelnder Arten bei Erdkabeln, nach Beendigung der Bauarbeiten wieder einstellen. Werden Trassen in Wäldern gerodet, geht dieser Lebensraum im Trassenbereich verloren.

Biotop streng geschützter Gebiete (v.a. Nationalparks, FFH-/VS-Gebiete, Zonen 1+2 Biosphärenreservat, NSG, nach § 30 BNatSchG geschützte Gebiete) können i.d.R. als hoch empfindlich gegenüber Eingriffen, die sich beim Leitungsbau ergeben, eingestuft werden. Die Schutzbedürftigkeit dieser speziellen Naturräume sollte zur Vermeidung späterer Planungskonflikte schon frühzeitig bei der Trassenplanung beachtet werden. Nach Möglichkeit sollten auch weniger streng geschützte Gebiete (LSG, Zone 3 in Biosphärenreservaten, Naturparke) geschont werden.

Unter den linearen Biotop sind es vor allem naturnahe Fließgewässer, die als stark gefährdet gelten. Bei der Erdkabelverlegung kann hier durch eine Unterdükerung temporären und dauerhaften Störungen der Biotopeigenschaften und des Artenspektrums vorgebeugt werden. Bei linearen Gehölzbiotop (Hecken, Baumreihen) sind Funktionsverluste des Lebensraums insbesondere für Kleinsäuger und Vögel zu erwarten.

Gehölzbiotop sind durch die Anlage von Schutzstreifen sowohl bei Freileitungen wie Erdkabeln gefährdet. Aufgrund der ungehinderten Sonneneinstrahlung auf die Schlagfläche und auf das Bestandsinnere kann es bei Waldbiotop zu kleinklimatischen Folgewirkungen, z.B. zur verstärkten Austrocknung von Vegetation und Oberboden sowie zur Zunahme von Schadpilzen und Schadinsekten kommen. Mögliche Barrierewirkungen für wandernde Tierarten sind standörtlich zu untersuchen. Die neu entstandenen Waldschneisen müssen jedoch nicht zwangsläufig negativ wirken, sondern können u.U. auch zu einer Zunahme von Waldränder bewohnenden Arten und somit zu einer gesteigerten Artenvielfalt führen.

Feuchtgebietsbiotop weisen eine hohe naturschutzfachliche Bedeutung auf und werden gegenüber Eingriffen als sehr sensibel und schutzwürdig eingestuft. Ist eine Umgehung nicht möglich, sollte bei Freileitungen eine Überspannung dieser Gebiete vorgenommen werden, bei Erdkabeln eine Unterdükerung.

Intensiv genutzte Ackerbiotop gelten für die Errichtung von Freileitungen als weniger empfindlich. Wird auf die Vermeidung einer übermäßigen Bodenverdichtung während der Bauphase geachtet, sind Ackerflächen i.d.R. gut regenerierbar. Im Normalbetrieb geht von Erdkabeln nur eine geringe Wärmeemission aus. Da die heutigen Kultursorten robust sind, wird bei lastgerechter Auslegung der Kabeltrasse von keinen nennenswerten Beeinträchtigungen intensiv genutzter Ackerbiotop ausgegangen.

Während die Anlage von Freileitungen auf intensiv genutztem Grünland als unproblematisch gilt, können extensive, artenreiche Grünlandbiotope durch die Errichtung von Freileitungsmasten in ihrer Lebensraumfunktion beeinträchtigt werden. Die Entstehung ökologisch funktionsträchtiger Ersatzbiotope kann durch die Etablierung von Altgrasbeständen an Maststandorten initiiert werden. Erdkabeltrassen sollten Trockenrasen und andere schwer regenerierbare Grünlandstandorte möglichst umgehen.

Eine Trassenführung unter Umgehung ökologisch wertvoller Biotop ist die effektivste Vermeidungsmaßnahme. Freileitungen und Erdkabel sollten naturnahe Wälder, Feuchtgebiete, Gewässer- und Auenbiotope allenfalls in Ausnahmefällen tangieren. Bei Freileitungen können mit der Wahl der Maststandorte ggf. schutzwürdige Einzelbiotope umgangen werden. Wertvolle Gehölzstandorte können ggf. mit Hilfe höherer Masten überspannt werden. Führt ein Freileitungs-Schutzstreifen durch Gehölze, so ist grundsätzlich ein Zurückschneiden von Bäumen einer vollständigen Baumentnahme vorzuziehen. Im Falle einer Erdkabeltrasse besteht die Möglichkeit, schutzwürdige Biotop zu unterdüken.

Auch durch die Errichtung von Nebenanlagen geht potentieller Lebensraum verloren. Hier sind insbesondere Umspannwerke (bei Wechselstromleitungen und Gleichstromleitungen), Konverterstationen (nur bei Gleichstromleitungen) sowie von Übergangsbauwerke zu nennen.

Saisonal angepasste Bauzeitenregelungen und eine minimal notwendige Inanspruchnahme können unvermeidliche Beeinträchtigungen wertvoller Biotop reduzieren.

5. Schutzgut „Boden“

5.1 Auswirkungen von 380-kV-Höchstspannungsdrehstrom-Freileitungen

5.1.1 Übersicht

Boden ist stets Teil eines Ökosystems und bildet zusammen mit der bodennahen Luftschicht den Lebensraum für die Lebensgemeinschaft aus Pflanzen, Tieren und Mikroorganismen (SCHEFFER u. SCHACHTSCHABEL 2010, S. 3). Dabei ist zu beachten, dass Bodeneigenschaften oft auf engstem Raum variieren (vgl. RICHNER u. MÜHLETHALER 2002, S. 12). Neben seinen natürlichen Funktionen erfüllt der Boden Funktionen als Archiv der Natur- und Kulturgeschichte und für Bodennutzungen (BBodSchG 1998, § 2).

Gegenüber der Verlegung von Erdkabeln muss bei Freileitungen lediglich an den Maststandorten aktiv in die Bodenhorizonte eingegriffen werden, wobei es im Offenland nur zu punktuellen Funktionsverlusten kommt. Zwischen den Masten bleibt der Boden im Offenland auf ca. 400 m Länge und damit nahezu auf dem gesamten Trassenverlauf ungestört (vgl. HOFMANN et al. 2012, Teil I, Abschn. 1.3.3). Für die 380-kV-Ebene nennen BET GMBH et al. (2011, S. 36) als durchschnittliche Spannfeldweite, die den Abstand zweier Masten bezeichnet, ca. 325 m. Für das Fundament des Mastes ist eine Aushubtiefe von 3–4 m notwendig (BET GMBH et al. 2011, S. 36). Einflussfaktoren der Bauphase wie Abgrabung, Versiegelung, Verdichtung und Bodenumlagerung wirken sich auf die Bodenfunktionen je nach Eingriffsintensität und Standorteigenschaft temporär oder dauerhaft aus.

In waldreichen Gebieten kann die Anlage einer breiten Schneise allerdings zu großräumigen Bodenveränderungen, bspw. durch Austrocknung, führen. Die Ausdehnung der Wirkungen auf den Boden erstreckt sich in Bau- und Betriebsphase somit in jedem Fall auf den Nahbereich der Masten (LAUKHUF 2007, S. 19), im Einzelfall auf die anzulegende Schneise.

Als Fundamente kommen in Abhängigkeit des vorherrschenden Bodenprofils entweder gerammte Stahlrohre oder aus Fertigbeton gegossene Stufen- oder Plattenfundamente in Betracht (vgl. HOFMANN et al. 2012, Teil I, Abschn. 1.3.3). Sowohl die natürlichen Bodenfunktionen als auch die Archivfunktionen des Bodens können dabei gestört werden. Trotz vergleichsweise geringer Beeinträchtigungen ist auch bei Freileitungen der Bodenschutz gemäß Bundes-Bodenschutzgesetz (BBodSchG) zu berücksichtigen. Falls schutzwürdige Böden (vgl. Abschn. 5.1.2) von dem Bau einer Freileitung betroffen sind, kann von einem hohen Konfliktpotenzial ausgegangen werden. Eine Inanspruchnahme dieser Böden ist möglichst zu vermeiden.

Unter anderem beschreiben BINE (1990), BRAKELMANN (2004), GEO et al. (2009), LOSCH u. NAKE (1989), ECOFYS (2008), FORWIND (2005), JARASS et al. (1996), NIEDERSÄCHSISCHE STAATSKANZLEI (2007) und VATTENFALL (2005) Funktionsverlust, Versiegelung, Verdichtung und Bodeneintrag als wesentliche Auswirkungen von Freileitungen auf den Boden.

5.1.1.1 Schutzwürdige Böden

Der Bodenschutz ist in Deutschland gesetzlich im Rahmen des Bundes-Bodenschutzgesetzes (BBodSchG) verankert und ist in räumlichen Planungsprozessen zu berücksichtigen. Aus Sicht der Bodenvorsorge gelten Böden mit folgenden Eigenschaften als besonders schutzwürdig (vgl. LBEG 2008, S. 8):

- besondere Standorteigenschaften,
- hohe natürliche Bodenfruchtbarkeit,
- hohe kulturgeschichtliche Bedeutung,
- hohe naturgeschichtliche Bedeutung,
- Seltenheit.

„*Böden mit besonderen Standorteigenschaften*“ sind v.a. extrem nasse Böden wie z.B. Hoch- und Niedermoore sowie sehr nährstoffarme Böden.

„*Hohe natürliche Bodenfruchtbarkeit*“ ist insbesondere für die Agrarwirtschaft von erheblicher Bedeutung. Parabraunerde oder auch Schwarzerde gelten z.B. als sehr fruchtbar und sind als besonders schutzwürdig einzustufen (vgl. LBEG 2008, S.11).

„*Kulturhistorisch bedeutsame Böden*“ sind Zeugnisse vormaliger Bewirtschaftungsformen. Solche Böden sind bspw. durch heute nicht mehr gebräuchliche ackerbauliche Maßnahmen entstanden, die charakteristische Spuren in den Bodenprofilen hinterlassen haben. Beispiel eines kulturhistorisch bedeutsamen Bodens ist der Plaggenesch (vgl. ERM 2008, 6-4.14).

„*Böden mit hoher naturgeschichtlicher Bedeutung*“ liefern Informationen über vergangene Klima- und Vegetationsverhältnisse wie z.B. die geowissenschaftlich bedeutenden Paläoböden. Hierzu gehören auch Geotope in Form von markanten Bodenformationen, Gesteinsaufschlüssen, Mineralienfundstellen, Fossilien und Höhlen.

„*Seltene Böden*“ gelten als besonders schutzwürdig und sind häufig durch eine geringe flächenhafte Verbreitung gekennzeichnet. Hierzu gehören v.a. naturnahe Moore und Gleye mit starker Vernässung (vgl. LBEG 2008, S. 24).

Informationsgrundlagen über schutzwürdige Böden sind über die entsprechenden Landesbehörden verfügbar, bspw. über das Niedersächsische Bodeninformationssystem (vgl. LBEG 2008).

5.1.2 Bodenverdichtung

Während der Bauphase wird der Boden vielfältig durch schwere Baufahrzeuge belastet und ist damit im Hinblick auf eine Bodenverdichtung gefährdet. Bodenverdichtung tritt ein, wenn die Auflast die Eigenstabilität der Böden übertrifft. Bodenverdichtung kennzeichnet sich durch eine Abnahme des Porenanteils (Vol %) mit flüssigen und gasförmigen Bestandteilen und eine Zunahme der festen Volumenanteile im Boden. Dies hat erhebliche Folgen für die Bodenfunktion als Lebensraum für Pflanzen und Tiere (vgl. SCHEFFER U. SCHACHTSCHABEL 2010, S. 516). Entscheidend für die Intensität der Verdichtung durch Fahrzeuge sind die Fahrzeugparameter Gesamtmasse, Radlast, Reifeninnendruck, Überrollhäufigkeit und Kontaktfläche.

Wenn das Baugelände ohne schützende Radunterlage befahren wird, kann es zu Verdichtungen bis in tiefere Bodenschichten kommen (vgl. GEO et al. 2009, S. 87). Durch Geräte > 40 t hervorgerufene Strukturschäden und Verdichtungen im Unterboden (bis 1,7 m Tiefe gemessen) sind BLUM (2007, S. 136) zufolge irreversibel. Feuchte und nasse Böden können schon bei einmaligem Überfahren mit schweren Baumaschinen geschädigt werden. In diesem Zustand wird das Hohlraumvolumen im Unterboden schon durch geringen Druck reduziert. Eine gute bis sehr gute Befahrbarkeit und gleichzeitig geringe Gefährdung ist unabhängig vom Tongehalt des Bodens

bei einer Feuchtestufe 2 gegeben. Bei einem Tongehalt < 45 % und einer Feuchtestufe 4 ist der Boden jedoch nicht nur schlecht befahrbar, sondern auch hoch gefährdet (SPONAGEL et al. 2005). Schluffreiche und feinsandige Böden mit geringem Tongehalt reagieren im nassen Zustand aufgrund ihrer geringen Gefügestabilität mit Verschlammung. Böden mit hohem Tongehalt sind im feuchten Zustand aufgrund der teigigen Konsistenz der Tonanteile besonders verdichtungsempfindlich. Auch die Empfindlichkeit von Moorböden ist gegenüber Verdichtung extrem hoch (AG BODEN 2005). Besonders schutzwürdige Böden und deren Empfindlichkeit gegenüber Verdichtung sind exemplarisch in Tabelle 15 aufgelistet.

Tabelle 15: Verdichtungsempfindliche schutzwürdige Böden (exemplarisch, nach LBEG 2008 u. Bundesverband Boden 2003)

| Schutzwürdigkeit | Verdichtungsempfindliche Böden |
|---|--|
| Böden mit besonderen Standorteigenschaften | Extrem nasse Böden (z.B. Hoch- und Niedermoore, Anmoorböden, Gleye, Auenböden mit natürlichem Wasserhaushalt oder nur geringfügig abgesenkten Wasserständen) |
| | Salzböden des Binnenlandes |
| | Sehr nährstoffarme Böden |
| Böden mit hoher natürlicher Bodenfruchtbarkeit | Plaggenesche in der Geest |
| | Parabraunerden |
| Böden mit hoher kulturgeschichtlicher Bedeutung | Plaggenesche mit charakteristischer Ausbildung |
| | Wölbäcker und Terrassenäcker mit charakteristischer Ausbildung |
| | Wurten |
| | Heidepodsole mit charakteristischer Ausbildung und Vegetation |
| | Kultivierte Moore (z.B. Fehnkultur, Sanddeckkultur; im Einzelfall prüfen) |
| Böden mit hoher naturgeschichtlicher Bedeutung | Repräsentative Böden (Boden-Dauerbeobachtungsflächen als Vertreter repräsentativer Böden) |
| | Paläoböden |
| | Stauwasserböden (Pseudogley unter Wald oder in NSG und/oder starke Vernässung, als Extremstandort; Stagnogley) |
| | Terrestrische anthropogene Böden (Kolluvien unter Wald u. in NSG; Plaggenesch als schützenswert einzustufen; Hortisol und Rigosol unter Wald, Biotop u. in NSG; Tiefumbruchboden unter Wald u. in NSG) |
| | Auenböden (bei naturnahen Verhältnissen und unter Wald, Biotop, u. in NSG) |
| | Gleye (naturnahe Vegetationsverhältnisse unter Wald, Biotop u. in NSG) |
| | Marschen (Organomarsch, Moormarsch, Organomarsch über fossilem Podsol) |
| | Natürliche Moore |
| | Kultivierte Moore (als Beispiel kulturgeschichtlicher bedeutsamer Böden, unter Wald u. in NSG, Art der Kultivierung muss bekannt sein z.B. Fehnkultur, Sandmischkultur) |

Bodenverdichtung schädigt primär die Regler- und Speicherfunktion der Böden für den Wasserhaushalt und führt zu Staunässe oder mangelnder Durchlüftung. Dies resultiert in verstärkter Aktivität von anaeroben Bakterien und in einem lebensungünstig veränderten Stoffhaushalt mit Auswirkungen auf das Grundwasser und die Atmosphäre (vgl. GEO et al. 2009, S. 87/93). Sekundär schädigt Bodenverdichtung das Pflanzenwachstum, wobei speziell die Durchwurzelbarkeit des Bodens sinkt, gefolgt von einem Rückgang von anfallender Pflanzen- und Wurzelstreu, welche die Lebensgrundlage für die meisten Bodenlebewesen bildet und die Basis des

Nährstoffkreislaufs auf dem Boden darstellt. Daraus resultiert auch eine Verschiebung des Artenspektrums.

5.1.3 Bodenerosion

Die Ablösung und der Transport von Bodenteilchen entlang der Bodenoberfläche wird je nach Transportmedium als Wasser- oder Winderosion bezeichnet (SCHEFFER U. SCHACHTSCHABEL 2010, S. 506). Die Erosionserscheinungen bzw. ihre Risiken finden vor allem im Baustellenbereich, den Arbeitsstreifen sowie auf den Zufahrten statt. Da der Bau von Freileitungen hinsichtlich der Maststandorte kleinräumig begrenzt ist, ist die Bodenerosion bei der Errichtung von Freileitungen nicht zu umfangreich. Ein Aspekt beim Freileitungsbau spielt die Errichtung der Schneise bzw. des Schutzstreifens in geschlossenen Waldbeständen. Hier kann der Vegetationsverlust (Kahlschlag) zu einer Veränderung des Oberbodens und zu Bodenerosion führen (PARTL U. ABERLE 2006, S. 98 zit. nach FÜHRER 2001) (vgl. Kap. 4.1.3.3).

5.1.4 Funktionsverlust, Versiegelung und Austrocknung

Versiegelte Böden sind überbaute bzw. überdeckte Böden, die zuvor unterschiedlich stark abgetragen oder verdichtet worden sind (SCHEFFER U. SCHACHTSCHABEL 2010, S. 370). Grundsätzlich können Bodenversiegelungen insofern als dauerhafte Schädigung betrachtet werden.

Im Bereich der betonierten Mastsockel kommt es auf den versiegelten Flächen zu einem vollständigen Verlust der Lebensraum- und Archivfunktionen des Bodens (vgl. IBU 2007, S. 328; GEO et al. 2009, S. 93; JARASS et. al. 1996, S. 21; ERM 2008, S. 6.4-3). Während der Bauphase kann es darüber hinaus aufgrund der Druckbelastung des Baustellenverkehrs zu kleinräumigen Verdichtungen des Bodens und damit zu nachteiligen Auswirkungen auf das Pflanzenwachstum kommen (vgl. Abschn. 5.1.2).

Mögliche Bodenveränderungen im Bereich einer Schneise, bspw. durch Aushagerung ehemals baumbestandener Böden, hängen von den jeweiligen Bodenverhältnissen ab und können nur standörtlich beschrieben und bewertet werden.

5.1.5 Bodeneintrag

Witterungsbedingt kann es bei Freileitungen zu Stoffeinträgen in den Bodenhaushalt kommen. Bis dato waren mit blei- oder zinkhaltigen Korrosionsschutzanstrichen erhebliche Bodenbelastungen verbunden.

An verschiedenen Pflanzen wurden unmittelbar unter Hochspannungsmasten erhöhte Schwermetallwerte gemessen (BINE 1990, S. 2). Dies korrespondiert mit höheren Zinkwerten, die im Bereich des Mastfußes sowohl bei 110-kV-Masten als auch bei 380-kV-Masten gemessen wurden. Der Niederschlag des schadstoffbelasteten sogenannten „Sauren Regens“ führt offenbar zu einer stärkeren Korrosionsanfälligkeit der Masten und zu einer Auswaschung der zinkhaltigen Grundierungsschicht an den Masten (BINE 1990, S. 3). Die Konzentration des aufgefundenen Zinkeintrags überschreitet JARASS et al. (1996, S. 21 zit. nach JARASS et. al. 1989) zufolge deutlich den allgemein gültigen Richtwert von 300 ppm und ist bis zu einem Abstand von 50 m um die Masten herum nachweisbar. Seit einigen Jahren werden feuerverzinkte und damit umwelt-

freundlichere Masten eingesetzt als bisher (vgl. BINE 1990, S. 2; GEO et al. 2009, S. 17 zit. nach MARTI 2001).

Im Rahmen von Wartungen, die in regelmäßigen Abständen von 25 bis 30 Jahren durchgeführt werden, kann es bei unsachgemäßer Durchführung der Entrostungs- und Streicharbeiten zu Schadstoffeinträgen in den Boden kommen (vgl. GEO et al. 2009, S. 23; IBU 2007, S. 328; vgl. HOFMANN et al. 2012, Teil I, Abschn. 6.1.1; BRAKELMANN 2004, S. 34).

5.1.6 Vermeidungs- und Minderungsmaßnahmen

Irreversible Bodenschäden in Folge des Baus von Freileitungen können durch eine frühzeitige bodenkundliche Begleitung vermieden werden (vgl. BLUM 2007, S. 140; RICHNER U. MÜHLTHALER 2002, S. 13). Beeinträchtigungen des Schutzgutes Boden sind zumeist ausgleichbar oder ersetzbar (vgl. auch Abschn. 5.4.7). Bodenverluste durch Versiegelung lassen sich bspw. durch Entsiegelungsmaßnahmen ausgleichen. Die Verbesserung von Teilfunktionen, bspw. der Herstellung eines natürlichen Bodenwasserhaushaltes oder die Extensivierung der Bodennutzung (z.B. die Umwandlung von Acker in Grünland, die Extensivierung von Grünland, die Entwicklung von Ruderalfluren oder die Anlage dauerhafter Gehölzbestände), ist gleichermaßen möglich (ERM 2010, S C6-8).

Einem sich negativ auf den Boden auswirkenden Eintrag von Fremdstoffen (bei Bau, Wartung und Reparatur) kann durch die Einhaltung der gesetzlichen Anforderungen im Umgang mit wasser- und bodengefährdenden Stoffen vorgebeugt werden.

Bodenverdichtung lässt sich durch diverse technische Vorkehrungen hinsichtlich der Bau- und Transportfahrzeuge vermeiden. Die Radlast der Bau- und Transportfahrzeuge kann durch Mehrachsen und bodenschonende Fahrwerke reduziert werden. Generell sollte (u.a. zur Vermeidung von Bodenschlupf) auf eine bodenschonende Kraftübertragung, bspw. durch Allradantrieb, zapfwellengetriebene statt gezogener Geräte und Aufsattel- und Anbaugeräte, geachtet werden. Ein hoher Reifendruck bspw. bewirkt ein tieferes Eindringen der Druckzwiebel der Auflast in das Bodengefüge, als dies bei einem verringerten Reifendruck der Fall ist. Bau- und Transportfahrzeuge mit einem verringerten Reifendruck und mit möglichst breiten Reifen empfehlen sich daher in verdichtungsgefährdeten Bereichen. Auch Gitterräder, Zwillingstreifen, Breit- und Terrareifen sowie Bandlaufwerke mindern den Kontaktflächendruck. Grundsätzlich sind die Bauarbeiten zeitlich so zu planen, dass die Böden nur in ausreichend trockenem Zustand befahren werden.

Soweit möglich sind vorhandene Verkehrswege zu nutzen, ansonsten ist die Anlage von Baustraßen notwendig, um den Lastendruck zu verteilen. Die Norm DIN 4124 „Baugruben und Gräben, Böschungen – Verbau – Arbeitsraumbreiten“ beschreibt einen Straßenoberbau von 15 cm Dicke, der z.B. aus Schotter oder aus aufbereitetem Bauschutt hergestellt werden kann und der ggf. mehrmals verwendet werden kann (Auskunft RATHKE 15.11.10). Weitaus unaufwendiger und für den Boden weniger beeinträchtigend ist es jedoch, empfindliche Böden durch Baustraßen aus mobilen Stahlplatten herzustellen. Entsprechend wird gegenwärtig (2012) bei der Verlegung eines Gleichstromkabels zwischen Büsum und Brunsbüttel (Schleswig-Holstein) zur Ableitung von Strom aus Offshore-Windparks verfahren. In stark beanspruchten Bereichen kann es auch vorteilhaft sein, Baustraßen aus geotextilen Matten gemäß DIN 18915 herzustellen. In Verbindung mit einer korngestufteten Sand-Kiesauflage oder vergleichbarer Technik kann irreversible Strukturschäden vorgebeugt werden (IBNI et al. 2008, S. 55 ff.). Auch diese Baustraßen sind nach Beendigung der Bauarbeiten vollständig entfernbar. Im Bereich besonders hochwertiger

Strukturen und morphogenetischer Besonderheiten ist eine möglichst weitgehende Verschmälerung des Arbeitsstreifens zu erwägen.

5.2 Auswirkungen von 380-kV-Höchstspannungsgleichstrom-Freileitungen

Die im Kapitel 5.1 für 380-kV-Höchstspannungs-Drehstrom-Freileitungen angeführten Aspekte können für Höchstspannungs-Gleichstrom-Freileitungen übernommen werden.

5.3 Nebenanlagen bei Freileitungen

Aufgrund notwendiger Nebenanlagen kommt es zu Flächenversiegelungen. Hier sind Umspannwerke, Konverterstationen (~5000 m²) und Übergangsbauwerke (~2500 m²) zu nennen (vgl. Abschn. 3.3). Für Übergangsbauwerke werden sog. Abspannportale errichtet, deren Gesamtflächenbedarf mit 30 m x 70 m angegeben wird. Im Bereich der Portalfundamente (12 x 3 m²), der Garniturfundamente (30 x 1 m²), einem Containerfundamente (12,5 m²) sowie einem notwendigen Schotterweg werden hierbei insgesamt etwa 540 m² Fläche versiegelt (POLSTER et al. 2009, S. 27).

Des Weiteren kann es im Zuge der Baumaßnahmen zu Bodenverdichtungen kommen (vgl. Abschn. 5.1.2).

5.4 Auswirkungen von 380-kV-Höchstspannungsdrehstrom-Erdkabeln

5.4.1 Übersicht

Die Verlegung von Erdkabeln im Untergrund führt v.a. in der Bauphase zu Beeinträchtigungen der Bodenfunktionen auf dem Wege der Bodenverdichtung, der Störung des Bodengefüges und des Bodenwasserhaushaltes, sowie der Einbringung von Fremdstoffen. Die Anlage und der Betrieb von Höchstspannungskabeln wirken sich ggf. auf dem Wege der Bodenversiegelung sowie der Erwärmung und potenzieller Austrocknung nachteilig auf den Boden aus.

Einflussfaktoren der Bauphase wie Abgrabung, Versiegelung, Verdichtung und Bodenumlagerung als auch Einflussfaktoren der Betriebsphase wie Erwärmung und Austrocknung wirken sich auf die Bodenfunktionen je nach Eingriffsintensität und Standorteigenschaft temporär oder dauerhaft aus. Im Einzelnen sind v.a. Beeinträchtigungen von Bodenaufbau, Bodenwasserhaushalt, Lebensraumfunktion und Archivfunktion möglich.

Das Risiko irreversibler Bodenschäden durch Bau und Betrieb von Erdkabeln kann durch eine bodenkundliche Begleitung erheblich gesenkt werden (vgl. BLUM 2007, S. 140; RICHNER U. MÜHLTHALER 2002, S. 13).

Einer gemeinsamen Studie nennen ENTSOE U. EUROPACABLE (2011, S. 16), dass innerhalb der Korridorbreite plus einem ca. 5 m breiten Rand keine tiefwurzelnden Bäume gepflanzt werden dürfen, um ein Eindringen der Wurzeln in den Kabelgraben zu vermeiden. Ansonsten kann der Boden oberhalb der Erdleitungen land- oder forstwirtschaftlich genutzt werden. Ein 4–5 m breiter Korridor über dem Kabel ist auch für den zukünftigen Zugang freizuhalten. Durch moderne Erdarbeitstechniken und Installierungsmethoden wie das HDD-Bohrverfahren (Horizontal Directional Drilling, Richtbohrtechnik) und Rohrrammung ist eine Installation mit geringen Auswirkungen für die Umwelt möglich. Wird bereits bestehende Infrastruktur wie Straßen, Bahnstrecken oder Oberleitungskorridore für die Kabeltrasse genutzt, kann der Einfluss auf die Umgebung weiter reduziert werden (ABB 2011, S. 27).

Der Einsatz von Kabelfräsen reduziert den Flächenverbrauch während der Installation (ABB 2011, S.28). ABB (2011, S. 36) präsentieren unterschiedliche Eingrabungstechniken. Befindet sich der Arbeitsbereich für den Bagger zwischen dem Aushub und dem Graben, ist ein 8–10 m breiter Arbeitsbereich notwendig. Wird der Aushub direkt neben dem Graben platziert, genügt ein 6–8 m breiter Arbeitsbereich. Der Arbeitsbereich kann durch den Einsatz spezieller Arbeitsmaschinen (Bagger und Muldenkipper, die direkt über dem Graben arbeiten) auf 4–5 m reduziert werden. Letzteres ist nur bei geeigneten Bodeneigenschaften möglich. In bewaldeten Gebieten ist durch Freischneiden und Abholzen ein 2–4 m breiter Arbeitskorridor herzustellen, dessen Breite je nach verwendetem Arbeitsgerät variieren kann (ABB 2011, S. 36–37). In bergigen oder unwegsamen Gegenden können Kabel auch in bereits bestehenden Tunneln installiert werden (z.B. neben der Fahrbahndecke oder entlang der Tunneldecke (ABB 2011, S. 44)).

Aus Sicht der Bodenvorsorge nach dem Bundes-Bodenschutzgesetz (BBodSchG) als besonders schutzwürdig geltende Böden wurden in Abschn. 5.1.1.1 beschrieben. Insbesondere während der Bauphase wird der Boden im Bereich der Kabeltrasse sowie der Zufahrten stark beeinträchtigt, so dass schutzwürdige Böden bei der Trassenwahl nach Möglichkeit vermieden werden sollten.

5.4.2 Bodenverdichtung

Bei der Verlegung eines Erdkabels muss die gesamte Kabeltrasse für den Abtransport von Bodenmaterial und den Antransport von Baumaterial, insbesondere auch Bettungsmaterial zugänglich sein (vgl. HOFMANN et al. 2012, Teil I, Abschn. 1). Der Boden wird während der Bauphase durch schwere Baufahrzeuge belastet und ist im Hinblick auf eine Bodenverdichtung gefährdet. Ein Zugang für Schwertransporter ist mindestens im Abstand der verwendeten Kabellängen erforderlich (vgl. GEO et al. 2009, S. 36). Auch bei Dükerungen von mehr als 300 m Länge kommen größere Bohranlagen auf einer Fläche von rd. 1.000 m² auf der Seite des Bohrgeräts und rd. 300 m² auf der Zielseite der Bohrungen zum Einsatz. Für ihren Transport werden Schwerlastler und demzufolge auch spezielle Baustraßen benötigt (vgl. GEO et al. 2009, S. 46). Für die Intensität der Verdichtung sind als Fahrzeugparameter Gesamtmasse, Radlast, Reifeninnendruck, Überrollhäufigkeit und Kontaktfläche entscheidend. Die Höchstspannungskabel werden auf Spezialspulen mit Tiefladern zu der Kabeltrasse transportiert, wobei das Gewicht einer Spule bei ca. 40 t liegt (vgl. PAUL 2007, S. 12, vgl. HOFMANN et al. 2012, Teil I, Abschn. 1.5.3). Besonders schutzwürdige Böden sowie deren Empfindlichkeit gegenüber Bodenverdichtung sind in Tabelle 15 im Abschn. 5.1.3 dargestellt.

Aus Erfahrungen bei mechanischen Bodeneingriffen für Leitungstrassen in Dänemark schließen GEO et al. (2009, S. 93), dass es bei diesen Arbeiten nicht zwangsläufig zu Bodenverdichtungen und entsprechenden landwirtschaftlichen Nutzungseinschränkungen kommen muss. Bodenverdichtung kann im Falle einer Bündelung der benötigten Fahrstraßen bzw. Kabeltrassen mit bereits vorhandenen Verkehrswegen leicht vermieden werden, doch führt dies ggf. zu kostenwirksamen Umwegen (vgl. BRAKELMANN 2004, S. 46). Die Reduzierung der besonders schwerlastigen Transporte auf die Kabeleinzugspunkte und die flexible Anlage mobiler Baustraßen sind weitere Maßnahmen, die einer Bodenverdichtung entgegenwirken (vgl. BRAKELMANN 2010). Aufgrund der besonderen Verdichtungsgefährdung nasser Böden sind an empfindlichen Standorten in Schlechtwetterphasen ggf. Bauverzögerungen nicht auszuschließen.

5.4.3 Bodenerosion

Im Zuge der Bauarbeiten für die Anlage von Erdkabeltrassen wird die Vegetation komplett entfernt und es kann vorübergehend in Abhängigkeit von Relief bzw. der Hangneigung und Bodenart zu Erosionen kommen. Von Wassererosionen sind vor allem Böden betroffen, die eine geringe Wasseraufnahmefähigkeit besitzen (BLUM 2007, S. 85), wobei schluffige Böden und Feinstsande besonders gefährdet sind (AG Boden 2005, S. 366). Auch Winderosionen treten überwiegend bei schluff- und feinsandreichen Böden auf (BLUM 2007, S. 85). Diese können auch bei langanhaltender Trockenheit auftreten. Nach Abschluss der Bauarbeiten kann sich erneut Bewuchs einstellen und die Erosionsgefahr nimmt wieder ab.

5.4.4 Störung des Bodengefüges durch Aushub, Zwischenlagerung und Wiedereinbau

Bei der Realisierung der Kabeltrasse kommt es zu umfangreichen Erdbewegungen. Dabei müssen die Bodenhorizonte während des Bodenaushubs sorgfältig getrennt gelagert werden, um sie anschließend in ihrer natürlichen Schichtung wieder einzubauen. Eine Rekultivierung ist sonst nicht mehr möglich (RICHNER U. MÜHLETHALER 2002, S. 14). Zu Beginn der Bauphase wird der Oberboden in der gesamten Breite des Baufeldes abgetragen und neben dem Kabelgraben nach Horizonten getrennt gelagert (vgl. GEO et al. 2009, S. 40). FORWIND (2005, S. 24) zufolge ergibt sich für ein Kabelsystem ein Bodenaushub von etwa 4,5 m³/m, wobei der Bedarf an Bettungsmaterial rund 1,5 m³/m beträgt. HOFMANN et al. 2012, Teil I Abschn. 1.4.5.2) rechnen bei vier Systemen mit einem Aushub von etwa 18 m³/m. Bei der abschließenden Verfüllung des Kabelgrabens wird das ursprüngliche Bodenmaterial zum größten Teil wiederverwendet, wobei Ober- und Unterboden nach Horizonten getrennt eingebaut werden. Üblicherweise können 70–80 % des Aushubs wieder in den Graben gefüllt werden (ENTSOE U. EUROPACABLE 2011, S. 19).

Überschüssiges Bodenmaterial wird nach Beendigung der Bauphase abgefahren. Durch umgelagertes Bodenmaterial und die daran gebundenen Stoffe kann es in benachbarten Ökosystemen zu sogenannten Off-Site-Schäden, bspw. durch Gewässerbelastungen kommen. Speziell bei grundwassernahen Böden wie etwa Niedermooren führen Umlagerung und Bodenaustausch zu stark negativen Veränderungen der Bodenstruktur.

Auch die Wiederverwendung desselben Bodenmaterials bei der Verfüllung der Baugrube stellt das gewachsene Bodenprofil nicht sofort wieder her. Boden kann nur in langen Zeiträumen zu seinem natürlichen Zustand regenerieren. RICHNER U. MÜHLTHALER (2002, S. 15) empfehlen in den ersten zwei Jahren nur extensive Grünlandwirtschaft und frühestens im dritten Jahr nach der Rekultivierung wieder Ackerbau. Zu einer chemischen Veränderung der Zusammensetzung des Bodenmaterials kommt es GEO et al. (2009, S. 89) zufolge nicht, da Ober- und Unterboden im normalen Bauablauf getrennt voneinander wieder verwendet werden.

5.4.5 Auswirkungen auf den Bodenwasserhaushalt

Grundsätzlich sind bei der Planung und Realisierung von Wasserhaltungsmaßnahmen bzw. Grundwasserabsenkungen die Bestimmungen des Wasserhaushaltsgesetzes und des jeweiligen Landeswassergesetzes zu beachten. Sowohl Böden mit hoch anstehendem Grundwasserstand wie z.B. Niedermoore, als auch Böden mit gespannten Grundwasserleitern können bei der

Verlegung eines Erdkabels temporär oder dauerhaft geschädigt werden (vgl. u.a. GEO et al. 2009, S. 41 u. 90 ff.).

Bei hoch anstehendem Grundwasser wird während der Bauarbeiten Wasserhaltung betrieben. Die Dauer der Wasserhaltung sollte so kurz wie möglich bemessen sein, um den natürlichen Zustand des Bodens in der Umgebung der Kabeltrasse nicht nachhaltig zu verändern.

Werden durch Kabelgräben durchgängige wasserstauende Bodenhorizonte oder gespannte Grundwasserleiter durchstoßen, kann es bei anschließend unzureichendem Verschluss zu einer dauerhaften Drainagewirkung kommen – staunasse Böden könnten bspw. in die Tiefe entwässert werden. Mineralisierung und Sackung bei Moorböden sowie Versauerung und Maiboltbildung in Marschböden sind die Folge (GEO et al. 2009, S. 92). Besonders schutzwürdige Böden und deren Empfindlichkeit gegenüber Entwässerung sind in Tabelle 16 aufgelistet.

Eine weitere Form unerwünschter Drainagewirkung wird durch ein Längsgefälle im Boden hervorgerufen. Sollte Wasser durch den Kabelgraben in Geländesenken gelangen, kommt es zu Vernässungserscheinungen, die i. Allg. jedoch nicht dauerhaft sind (vgl. GEO et al. 2009, S. 92).

Werden Trassen im Wald geführt, ist der Boden durch den erforderlichen Kahlschlag einer erhöhten Errodiierbarkeit im Bereich der Schlagflächen ausgesetzt. Dies kann zum Abtrag mineralischer und organischer Masse führen (INSTITUT FÜR ELEKTRISCHE ANLAGEN UND HOCHSPANNUNGSTECHNIK – ABTEILUNG FÜR HOCHSPANNUNGSTECHNIK 2001, S. 32).

Tabelle 16: Entwässerungsempfindliche schutzwürdige Böden (nach LBEG 2008 u. BUNDESVERBAND BODEN 2003)

| Schutzwürdigkeit | Entwässerungsempfindliche Böden |
|--|---|
| Böden mit besonderen Standorteigenschaften | Extrem nasse Böden (z.B. Hoch- und Niedermoore, Anmoorböden, Gleye, Auenböden mit natürlichem Wasserhaushalt oder nur geringfügig abgesenkten Wasserständen) |
| Seltene Böden | Stauwasserböden (Pseudogley unter Wald oder in NSG und/oder starke Vernässung, als Extremstandort; Stagnogley) |
| | Auenböden (bei naturnahen Verhältnissen und unter Wald, Biotop, u. in NSG) |
| | Gleye (naturnahe Vegetationsverhältnisse unter Wald, Biotop u. in NSG) |
| | Marschen (Organomarsch, Moormarsch, Organomarsch über fossilem Podsol) |
| | Natürliche Moore Kultivierte Moore (als Beispiel kulturgeschichtlicher, bedeutsamer Böden, unter Wald u. in NSG, Art der Kultivierung muss bekannt sein, z.B. Fehnkultur, Sandmischkultur) |

Auswirkungen des Betriebs von Höchstspannungskabeln auf den Bodenwasserhaushalt sind grundsätzlich auf dem Wege einer Erwärmung und sukzessiven Austrocknung des Bodens denkbar. Nach BRAKELMANN (mdl. 2011) beschränken sich entsprechende Vorgänge allerdings auf die direkte Kabelumgebung. In den ersten Wochen bis Monaten einer ungebettet verlegten Kabelstrecke verliert der Boden einige cm um ein ungebettet verlegtes Kabel herum seine Kapillarität und hält danach dauerhaft einen Wärmeleitwert von 0,5 W/mK. Der Einfluss eines Hochspannungskabels auf den Bodenwasserhaushalt eines Bodens mit Wärmeleitwert 1 W/mK wurde in einem dreijährigen Freilandversuch von TRÜBY u. UTHER (2011) untersucht. Im Ergebnis konnte kein nennenswerter Einfluss auf den Bodenwasserhaushalt festgestellt werden.

5.4.6 Einbringung von Fremdstoffen

Während der Bauphase werden i. Allg. Magerbeton und Kabelsand als Bettungsmaterialien, in seltenen Ausnahmen auch vorgefertigte Tunnelkörper in den Boden eingebracht (vgl. HOFMANN et al. 2012, Teil I, Abschn. 1.4.5.3). Das Material reduziert die Masse des natürlich gewachsenen Bodens und den damit zusammenhängenden Bodenfunktionen. Die Folge ist bspw. ein geringer Verlust an Wurzelraum für Pflanzen. Auch das bei freier Verlegung notwendige Freihalten der Trasse von tief wurzelnden Sträuchern und Pflanzen während der Betriebsphase wirkt sich qualitativ auf Boden und Bodenfunktionen aus (vgl. PAUL 2007, S. 13; FORWIND 2005, S. 29). Nur bei nicht fachgerechter Durchführung von Bau- und Wartungsarbeiten können Schmier- und Treibstoffe in den Boden. Insbesondere baubedingt ist eine unbeabsichtigte Beeinträchtigung des Grundwassers durch Schadstoffeinträge, z.B. im Falle eines Maschinenschadens mit Austritt von Treib- oder Schmierstoffen, nicht vollständig auszuschließen (IBNI 2008, S. 78).

Zur Kabelisolierung können getränkte Papierisolationen (Masse- oder Öl-Kabel) oder Kunststoffe (z.B. vernetztes Polyethylen) verwendet werden. Aus Umweltschutzgründen haben sich für Neubauten Kunststoffkabel mit einer Isolierung aus vernetztem Polyethylen (VPE) durchsetzen können. Heute werden weder für HGÜ noch für HDÜ-Kabel reine Öl-Kabel gebaut (HOFMANN et al. 2012, S. 23).

5.4.7 Bodenerwärmung im Betrieb

Während des Betriebs erwärmt sich ein Höchstspannungskabel und gibt diese Wärme anschließend an das Erdreich ab (vgl. HOFMANN et al. 2012, Teil II). Die Erwärmung an der Leiteroberfläche ist abhängig von einer Reihe von Faktoren, u.a.:

- der Legetiefe,
- der Kabelisolierung,
- der Bettung des Kabels,
- der Anordnung der Kabel,
- dem Kabelabstand untereinander,
- der Wärmeleitfähigkeit des Erdreichs,
- ergänzender Vermeidungs- und Verminderungsmaßnahmen
- sowie vor allem der tatsächlichen Kabelauslastung (FORWIND 2005, S. 18).

Da eine ins Erdreich abfließende Verlustwärme stets auch einen wirtschaftlichen Verlust darstellt, ist es sowohl im ökologischen wie im ökonomischen Interesse, die Wärmeentwicklung im Kabel und seiner Umgebung gering zu halten. Die Kabelauslegung wird sich u.a. auch daran orientieren, einen dauerhaften wirtschaftlichen Verlust durch unnötige Abwärme auszuschließen. Aufgrund der üblichen n-1 Auslegung werden Erdkabel im Normalbetrieb lediglich mit einem Teil des Nennstroms ausgelastet, so dass die Temperaturerhöhung in 30 cm Tiefe BRAKELMANN U. ERLICH (2010) zufolge 2–3 K nicht überschreitet. Der Richtwert von 2–3 K in 30 cm Tiefe als maximale Erwärmung war für Offshore-Windparks anschließende Seekabel entwickelt worden, die insbesondere im Wattenmeer keine Beeinträchtigungen für die Meeresfauna entfalten sollten.

BRAKELMANN (2004, S. 46) zufolge wird bei den bisher verlegten Hochspannungskabeln die direkte Umgebung eines Kabels im Normalbetrieb bis zu einem Abstand von ca. 30 bis 50 cm

nennenswert erwärmt, wobei die Erwärmung des Bodens mit zunehmendem Abstand vom Kabel abnimmt und spätestens ab einer Entfernung von ± 3 m vom Kabelgraben aus nicht mehr messbar ist. Über ein Glasfaserkabel, welches BRAKELMANN U. ERLICH (2010) zufolge bei Höchstspannungskabeln heute standardmäßig eingearbeitet wird, kann das Maß der Verlustwärme mit einem intelligenten Monitoring überwacht werden (vgl. auch HOFMANN et al. 2012, Teil II). Auch ENTSOE U. EUROPACABLE (2011, S. 19) betonen, dass die Auswirkung der Wärmeabgabe auf die Bodentemperatur rein lokal und sehr begrenzt ist. Lediglich bei langzeitiger Volllast könnte sich der Boden direkt über dem Graben möglicherweise um ca. 2 °C erwärmen. DELBRENNNA, M. (2009) gibt an, dass in 5 m Entfernung vom Kabel keine Bodenerwärmung infolge des Erdkabels mehr auftritt (berechneter Wert für ein einadriges 380 kV XLPE-Kabel; XLPE: Cross Linked Polyethylene). Anders sieht dies der DEUTSCHER BAUERNVERBAND (2012), der davon ausgeht, dass Erdkabel den Boden soweit erwärmen, dass es zu erhöhten Verdunstungs- und Austrocknungsraten kommt, die einen 20–30 m breiten Schutzstreifen notwendig machen.

Die Bodenbeschaffenheit bzw. der Bodentyp spielt bei den Auswirkungen der Verlustwärme eine zentrale Rolle. So transportieren trockenere Böden die Wärme schlechter als feuchte Böden, wodurch es bei trockenen Böden zu einer Erhöhung des Temperaturgradienten und dementsprechend auch zu einem Anstieg der Kabeltemperatur kommt (vgl. GEO et al. 2009, S. 97). Gute kapillare Eigenschaften eines Bodens begünstigen die Wasserhaltefähigkeit. So liegt laut HOFMANN et al. 2012, Teil II, Abschn. 3.3.3 die Grenzisothermie von Lehm bspw. bei 50 °C, die von Sand jedoch nur bei 30 °C. Ein ohne Bettungsmaterial verlegtes Kabel trocknet einen Normalboden, für den üblicherweise ein Wärmeleitwert von 1 W/mK angesetzt wird, innerhalb der ersten Wochen bis Monate in der direkten Kabelumgebung dauerhaft aus, so dass dieser Boden seine Kapillarität verliert und danach einen Wärmeleitwert von 0,5 W/mK auf Dauer hält (BRAKELMANN mdl. 2011). Mit Hilfe der Bemessung des Magerbeton-Bettungsmaterials kann die Wärmeableitung standortbezogen in großen Spannen optimiert werden.

Mit Blick auf die durch krautige Vegetation durchwurzelte oberste Bodenschicht sind mögliche Temperaturveränderungen insbesondere in den oberen 50 cm unter EOK beurteilungsrelevant. Im groben Schnitt der Bodentypen und im langjährigen Mittel schwankt die natürliche Temperatur in 50 cm Tiefe in Deutschland (Potsdam) zwischen 0 °C und 19 °C, wobei sie den Monatsmittelwerten träge folgt. Die Tagesamplitude schwankt meist nur um 2 bis 3 K.

JARASS et al. (1996, S. 20) zufolge kann die Bodenerwärmung, ausgelöst durch den Betrieb von Erdkabeln, als Umweltfaktor vernachlässigt werden, weil sie um mehr als eine Größenordnung unter dem Effekt der natürlichen Globalstrahlung liege. Nur wenn das Kabel über eine längere Zeit unter Höchstlast genutzt werde, können Erwärmung und auch Austrocknung des Bodens GEO et al. (2009, S. 96 u. 104) zufolge kleinräumig bzw. vorübergehend graduell zu Veränderungen führen. Diese Quellen beziehen sich allerdings v.a. auf die bislang üblichen Erdverkabelungen im Nieder- bis Mittelspannungsbereich. Für die bisher wenig erprobten Erdkabel auf der Höchstspannungsebene wird es maßgeblich von deren technischer Auslegung abhängen, ob es zu nennenswerten Bodenveränderungen kommen kann. UThER et al. (2009) betonen zu Recht, dass mit dem Boden ein komplexes System physikalischer Parameter betroffen ist, dessen standörtlich unterschiedliche Reaktionen schwer vorher zu bestimmen sind (UThER et al. 2009, S. 6).

Eine moderate Temperaturerhöhung im Boden beschleunigt i. Allg. die Aktivität mikrobieller Bodenorganismen und damit insbesondere Zersetzungs Vorgänge. Eine Temperaturerhöhung um

10 °C aber steigert die biochemischen Prozesse im Boden bereits um das 2–3fache. Solche Temperaturverschiebungen könnten in Abhängigkeit der standörtlichen Bodenverhältnisse nicht mehr zu puffern sein und würden ggf. die Bodeneigenschaften dauerhaft verändern. In Ermangelung wissenschaftlich fundierter Richtwerte für die maximal tragbare Erwärmung in terrestrischen Böden gehen wir im Folgenden von einem Daumenwert von maximal 5 K in 50 cm unter EOK aus. Dieser Wert entspricht in etwa der doppelten Tagesamplitude in dieser Bodentiefe und berücksichtigt somit Pufferkapazitäten.

Maßgeblich für das Risiko des Auftretens von Situationen mit einer starken Bodenerwärmung ist die technische Auslegung des jeweiligen Höchstspannungskabels. In der Planung empfiehlt sich, insbesondere bei einem Bestand schlecht wärmeableitender Böden, frühzeitig auch seltene Ausnahmesituationen mit einer über eine lange Zeit andauernden, deutlich erhöhten Wärmeemission zu berücksichtigen. Es ist für die Ermittlung der möglichen Umweltkonsequenzen wesentlich zu wissen, wie häufig höhere Wärmeemissionen an den jeweiligen Hot Spots mit hohen thermischen Widerständen auftreten können, wie zuverlässig Vorsorge- und Vermeidungsmaßnahmen greifen sowie in welcher Dauer und in welcher Ausdehnung mit Temperaturveränderungen gerechnet werden kann.

5.4.8 Vermeidungs- und Minderungsmaßnahmen

5.4.8.1 Bodenvermischung

Einfach aufgebaute Bodentypen, bei denen nur ein oder zwei Bodenhorizonte berührt werden, lassen sich durch eine saubere Trennung von Ober- und Unterboden während der Entnahme, der Lagerung und dem Wiedereinbau weitgehend mit der ursprünglichen Schichtung wieder herstellen (vgl. DIN 18915 – Vegetationstechnik im Landschaftsbau – Bodenarbeiten). Allerdings ist in jedem Fall das gewachsene Profil gestört. Komplizierter aufgebaute Böden brauchen lange Zeiträume der Bodenentwicklung, um zu regenerieren – in seltenen Fällen werden Bodenfunktionen irreversibel geschädigt. Bei gegenüber Strukturschäden besonders empfindlichen Böden sollte ein Oberbodenabtrag nach Möglichkeit – z.B. durch Dükerung – vermieden werden, da die Grasnabe bzw. die Humusaufgabe eine stabilisierende Wirkung hat (IBNI et al. 2008).

5.4.8.2 Bodenverdichtung

Bodenverdichtung lässt sich durch diverse technische Vorkehrungen hinsichtlich der Bau- und Transportfahrzeuge vermeiden und wurde bereits in Abschn. 5.1.5 ausführlich dargelegt. So sind Fahrzeugeigenschaften wie bspw. Antriebsart und Reifendruck für das Ausmaß der Bodenbelastung von Bedeutung. Weitere wichtige Punkte betreffen die Anlage von Baustraßen (vgl. Abschn. 5.1.5).

Unbeabsichtigt verdichteter Oberboden kann nach Beendigung der Baumaßnahme ggf. durch Tiefenlockerung seine Funktionsfähigkeit weitgehend wiedererlangen (vgl. ERM 2008, 6-4.6). Doch sollte IBNI et al. (2008) zufolge die Tiefenlockerung im Bereich des Arbeitsstreifens vor Wiederaufbringung der oberen Bodenschicht auf ein notwendiges Maß beschränkt werden. Auch durch Zwischenfruchtanbau ist eine biologische Lockerung und Stabilisierung des Bodens denkbar.

5.4.8.3 Bodenerosion

Eine hangparallele Trassenführung kann die Erosionsgefahr durch Wasser während der aufgrund der Bauarbeiten vegetationslosen Phase abschwächen. Weiterhin können eine kurze Bauphase sowie ein zügiger erneuter Bewuchs der Erosionsgefahr entgegenwirken.

5.4.8.4 Bodenwasserhaushalt

Wasserstauende Schichten, die vom Kabelgraben ggf. durchbrochen werden, können durch quellfähige Tone wie etwa Betonit wieder vollständig abgedichtet werden. Auf diese Weise sind Beeinträchtigungen des Bodenwasserhaushalts vermeidbar (GEO et al. 2009). Zum Beispiel an (Nieder-) Moorstandorten kann so die Funktionsbeeinträchtigung durch Entwässerung gering gehalten werden. Auch durch zeitlich gestraffte Baumaßnahmen und eine rasche Wiederbefüllung des Grabens können Beeinträchtigungen minimiert werden (IBNI et al. 2008, S. 55 ff.). Auf Hängen verlegte Kabel haben eine starke Drainagewirkung (INSTITUT FÜR ELEKTRISCHE ANLAGEN UND HOCHSPANNUNGSTECHNIK – ABTEILUNG FÜR HOCHSPANNUNGSTECHNIK 2001, S. 32).

5.4.8.5 Bodenerwärmung

Eine Verminderung der Bodenerwärmung ist durch unterschiedliche Maßnahmen möglich, die im Wesentlichen von HOFMANN et al. (2012, Teil II) abgehandelt werden. In erster Linie verringert die Wahl eines angemessenen Leitermaterials und eines großen Leiterquerschnitts Verlustwärme. Über die Bemessung des Bettungsmaterials kann darüber hinaus die Wärmeabgabe standortbezogen ausgeregelt werden. Auch eine Verlegung des Kabels in größerer Tiefe kann einer Erwärmung des belebten Oberbodens vorbeugen. Bei einer streckenweise getunnelten Verlegung kann aktiv belüftet werden. Falls erforderlich, kann die Bodenerwärmung auch durch externe Kühlung vermindert werden, die bspw. für den (n-1)-Fall vorgehalten wird. Aufwendige Maßnahmen bleiben i. Allg. aufgrund der hohen Kosten auf die Hot Spots der Wärmeentwicklung beschränkt. Hohe Abstände zwischen den Kabeln bzw. Kabelsystemen wirken sich zwar günstig auf das thermische Verhalten aus, führen jedoch zu höheren magnetischen Feldstärken (HOFMANN et al. 2012, S.151).

HOFMANN et al. (2012, S. 151) haben unterschiedliche Grabenprofil-Varianten für Dreh- und Wechselstromkabel miteinander verglichen und festgestellt, dass aus thermischer Sicht sowohl für HDÜ als auch HGÜ die Grabenprofil-Variante „Zwei Doppelsysteme in getrennten Kabelgräben“ die günstigste der Varianten (vgl. HOFMANN et al. 2012, S. 97–98) hinsichtlich Leistungsübertragung (hoch) und somit Wärmeabgabe (gering) ist. Die ungünstigste Variante für Drehstrom war die Variante „2x2 Systeme äquidistant verlegt“.

5.5 Auswirkungen von 380-kV-Höchstspannungsgleichstrom-Erdkabeln

5.5.1 Übersicht

Da bei der HGÜ im Gegensatz zur Drehstromtechnik nur zwei Leiter pro Stromkreis (bipolares System; bei Neubauten werden nur noch bipolare Systeme eingesetzt) notwendig sind (HOFMANN et al. 2012, S. 38–40), ist der Flächenverbrauch bei HGÜ-Erdkabeln geringer als bei HDÜ-Erdkabeln (vgl. Abschnitt 2.5.4 sowie HOFMANN et al. 2012, S. 97–98).

5.5.2 Bodenverdichtung, Störung des Bodengefüges und des Bodenwasserhaushaltes

Die unter 5.4.2, 5.4.3 und 5.4.4 für 380-kV-Höchstspannungs-Drehstrom-Erdkabel angeführten Aspekte können für Höchstspannungs-Gleichstrom-Erdkabel übernommen werden.

5.5.3 Einbringung von Fremdstoffen

Die unter 5.4.5 für 380-kV-Höchstspannungs-Drehstrom-Erdkabel angeführten Risiken können für Höchstspannungs-Gleichstrom-Erdkabel übernommen werden.

Zur Kabelisolierung können getränkte Papierisolationen (Masse- oder Öl-Kabel) oder Kunststoffe (z.B. vernetztes Polyethylen) verwendet werden. Aus Umweltschutzgründen haben sich für Neubauten Kunststoffkabel mit einer Isolierung aus vernetztem Polyethylen (VPE) durchsetzen können. Heute werden weder für HGÜ noch für HDÜ-Kabel reine Öl-Kabel gebaut (HOFMANN et al. 2012, S. 23).

5.5.4 Bodenerwärmung im Betrieb

Die unter 5.4.6 für 380-kV-Höchstspannungs-Drehstrom-Erdkabel angeführten Risiken können für Höchstspannungs-Gleichstrom-Erdkabel übernommen werden. Allerdings sind die Stromwärmeverluste bei HGÜ geringer als bei HDÜ (HOFMANN et al. 2012, S. 40), so dass die Kabel bei sandigen Böden direkt im Graben verlegt werden können und keine Auffüllung zum Schutz des Kabels notwendig ist (ABB 2011, S. 38). ML (2011, S. 72–73) erwarten für die geplante HGÜ-Kabelleitung NorGer eine Temperaturerhöhung von 2–3 K in 20 cm Bodentiefe bei einer Verlegetiefe von 1,5 m, was eine Verringerung der Bodenfeuchte, Veränderung der Speicher-Regler- und der natürlichen Ertragsfunktionen des Bodens sowie eine veränderte Artenzusammensetzung der Tier- und Pflanzenarten im Trassenbereich zur Folge haben könnte. POLSTER et al. (2009, S. 21) gehen bei einer Bodenoberflächentemperatur von 0 °C von einer Erwärmung von ca. 3 °C in 0,2 m Bodentiefe aus. In unmittelbarer Kabelnähe kann der Boden austrocknen: VPE-isolierte Kabel erreichen Leitertemperaturen von bis zu 90 °C (POLSTER et al. 2009, S. 19).

5.5.5 Vermeidungs- und Minderungsmaßnahmen

HOFMANN et al. (2012, S. 151) haben unterschiedliche Grabenprofil-Varianten für Dreh- und Wechselstromkabel miteinander verglichen und festgestellt, dass aus thermischer Sicht sowohl für HDÜ als auch HGÜ die Grabenprofil-Variante „Zwei Doppelsysteme in getrennten Kabelgräben“ die günstigste der Varianten (vgl. HOFMANN et al. 2012, S. 97–98) hinsichtlich Leistungsübertragung (hoch) und somit Wärmeabgabe (gering) ist. Die Kabel bipolarer HVDC-Kabelsysteme können nah beieinander verlegt werden. ABB (2011) gibt für ± 320 kV-Kabel einen Außendurchmesser von 100–125 mm an. Darüber hinaus können die unter 5.4.7 für 380-kV-Höchstspannungs-Drehstrom-Erdkabel angeführten Vermeidungs- und Minderungsmaßnahmen für Höchstspannungs-Gleichstrom-Erdkabel übernommen werden.

5.6 Nebenanlagen bei Erdleitungen

Bei den für Erdkabel ebenso wie für Freileitungen notwendigen Nebenanlagen kommt es zu Flächenversiegelungen. Hier sind Umspannwerke, Konverterstationen (~5000 m²) und Übergangsbauwerke (~2500 m²) zu nennen (vgl. auch Abschn. 5.3).

Für die Kabelverbindungen muss der Graben während des Baus auf einer Länge von 8 m und einer Breite von 3 m aufgeweitet werden. In dieser Grube wird direkt auf dem Untergrund vorübergehend ein Verbindungshaus/-container platziert, so dass die Arbeiten an den Kabelverbindungen in einem geschützten Umfeld durchgeführt werden können. Nach der Montage können die Verbindungen in einer ausgehobenen Grube neben dem Verbindungshaus positioniert werden (ABB 2011, S. 52). Kabelverbindungsmuffen sind transportbedingt alle 600–900 m notwendig (HOFMANN et al. 2012, S. 316). Cross-Bonding-Bauwerke und Kompensationsanlagen sind weitere mögliche Nebenanlagen, die Flächenversiegelungen bedingen (vgl. Abschn. 3.6).

Je nach Bodenverhältnissen kann für Nebenanlagen eine Pfahlgründung oder eine Flach- bzw. Tiefgründung notwendig sein. Bei einer Flach- bzw. Tiefgründung erfolgt Bodenaushub, was gewachsene Bodenhorizonte zerstören kann sowie eine Veränderung der Bodeneigenschaften z. B. durch Bodenverschlammung zur Folge haben kann. Ist im Rahmen der Erdarbeiten eine Wasserhaltung notwendig, wird der Bodenwasserhaushalt verändert. Außerdem kann eine Sackung in Bereichen mit organischen Böden ausgelöst werden (ML 2011, S. 73).

Des Weiteren kommt es im Zuge der Baumaßnahmen zu Bodenverdichtungen. Eine dauerhafte Anlage von trassenbegleitenden Straßen und Wegen ist BRAKELMANN (2010) zufolge nicht erforderlich, da im Reparaturfall eine Erreichbarkeit stets mit flexiblen Baustraßen (bspw. mittels Stahlplatten) hergestellt werden kann.

5.7 Auswirkungen von gasisolierten Leitungen

Gasisolierte Leitungen (GIL) können am Boden, unterirdisch in Tunneln oder direkt im Erdreich verlegt werden, wofür der Boden aufgedrückt werden muss. Aufgrund der höheren Leistung ist die Trassenbreite der GIL geringer als bei vergleichbaren Kabelsystemen (VDE 2010, S. 10). Der Außendurchmesser einer GIL beträgt zwischen 40–60 cm (ALSTOM GRID 2010, S. 13). Die Wärmeabgabe an den umgebenen Boden ist bei Tunnelverlegung vernachlässigbar, so dass der Boden nach der Installation ohne Einschränkungen landwirtschaftlich genutzt werden kann (SIEMENS AG 2010, S. 4). Bei direkter Verlegung im Boden kann nach abgeschlossener Installation eine landwirtschaftliche Nutzung mit geringfügigen Einschränkungen stattfinden (SIEMENS AG 2010, S. 5).

Die Länge der einzelnen Rohrstücke variiert zwischen 11,5 und 13,5 m (SCHÖFFNER et al. 2006). Die Erdverlegung orientiert sich stark an der Verlegung von Öl- und Gaspipelines. Die Rohrsegmente werden neben dem Graben zur Leitung vorgefertigt. Aufgrund der hohen Elastizität der Rohrsegmente ist ein Absenken in den Graben problemlos. Anschließend wird der Graben mit dem Aushub gefüllt, wobei keine Steine in der näheren Umgebung der GIL sein dürfen. GIL können auch in Tunneln verlegt werden. Bei rundem Querschnitt ist ein Tunnelradius von ca. 3 m erforderlich, während ein rechteckiger Tunnelquerschnitt 2,6 m Höhe und 2,4 m Breite misst. Da die natürliche Konvektion i.d.R. zur Kühlung ausreicht, sind keine Kühlungssysteme erforderlich (KOCH 2002, S. 2).

GIL haben im Betrieb einen geringen Ohmschen Widerstand, wodurch entsprechend wenig Wärme entsteht. Dies ermöglicht auch bei sehr hohen Übertragungsleistungen eine direkte Erd-

verlegung ohne Überschreitung der Grenztemperaturen für Bodenaustrocknung bzw. eine Tunnelverlegung ohne Kühlsysteme. Bei der Verlegung von zwei GIL-Systemen zu je 2000 MVA Übertragungsleistung in einem Tunnel mit dem Durchmesser von 3 m ist die natürliche Konvektion im Tunnel als Kühlung ausreichend. Unter normalen Legebedingungen und Bodenleitfähigkeiten können direkt erdverlegte Systeme mit Leistungen von 2000 MVA (ca. 3100 nA bei 400 kV Betriebsspannung) bei einer Bodenerwärmung von weniger als 30 °C realisiert werden (KOCH 2002, S. 4).

Bei einer Pilotstudie am Frankfurter Flughafen wurde die später erdverlegte GIL in einem Montagezelt vorgefertigt. Die Rohre wurden mit Flüssigboden, einem thermisch stabilisierten Rückfüllmaterial, eingebettet (NEUMANN 2012).

5.8 Zusammenfassung Schutzgut „Boden“

Das Schutzgut „Boden“ wird vor allem bei der Verlegung von Erdkabeln stark in Anspruch genommen. Die gesamte Kabeltrasse wird in der Bauphase aufgegraben und muss für Ab- und Antransporte zugänglich sein. Abgrabung, Versiegelung, Bodenverdichtung und Bodenumlagerung können temporäre oder dauerhafte Störungen des Bodengefüges und des Bodenwasserhaushaltes zur Folge haben. Beim Freileitungsbau treten die Auswirkungen überwiegend punktuell auf.

Schwere Baufahrzeuge belasten den Boden während der Bauphase und können aufgrund ihres hohen Gewichts auf ungeschützten Böden eine Bodenverdichtung bewirken, die sich erheblich auf die Bodenfunktion als Lebensraum für Pflanzen und Tiere auswirkt. Bei feuchten und nassen Böden sind schon nach einmaligem Überfahren mit schweren Baumaschinen erhebliche Schäden möglich. Eine Bodenverdichtung beeinträchtigt die Regler- und Speicherfunktion der Böden für den Wasserhaushalt und hat Staunässe oder mangelnde Durchlüftung zur Folge, was eine verstärkte Aktivität von anaeroben Bakterien begünstigt. Dadurch ändert sich der Stoffhaushalt mit Auswirkungen auf das Grundwasser und die Atmosphäre. Auch verringert sich die Durchwurzelbarkeit des Bodens mit nachteiligen Folgen für das Pflanzenwachstum. Geringeres Pflanzenwachstum geht mit einem Rückgang an anfallender Pflanzen- und Wurzelstreu einher, welche die Lebensgrundlage für die meisten Bodenlebewesen bildet und die Basis des Nährstoffkreislaufs auf dem Boden darstellt. Dies hat zwangsläufig eine Verschiebung des Artenspektrums zur Folge.

Beim Bau von Freileitungen ist unbeachtet passiver Schäden durch Bodenverdichtung auf Zufahrten der aktive Eingriff in die Bodenhorizonte an den Maststandorten begrenzt, wo für die Fundamente eine Aushubtiefe von 3–4 m notwendig ist. Masten werden i. Allg. alle 350 bis 400 m entlang der Trasse errichtet. Im Bereich der betonierten Mastsockel kommt es auf den versiegelten Flächen zu einem vollständigen Verlust der Lebensraum- und Archivfunktionen des Bodens.

Um eine Rekultivierung der beim Verlegen von Erdkabeln unvermeidlich umfangreichen Erdbewegungen zu ermöglichen, müssen die Bodenhorizonte während des Bodenaushubs sorgfältig getrennt gelagert werden und anschließend in ihrer natürlichen Schichtung wieder eingebaut werden. Infolge der Umlagerung können zuvor im Bodenmaterial gebundene Stoffe in benachbarte Ökosysteme gelangen. Auch wenn das Bodenmaterial wieder in den Graben rückverfüllt wird und sich die ursprünglichen Schichtung einfach aufgebauter Bodentypen nach einer sauberen Trennung von Ober- und Unterboden während der Entnahme, der Lagerung und dem Wie-

dereinbau wieder einstellt, so ist das gewachsene Bodenprofil in jedem Fall gestört und kann sich nur in längeren Setzungsprozessen regenerieren.

Während der Bauphase wird die Vegetationsdecke im Bereich der Erdkabeltrassen komplett entfernt, wodurch vorübergehend eine erhöhte Erosionsgefahr besteht. Hiervon sind vor allem schluffige und feinsandige Böden in Abhängigkeit von Relief bzw. Hangneigung betroffen. Nach Abschluss der Bauarbeiten kann sich erneut Bewuchs einstellen und die Erosionsgefahr nimmt wieder ab. Eine hangparallele Trassenführung kann die Erosionsgefahr durch Wasser während der aufgrund der Bauarbeiten vegetationslosen Phase abschwächen.

Breite Schneisen führen in waldreichen Gebieten zu großräumigen Bodenveränderungen, insbesondere bei Austrocknung. Im Schneisenbereich von Freileitungen kann es insbesondere zur Aushagerung ehemals baumbestander Böden durch Abtrag mineralischer und organischer Masse kommen. Ausschlaggebend hierfür sind die jeweiligen Bodenverhältnisse, die nur standörtlich bewertet werden können. Auch das bei Erdkabeln notwendige Freihalten der Trasse von tief wurzelnden Sträuchern und Bäumen wirkt sich qualitativ auf Boden und Bodenfunktionen aus.

Der Bodenwasserhaushalt kann bei Böden mit hoch anstehendem Grundwasserstand wie z.B. Niedermooren sowie Böden mit gespannten Grundwasserleitern bei der Verlegung eines Erdkabels temporär oder dauerhaft geschädigt werden. Während der Bauarbeiten wird bei hoch anstehendem Grundwasser Wasserhaltung betrieben, deren Dauer so kurz wie möglich bemessen sein sollte, um den natürlichen Zustand des Bodens in der Umgebung der Kabeltrasse nicht nachhaltig zu verändern. Werden wasserstauende Bodenhorizonte oder gespannte Grundwasserleiter durchstoßen, kann es bei anschließend unzureichendem Verschluss zu einer dauerhaften Drainagewirkung kommen. Dies führt z.B. zur Mineralisierung und Sackung von Moorböden oder zur Versauerung und Maiboltbildung in Marschböden und sollte in jedem Fall vermieden werden.

Die Wärmeableitung eines HDÜ-Erdkabels wird üblicherweise mit Hilfe einer Magerbeton-Bettung reguliert und standortbezogen optimiert. Die technische Auslegung des jeweiligen Höchstspannungskabels auf die zu erwartende Auslastung ist maßgeblich für die Wärmeableitung. Während des Betriebs erwärmt sich ein Höchstspannungskabel und gibt diese Wärme an das umgebende Erdreich ab. Bei den Auswirkungen der Verlustwärme spielt neben der thermischen Bettung die Bodenbeschaffenheit bzw. der Bodentyp eine zentrale Rolle. Trockenere Böden transportieren die Wärme schlechter ab als feuchte Böden. Eine gute Wasserhaltefähigkeit begünstigt die Isothermie, so dass sich Lehmböden weniger erwärmen als Sandböden. Entscheidend für das Maß der Erwärmung ist die Auslegung des Kabels, welches der zu erwartenden Auslastung angemessen sein muss. Techniker gehen davon aus, dass sich im Normalbetrieb in 30 cm Tiefe allenfalls eine Temperaturerhöhung von maximal 2–3 K ergibt. Vertreter der Landwirtschaft befürchten, dass Erdkabel den Boden soweit erwärmen, dass es zu erhöhten Verdunstungs- und Austrocknungsraten kommt, die einen breiten Schutzstreifen notwendig machen. Mit Blick auf die durch krautige Vegetation durchwurzelte oberste Bodenschicht sind mögliche Temperaturveränderungen insbesondere in den oberen 50 cm unter der Erdoberkante beurteilungsrelevant.

Zu Stoffeinträgen in den Bodenhaushalt kann es witterungsbedingt insbesondere bei Freileitungen kommen. Bis vor kurzem wurden blei- oder zinkhaltige Korrosionsschutzanstriche verwendet, die beim Eintrag erhebliche Bodenbelastungen bewirken. Die Korrosion der Masten führt zur

Auswaschung der zinkhaltigen Grundierungsschicht an den Masten, so dass der allgemein gültige Richtwert für Zinkeinträge vielfach überschritten wird. Alle 25 bis 30 Jahre werden Wartungsarbeiten durchgeführt, bei denen es bei unsachgemäßer Durchführung der Entrostungs- und Streifarbeiten zu Schadstoffeinträgen in den Boden kommen kann. Seit einigen Jahren werden für neue Masten jedoch feuerverzinkte und damit umweltfreundlichere Materialien eingesetzt.

Bei Erdkabeln reduziert die Einbringung von Bettungsmaterialien (Magerbeton, Kabelsand) die Masse des natürlich gewachsenen Bodens, was sich ebenfalls reduzierend auf die natürlichen Bodenfunktionen auswirken kann. Aufgrund der gravierenden Folgen einer Bodenverdichtung erscheint es sinnvoll, soweit wie möglich bereits vorhandene Verkehrswege zu nutzen. Bodenverdichtung lässt sich darüber hinaus durch flexible Baustraßen sowie durch diverse technische Vorkehrungen an den Bau- und Transportfahrzeugen vermeiden bzw. verringern. Bei der Bodenentnahme ist auf eine saubere Trennung von Ober- und Unterboden während der Entnahme, der Lagerung und dem Wiedereinbau zu achten. Bei gegenüber Strukturschäden besonders empfindlichen Böden sollte ein Oberbodenabtrag nach Möglichkeit vermieden werden. Werden in der Bauphase bei Erdkabeln wasserstauende Schichten vom Kabelgraben durchbrochen, können sie durch quellfähige Tone wie etwa Betonit wieder vollständig abgedichtet und Beeinträchtigungen des Bodenwasserhaushalts vermieden werden.

Bei den für Erdkabel ebenso wie für Freileitungen notwendigen Nebenanlagen kommt es zu Flächenversiegelungen. Hier sind Umspannwerke, Konverterstationen (~5000 m²), Übergangsbauwerke (~2500 m²) und Kompensationsanlagen zu nennen. Je nach Bodenverhältnissen kann für Nebenanlagen eine Pfahlgründung oder eine Flach- bzw. Tiefgründung notwendig sein.

Das Risiko irreversibler Bodenschäden kann in der Bauphase von Freileitungen und Kabeln durch eine bodenkundliche Begleitung erheblich gesenkt werden.

6. Schutzgut „Wasser“

6.1 Auswirkungen von 380-kV-Höchstspannungsdrehstrom-Freileitungen

6.1.1 Auswirkungen von Freileitungen auf Grundwasser

Bau- und anlagebedingt kann es zu kleinräumigen und lokalen Auswirkungen an den Maststandorten von Freileitungen auf das Grundwasser kommen. In bewaldeten Gebieten kann die Anlage breiter Schneisen Auswirkungen auf die Wasserhaltefähigkeit des Bodens und das Grundwasserdargebot haben. Folgende Effekte sind beim Bau von Freileitungen möglich (vgl. ERM 2008; TRANSPOWER 2010):

- dauerhafte Veränderung von Grundwasserleitern und der Deckschicht durch Gründungsmaßnahmen,
- dauerhafte Grundwasserabsenkung durch Veränderung des Grundwasserdargebots,
- temporäre Verunreinigung von Grundwasser bei bauzeitlicher Freilegung des Grundwassers,
- wartungsbedingte Beeinträchtigung der Grundwasserbeschaffenheit, relevant v.a. in Wasserschutzgebieten.

Für die Einstufung des Konfliktpotenzials im Hinblick auf Eingriffe in den Grundwasserhaushalt beim Bau von Freileitungen, soll im Folgenden die von IBU (2007) zusammengestellte Übersicht der Empfindlichkeit unterschiedlicher Grundwassersituationen herangezogen werden. Entscheidend sind hierbei die hydrologischen Verhältnisse, die Flurabstände und der Aufbau der Versickerungszonen (vgl. Tabelle 17). Grundwasserstandorte mit einer sehr hohen und hohen Empfindlichkeit sollten bereits in der Planungsphase berücksichtigt und gemieden werden.

Im Falle eines Aushubs von Baugruben für die benötigten Mastfundamente – bei Rammpfahlgründung vermeidbar (vgl. HOFMANN et al. 2012, Teil I, Abschn. 1.3.3) – ist ein Aufschluss des oberflächennahen Grundwassers möglich, was in einer temporären Grundwasserabsenkung resultieren kann (vgl. ERM 2008, S. 6.5-24). Eine nachhaltige Auswirkung auf das Grundwasservorkommen ist dadurch im Regelfall jedoch nicht zu erwarten. Als mögliche Auswirkung auf das Schutzgut Grundwasser sind Schadstoffeinträge an Maststandorten zu beachten. Während der Bauphase kann es bspw. zu einem Eintrag von Schmier- und Reinigungsmitteln sowie von Farben und Treibstoff in den Boden und in das Grundwasser kommen (vgl. IBU 2007, S. 334). Bei einer nicht sachgemäßen Erneuerung des Korrosionsschutzes kann dies mit schwermetallhaltigen Farbstoffen der Fall sein (vgl. GEO et al. 2009, S. 87). Die ausgetretene Menge, der Flurabstand des obersten Grundwasserleiters und die Filterwirkung der Versickerung sind dabei ausschlaggebend für die tatsächliche Menge des Schadstoffeintrages in das Grundwasser.

Tabelle 17: Bewertung der Empfindlichkeit des Grundwassers (nach IBU 2007, S. 191)

| Kategorie | Beschreibung | |
|---------------------------|---|---|
| Sehr hohe Empfindlichkeit | Ungünstige hydrologische Verhältnisse | Flurabstände von < 2 m bei vorwiegend sandigem Aufbau der Versickerungszone (Anteil bindiger Bildungen < 20 %) |
| Hohe Empfindlichkeit | Ungünstige hydrologische Verhältnisse | Flurabstände von < 2 m bis 5 m bei sandig ausgebildeter bzw. wechselhaft aufgebauter Versickerungszone |
| | | Flurabstände von < 2 m bei vorwiegend bindigem Aufbau der Versickerungszone (Anteil bindiger Bildungen 20 bis 80 %) |
| Mittlere Empfindlichkeit | Relativ günstige hydrologische Verhältnisse | Flurabstände von > 5 bis > 10 m bei ungespannten Grundwasserverhältnissen sowie sandig ausgebildeter bzw. wechselhaft aufgebauter Versickerungszone (Anteil bindiger Bildungen < 20 %) |
| | | Flurabstände von 2 m bis 10 m bei vorwiegend bindigem Aufbau der Versickerungszone (Anteil bindiger Bildungen 20 bis < 80 %) und Mächtigkeit der Deckschicht von 5 bis 10 m |
| Geringe Empfindlichkeit | Günstige hydrologische Verhältnisse | Flurabstände von > 10 m bei ungespannten Grundwasserverhältnissen sowie vorwiegend bindigem Aufbau der Deckschichten (Anteil bindiger Bildungen 20 bis 80 %) bzw. Torfe und Mächtigkeit der Grundwasserabdeckung von > 10 m |
| | | Flurabstände von > 5 m bei gespannten Grundwasserverhältnissen (Anteil bindiger Bildungen > 80 % bzw. Torfe) |

Eine mögliche Folge der Versiegelung im Bereich der Mastfundamente ist eine geringe Verminderung der Grundwasserneubildungsrate. Im Rahmen der UVS des Planfeststellungsverfahrens für die 380-kV-Leitung Krümmel-Görries (sog. Windsammelschiene) (vgl. IBU 2007, S. 334) wurden darüber hinaus kleinräumige Veränderungen der Grundwasserströme prognostiziert. Aufgrund der geringen Versiegelungsfläche dürften diese Veränderungen jedoch im Normalfall keine nachhaltige Wirkung auf die Grundwasserdynamik haben (vgl. IBU 2007, S. 334). Anhaltende Veränderungen der Grundwasserströmungen sind v.a. deswegen nicht zu erwarten, weil das Wasser die geplanten Fundamente umströmen kann (vgl. ERM 2008, S. 6.5-25). IBU (2007, S. 334) und ERM (2008, S. 6.5-26) zufolge sind bei ordnungsgemäßigem Bau sowie ordnungsgemäßer Anlage und Betrieb einer Freileitung keine nachhaltigen bzw. schwerwiegenden Auswirkungen auf das Grundwasser zu erwarten.

Mögliche Veränderungen des Grundwasserdargebots im Bereich einer Schneise können nur standörtlich beschrieben und bewertet werden.

6.1.2 Auswirkungen von Freileitungen auf Oberflächengewässer

Oberflächengewässer wie z.B. schiffbare Kanäle können von Freileitungen überbrückt werden. Zu beachten ist, dass bei der Überspannung von Oberflächengewässern durch Freileitungen mit Hilfe von hohen Masten angemessene lichte Höhen eingehalten werden müssen (vgl. GEO et al. 2009, S. 123, 223). Zu einer dauerhaften Beeinträchtigung der Qualität von Oberflächengewässern kommt es bei einem ausreichenden Abstand der Maststandorte zu den Uferbereichen nicht (IBU 2007, S. 336).

Bei der Aufstellung von Höchstspannungsmasten sind rechtlich vorgeschriebene Abstände zu Gewässeruferrändern einzuhalten. Nach dem BNatSchG (§ 61) dürfen sich im Außenbereich befindende Bundeswasserstraßen und Gewässer erster Ordnung sowie anstehende Gewässer > 1 ha im Abstand von 50 m von der Uferlinie keine baulichen Anlagen errichtet werden. Für Küstengewässer ist ein Mindestabstand von 150 m zur mittleren Hochwasserlinie einzuhalten. Weitergehende Vorschriften unterliegen dem jeweiligen Landesrecht.

Im Wasserhaushaltsgesetz (WHG) ist die Breite von Gewässerrandstreifen im Außenbereich auf 5 m festgelegt. Diese Gewässerrandstreifen müssen im Hinblick auf ihre Funktionen der Erhaltung und Verbesserung ökologischer Funktionen oberirdischer Gewässer, Wasserspeicherung, Sicherung des Wasserabflusses sowie Verminderung von Stoffeinträgen aus diffusen Quellen erhalten bleiben (WHG § 38). Im Zuge der Bauarbeiten ist deshalb auf ausreichende Abstände zu Gewässern zu achten, damit Gewässerrandstreifen, Uferstrukturen und die Gewässerstrukturgüte nicht beeinträchtigt werden. Des Weiteren ist zu beachten, dass eine hiervon abweichende Gewässerrandstreifenbreite nach Länderrecht geregelt sein kann. So beträgt die Gewässerrandstreifenbreite bspw. in Niedersachsen an Gewässern erster Ordnung 10 m und an Gewässern zweiter Ordnung 5 m (Niedersächsisches Wassergesetz, NWG § 91a).

6.1.3 Vermeidungs- und Minderungsmaßnahmen

Verunreinigungen können i. Allg. von Gewässern (z.B. bei Beschichtung der Masten) durch Einhaltung der Regeln und Vorschriften zum Umgang mit wassergefährdenden Betriebsstoffen vermieden werden (ERM 2010). Oberflächengewässer bleiben i. Allg. von Baustelleneinrichtungen ausgespart, so dass die Gewässerbereiche unberührt bleiben. In unvermeidlichen Ausnahmefällen wird das Gewässer mit Metallplatten abgedeckt, so dass die Durchgängigkeit und die Vorflutfunktion der Gewässer erhalten bleiben.

Während der Bauarbeiten ist auf ausreichend große Abstände zu Uferbereichen zu achten, um eine Beeinträchtigung der Uferstrukturen und des Uferbewuchses zu vermeiden. Dies gilt auch für Gewässerrandstreifen, wo es andernfalls durch Baustelleneinrichtungen zur Beschädigungen, Verdichtungen oder Einträgen von Betriebsstoffen kommen kann.

6.2 Auswirkungen von 380-kV-Höchstspannungsgleichstrom-Freileitungen

Die im Kapitel 6.1 für 380-kV-Höchstspannungs-Drehstrom-Freileitungen angeführten Aspekte können für Höchstspannungs-Gleichstrom-Freileitungen übernommen werden.

6.3 Nebenanlagen bei Freileitungen

Durch die Errichtung von Umspannwerken, Konverterstationen sowie Übergangsanlagen geht als Folge von Flächenversiegelung kleinräumig Versickerungsfläche verloren. Beim Bau kann

es wie bei Errichtung der Masten zum Eintrag von Schmier- und Reinigungsmitteln sowie von Farben und Treibstoff in den Boden und in das Grundwasser kommen.

6.4 Auswirkungen von 380-kV-Höchstspannungsdrehstrom-Erdkabeln

6.4.1 Auswirkungen von Erdkabel auf das Grundwasser

Im Zuge von Erdkabelverlegungen sind mögliche baubedingte Auswirkungen auf das Grundwasser, d.h. auf ganzjährig vorhandene, durch Niederschlag gespeiste Wasservorkommen, zu beachten (NLT 2009, S. 12, SCHEFFER U. SCHACHTSCHABEL 2010, S. 220). Maßgebend sind die Bestimmungen des Wasserhaushaltsgesetzes und des jeweiligen Landeswassergesetzes. Beeinträchtigungen des Grundwassers sind insbesondere in folgenden Situationen denkbar:

- Bei Feuchtgebieten mit hoch anstehendem Grundwasser wie z.B. Niedermooren, die für die Zeit der Kabelverlegung eine aktiv herbeigeführte Grundwasserabsenkung erfordern und entwässert werden könnten (vgl. GEO et al. 2009, S. 41; ECOFYS 2008, S. 97).
- Bei gespannten Grundwasserleitern, die im Laufe der Bauphase – bei unzureichendem Verschluss auch dauerhaft – über das Längsgefälle des Grabenverlaufs entwässern könnten (vgl. FORWIND 2005, S. 29). Mineralisierung und Sackung, z.B. von Moorböden, sowie Versauerung und Maiboltbildung könnten folgen.
- Bei der (Teil-)Rückverschließung von Kabelgräben mit allochthonem Material, welches den natürlichen Fluss des Grundwassers sowie die Grundwasserneubildung hemmt und insbesondere in der Nähe von Quellen oder Feuchtflächen zu Austrocknung führen kann (ECOFYS 2008, S. 98).

Irreversible Schädigungen durch Erdkabelverlegung lassen sich im Bereich des Grundwassers aufgrund der geringen Dauer der Baumaßnahmen i. Allg. ausschließen (vgl. u.a. GEO et al. 2009, S. 92; IBNI 2008, S. 78). Auch eine Wasserkontamination durch Schadstoffe kann bei sachgemäßer Ausführung vermieden werden, da die derzeitigen Kabeltypen dahingehend unbedenklich sind (vgl. JARASS et. al. 1996, S. 21).

Für die Reichweite der Grundwasserabsenkung ist der Durchlässigkeitsbeiwert (m/s) des Bodens ein entscheidender Faktor (vgl. Tabelle 18). Bei tonreichen Marschböden wirkt sich GEO et al. (2009, S. 91) zufolge selbst eine 1 m tiefe Grundwasserabsenkung nur rd. 6 m in angrenzende Flächen aus. In naturnahen Moorböden mit schwach zersetzten Torfen sind dagegen Reichweiten von annähernd 20 m möglich.

Tabelle 18: Durchlässigkeitsbeiwerte wassergesättigter Böden (aus GEO et al. 2009 S. 91)

| Bodenhorizont | kf [m/s] (gerundet) | Durchlässigkeit |
|---|---|-----------------|
| Sd-Horizonte, Knickhorizonte | < 10 ⁻⁷ | sehr gering |
| Sd-Übergangshorizonte, Sg-Horizonte, weniger ausgeprägte Knick- und Dwogmarsch-Horizonte, stark zersetzte Torfe | 10 ⁻⁷ - 10 ⁻⁶ | gering |
| schluffreiche tonarme Schichten, mittel zersetzte Torfe | 10 ⁻⁶ - 5 · 10 ⁻⁶ | mittel |
| Horizonte mit guter Gefügeentwicklung, fein- bis mittelkörnige Sande, mittel bis schwach zersetzte Torfe | 5 · 10 ⁻⁶ - 10 ⁻⁵ | hoch |
| Horizonte mit sehr guter Gefügeentwicklung, mittelkörnige Sande, schwach zersetzte Torfe | 10 ⁻⁵ -4 · 10 ⁻⁵ | sehr hoch |
| schilfdurchwurzelte Tone, Grobsande, Kiese, sehr schwach zersetzte Torfe | > 4 · 10 ⁻⁵ | äußerst hoch |

Legende: Sd: Stauwassersohle

6.4.2 Auswirkungen von Erdkabel auf Oberflächengewässer

Mögliche Auswirkungen von Erdkabelverlegungen auf Oberflächengewässer sind vor allem beim Queren von Gewässern denkbar. Eine indirekte Entwässerung von Oberflächengewässern ist durch die bereits oben angesprochenen Wasserhaltungsmaßnahmen an Standorten mit hoch anstehendem Grundwasser möglich.

Falls eine Kabeltrasse ein Oberflächengewässer queren soll, wird das Kabel in der Regel mithilfe eines HDD-Bohrverfahrens oder eines Pressrohrverfahrens unter dem Gewässer verlegt bzw. unterdükert (vgl. HOFMANN et al. 2012, Teil I, Abschn. 1.5). Bei solchen Dükerungen, die beim Unterqueren von Gewässern zumeist sowohl aus baugrundtechnischen als auch aus ökologischen Erwägungen erforderlich sind, können hydraulische Verbindungen in Folge der Durchtrennung von wasserundurchlässigen Schichten entstehen (vgl. GEO et al. 2009, S. 89 ff.). Falls wasserundurchlässige Schichten durchstoßen werden, müssen die hydraulischen Verbindungen mit quellfähigen Tonen, wie bspw. Bentoniten, nach Abschluss der Bohrung wieder verschlossen werden.

Eine Alternative zur Dükerung ist bei der Querung von kleineren Fließ- und Stillgewässern die offene Bauweise mit Einstauung. Dabei wird das Wasser über eine Pumpe um die Baustelle herumgeleitet (vgl. GEO et al. 2009, S. 42). Während der Bauphase ist mit einer verstärkten Trübung des Gewässers sowie einem erhöhten Nähr- und Schadstoffstoffeintrag aus Rücklösungen zu rechnen. Je nach Fließgeschwindigkeit baut sich diese Trübung mehr oder weniger rasch ab. Naturnahe Fließgewässer sind gegenüber Trübungen empfindlicher als ausgebaute Gewässer. Bei sehr strukturreichen Ufern ist bei einer offenen Bauweise eine darüber hinaus vorübergehende Beeinträchtigung der Uferrandstruktur zu erwarten (vgl. IBNI 2008, S. 80). Als weitere Auswirkungen werden von ECOFYS (2008, S. 98) mögliche signifikante Beeinträchtigungen von wandernden Fischen und aquatisch lebenden Säugern beschrieben.

Für weite Unterwasserstrecken auf dem Meeresboden sind spezielle, jedoch erprobte Kabelverlegungsverfahren (bspw. Einpflügung) unvermeidlich. Diese Verfahren haben über die Aufwirbelung von Sedimenten und dabei ggf. Remobilisierung von Nähr- und Schadstoffen zumeist sehr temporäre Auswirkungen auf die Wasserqualität.

6.4.3 Vermeidungs- und Minderungsmaßnahmen

6.4.3.1 Grundwasser

IBNI et al. (2008, S. 81 ff.) empfehlen in Gebieten mit hoch oder sehr hoch empfindlichem Grundwasser angepasste Vorsorgemaßnahmen, um einer Grundwasserkontamination vorzubeugen. Im Falle unvermeidlicher Wasserhaltungsmaßnahmen sollte die Dauer der Verlegung eines Erdkabels so gering wie möglich gehalten werden (IBNI et al. 2008, S. 81). GEO et al. (2009, S. 92) empfehlen im Einzelfall die Einrichtung von Negativbrunnen, in welchen das abgepumpte Wasser nicht weit vom Entnahmeort entfernt wieder in den Boden gepumpt wird, um so einer Absenkung des Grundwasserspiegels an empfindlichen Nachbarstandorten entgegenzuwirken.

6.4.3.2 Oberflächengewässer

Bei der Querung von Oberflächengewässern empfehlen IBNI et al. (2008, S. 81 ff.) eine grabenlose Unterquerung des Gewässers. Ist dies nicht möglich und wird während der Bauzeit Wasser abgepumpt, so ist es grundsätzlich vor Wiedereinleitung in das Gewässer zu reinigen und mit einer angemessenen Fließgeschwindigkeit zurückzuführen. Durch eine Einschränkung des Arbeitsstreifens lassen sich Schädigungen der Uferstruktur in jedem Fall vermeiden. Hierbei sind mindestens die im WHG (§ 38, vgl. Abschn. 6.1.2) festgelegten Gewässerrandstreifenbreiten bzw. die davon abweichenden, konkreten Vorschriften der Länder einzuhalten.

6.5 Auswirkungen von 380-kV-Höchstspannungsgleichstrom-Erdkabeln

Die im Kapitel 6.4 für 380-kV-Höchstspannungs-Drehstrom-Erdkabel angeführten Aspekte können für Höchstspannungs-Gleichstrom-Erdkabel übernommen werden.

6.6 Nebenanlagen bei Erdleitungen

Durch die Errichtung von Umspannwerken, Konverterstationen sowie Übergangsanlagen geht als Folge von Flächenversiegelung kleinräumig Versickerungsfläche verloren (vgl. Abschn. 6.3). Des Weiteren werden bei Erdkabeltrassen Cross-Bonding-Bauwerke und Kompensationsanlagen errichtet, wodurch ebenfalls Versickerungsfläche verloren geht.

6.7 Auswirkungen von gasisolierten Leitungen

Die Verlegung von GIL wirkt sich ähnlich wie die Verlegung von Erdkabeln (vgl. Abschn. 6.4 und 6.5) auf das Schutzgut „Wasser“ aus.

6.8 Zusammenfassung Schutzgut „Wasser“

Potentielle Auswirkungen von Höchstspannungsübertragungen auf das Schutzgut „Wasser“ beziehen sich einerseits auf das Grundwasser, andererseits auf Oberflächengewässer. Auswirkungen auf das Schutzgut ergeben sich aufgrund der erforderlichen umfangreichen Tiefbauarbeiten insbesondere bei Erdkabeln. Die Auswirkungen bei Freileitungen sind dabei i. Allg. kleinräumig und beschränken sich auf den Bereich der Maststandorte.

Bezogen auf den Grundwasserhaushalt gilt es, Grundwasserstandorte mit einer sehr hohen und hohen Empfindlichkeit bereits in der Planungsphase zu berücksichtigen und möglichst zu meiden. Mögliche Auswirkungen auf das Grundwasser sind u.a. temporäre oder dauerhafte Ver-

änderungen von Grundwasserleitern und der Deckschicht durch Grabungs- und Gründungsmaßnahmen sowie Bodenverdichtung, dauerhafte Grundwasserabsenkung durch Veränderung des Grundwasserdargebots, temporäre Verunreinigungen von Grundwasser bei bauzeitlicher Freilegung des Grundwassers sowie wartungsbedingte Beeinträchtigung der Grundwasserbeschaffenheit. Die Grundwasserneubildungsrate wird in Folge punktueller Versiegelung, bspw. im Bereich der Mastfundamente, geringfügig verringert. Schadstoffeinträge ins Grundwasser sind während der Bauphase in Form von Kraftstoffen, Schmier- und Reinigungsmitteln sowie Farben möglich. Bei unsachgemäßer Erneuerung des Korrosionsschutzes von Masten können schwermetallhaltige Farbstoffe ins Grundwasser gelangen. Neben der ausgetretenen Schadstoffmenge und dem Flurabstand des obersten Grundwasserleiters spielt dabei die Filterwirkung des Bodens eine wichtige Rolle für den tatsächlichen Schadstoffeintrag in das Grundwasser.

Beeinträchtigungen des Grundwassers sind insbesondere dann zu besorgen, wenn großflächige Grabungen in Feuchtgebieten mit hoch anstehendem Grundwasser wie z.B. Niedermooren erfolgen, in denen während der Bauzeit eine aktive Wasserhaltung betrieben wird, so dass das Grundwasserregime zumindest temporär grundlegend verändert wird. Eine dauerhafte Entwässerung kann aus einem unzureichenden Verschluss gespannter Grundwasserleiter resultieren, was Mineralisierung, Bodensackung, Versauerung sowie Maiboltbildung zur Folge haben kann. Eine Rückverschließung von Kabelgräben mit allochthonem Material kann den natürlichen Fluss des Grundwassers sowie die Grundwasserneubildung hemmen. Erdkabeltypen sind heute durchgehend mit Kunststoffen isoliert. Eine Wasserkontamination aus darin verarbeiteten Schadstoffen ist daher nicht zu befürchten.

Freileitungen können Oberflächengewässer vielfach überbrücken. Bei der Positionierung von Höchstspannungsmasten sind jedoch rechtlich vorgeschriebene Abstände zu Gewässeruferrn einzuhalten. So sind nach dem BNatSchG (§ 61) für im Außenbereich gelegene Bundeswasserstraßen und Gewässer erster Ordnung sowie anstehende Gewässer > 1 ha Abstand von 50 m zur Uferlinie einzuhalten. Weitergehende Vorschriften unterliegen dem jeweiligen Landesrecht. Das Wasserhaushaltsgesetz (WHG) legt die Gewässerrandstreifenbreite im Außenbereich auf 5 m fest. Ausreichende Abstände zu Gewässern sind auch während der Bauarbeiten einzuhalten, um die Funktionen der Gewässerrandstreifen (Erhaltung und Verbesserung ökologischer Funktionen oberirdischer Gewässer, Wasserspeicherung, Sicherung des Wasserabflusses, Verminderung von Stoffeinträgen aus diffusen Quellen) nicht zu beeinträchtigen. Bei einem ausreichenden Abstand der Maststandorte zu den Uferbereichen kommt es i. Allg. nicht zu einer dauerhaften Beeinträchtigung von Oberflächengewässern.

Bei der Querung einer Kabeltrasse mit einem Oberflächengewässer wird i.d.R. unterdükert. Bei dieser empfohlenen Variante sind die Umweltauswirkungen i. Allg. gering. Im Einzelfall einer Durchtrennung von wasserundurchlässigen Schichten werden entstehende hydraulische Verbindungen nach Abschluss der Bohrung mit quellfähigen Tonen wieder verschlossen. Alternativ zur Dükerung ist die Querung von kleineren Fließ- und Stillgewässern in offener Bauweise mit Einstauung und Pumpverbindungen möglich. Hierbei ist das Konfliktpotenzial jedoch deutlich höher. U.a. können verstärkte Trübung des Gewässers sowie erhöhter Nähr- und Schadstoffeintrag die Folge sein. Darüber hinaus kann es zur Beeinträchtigungen von wandernden Tieren, insbes. Fischen kommen.

In den unvermeidlichen Ausnahmefällen, in denen ein Oberflächengewässer nicht von Baustelleneinrichtungen ausgespart werden kann, werden beanspruchte Gewässerkompartimente

vorzugsweise mit Metallplatten abgedeckt, um auf diese Weise die Durchgängigkeit und die Vorflutfunktion des Gewässers zu erhalten. Auf ausreichend große Abstände zu Uferbereichen und Gewässerrandstreifen ist während der Bauarbeiten zu beachten, um eine Beeinträchtigung der Uferstrukturen und des Uferbewuchses zu vermeiden. Unvermeidliche Wasserhaltungsmaßnahmen sollten auf die unbedingt notwendige Dauer der Verlegung eines Erdkabels begrenzt werden. In Einzelfällen können Negativbrunnen errichtet werden, die einer Absenkung des Grundwasserspiegels entgegenwirken.

7. Schutzgüter „Klima“ und „Luft“

7.1 Auswirkungen von 380-kV-Höchstspannungsdrehstrom-Freileitungen

7.1.1 Auswirkungen während der Bauphase

Der Bau von Freileitungen hat unterschiedliche Auswirkungen auf die Schutzgüter „Klima“ und „Luft“. Während der Bauphase entstehen IBU (2007, S. 337) zufolge erhöhte Abgasemissionen und bei langanhaltender Trockenheit auch Staubemissionen in Folge des Einsatzes von Fahrzeugen und Baumaschinen. Diese Emissionen führen zu kurzzeitigen und kleinräumigen Immissionen, die jedoch keine nachhaltigen und negativen Veränderungen auf die klimatischen Verhältnisse haben (IBU 2007, S. 337). Auch OBERFELD (2006, S. 10–11) schließt eine Überschreitung der Immissionsgrenzwerte aus, wobei die Werte für die Mastenerrichtung weit unter denen der Umspannwerkerrichtung liegen.

7.1.2 Auswirkungen während Anlage und Betrieb

In der Betriebsphase von Freileitungen kann es bei Koronaentladungen zu einer Ionisierung von Luftmolekülen und dadurch zu einer Entwicklung von Oxidantien wie z.B. Ozon und Stickoxiden kommen (JARASS et al. 1996, S. 21; IBU 2007, S. 337). Die entstandenen Ionen können bis zu einem Abstand von mehreren Kilometern nachgewiesen werden (vgl. GEO et al. 2009, S. 26, zit. nach SWERDLOW et al. 2004). OBERFELD (2006) führte Berechnungen zur Abschätzung der Ozonzusatzbelastung durch Koronaentladungen einer 380-kV-Salzburgleitung nach dem Box-Modell-Ansatz und dem Modellsystem SELMA-GIS durch. Die Berechnung nach dem Box-Modell-Ansatz ergab für maximale Ozon-Immissionskonzentrationen in ca. 70 m Entfernung von der Leitung $0,03 \mu\text{g}/\text{m}^3$ für Schönwetterperioden und $5,4 \mu\text{g}/\text{m}^3$ bei Raureif („worst case“ Bedingung) als Einstundenmittelwerte. Das Jahresmittel für die Zusatzbelastung lag bei $0,1 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Ein Vergleich der berechneten Zusatzbelastungen mit Ozon-Messwerten von umliegenden Messstationen ergab, dass der Schönwetterwert ($0,03 \mu\text{g}/\text{m}^3$) 0,01 % des maximal gemessenen Einstundenwertes der Messstationen betrug. Für die Raureifwetterlage ($5,4 \mu\text{g}/\text{m}^3$) ergaben sich 3 % Zusatzbelastung, für das Jahresmittel ($0,1 \mu\text{g}/\text{m}^3$) 0,2 %. Die genannten Werte sind OBERFELD (2006) zufolge aus umweltmedizinischer Sicht unbedenklich. Dies gilt auch für den „worst case“ Raureif, da die Zeiten erhöhter Ozonemissionen bei Nebel, Regen und Raureif mit Zeiten geringer Ozonbildungspotentiale bzw. geringer Ozonimmissionswerte zusammen fallen, wodurch kein relevanter Beitrag zur Gesamtbelastung entsteht (OBERFELD 2006, S. 83–84). Die Berechnungen nach dem Modellsystem SELMA-GIS ergaben für die Raureifwetterlage eine Zusatzbelastung bis zu $10 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (OBERFELD 2006, S. 84).

Im Rahmen der Umweltstudie zur ehemals geplanten 380-kV-Leitung Maade-Conneforde wird das Entstehen von Stickoxiden und Ozon als sehr gering eingestuft. Eine Zusatzbelastung durch entstehende Luftschadstoffe sei ausgeschlossen (vgl. ERM 2008, S. 6.1-4). Auch laut TRANSPower (2010, S. 70) ist bei 380-kV-Freileitungen in einem Abstand von 4 m zum Leiterseil kein eindeutiger Nachweis von zusätzlich entstandenen Luftschadstoffen mehr möglich. Entsprechend bezeichnet IBU (2007, S. 255) die Auswirkungen von Ozon- und Stickoxidbildungen auf die menschliche Gesundheit als unerheblich. Den oben genannten Einschätzungen steht allerdings die Einschätzung von FEWS et al. (1999; 1999a) gegenüber, die in der Ionisierung von Ae-

rosolen durch die Koronaeffekte die Ursache für erhebliche Gesundheitsbeeinträchtigungen sehen (vgl. Abschn. 2.1.2 und Abschn. 2.2.2).

Als Folge von Waldabtrieb zur Anlage von Freileitungstrassen kann es zu mikroklimatischen Veränderungen kommen. Entstehen bspw. auf stärker geneigten, bewaldeten Hängen rund um Siedlungen hangparallel Waldschneisen, so kommt es zu neuen oder erhöhten Kaltluftabflüssen, die insbesondere bei Inversionswetterlagen zur Verbesserung der lufthygienischen Situation führen können (vgl. IBU 2007, S. 338). Ortsweise wird das Kleinklima durch Minimierung der Waldfläche und Schneisenbildung geringfügig verändert. Dadurch kann im Extremfall auch das Waldinnenklima beeinträchtigt sein. Denkbar ist auch eine Beeinträchtigung durch erhöhte Sonnen- und Windeinwirkungen an den Schneisenrändern (MINISTERIUM FÜR WIRTSCHAFT, ARBEIT UND TOURISMUS MECKLENBURG-VORPOMMERN 2008). Schwerwiegende Beeinträchtigungen auf die Schutzgüter Luft und Klima sind durch Auswirkungen von Freileitungen in der Regel jedoch nicht zu erwarten (vgl. NLT 2009, S. 11).

7.1.3 Vermeidungs- und Minderungsmaßnahmen

Grundsätzlich können Beeinträchtigungen des Schutzgutes „Klima/Luft“ durch die Optimierung von Arbeits- und Bauabläufen zur Reduzierung von Verunreinigungen minimiert werden (IBNI et al. 2008, S. 231). Des Weiteren können die während der Bauphase auftretenden Staubemissionen durch Besprenkelung des Bodens mit Wasser erheblich reduziert werden (URS CORPORATION 2006, S. 1–19).

7.2 Auswirkungen von 380-kV-Höchstspannungsgleichstrom-Freileitungen

7.2.1 Auswirkungen während der Bauphase

Die unter 7.1.1 für 380-kV-Höchstspannungs-Drehstrom-Freileitungen angeführten Auswirkungen können für Höchstspannungs-Gleichstrom-Freileitungen übernommen werden.

7.2.2 Auswirkungen während Anlage und Betrieb

Wie in Abschn. 7.1.2 für HDÜ-Freileitungen beschrieben kommt es auch bei HGÜ-Freileitungen durch Koronaentladungen zur Bildung von Ozon (O_3) und Freisetzung von Oxiden (NO_x). Durch Koronaentladung entstandenes Ozon ist ORNL (1997) zufolge bei gutem Wetter (innerhalb der Spannweite des natürlichen vorkommenden Ozons) nicht nachweisbar. Bei Niederschlag ist es in seltenen Fällen möglich, von Koronaentladung produziertes Ozon nachzuweisen, wobei bei einer 500-kV-HVDC auf Höhe des Leiters Werte unter 2 ppb gemessen werden können (ORNL 1997, S. 71). Zum Vergleich: die Atmosphäre weist in ländlichen Gegenden 20–25 ppb Ozon auf (ORNL 1997, S. 8).

Unabhängig der Bildung von Ozon betrachten FEWS et al. (1999; 1999a) die Ionisierung von Aerosolen als eine ernstzunehmende Gefährdung der Gesundheit (vgl. Abschn. 2.1.2 und Abschn. 2.2.2).

7.2.3 Vermeidungs- und Minderungsmaßnahmen

Die unter 7.1.3 für 380-kV-Höchstspannungs-Drehstrom-Freileitungen angeführten Maßnahmen können für Höchstspannungs-Gleichstrom-Freileitungen übernommen werden.

7.3 Nebenanlagen bei Freileitungen

Während des Betriebs kann es im Bereich der Umspannwerke zu Störungen kommen, die zur Freisetzung von Luftschadstoffen führen. Bei Entzündung und Brand von Transformatorenölen können in Ausnahmefällen Kohlenstoffmonoxid (CO), Stickoxide, Partikel (Ruß), polyzyklische aromatische Kohlenwasserstoffe (PAH), Dioxine und Furane (polychlorierte Dibenzodioxine/polychlorierte Dibenzofurane: PCDD/F) und Salzsäure (HCl) freigesetzt werden (OBERFELD 2006, S. 89). Für eine Entfernung von 300 m wird angegeben, dass im Brandfall alle Indikator-schadstoffe mit Ausnahme von PM (Feinstaub: Particulate Matter) die Beurteilungswerte nach Immissionschutzgesetz-Luft (IG-L) bzw. EU-Richtlinie und die MAK/TRK-Werte (Maximale Arbeitsplatz-Konzentration/Technische Richtkonzentration) einhalten (OBERFELD 2006, S. 91).

Beim normalen Betrieb von Konverterstationen, wie sie bei HGÜ-Leitung zur Umwandlung in Drehstrom notwendig sind, werden keine Luftschadstoffe freigesetzt (ML 2011, S. 60). Im Brandfall sind ähnliche Folgen wie oben für die Umspannwerke geschildert zu erwarten.

7.4 Auswirkungen von 380-kV-Höchstspannungsdrehstrom-Erdkabeln

7.4.1 Auswirkungen während der Bauphase

Im Baubetrieb werden von den Fahrzeugen in geringem Umfang Schadstoffe und Abgase an die Luft abgegeben (vgl. u.a. GEO et al. 2009, S. 88). Bei trockener Witterung kann es aufgrund der umfangreichen Erdarbeiten zu Staubaufwirbelung, Staubverdriftung und Ablagerungen kommen. Dadurch ergeben sich in der Regel allerdings keine erheblichen Beeinträchtigungen der Schutzgüter „Luft“ und „Klima“.

7.4.2 Auswirkungen durch Anlage und Betrieb

Die Auswirkungen von Erdkabeln auf die Schutzgüter „Luft“ und „Klima“ sind in der Betriebsphase i. Allg. gering. Ortsweise wird das Kleinklima durch Minimierung der Waldfläche und Schneisenbildung kleinklimatisch verändert. Im Einzelfall können das Waldinnenklima oder durch neue Kaltluftabflüsse auch Siedlungslagen beeinträchtigt sein. Denkbar ist auch eine Beeinträchtigung durch erhöhte Sonnen- und Windeinwirkungen an den Schneisenrändern (MINISTERIUM FÜR WIRTSCHAFT, ARBEIT UND TOURISMUS MECKLENBURG-VORPOMMERN 2008). Bei erheblicher Wärmeabgabe des Kabels könnte es auf der Trasse zu kleinklimatischen Verschiebungen mit intensiverer, bei Austrocknung auch reduzierter Vegetationstätigkeit kommen.

7.4.3 Vermeidungs- und Minderungsmaßnahmen

Grundsätzlich können Beeinträchtigungen des Schutzgutes „Klima/Luft“ durch die Optimierung von Arbeits- und Bauabläufen zur Reduzierung von Verunreinigungen minimiert werden (IBNI et al. 2008, S. 231).

7.5 Auswirkungen von 380-kV-Höchstspannungsgleichstrom-Erdkabeln

Die im Kapitel 7.4 für 380-kV-Höchstspannungs-Drehstrom-Erdkabel angeführten Auswirkungen können für Höchstspannungs-Gleichstrom-Erdkabel übernommen werden.

7.6 Nebenanlagen bei Erdleitungen

Die im Abschn. 7.3 für Nebenanlagen bei Freileitungen beschriebenen Auswirkungen können für Erdleitungen übernommen werden.

7.7 Auswirkungen von gasisolierten Leitungen

Während die erste GIL-Generation noch zu 100 % mit dem Isoliergas Schwefelhexafluorid (SF_6) gefüllt war, wird für die in den 1990ern von Siemens entwickelte zweite Generation ein N_2 - SF_6 -Gemisch verwendet (SCHÖFFNER et al. 2006). Laut Hersteller SIEMENS (SIEMENS AG 2010) sind die GIL-Systeme mit einem Isoliergasgemisch gefüllt, das zu 80 % aus Stickstoff (N_2) und zu 20 % Schwefelhexafluorid (SF_6) besteht. SF_6 wird verwendet, um Lichtbögen zu löschen (VICTOR U. MACDONALD 1999). Ausgehend von Orbitalschweißgeräten aus dem Kernreaktorbereich wurde eine Orbitalschweißtechnik inklusive Ultraschallprüftechnik entwickelt. Die Gasdichtheit der Rohrsegmente wird durch mehrlagiges Schweißen der Rundnaht sichergestellt (KOCH 2002). Des Weiteren sind die brand- und explosionsicheren GIL-Anlagen auf der gesamten Länge in geschlossene Gasräume unterteilt, die bis zu 1200 m lang sind. Vor äußeren Einflüssen soll die gekapselte Bauweise schützen (SIEMENS AG 2010). Die einzelnen Rohrstücke sind zwischen 11,5 und 13,5 m lang. GIL-Leitungen sind standardmäßig mit einem Gasüberwachungssystem, das den Gasdruck überwacht, sowie einem Lichtbogen-Lokalisierungssystem (Arc-Location-System, ALS), das interne elektrische Überschläge lokalisiert, ausgestattet. Weitere Überwachungssysteme können eingebaut werden (SCHÖFFNER et al. 2006). SF_6 wird als stark klimaschädliches Treibhausgas eingestuft (IPCC 2010), das in der Atmosphäre eine Verweilzeit von über 1000 Jahren hat (VICTOR U. MACDONALD 1999). GIL haben den Vorteil, dass sie nicht entzündlich sind (SCHÖFFNER et al. 2006).

7.8 Zusammenfassung Schutzgüter „Klima und Luft“

Die Schutzgüter „Klima und Luft“ werden während der Bauphase der Verlegung von Höchstspannungsleitungen kurzzeitig und kleinräumig durch Abgasemissionen von Fahrzeugen und Baumaschinen sowie ggf. durch Staubemissionen belastet. Vor allem bei der Erdkabelverlegung kann es aufgrund der umfangreichen Tiefbauarbeiten bei langanhaltender Trockenheit zu Staubverdriftung und Winderosionen kommen.

In der Betriebsphase von Freileitungen entstehen Koronaentladungen, wobei Luftmoleküle ionisiert werden. Bei HDÜ-Freileitungen geschieht dies in stärkerem Maße als bei HGÜ-Freileitungen. Die verbleibende Gesamtmenge ionisierter Moleküle ist bei HDÜ aufgrund der nahezu simultanen Neutralisierung am gleichen Leiter jedoch geringer als bei HGÜ, weil dort eine Neutralisierung allenfalls am entgegengesetzten Leiter erfolgt. Durch Koronaentladungen können Oxidantien wie z.B. Ozon und Stickoxide entstehen. Angaben über die mögliche Verdriftungsentfernung ionisierter Aerosole differieren zwischen wenigen Metern und mehreren Kilometern. Weit überwiegend werden die Auswirkungen auf die menschliche Gesundheit aufgrund vergleichsweise niedriger nachgewiesener Mengen von Ozon und Stickoxiden als gering eingeschätzt. Die Ionisierung von Aerosolen durch Koronaeffekte steht darüber hinaus jedoch in

Verdacht, aufgrund einer erhöhten Lungenadhäsion ionisierter Luftschadstoffe (aus anderen Quellen) Gesundheitsbeeinträchtigungen zu verstärken.

Kleinklimatische Veränderungen sind bei der Schaffung von Gehölzschnaisen für Freileitungstrassen und aufgrund geringerer Trassenbreiten in geringerem Maße für Freileitungen zu erwarten (Erdkabeltrasse: ca. 11–21 m; Freileitungstrasse: ca. 40–70 m). Bei hangparallelen Waldschnaisen können etwa erhöhte Kaltluftabflüsse die Folge sein. Ggf. wird das Waldinnenklima durch erhöhte Sonnen- und Windeinwirkungen in der Schnaise beeinträchtigt.

8. Schutzgut „Landschaft“

8.1 Auswirkungen von 380-kV-Höchstspannungsdrehstrom-Freileitungen

8.1.1 Auswirkungen während der Bauphase

Der Baustellenbetrieb ist für die Dauer der Bauphase aufgrund von Geräusch- und Abgasemissionen eine Quelle der Beunruhigung, die sich auf den Zufahrtsstraßen sowie in der Umgebung der Baustandorte negativ auf das Landschaftserleben auswirkt. Da zu Maststandorten, die sich abseits von bestehenden Wegen und Straßen befinden, Zufahrten angelegt werden müssen, können sich verschiedentlich Vegetationsschäden ergeben, die über die Dauer der Bauphase hinaus bestehen.

Auf den für den Mastbau benötigten Arbeitsflächen wird Vegetation beschädigt und temporär entfernt. Für den Seilzug werden darüber hinaus Flächen zwischen den Maststandorten als Fahrspur und für die Stellplätze der Winden in Anspruch genommen. Für die Dauer der gesamten Bauphase werden abseits der Trasse sowie für einen kürzeren Zeitraum an den einzelnen Maststandorten Materiallager notwendig, an deren Standorte die Vegetation beseitigt wird und die für die Dauer der Bauphase als Fremdkörper in der Landschaft wahrgenommen werden. Nach Abschluss der Bauarbeiten werden die Baustelleneinrichtungen entfernt und die Baustreifen wieder begrünt.

In Siedlungsgebieten wird das Ortsbild in der Bauphase ggf. an Maststandorten durch Baumaßnahmen beeinträchtigt.

8.1.2 Auswirkungen durch Anlage und Betrieb

Die in Deutschland für Höchstspannungsübertragungen verwendeten Masten haben HOFMANN et al. (2012, Teil I, Abschn. 1.3.2.2) zufolge eine übliche Höhe von 40 m (Einebenenmast) bis 61 m (Tonnenmast). Die übliche Höhe des weithin verbreiteten Donaumastes gibt HOFMANN et al. (2012, Teil I, Abschn. 1.3.2.2) mit etwa 54 m an. Die üblichen Abstände zwischen den Masten betragen 375–400 m. Bei größeren Abständen werden höhere Masten eingesetzt, um den Durchhang zu begrenzen – bei der Elbekreuzung bei Stade bspw. bis zu 227 m Höhe. Die Traversenbreite beträgt von etwa 23 m (Tonnenmast) bis zu 45 m (Einebenenmast), bei einem Donaumast etwa 32 m.

Freileitungsmasten stellen weithin sichtbare Objekte in der Landschaft dar, die visuell i. Allg. als störend und in ihrer Reihung als landschaftszerschneidend empfunden werden. Der visuelle Wirkraum ist von der Höhe des jeweiligen Mastes, von seiner Exposition und von umgebenden Strukturen abhängig, die ggf. verschattend wirken. Auch die Leiterseile werden als naturfernes Element in der Landschaft wahrgenommen. Unter den Leiterseilen und in deren Ausschwenkbereich wird die Trasse von hohen Gehölzen freigehalten. Dadurch entstehen in geschlossenen Gehölzbeständen weithin sichtbare Schneisen, was sich durch ökologisches Schneisenmanagement vermindern lässt. Die übliche Breite beträgt HOFMANN et al. (2012, Teil I, Abschn. 1.3.2.2) zufolge ca. 70 m. TRANSPOWER (2010 S. 26) geht mit offenbar anderen Masten und kürzeren Spannfeldlängen von 40–60 m aus. In linearen Gehölzbeständen (Baumreihen, Alleen, Baumhecken) entstehen bei der Querung Lücken, die sich negativ auf das Erscheinungsbild die-

ser Strukturen auswirken. Punktuell lassen sich auch Verluste von landschaftsbildprägenden Einzelbäumen und Baumgruppen nicht vermeiden.

In regelmäßigen Abständen wird die gesamte Trasse der Freileitung per Hubschrauber oder Begehung auf Beschädigungen überprüft. Auch die Masten werden turnusmäßig angefahren. Die durch Lärm- und Abgasemissionen verursachten Störungen sind nur kurzfristig wahrnehmbar und übersteigen i. Allg. nur unwesentlich den Pegel der bestehenden Vorbelastungen.

An den Leiterseilen treten in Abhängigkeit von der Luftfeuchtigkeit sogenannte Korona-Geräusche (Knistern und Brummen) durch elektrische Vorentladungen auf (vgl. Abschn. 2.1.2). Diese Geräusche werden i. Allg. als unangenehm empfunden und schränken in den der naturnahen Erholung dienenden Gebieten das Landschaftserleben im unmittelbaren Nahbereich der Leitung ein.

8.1.2.1 Methodik der Ermittlung von Landschaftsbildbeeinträchtigungen

Die Untersuchung von Landschaftsaspekten ist eine rechtlich vorgeschriebene Standardanforderung der Umweltverträglichkeitsprüfung (UVP). Darüber hinaus führt das Naturschutzrecht des Bundes und der Länder „die Vielfalt, Eigenart und Schönheit von Natur und Landschaft“ als Schutzziel auf, wobei das Landschaftsbild in besonderem Maße als Voraussetzung für die Erholung des Menschen in Natur und Landschaft nachhaltig zu sichern ist. Das heutige Verständnis von Landschaftsbild beschränkt sich nicht allein auf visuell wahrnehmbare Einheiten der Landschaft, sondern umfasst ein darüber hinausgehendes, mit allen zur Verfügung stehenden Sinnesqualitäten verknüpftes Landschaftserleben (GASSNER 1995, S. 37; LOUIS 2000, S. 112).

Angesichts schwer objektivierbarer durch das BNatschG vorgegebene Beurteilungskriterien wie „Schönheit“ und „Eigenart“ erfolgen Bewertungen weitestgehend anhand qualitativer Maßstäbe und in grober Skalierung. Qualitativ bestimmt sich insbesondere das Maß der Erheblichkeit, mit dem das Landschaftsbild beeinträchtigt wird. Quantitative Aspekte betreffen v.a. den Flächenumfang des Einwirkungsbereichs sowie die vertikalen und horizontalen Winkel, in denen der Eingriff von bestimmten Standorten aus wahrnehmbar ist. Die Empfindlichkeit des Landschaftsbildes gegenüber störenden Eingriffen bestimmt sich aus ihrer Vielfalt, Eigenart und Schönheit sowie aus ihrer Einsehbarkeit und Naturschutzwürdigkeit.

Für Freileitungen wird i. Allg. eine von NOHL (1993) eingeführte und in vielfacher Variation abgewandelte Methodik zur Ermittlung „mastenartiger Eingriffe“ in das Landschaftsbild verwendet. Diese hat sich aus den allgemeinen Kriterien der landschaftsplanerischen Praxis heraus entwickelt, die in Abschn. 8.4.2.2 beschrieben sind. Die Erheblichkeit eines landschaftsästhetischen Eingriffs ergibt sich einerseits aus der Intensität eines Eingriffs, andererseits aber auch aus der Sensitivität als Ausdruck der ästhetischen Empfindlichkeit einer Landschaft. Der Kern der Nohlschen Arbeit ist ein Verfahrensansatz zur Ermittlung des Umfangs von Kompensationsflächen (in m²). Grob zusammengefasst geht es zunächst um eine Unterteilung des potentiell beeinträchtigten Gebiets in unterschiedliche Wirkzonen, sodann um den Abzug sichtsverschatteter Bereiche und die Aufgliederung des tatsächlich beeinträchtigten Gebiets in ästhetische Raumeinheiten. Es folgt eine Ermittlung der ästhetischen Eigenwerte in den identifizierten Raumeinheiten. Den Abschluss bilden die Ermittlung der landschaftsästhetischen Eingriffserheblichkeit in den einzelnen Raumeinheiten, dabei v.a. die Ermittlung der erheblich beeinträch-

tigten Flächen und ggf. die Ermittlung des benötigten Umfangs von Kompensationsflächen (NOHL 1993, S. 43 ff.).

Der Anwendungsschwerpunkt des oben skizzierten Ansatzes der Landschaftsbildanalyse liegt in der vergleichenden Bewertung von Freileitungstrassen. Im Ergebnis können unterschiedliche Quadratmeter-Summen annähernd gleich beeinträchtigter Flächen verglichen und auf dieser Basis Teiltrassen ausgewählt und Kompensationsflächen bestimmt werden. Eine vergleichende Bewertung von Freileitung und Erdkabel kann mit diesem, ausschließlich für mastenartige Eingriffe entwickelten Verfahren allerdings nicht geleistet werden.

8.1.2.2 Bewertung von Landschaftsbildbeeinträchtigungen

Rechtsprechung und Rechtskommentare geben grundsätzliche Hilfestellungen, in welcher Weise die einschlägigen, sehr auslegbaren Begriffe des Naturschutzrechts wie „Vielfalt“, „Schönheit“ und „Eigenart“ zu interpretieren sind, so dass die erwartete Fachbeurteilung trotz aller unvermeidbaren Subjektivität nicht der Beliebigkeit anheimfällt. Die in einer Landschaftsbildanalyse erwartete Einschätzung der „Schönheit von Natur und Landschaft“ ist durch die Rechtsprechung insoweit eingegrenzt worden, als „auf das Urteil eines für die Schönheiten der natürlich gewachsenen Landschaft aufgeschlossenen Durchschnittsbetrachters“ abgestellt wird (BVerwG, Urteil vom 27.09.1990, 4 C 44/87). Diese Durchschnittsbetrachtermeinung wird i. Allg. von entsprechend ausgebildeten Landschaftsplanern auf der Basis anerkannter Methoden nachvollzogen. Aufgrund vielfacher Auseinandersetzungen um die Akzeptanz landschaftsbildwirksamer Großvorhaben werden diese professionellen ästhetischen Bewertungen zunehmend auch durch Meinungsbilder aus Vor-Ort-Befragungen gestützt. Zweifellos kommt solchen Fachurteilen eine erhöhte Rechtssicherheit zu (vgl. ROTH u. GRUEHN 2010).

Eine standortunabhängige, vorgeifende Landschaftsbewertung von Leitungstrassen orientiert sich zweckmäßiger Weise an der groben Unterscheidung von Wirkzonen. Die Wirkung von Landschaftselementen auf den Betrachter nimmt ausgehend vom Vordergrund, in dem noch Details erlebbar sind, über den Mittelgrund bis zum Hintergrund, in dem landschaftliche Großelemente nur noch silhouettenhaft wahrgenommen werden, zunächst langsam, dann immer zügiger ab, um sich schließlich ganz aufzulösen. Im Allgemeinen werden zur Bewertung daher eine Nahzone, eine Mittelzone und eine Fernzone unterschieden. Auch bei der Planung von ebenfalls „mastenartigen“ Windenergieanlagen wird verschiedentlich ein mehrstufiges Wirkzonenschema verwandt, um unerhebliche von erheblichen Landschaftsbildbeeinträchtigungen zu unterscheiden. Im Folgenden wird zum Abgleich mit der Bewertungspraxis an Windenergieanlagen ein an einem vertikalen Sehwinkel des menschlichen Auges von 26° oberhalb der Erdoberfläche orientiertes Zonierungsmodell heran gezogen, welches vom WIRTSCHAFTS-MINISTERIUM DES LANDES BADEN-WÜRTTEMBERG (2001) in der sogenannten „Windfibel“ erstveröffentlicht und breite Praxisrelevanz gewonnen hat. Die im „Windfibel“-Modell verwendeten Algorithmen sowie Algorithmen aus einem vergleichbaren Ansatz für Masten der 110 kV-Ebene (GEO et al. 2009) werden im Folgenden auf Stromleitungsmasten mit einer durchschnittlichen Leitungsmasthöhe von 55 m übertragen und verglichen.

Nahzone

Bei NOHL (1993) umfasst die visuell dominante Nahzone eine Kreisfläche mit 200 m Radius um den Mast. Hier nimmt die Freileitung einen großen Anteil des Blickfeldes ein, die Masten überra-

gen die Horizontlinie deutlich und die Trasse tritt als zusammenhängende Struktur in Erscheinung. Die gesamte Anlage beherrscht somit den Landschaftsbildeindruck.

Nach einem Modell von GEO et al. (2009) würde die dominante Nahzone für Freileitungen bei einem 55 m hohen Mast etwa 440 m weit reichen. Nach dem Windfibel-Modell wäre für Windenergieanlagen eine zweigeteilte Nahzone zu berücksichtigen. In der ersten Zone wäre für eine Gesamthöhe von 55 m die erste Nahzone bereits bei 110 m abgeschlossen. In dieser Zone ist der Abstand zur Wahrnehmung der vollen Objektgröße zu klein, das Bauwerk ist nur durch Umherblicken erkennbar. Eine zweite Nahzone, die sog. Blickbindungszone, würde bis etwa 220 m reichen. In dieser Zone nimmt die Anlage nach diesem Modell etwa ein Ganzes bis ein Halbes des vertikalen Blickfeldes ein.

Mittelzone

Bei NOHL (1993) umfasst die Mittelzone eine Ringfläche, die von 200 m (Nahzone) bis 1.500 m reicht. Dem NIEDERSÄCHSISCHEN LANDKREISTAG (NLT 2009, S.13) zufolge ist bei Freileitungen mindestens ein Abstand bis 1.500 m beiderseits der Trasse als erheblich beeinträchtigt anzusehen.

In dem von GEO et al. (2009) für Masten der 110 kV-Ebene angewendeten Modell ist die Mittelzone eine subdominante Zone, die in der Übertragung auf einen 55 m hohen Mast von 440 m bis etwa 1.100 m reichen würde. Zur entsprechenden Darstellung auf der 110-kV-Ebene wird erläutert, dass die Freileitung im Blickfeld deutlich zu erkennen sei, aufgrund der geringeren scheinbaren Größe und von Sichtverschattungen aber nicht mehr für den Landschaftsbildeindruck beherrschend. Einzelheiten wie einzelne Leiterseile würden nicht mehr (unwillkürlich) aufgelöst und erkannt, der Anteil im Blickfeld sei > 10 % (GEO et al. 2009, S. 119).

Die Mittelzone reicht nach dem Windfibel-Modell für eine Windenergieanlagenhöhe von 55 m von etwa 220 m bis 440 m. In diesem Bereich sei noch eine dominante Vollansicht gegeben. Das Bauwerk nimmt danach 1/2 bis 1/4 des Blickfeldes ein, und der volle Umriss der Objektgestalt sei mit einem Blick erfassbar.

Die Mittelzone wird i. Allg. als der in jedem Fall noch erheblich beeinträchtigte Flächenbereich angesehen. Es wird an dieser Stelle deutlich, dass die Mittelzone in der Praxis der Landschaftsbildanalyse für Windenergieanlagen mit bis zu 440 m deutlich schmaler ausgelegt wird, als dies NOHL (1993) und NLT (2009) für Höchstspannungsfreileitungen für angemessen halten.

Fernzone

Bei NOHL (1993) umfasst die Fernzone eine immer noch als „Wirkzone“ anzusprechende Ringfläche, die von 1.500 m bis 10.000 m reicht. Als zunehmend unbedeutendere Zone kann sie jedoch vielfach vereinfachend auf 5.000 m reduziert werden.

Nach dem von GEO et al. (2009) vorgestellten Modell wäre für einen 55 m hohen Mast in einer Entfernung von 1.100 m bis 2.200 m von einer zwar marginalen, aber dennoch erheblichen negativen Veränderung des Landschaftsbildes auszugehen (GEO et al. 2009, S. 119). Aufgrund des größeren Abstands und der i. Allg. auch stärkeren Sichtverschattung sei die Freileitung in dieser Entfernung nicht mehr für den Landschaftsbildeindruck prägend. Oft seien nur einzelne Abschnitte der Leitung oder obere Teile der Masten sichtbar. Der Anteil im Blickfeld beträgt über 5 %.

Als der Fernzone zuzurechnender Bereich ist dem Windfibel-Modell zufolge der „Hintergrund“ anzusehen, welcher für eine Anlagenhöhe von 55 m von etwa 440 m bis 1.100 m reicht. Die Ansicht wird in diesem Modell als subdominant beschrieben, die Anlage nimmt 1/4 bis 1/10 des Blickfeldes ein. Auch in dieser Zone wird bei der Windenergieanlagenplanung von geringeren Abständen ausgegangen, als von NOHL und NLT für die Freileitungsplanung empfohlen.

Der Vergleich macht deutlich, dass sich die Auffassungen über die Ausdehnung der Fernzone deutlich unterscheiden. Da es sich hierbei um räumlich auslaufende Wirkungen handelt, geht es faktisch um nur geringe Wertunterschiede.

Nicht signifikanter Bereich

Der nicht signifikante Bereich beginnt nach NOHL (1993) ab 10.000 m bzw. verkürzt 5.000 m.

In dem von GEO et al. (2009) vorgestellten Modell ist eine Fernwirkung, in der der Anteil der Anlage < 5 % ist, nicht mehr signifikant. Bei einem 55 m hohen Mast entspricht dies einer Entfernung vom mehr als 2.200 m.

Nach dem Windfibel-Modell reicht die „Fernsichtzone“ von einer Anlagenhöhe < 10 % des vertikalen Blickfeldes (hier 26° ab Erdboden) bis zum Ende der Wahrnehmbarkeit. Nach diesem Modell beginnt diese Zone für einen 55 m hohen Bauwerk bereits bei 1.100 m.

Vorbelastungen

Vorbelastungen können abschwächende oder verstärkende Wirkung auf die landschaftsästhetische Erheblichkeit des Eingriffs haben. Als Vorbelastungen kommen v.a. bestehende Freileitungstrassen in Betracht, die sowohl ersetzt wie ergänzt werden können. Darüber hinaus sind v.a. andere mastenartige Eingriffe, wie z.B. Kraftwerke, Funktürme oder Windenergieanlagen als Vorbelastungen anzusprechen. NOHL (1993, S. 25) differenziert drei Fälle der visuellen Wirkung einer Vorbelastung:

- Die Neulast ist gegenüber der Vorlast in ihrer visuellen Wirkung erkennbar schwächer (aber deutlich wahrnehmbar). Dabei wird die Erheblichkeit des Eingriffs durch die Vorlast abgemildert.
- Die Neulast besitzt in etwa gleiche visuelle Wirkungen wie die Vorlast. Die Erheblichkeit vergrößert sich dann deutlich durch die Vorlast.
- Die Neulast ist gegenüber der Vorlast erkennbar stärker. Wie im ersten Fall wird die Beeinträchtigung durch die Vorlast abgemildert, ist aber – absolut gesehen – größer als im ersten Fall.

Schutzwürdigkeit

Der ästhetische Eigenwert der Landschaft und die visuelle Verletzlichkeit von Betrachterstandorten sind stets standörtlich zu ermitteln und abstrakt kaum zu erfassen. Am ehesten noch kann die Schutzgebietskaskade des Bundesnaturschutzgesetzes (§§ 23–32), welche von den Naturschutzgebieten (§ 23) über die Nationalparke und Nationalmonumente (§ 24), Biosphärenreservate (§ 25), Landschaftsschutzgebiete (§ 26), Naturparke (§ 27), Naturdenkmäler (§ 28), geschützte Landschaftsbestandteile (§ 29) und gesetzlich geschützten Biotopen (§ 30) zu den Natura-2000-Schutzgebieten (§§ 31, 32) führt, in einer sehr überschlägigen Orientierung bei ge-

geschützten Flächen erste Hinweise auf eine möglicherweise auch visuelle Verletzlichkeit geben, denn viele Schutzgebiete dienen neben ökologischen Zielen dem ästhetischen Werterhalt der Landschaft sowie der Erholung des Menschen.

8.1.2.3 Beeinträchtigungen des Ortsbildes

Beeinträchtigungen des Ortsbildes sind Landschaftsbildbeeinträchtigungen im besiedelten Raum. Sie werden nicht mit der im Außenbereich üblichen Methodik erfasst. Sie entstehen vorwiegend aus einer Unmaßstäblichkeit von Bauwerken gegenüber der vorhandenen Siedlungsbebauung oder werden durch visuelle Zerschneidungseffekte hervorgerufen. Bei Höchstspannungstrassen kann im visuell dominanten Nahbereich von etwa 220 m an einer ansonsten nicht vorbelasteten Wohnsiedlung eine Beeinträchtigung durch Masten und Leitungsführungen angenommen werden (vgl. Abschn. 8.1.2.2). Geräusche durch Koronaentladungen und Windsurren verstärken die Beeinträchtigungen. Anwohner verweisen vielfach auf sinkende Grundstückspreise in der Nähe neu errichteter Freileitungen, die v.a. als Resultat einer Ortsbildbeeinträchtigung aufzufassen sind.

8.1.3 Vermeidungs- und Minderungsmaßnahmen

Der Ausgleich einer Landschaftsbildbeeinträchtigung durch Freileitungen ist nur in engen Grenzen möglich. Hierzu besagt das BVerwG, Urteil vom 27.09.1990 – 4 C 44.8: „Eine Kompensation der erheblichen Beeinträchtigungen des Landschaftsbildes bzw. die Wiederherstellung des Landschaftsbildes scheidet bei mastenartigen Eingriffen aufgrund ihrer optischen Wirkungen in der Regel aus. Eine landschaftsgerechte Neugestaltung ist nur dann möglich, wenn ein Zustand hergestellt wird, der den vorher vorhandenen Zustand in weitest möglicher Annäherung fortführt, d.h. in gleicher Art, mit gleichen Funktionen und ohne Preisgabe wesentlicher Faktoren des optischen Beziehungsgefüges.“ Aus dieser Einleitung ergibt sich, dass die Schonung landschaftlich hochwertiger Naturräume durch eine frühzeitig ausweichende Trassenplanung den Schwerpunkt der im Hinblick auf das Schutzgut Landschaftsbild zu erwägenden Vermeidungs- und Minderungsmaßnahmen darstellen muss. Eine brauchbare Variante der Schonung hochwertiger Naturräume ist die Bündelung der Trasse mit anderen technischen Strukturen wie etwa Bundesautobahnen und vorhandenen Freileitungstrassen. Bestenfalls ergeben sich auf diese Weise nur geringe Zusatzbelastungen.

Sind die Möglichkeiten der Trassierung ausgeschöpft, lassen sich das Landschaftsbild beeinträchtigende Wirkungen noch durch technisch-gestalterische Mittel minimieren. Wo an Waldstandorten z.B. die Schneisenwirkung im Vordergrund steht, kann erwogen werden, ob eine Waldüberspannung mit Hilfe höherer Masten eine Minderung der Landschaftsbildbeeinträchtigung bedeuten würde. IBU (2007, S. 474 ff.), GEO et al. (2009, S. 122) und POHLMANN (2012) zufolge lassen sich visuelle Beeinträchtigungen insbesondere durch geringe Masthöhen (Einebenenmasten statt Donaumasten), gerade Leitungszüge und ggf. durch eine geeignete farbliche Gestaltung der Maste realisieren. IBU (2007) zufolge lassen sich Masthöhen bspw. durch einen Verzicht auf die Mastspitze und (soweit möglich) auf die Mitführung des Erdseils auf der Traverse verringern.

Durch das Zulassen von natürlicher Sukzession an den Maststandorten und auf den Schneisen im Rahmen eines ökologischen Trassenmanagements (DEUTSCHE UMWELTHILFE 2010) kann die visuelle Beeinträchtigung des Landschaftsbildes durch Trassenbauwerke zusätzlich vermindert

werden. Abpflanzungsmaßnahmen an Maststandorten und Nebenanlagen sowie an sichtbeeinträchtigten Blickstandorten sind ein weiteres Mittel der möglichen Verminderung von Landschaftsbildbeeinträchtigungen.

Das INSTITUT FÜR ELEKTRISCHE ANLAGEN UND HOCHSPANNUNGSTECHNIK – ABTEILUNG FÜR HOCHSPANNUNGSTECHNIK (2001) empfiehlt eine „landschaftsgerechte Trassenführung“, um die Beeinflussung des Landschaftsbildes möglichst gering zu halten. Dies beinhaltet eine flexible Anpassung an die Geländeformen wie Wälder, Täler oder Flüsse, die Parallelführung mehrerer Trassen im Sichtbereich, die Errichtung der Leitungen auf Hängen statt auf Kuppen, Bergrücken-überquerungen mit zwei niedrigen anstatt eines hohen Mastes und bei unvermeidlichen Wald-überspannungen die Verwendung möglichst wenig herausragender Masten. Des Weiteren sollten Waldschneisen winkelig statt gradlinig angelegt werden, bevorzugte Blickschneisen (auf besondere Gebäude, Aussichtslagen) freigehalten und topographische Hindernisse genutzt werden. (INSTITUT FÜR ELEKTRISCHE ANLAGEN UND HOCHSPANNUNGSTECHNIK – ABTEILUNG FÜR HOCHSPANNUNGSTECHNIK 2001, S. 31).

Des Weiteren können verschiedene Mastkonzepte eingesetzt werden. Diese haben einen unterschiedlichen Platzverbrauch (Höhe, Breite, Aufbau) und wirken sich unterschiedlich auf das Landschaftsbild aus. Die SAG GMBH (2012) hat mehrere neue Freileitungskonzepte entwickelt, bei denen die Leiterseile an einem straff gespannten Stahlseil girlandenförmig höher gehängt werden. Dies ermöglicht die Installation neuer 380-kV-Freileitungen, ohne eine Masthöhe von 30 m überschreiten zu müssen, und das bei einem schmaleren Schutzstreifen, als er für 110-kV-Leitungen notwendig ist. Auch eine angepasste Bauform der Masten (Mastkopfbild) sowie die Wahl der Anstrichfarbe können die Auswirkungen von Freileitungen auf das Landschaftsbild abschwächen (POHLMANN 2012).

8.2 Auswirkungen von 380-kV-Höchstspannungsgleichstrom-Freileitungen

HGÜ-Freileitungen werden als ein bipolares System errichtet und betrieben, was bedeutet, dass bei der HGÜ- im Gegensatz zur Drehstromtechnik nur zwei Leiter pro Stromkreis notwendig sind (HOFMANN et al. 2012, S. 38–40). Dies hat nicht nur Auswirkungen auf die visuelle Wirkung der Anzahl der Leitungsstränge selbst, sondern (zumindest bei Neubauten) auch auf die Masten, die für geringere Gewichtslasten ausgelegt werden können. Im Ergebnis dürfte die visuelle Wirkung weniger beeinträchtigend ausfallen als bei Drehstromfreileitungen. Die im Kapitel 8.1 genannten Wirkaspekte gelten gleichermaßen.

8.3 Nebenanlagen bei Freileitungen

Umspannwerke, Konverterstationen und Übergangsbauwerke können aufgrund ihrer Größe eine Beeinträchtigung des Landschaftsbildes darstellen. Konverterstationen haben eine Grundfläche von etwa 5000 m² (HOFMANN 2012, S. 27), auf der eine bis zu 30 m hohe Ventilhalle, Stromrichtertransformatoren sowie ein Kontrollhäuschen stehen (AECOM U. INTERTEC-METOC 2011, S. 8). Übergangsbauwerke für 380-kV-Leitungen werden auf Abspannportalen errichtet, in denen die Freileitungsseile auf Überspannungsableitern über Stromumwandler hin zu den Kabelendverschlüssen führen. Der Gesamtflächenbedarf für ein Übergangsbauwerk beträgt etwa 30 m x 70 m (POLSTER et al. 2009, S. 27) bzw. 50 m x 50 m (HOFMANN 2012, S. 23).

8.4 Auswirkungen von 380-kV-Höchstspannungsdrehstrom-Erdkabeln

8.4.1 Auswirkungen während der Bauphase

Der Baustellenbetrieb ist für die Dauer der Bauphase aufgrund von Geräusch- und Abgasemissionen, visueller Unruhe und Baubeleuchtung eine Störquelle, die sich auf den Zufahrtsstraßen sowie in der Umgebung der Baustandorte negativ auf das Landschaftserleben auswirken kann. Da entlang der gesamten Trasse Baustraßen angelegt werden müssen, ergeben sich auch seitlich der Verlegetrasse Vegetationsschäden, die über die Dauer der Bauphase hinaus fortbestehen können.

Auf den benötigten Arbeitsflächen wird Vegetation unvermeidlich beschädigt und entfernt. Vor allem in Waldgebieten wirkt sich der Verlust landschaftsprägender Gehölzstrukturen auf das Landschaftsbild aus (vgl. MINISTERIUM FÜR WIRTSCHAFT, ARBEIT UND TOURISMUS MECKLENBURG-VORPOMMERN 2008). Aktuellen Planungen bei TENNET zufolge (Schomburg mdl. 19.10.2011) ist in der Bauphase bei vier Systemen für Kabelgraben, Erdaushub und Baustraße je nach Verlegungsart mit einer Trassenbreite von 13–21 m Breite zu rechnen (HOFMANN et al. 2012, S. 320).

8.4.2 Auswirkungen durch Anlage und Betrieb

8.4.2.1 Trasse und Nebenanlagen

Nach Abschluss der Bauarbeiten werden die Baustelleneinrichtungen entfernt und die Baustreifen wieder begrünt. Da im direkten Trassenbereich keine tiefwurzelnden Gehölze gepflanzt werden dürfen, verbleibt in Gebüsch und Wäldern jeweils eine Schneise von 13 m bis 21 m Breite. Der Flächenbedarf ist damit geringer als bei Freileitungen. Im Offenland ist die Trasse ein Jahr nach Fertigstellung nicht mehr zu erkennen. Allenfalls in Abständen gesetzte Markierungspfähle warnen vor unbeabsichtigter Beschädigung des Kabels bei Bauarbeiten bspw. im Straßenbau.

Als Nebenbauwerke sind ggf. Muffenbauwerke, Tunnelbauwerke, Umrichterstationen und Kabelübergangsanlagen (Freileitung–Kabel) zu beachten. Landschaftsbildrelevant sind v. a. Kabelübergangsanlagen, die üblicherweise als etwa 27 m hohe Stahlkonstruktionen ausgelegt sind, wobei für ein System eine umzäunte Fläche mindestens der Maße 20 m x 70 m benötigt wird (Auskunft GÖRNER, ABB AG 08.02.11).

Aufgrund der unterirdischen Lage wird das Orts- und Landschaftsbild durch Anlage und Betrieb des Kabels selbst i. Allg. nicht nennenswert beeinträchtigt. Eine Ausnahme stellen Wälder und Gehölze dar, wo aufgrund der Trassenfreihaltung eine Schneise ohne tiefwurzelnde Pflanzen entsteht.

8.4.2.2 Bewertung von Landschaftsbildbeeinträchtigungen

Im Unterschied zu Freileitungen, für die es eine recht spezialisierte Methodik zur Ermittlung „mastenartiger Eingriffe“ in das Landschaftsbild gibt, richtet sich die Landschaftsbildanalyse bei Erdkabeln nach allgemeinen Kriterien der landschaftsplanerischen Praxis. Im Rahmen der Landschaftsbildanalyse und Landschaftsbewertung sind vorrangig Informationsgrundlagen zusammenzutragen und zu erstellen, die eine möglichst realitätsnahe Abschätzung der zu erwartenden visuellen Wirkungen eines Vorhabens ermöglichen. Eine Vielzahl von unterschiedlichen

Methoden zur Bewertung des Landschaftsbildes wird in Leitfäden und Fachgutachten beschrieben (u.a. GAREIS-GRAHMANN 1993, NOHL 1993, KLÖPPEL u. KRAUSE 1996, KRAUSE u. KLÖPPEL 1996). Über die Abschätzung möglicher Landschaftsbildbeeinträchtigungen hinaus soll jeweils geklärt werden, ob und wenn ja wie unvermeidliche Landschaftsbildbeeinträchtigungen minimiert, ausgeglichen oder ersetzt werden können.

Im Vergleich zu Freileitungstrassen werden Erdkabeltrassen aufgrund ihrer deutlich geringeren Sichtbarkeit i. Allg. als landschaftsverträglicher eingeschätzt. So werden Erdkabel verschiedentlich zum Ersatz bestehender Freileitungen in Regionen mit hoch empfindlichen Landschaftsbildern vorgeschlagen. In Dänemark z.B. wurde im Frühjahr 2008 auf den Rat eines „Electricity Infrastructure Committee“, welches mit Vertretern der Regierung und der Elektrizitätsversorger besetzt ist, eine weitreichende Verkabelung des 400-kV-Netzes in sechs Regionen mit sehr hoher Landschaftsbildrelevanz beschlossen. Hierzu gehören verschiedene Küstenlandschaften, Endmoränenlandschaften und eiszeitliche Tallandschaften. Vergleichbare Landschaften sind in Deutschland u.a. als National- und Naturparke geschützt. Eine umweltpsychologische Akzeptanzuntersuchung in der Region Wahle-Mecklar ergab, dass Erdkabel gegenüber Freileitungen deutlich bevorzugt werden und dass ein Bau entlang bereits bestehender Infrastrukturtrassen befürwortet wird (FORSCHUNGSGRUPPE UMWELTPSYCHOLOGIE 2010).

8.4.3 Vermeidungs- und Verminderungsmaßnahmen

Die Beeinträchtigungen des Baubetriebs einer Kabelverlegung auf das Landschaftsbild sind weitgehend temporär und in den meisten Fällen von geringer Bedeutung für die Zulässigkeit des Vorhabens.

Dauerhaft verbleiben Schneisen in Gehölzen und vereinzelte Nebenbauwerke, die ggf. das Landschaftsbild beeinträchtigen können. Die in der Bauphase entstandenen Schneisen sind jedoch deutlich schmaler als etwa bei Freileitungen. Ihre Wirkung auf das Landschaftsbild lässt sich durch Trassenmanagementmaßnahmen und durch die Anlage einer Waldrandbepflanzung entschärfen. In den seltensten Fällen wird es aus Gründen des Landschaftsbildes erforderlich sein, ein Erdkabel auf einer begrenzten Strecke durch ein aufwendiges Schutzrohr oder einen kostenaufwendigen, mit Ortsbeton hergestellten Tunnel, den sog. „Infrastrukturtunnel“, zu führen (vgl. HOFMANN et al. 2012, Teil I, Abschn. 1.4.5.3).

Eine ggf. störende Wirkung von Nebenbauwerken kann durch Abpflanzungen an der Anlage selbst sowie bspw. an Straßen mit Blickachse auf die Anlage herabgesetzt werden. Als Alternative zu einer ggf. landschaftsbildbeeinträchtigenden Wirkung konventioneller Kabelübergangsanlagen wurden in einem Ideenwettbewerb der dänischen Regierung darüber hinaus zahlreiche künstlerische Designvorschläge entwickelt, die bis hin zur Absenkung des Terrains um die Anlagen herum und zur Teilverlegung der Anlage unter die Erde reichten (vgl. MILJÖMINISTERIET 2010).

8.5 Auswirkungen von 380-kV-Höchstspannungsgleichstrom-Erdkabeln

Die im Kapitel 8.4 für 380-kV-Höchstspannungs-Drehstrom-Erdkabel angeführten Aspekte können für Höchstspannungs-Gleichstrom-Erdkabel übernommen werden. Hierbei ist der Flächenbedarf von Gleichstrom-Erdkabeltrassen mit einer Trassenbreite von 11–20 m geringer als der von Drehstromerdkabeltrassen (HOFMANN et al. 2012, S. 320).

8.6 Nebenanlagen bei Erdleitungen

Umspannwerke, Konverterstationen und Übergangsbauwerke können aufgrund ihrer Größe eine erhebliche Beeinträchtigung des Landschaftsbildes darstellen. Näheres hierzu wurde in Abschn. 8.3 beschrieben. Weitere sichtbare bei Drehstrom-Erdleitungen notwendige Nebenanlagen sind Cross-Bonding-Bauwerke, die etwa 1,8 m breit, 2,9 m lang und 1,35 m hoch sind (POLSTER et al. 2009, S. 30) sowie Kompensationsanlagen.

8.7 Auswirkungen von gasisolierten Leitungen

GIL können direkt im Boden oder in Tunneln verlegt werden, so dass sie nach dem Bau nicht sichtbar sind und das Landschaftsbild nicht beeinflussen (KOCH U. BRACHMANN 1997, S. 633). Dies ist vor allem in sensiblen Regionen wie beispielsweise dem Alpenraum von Vorteil, wo GIL in Eisenbahntunneln installiert werden können, was in einer Pilotstudie geplant ist: unterhalb des Brennerpasses ist zwischen Italien und Österreich (Fortezza – Innsbruck) ein 57 km langer Eisenbahntunnel geplant, der von einem Versorgungstunnel begleitet wird. In diesem soll eine GIL (Doppelleitung) installiert werden (BENATO et al. 2005). Hiefür ist allerdings aufgrund der einzuhaltenen Temperaturgrenze für Nebeneinrichtungen von maximal 40 °C eine Belüftungsstrategie notwendig (BENATO et al. 2010).

8.8 Zusammenfassung Schutzgut „Landschaft“

Als Maßstab der Bewertung von Landschaftsbildbeeinträchtigungen hat das Bundesverwaltungsgericht (1991) den „für die Schönheiten der natürlich gewachsenen Landschaft aufgeschlossenen Durchschnittsbetrachter“ festgelegt. Dabei besteht ein breiter fachlicher Konsens darüber, dass das Schutzgut „Landschaft“ nicht nur ein visuell erfassbares „Landschaftsbild“ umfasst, sondern sich auf ein mit allen Sinnen erfahrbares „Landschaftserleben“ erstreckt.

In der Bauphase wird das Schutzgut „Landschaft“ sowohl bei Freileitungen als auch bei Erdkabeln durch den Baustellenbetrieb mit seinen Geräusch- und Abgasemissionen, visueller Unruhe und Baubeleuchtung beeinträchtigt. Auch im Bereich der Zufahrtsstraßen und in der Umgebung der Baustandorte kommt es aufgrund von Geräusch- und Abgasemissionen sowie durch Vegetationsschäden zu einer Beeinträchtigung des Landschaftserlebens. Bei Freileitungen sind abseits der Trasse sowie an den Maststandorten Materiallager notwendig, die als Fremdkörper in der Landschaft wahrgenommen werden. Da bei Erdkabeln entlang der gesamten Trasse Baustraßen angelegt werden, ergeben sich ggf. auch seitlich der Verlegetrasse Vegetationsschäden, die über die Dauer der Bauphase hinaus landschaftswirksam fortbestehen können. Auf den benötigten Arbeitsflächen wird Vegetation unvermeidlich beschädigt und entfernt. Vor allem in Waldgebieten wirkt sich sowohl bei Freileitungen wie bei Kabeln der Verlust landschaftsprägender Gehölzstrukturen auf das Landschaftsbild aus. In der Bauphase ist bei der Verlegung von vier Kabelsystemen für Kabelgraben, Erdaushub und Baustraße je nach Verlegungsart mit einer Trassenbreite von 13–21 m Breite zu rechnen. Für Freileitungen beträgt die Trassenbreite 40–70 m. I. Allg. sind die Baubeeinträchtigungen jedoch vorübergehend, da nach Abschluss der Bauarbeiten die Baustelleneinrichtungen entfernt und die Baustreifen wieder begrünt werden.

Die in Deutschland für Höchstspannungsübertragungen verwendeten Masten haben eine übliche Höhe von 40 m (Einebenenmast) bis 61 m (Tonnenmast). Die gewöhnliche Höhe des weit verbreiteten Donaumastes beträgt etwa 54 m. Die Masten werden i. Allg. in Abständen von 375–400 m errichtet. Die Traversenbreite beträgt etwa 23 m beim Tonnenmast, etwa 45 m beim

Einebenenmast und etwa 32 m beim Donaumast. Freileitungsmasten stellen weithin sichtbare Objekte in der Landschaft dar, die visuell i. Allg. als störend und in ihrer Reihung als landschaftszerschneidend empfunden werden. Der visuelle Wirkraum ist von der Höhe des jeweiligen Mastes, von seiner Exposition und von umgebenden Strukturen abhängig, die ggf. verschattend wirken. Auch die Leiterseile werden als naturfernes Element in der Landschaft wahrgenommen. Unter den Leiterseilen und in deren Ausschwenkbereich wird die Trasse von hohen Gehölzen freigehalten. Dadurch entstehen in geschlossenen Gehölzbeständen weithin sichtbare Schneisen mit einer Breite von ca. 40–70 m. In linearen Gehölzbeständen (Baumreihen, Alleen, Baumhecken) entstehen bei der Querung Lücken, die sich negativ auf das Erscheinungsbild dieser Strukturen auswirken. Punktuell lassen sich auch Verluste von landschaftsbildprägenden Einzelbäumen und Baumgruppen nicht vermeiden.

Eine standortunabhängige, vorgreifende Landschaftsbewertung von Leitungstrassen orientiert sich zweckmäßiger Weise an einer Unterscheidung von Wirkzonen. Die Wirkung von Landschaftselementen auf den Betrachter nimmt ausgehend vom Vordergrund, in dem noch Details erlebbar sind, über den Mittelgrund bis zum Hintergrund, in dem landschaftliche Großelemente nur noch silhouettenhaft wahrgenommen werden, zunächst langsam, dann immer zügiger ab, um sich schließlich ganz aufzulösen. Zur Bewertung der Landschaftsbildwirksamkeit von Freileitungen wird daher eine Nahzone, eine Mittelzone und eine Fernzone unterschieden, die sich im Abgleich mit der Bewertungspraxis an Windenergieanlagen und Stromleitungsmasten der 110 kV-Ebene für einen ca. 55 m hohen Übertragungsleitungsmast auf maximal ca. 220 m für die Nahzone, maximal ca. 1.100 m für die Mittelzone und maximal ca. 2.200 m für die Fernzone eingrenzen lässt.

HGÜ-Freileitungen werden als ein bipolares System errichtet und betrieben, was bedeutet, dass bei der Gleichstrom- im Gegensatz zur Drehstromtechnik nur zwei Leiter pro Stromkreis notwendig sind. Dies hat nicht nur Auswirkungen auf die visuelle Wirkung der Anzahl der Leitungsstränge selbst, sondern (zumindest bei Neubauten) auch auf die Masten, die für geringere Gewichtslasten ausgelegt werden können. Im Ergebnis dürfte die visuelle Wirkung weniger beeinträchtigend ausfallen als bei Drehstromfreileitungen.

An den Leiterseilen einer Freileitungsübertragung (HDÜ und HGÜ) treten in Abhängigkeit von der Luftfeuchtigkeit sogenannte Korona-Geräusche (Knistern und Brummen) durch elektrische Vorentladungen auf. Diese Geräusche werden i. Allg. als unangenehm empfunden und schränken in den der naturnahen Erholung dienenden Gebieten das Landschaftserleben im unmittelbaren Nahbereich der Leitung ein.

Aufgrund der unterirdischen Lage stellen Erdkabel i. Allg. keine nennenswerte Orts- und Landschaftsbildbeeinträchtigung dar. Erdkabeltrassen wirken sich jedoch v.a. in Waldgebieten durch den Verlust landschaftsprägender Gehölzstrukturen auf das Landschaftsbild aus. Für Drehstromerdkabeltrassen ist je nach Verlegeart ein 13–21 m breiter Schutzstreifen notwendig; bei Gleichstromerdkabeltrassen ist dieser 11–20 m breit. Nach der Bauphase kann sich niedrigerer Bewuchs auf dem Schutzstreifen etablieren, während tiefwurzelnnde Pflanzen entfernt werden. Als Nebenbauwerke sind ggf. Muffenbauwerke, Tunnelbauwerke, Umrichterstationen und Kabelübergangsanlagen (Freileitung–Kabel) zu beachten. Landschaftsbildrelevant sind v. a. Kabelübergangsanlagen, die üblicherweise als etwa 27 m hohe Stahlkonstruktionen ausgelegt sind, wobei für ein System eine umzäunte Fläche mindestens der Maße 30 m x 70 m benötigt wird.

Der Ausgleich einer Landschaftsbildbeeinträchtigung durch Freileitungen ist nur in engen Grenzen möglich. Daraus ergibt sich, dass die Schonung landschaftlich hochwertiger Naturräume durch eine frühzeitig ausweichende Trassenplanung den Schwerpunkt der im Hinblick auf das Schutzgut Landschaftsbild zu erwägenden Vermeidungs- und Minderungsmaßnahmen darstellen muss. Eine landschaftsgerechte Trassenführung, die eine Beeinträchtigung des Landschaftsbildes möglichst gering hält, beinhaltet eine flexible Anpassung an die Geländeformen wie Wälder, Täler oder Flüsse, die Parallelführung mehrerer Trassen im Sichtbereich, die Errichtung der Leitungen auf Hängen statt auf Kuppen, Bergrückenüberquerungen mit zwei niedrigen anstatt eines hohen Mastes und bei unvermeidlichen Waldüberspannungen die Verwendung möglichst wenig herausragender Masten. Des Weiteren sollten Waldschneisen winkelig statt gradlinig angelegt werden, bevorzugte Blickschneisen freigehalten und topographische Hindernisse genutzt werden.

Eine erwägenswerte Variante der Schonung hochwertiger Naturräume ist die Bündelung der Trasse mit anderen technischen Strukturen wie etwa Bundesautobahnen und vorhandenen Freileitungstrassen. Sind die Möglichkeiten der Trassierung ausgeschöpft, lassen sich das Landschaftsbild beeinträchtigende Wirkungen noch durch technisch-gestalterische Mittel minimieren. Visuelle Beeinträchtigungen lassen sich insbesondere durch geringe Masthöhen und ggf. durch eine geeignete farbliche Gestaltung der Maste realisieren. Auch eine angepasste Bauform der Masten mindert die Auswirkungen von Freileitungen auf das Landschaftsbild. So werden z.B. aktuell mehrere neue Freileitungskonzepte entwickelt, bei denen die Leiterseile an einem straff gespannten Stahlseil montiert werden, so dass kürzere Masten und schmalere Schutzstreifen verwirklicht werden können. Das Zulassen von natürlicher Sukzession an den Maststandorten und auf den Schneisen im Rahmen eines ökologischen Trassenmanagements kann die visuelle Beeinträchtigung des Landschaftsbildes durch Trassenbauwerke zusätzlich vermindern. Abpflanzungsmaßnahmen an Maststandorten und Nebenanlagen sowie an sichtbeeinträchtigten Blickstandorten sind ein weiteres Mittel der möglichen Minderung von Landschaftsbildbeeinträchtigungen.

9. Schutzgut „Kultur- und Sachgüter“

9.1 Auswirkungen von 380-kV-Höchstspannungsdrehstrom-Freileitungen

9.1.1 Auswirkungen während der Bauphase

Mit den Bauarbeiten an Freileitungstrassen können Boden-, Kultur- und Baudenkmäler sowie archäologische Fundstellen gefährdet sein. Solche Verluste sind unwiederbringlich.

9.1.2 Auswirkungen durch Anlage und Betrieb

Durch die Anlage einer Freileitung kann es in der Nähe von Kulturdenkmälern, bspw. Grabhügel oder Kirchen, zu visuellen Beeinträchtigungen kommen, die nach Möglichkeit bereits bei der Planung der Maststandorte und Leitungstrasse ausgeschlossen werden sollten. Die im Abschnitt zum Landschaftsbild dargestellte Zonierung ist auch für die Beurteilung visueller Beeinträchtigungen von Kulturgütern sinnvoll (vgl. Abschn. 8.1).

9.1.3 Vermeidungs- und Minderungsmaßnahmen

Mit den Bauarbeiten für Mastfußfundamente kommt es zu Tiefbaumaßnahmen, bei denen Boden-, Kultur- und Baudenkmäler gefährdet sein können. Durch eine archäologische Prospektion im Bereich der Maststandorte bereits im Vorfeld des Bauvorhabens lassen sich Verluste und Beeinträchtigungen von bekannten und bisher nicht bekannten Kulturdenkmälern vermeiden bzw. vermindern.

Durch eine baubegleitende Untersuchung lässt sich im seltenen Fall einer bei den Grabungen entdeckten bodendenkmalpflegerischen Betroffenheit das Ausmaß der etwaig anschließenden Bergungs- und Dokumentationsmaßnahmen abschätzen (IBNI et al. 2008, S. 278). Beim Auffinden von Bodenfunden sind die Bestimmungen der Denkmalschutzgesetze der Länder zu beachten (ERM 2010).

9.2 Auswirkungen von 380-kV-Höchstspannungsgleichstrom-Freileitungen

Die im Kapitel 9.1 für 380-kV-Drehstromfreileitungen genannten Aspekte gelten ebenso für HGÜ-Freileitungen.

9.3 Nebenanlagen bei Freileitungen

Im Zuge der Bauarbeiten an Umspannwerken, Konverterstationen und Übergangsbauwerken können Boden-, Kultur- und Baudenkmäler sowie archäologische Fundstellen gefährdet sein. In der Nähe von Kulturgütern können sie visuelle Beeinträchtigungen bewirken, die im Vorfeld bei der Planung berücksichtigt werden sollten.

9.4 Auswirkungen von 380-kV-Höchstspannungsdrehstrom-Erdkabeln

9.4.1 Auswirkungen während der Bauphase

Mit den Bauarbeiten für die Kabeltrasse kommt es zu ausgedehnten Tiefbaumaßnahmen. Dabei können Boden-, Kultur- und Baudenkmäler gefährdet sein. Solche Verluste sind unwiederbringlich.

9.4.2 Auswirkungen durch Anlage und Betrieb

Durch Anlage und Betrieb eines Erdkabels sind Beeinträchtigungen von Kultur- und Sachgütern i. Allg. nicht zu erwarten.

9.4.3 Vermeidungs- und Minderungsmaßnahmen

Durch eine archäologische Prospektion im Bereich der Feintrasse bereits im Vorfeld des Bauvorhabens lassen sich Verluste und Beeinträchtigungen von bekannten und bisher nicht bekannten Kulturdenkmälern vermeiden bzw. vermindern.

Die angemessenen Maßnahmen, die im seltenen Fall einer bei den Grabungen entdeckten bodendenkmalpflegerischen Betroffenheit durchzuführen sind, wurden in Abschn. 9.1.3 dargestellt

9.5 Auswirkungen von 380-kV-Höchstspannungsgleichstrom-Erdkabeln

Die im Kapitel 9.4 für 380-kV-Drehstrom-Erdkabel genannten Aspekte sind ebenso für Gleichstrom-Erdkabel relevant.

9.6 Nebenanlagen bei Erdleitungen

Für potenzielle visuelle Beeinträchtigungen durch Bauarbeiten an Umspannwerken, Konverterstationen und Übergangsbauwerken für Erdkabel gelten die Ausführungen des Abschn. 9.3. gleichermaßen.

9.7 Auswirkungen von gasisolierten Leitungen

Bei der Integration der GIL in bereits bestehende Tunnelsysteme ist mit keinen neu hinzukommenden Auswirkungen zu rechnen. Werden die GIL in Gräben verlegt, sind die unter 9.4 und 9.5 für Erdkabel genannten Auswirkungen auf Kultur- und Sachgüter möglich.

9.8 Zusammenfassung Schutzgut „Kultur- und Sachgüter“

Das Schutzgut „Kultur- und Sachgüter“ kann durch Bauarbeiten unwiederbringlich geschädigt werden, wenn Boden-, Kultur- und Baudenkmäler sowie archäologische Fundstellen im direkten Nahbereich beschädigt oder zerstört werden. Hierbei sind vor allem die ausgedehnten Tiefbaumaßnahmen bei der Verlegung von Erdkabeln und GIL als potentielle Risiken zu nennen.

Durch eine archäologische Prospektion im Bereich der Mastfußstandorte bzw. der Feintrasse bereits im Vorfeld des Bauvorhabens lassen sich Verluste und Beeinträchtigungen von bekannten und bisher nicht bekannten Kulturdenkmälern vermeiden bzw. vermindern. Beim Auffinden von Bodenfunden lässt sich das Ausmaß der möglichen anschließenden Bergungs- und Doku-

mentationsmaßnahmen durch baubegleitende Untersuchungen abschätzen, wobei die Bestimmungen der Denkmalschutzgesetze der Länder zu beachten sind.

Mögliche visuelle Beeinträchtigungen von Kulturdenkmälern können insbesondere von Freileitungen sowie von Nebenbauwerken ausgehen. Um Beeinträchtigungen von Kultur- und Sachgütern zu vermeiden oder zu vermindern, sollten visuell sensible Bereiche nach Möglichkeit bereits frühzeitig in der Planung ausgeschlossen werden.

Sollte bei einer Grabung ein Bodenfund gemacht werden, sind die Bestimmungen der Denkmalschutzgesetze der Länder zu beachten.

10. Wechselwirkungen

10.1 380-kV-Höchstspannungsdrehstrom-Freileitungen

Wechselwirkungen zwischen den Umweltschutzgütern können auf einer hohen Abstraktionsebene für den Bau und Betrieb von Freileitungen nur sehr verallgemeinert erfasst und beschrieben werden. Sie sind in besonderem Maße in nachfolgenden Umweltprüfungen unter Betrachtung standörtlicher Faktoren zu präzisieren und zu ergänzen. Da die Umwelt als ein komplexes und vielfach rückgekoppeltes System zu betrachten ist, welches in allen Teilsystemen und zwischen den Teilsystemen Wechselwirkungen entwickelt, können in einer Umweltprüfung, gleich auf welcher Planungsebene, hinsichtlich Wechselwirkungen stets nur Schwerpunkte beleuchtet werden. In dem Hauptteil einer jeglichen Umweltprüfung werden die einzelnen Systemkompartimente separiert nach Boden, Wasser, Luft, Tieren, Pflanzen etc. und damit zwangsläufig um die Wirkungsbezüge in andere Systemkompartimente verkürzt abgehandelt. Zum Abschluss einer Umweltprüfung geht es daher vorrangig darum, über den Begriff „Wechselwirkungen“ die integrativen und verknüpfenden Aspekte hervorzuheben und die vielfältigen Wirkungsbeziehungen innerhalb und zwischen den einzelnen Teilsystemen zu würdigen. Hierbei sind einerseits projektunabhängige Wirkungsbeziehungen zwischen den Umweltschutzgütern im Bestand zu benennen, andererseits aber auch wesentliche Folgewirkungen und Wirkungsverkettungen, die aus einem Vorhaben allein oder in Verknüpfung mit anderen Projekten in den unterschiedlichen Umweltkompartimenten entstehen.

Da es sich hier um eine standortunabhängige Betrachtung handelt, müssen Ausführungen zu Wechselwirkungen im Bestand entfallen. Aus der linearen Eigenart des Eingriffs durch Freileitungen lassen sich immerhin bestimmte Schwerpunkte für Wechselwirkungen benennen, die im Einzelfall tangiert werden können. So ist ggf. einer Barrierewirkung der Leitungen für Avifauna zu rechnen, die in ökologischen Folgewirkungen resultieren kann (z.B. bzgl. der Nahrungskette) als auch von Folgewirkungen, die aus der Schaffung von Gehölzschneisen entstehen. Vergrämungseffekte durch Leitungsstränge und vermehrte Vogelkollisionen können bspw. auf Artenverschiebungen und die Veränderung von Nahrungsketten Einfluss haben. Dies wiederum kann faunistische Ungleichgewichte hervorrufen, die sich in bestimmten Situationen auf Vegetationsstrukturen und landwirtschaftliche Nutzungen auswirken. Die hier hypothetisch über mehrere Umweltkompartimente hinweg konstruierten Zusammenhänge werden im Einzelfall in dieser Form nur selten Relevanz gewinnen. Geläufiger sind einstufige Wirkungsverkettungen, wie sie bspw. bei der Anlage von Gehölzschneisen auftreten. Durch Gehölzschneisen geht nicht nur Vegetation verloren, sondern es können sich auch die Bodenstruktur und das Bestandsklima verändern. Weitere Rückwirkungen auf floristische und faunistische Verteilungen sind denkbar. Wechselwirkungen müssen nicht zwangsläufig negativ zu bewerten sein. Gehölzschneisen können z.B. auch neue Lebensräume für bestimmte Tierarten, bspw. Fledermäuse, eröffnen und die Artenvielfalt eines Standortes erhöhen. Letztlich hängen die tatsächlich zu erwartenden Wechselwirkungen von den spezifischen Randbedingungen des jeweiligen Standortes ab. Vorliegende Umweltverträglichkeitsuntersuchungen zeigen bei Freileitungsvorhaben, dass Sekundärwirkungen i. Allg. offenbar nicht die Qualität einer erheblichen Beeinträchtigung erreichen (ERM 2010, C4.7.1).

Neben den Sekundärwirkungen, die über die ökologische Vernetzung der einzelnen Naturgüter transportiert werden, werden Wechselwirkungen darüber hinaus auch in Verbindung mit den

Umweltauswirkungen anderer Bauten, Einrichtungen und Planungen relevant. Die unterschiedlichen Umweltauswirkungen können sich dabei addieren und potenzieren, aber auch vermindern oder sogar aufheben. Durch Bündelung eines Freileitungsvorhabens mit anderen linearen Anlagen bzw. Bauvorhaben können einerseits die zusätzlich zu erwartenden Umweltwirkungen auf ein Minimum reduziert werden. Andererseits sind gerade aufgrund der absichtlich herbeigeführten Nähe einer anderen Anlage auch mögliche negative Wechselwirkungen zu beachten.

10.2 380-kV-Höchstspannungsgleichstrom-Freileitungen

Die im Abschnitt 10.1 für 380-kV-Drehstrom-Freileitungen genannten Aspekte sind auf Gleichstrom-Freileitungen übertragbar.

10.4 Nebenanlagen bei Freileitungen

Zur Minimierung negativer Einflüsse sollten bei der Errichtung von Nebenanlagen schon versiegelte oder genutzte Flächen priorisiert werden, zu denen bereits Zufahrtswege bestehen.

10.5 380-kV- Höchstspannungsdrehstrom-Erdkabel

Für Wechselwirkungen zwischen den Umweltschutzgütern bei Bau und Betrieb von Erdkabeln gelten weitgehend die bereits für Freileitungen getroffenen Aussagen analog. Grundsätzlich sind auf einer hohen Abstraktionsebene nur sehr verallgemeinerte Aussagen möglich, die in nachfolgenden Umweltprüfungen unter Betrachtung standörtlicher Faktoren präzisiert und ergänzt werden müssen. Für Erdkabel lässt sich immerhin feststellen, dass sie durch den baubedingten Eingriff in den Boden vielfach auch den Wasserhaushalt tangieren, welcher in Bezug auf Wechselwirkungen eine Sonderrolle einnimmt. Die Sonderrolle begründet sich darin, dass der Wasserhaushalt in einer essentiell funktionalen Verknüpfung mit einer Vielzahl von Umweltkompartimenten steht. Hierzu gehören insbesondere Boden, Klima, Flora und Fauna.

Die einzelnen Trigger für mögliche Eingriffe in den Wasserhaushalt durch den Bau von Erdkabeln sind in den Abschnitten zum Grundwasser, zu Oberflächengewässern und zum Boden ausgeführt worden – ebenso wie Ausführungen zu möglichen Vermeidungs- und Minderwirkungswirkungen. Lässt sich die Intensität von Veränderungen des Wasserhaushalts (bspw. durch Versiegelung, Bodenverdichtung, Grundwasserabsenkung, Gewässerquerung) auch durch Vermeidungs- und Verminderungsmaßnahmen nicht adäquat absenken, sind Folge- und Kettenwirkungen für Boden, Klima Flora und Fauna denkbar. Die nähere Ausprägung solcher Wirkungen kann nur standortbezogen ermittelt werden. Vorliegende Umweltverträglichkeitsuntersuchungen zeigen bei Kabel- und bei Rohrleitungsvorhaben, dass Sekundärwirkungen offenbar nicht die Qualität einer erheblichen Beeinträchtigung erreichen (IBNI 2008, S. 285, IBU 2007, S. 369 ff.).

Über Sekundärwirkungen hinaus, die über die ökologische Vernetzung der einzelnen Naturgüter transportiert werden, können Wechselwirkungen auch in Verbindung mit den Umweltauswirkungen anderer Bauten und Bauvorhaben auftreten. Die unterschiedlichen Umweltauswirkungen können sich dabei im Einzelfall addieren, potenzieren oder kompensieren und sogar aufheben.

10.6 380-kV-Höchstspannungsgleichstrom-Erdkabel

Die im Abschnitt 10.4 für 380-kV-Drehstrom-Erdkabel genannten Aspekte sind auf 380-kV-Gleichstrom-Erdkabel übertragbar.

10.7 Nebenanlagen bei Erdleitungen

Zur Minimierung negativer Einflüsse sollten bei der Errichtung von Nebenanlagen schon versiegelte oder genutzte Flächen priorisiert werden, zu denen bereits Zufahrtswege bestehen.

10.8 Auswirkungen von gasisolierten Leitungen

Die geringste Beeinträchtigung der Schutzgüter erzielt man, wenn GIL in bereits bestehende Tunnelsysteme integriert werden können.

10.9 Zusammenfassung Wechselwirkungen

Wechselwirkungen zwischen den Umweltschutzgütern können auf einer hohen Abstraktionsebene für den Bau und Betrieb von Freileitungen nur sehr verallgemeinert erfasst und beschrieben werden. Sie sind in besonderem Maße in nachfolgenden Umweltprüfungen unter Betrachtung standörtlicher Faktoren zu präzisieren und zu ergänzen. In dem Hauptteil einer jeglichen Umweltprüfung werden die einzelnen Systemkompartimente separiert nach Boden, Wasser, Luft, Tieren, Pflanzen etc. und damit zwangsläufig um die Wirkungsbezüge in andere Systemkompartimente verkürzt abgehandelt. Zum Abschluss einer Umweltprüfung geht es daher vorrangig darum, über den Begriff „Wechselwirkungen“ die integrativen und verknüpfenden Aspekte hervorzuheben und die vielfältigen Wirkungsbeziehungen innerhalb und zwischen den einzelnen Teilsystemen zu würdigen. Hierbei sind einerseits projektunabhängige Wirkungsbeziehungen zwischen den Umweltschutzgütern im Bestand zu benennen, andererseits aber auch wesentliche Folgewirkungen und Wirkungsverkettungen, die aus einem Vorhaben allein oder in Verknüpfung mit anderen Projekten in den unterschiedlichen Umweltkompartimenten entstehen.

Aus der linearen Eigenart des Eingriffs durch Übertragungsleitungen lassen sich bestimmte Schwerpunkte für Wechselwirkungen benennen, die im Einzelfall tangiert werden können. So ist ggf. bei einer Freileitung mit Barrierewirkungen für Avifauna zu rechnen, die in ökologischen Folgewirkungen resultieren kann (z.B. bzgl. der Nahrungskette) als auch von Folgewirkungen, die aus der Schaffung von Gehölzschneisen entstehen. Vergrämungseffekte durch Leitungsstränge und vermehrte Vogelkollisionen können bspw. auf Artenverschiebungen und die Veränderung von Nahrungsketten Einfluss haben. Dies wiederum kann faunistische Ungleichgewichte hervorrufen, die sich in bestimmten Situationen auf Vegetationsstrukturen und landwirtschaftliche Nutzungen auswirken. Die hier hypothetisch über mehrere Umweltkompartimente hinweg konstruierten Zusammenhänge werden im Einzelfall in dieser Form nur selten Relevanz gewinnen. Geläufiger sind einstufige Wirkungsverkettungen, wie sie bspw. bei der Anlage von Gehölzschneisen auftreten. Durch Gehölzschneisen geht nicht nur Vegetation verloren, sondern es können sich auch die Bodenstruktur und das Bestandsklima verändern. Weitere Rückwirkungen auf floristische und faunistische Verteilungen sind denkbar.

Baubedingte Eingriffe für die Erdkabelverlegung tangieren häufig Wasserhaushalt, der in Bezug auf Wechselwirkungen eine Sonderrolle einnimmt, da er mit vielen Umweltkompartimenten verknüpft ist. Hier sind v.a. Boden, Klima, Flora und Fauna zu nennen, wobei Veränderungen des Wasserhaushalts Folge- und Kettenwirkungen zwischen dem Umweltkompartimenten auslösen kann.

Wechselwirkungen müssen nicht zwangsläufig negativ zu bewerten sein. Gehölzschneisen können z.B. auch neue Lebensräume für bestimmte Tierarten, bspw. Fledermäuse, eröffnen und die

Artenvielfalt eines Standortes erhöhen. Letztlich hängen die tatsächlich zu erwartenden Wechselwirkungen von den spezifischen Randbedingungen des jeweiligen Standortes ab.

11. Vorhabensbündelungen

11.1 380-kV-Höchstspannungsdrehstrom-Freileitungen

11.1.1 Auswirkungen während der Bauphase

Bei der Verlegung einer Freileitungstrasse entlang einer Straße oder eines Schienenweges kann auf diesen Strecken auf die Herstellung von Zuwegungen zu den Maststandorten verzichtet werden. Die Umweltauswirkungen der Bauphase treffen auf durch die Verkehrsstrecke deutlich vorbelastete Bereiche und sind daher gegenüber einer isolierten Trasse reduziert.

Die Bündelung eines Freileitungsvorhabens mit anderen linearen Anlagen, bspw. Rohrleitungen, Kommunikationsleitungen, Drainageleitungen oder Freileitungen einer anderen Spannungsebene kann ebenfalls eine Wirkungsreduzierung aufgrund der Inanspruchnahme bereits vorbelasteter Flächen erzeugen.

Unerwünschte Wechselwirkungen sind während der Bauphase wechselseitig durch versehentliche Beschädigungen der dicht benachbarten Anlagen denkbar.

11.1.2 Auswirkungen durch Anlage und Betrieb

Bei der Bündelung von Freileitungstrassen mit linienhaften Infrastrukturen können sich bei Anlage und Betrieb gegenüber isolierten Trassen erhebliche Wirkungsreduktionen ergeben (vgl. WEYER et al. 2012, Abschn. 4.1.3.1). Dies gilt insbesondere für Wirkungen auf den Menschen, auf Arten und Biotope sowie auf das Landschaftsbild. Umweltentlastende Wirkungen können z.B. durch die kombinierte und dadurch insgesamt flächenreduzierte Freihaltung von Gehölzen im Trassenbereich erzielt werden. Im Idealfall treffen gleichartige Wirkungen zusammen und ergeben nur geringe kumulative Effekte.

Zur Bündelung sind insbesondere linienhafte Infrastrukturtrassen mit erheblichen Umweltvorbelastungen geeignet wie:

- Vorhandene Freileitungstrassen,
- Bundesstraßen, Bundesautobahnen,
- Schienenwege für den Zugverkehr, insbesondere elektrifizierte Bahnstrecken,
- Gasversorgungsleitungen,
- Rohrleitungsanlagen zum Befördern von Wasser.

Unerwünschte Wechselwirkungen bei der gebündelten Verlegung von Freileitungen mit anderen linienhaften Infrastrukturtrassen sind insbesondere an folgenden Punkten denkbar:

- Magnetfelder können Induktionsspannungen und damit Korrosionen in sehr nahe gelegenen metallischen Anlagen verursachen (ggf. durch Potenzialsteuerung bzw. Erdung vermeidbar).
- Die Beeinträchtigung des Landschaftsbildes kann durch Bündelung mit einer bestehenden Freileitungstrasse unverhältnismäßig gesteigert werden (NOHL 1993, S. 25).
- Die kumulative Belastung aufgrund unterschiedlicher Beeinträchtigungsfaktoren kann für benachbarte Nutzungen, bspw. Wohnnutzung, ein zumutbares Maß überschreiten.

11.2 380-kV-Höchstspannungsgleichstrom-Freileitungen

Die im Abschnitt 11.1 für 380-kV-Drehstrom-Freileitungen genannten Aspekte sind auf Gleichstrom-Freileitungen übertragbar.

11.3 Nebenanlagen bei Freileitungen

Zur Minimierung negativer Einflüsse sollten bei der Errichtung von Nebenanlagen schon versiegelte oder genutzte Flächen priorisiert werden, zu denen bereits Zufahrtswege bestehen.

11.4 380-kV-Höchstspannungsdrehstrom-Erdkabel

11.4.1 Auswirkungen während der Bauphase

Durch die Verlegung eines Kabels entlang einer Straße oder eines Schienenweges kann auf diesen Strecken auf die Herstellung einer Baustraße und damit auf wesentliche Bauwirkungen verzichtet werden. Die Umweltauswirkungen der Bauphase treffen auf durch die Verkehrsstrecke deutlich vorbelastete Bereiche und sind daher gegenüber einer isolierten Trasse reduziert.

Häufige negative Wechselwirkungen werden während der Bauphase v.a. durch unabsichtliche Beschädigungen dicht benachbarter Anlagen erzeugt. Die häufigsten Ausfallursachen bei Kabelanlagen sind z.B. versehentliche Beschädigungen bei Baumaßnahmen (BRAKELMANN 2010 mdl.).

11.4.2 Auswirkungen durch Anlage und Betrieb

Die Bündelung von Kabeltrassen mit anderen linienhaften Infrastrukturen kann hinsichtlich der bei Anlage und Betrieb verursachten Umweltauswirkungen insgesamt erhebliche Wirkungsreduktionen erzielen (vgl. WEYER et al. 2012, Abschn. 1.5.3). Dabei werden bestehende Umweltvorbelastungen genutzt und landschaftliche Freiräume geschont. Reduktionen können gleichermaßen für Wirkungen auf den Boden und das Grundwasser, auf Arten und Biotope sowie auf das Landschaftsbild erreicht werden. Zur Bündelung eignen sich insbesondere linienhafte Infrastrukturtrassen mit erheblichen Umweltvorbelastungen wie:

- Bundesstraßen (20 m Abstand erforderlich),
- Bundesautobahnen (40 m Abstand erforderlich),
- Schienenwege von Eisenbahnen,
- Gasversorgungsleitungen,
- Rohrleitungsanlagen zum Befördern von Wasser.

Unerwünschte Wechselwirkungen bei der gebündelten Verlegung von Erdkabeln mit anderen linienhaften Infrastrukturtrassen sind insbesondere an folgenden Punkten denkbar:

- Die kumulative thermische Belastung des Erdbodens kann durch das Zusammenwirken verschiedener linienhafter Infrastrukturtrassen zur Strukturveränderung des Erdbodens führen.
- Magnetfelder können Induktionsspannungen und damit Korrosionen in sehr nahe gelegenen metallischen Anlagen verursachen (ggf. durch Potenzialsteuerung bzw. Erdung vermeidbar). Die Störaussendung magnetischer Felder durch Erdkabelanlagen steht in

Abhängigkeit von Übertragungsleistung, Verlegetiefe und Verlegeabstand der betroffenen technischen Einrichtungen.

- Die kumulative Belastung aufgrund unterschiedlicher Beeinträchtigungsfaktoren kann für benachbarte Nutzungen, bspw. Wohnnutzung, ein zumutbares Maß überschreiten.

11.5 380-kV-Höchstspannungsgleichstrom-Erdkabel

Die im Abschnitt 11.4 für 380-kV-Drehstrom-Erdkabel genannten Aspekte sind auf Gleichstrom-Erdkabel übertragbar.

11.6 Nebenanlagen bei Erdleitungen

Zur Minimierung negativer Einflüsse sollten bei der Errichtung von Nebenanlagen schon versiegelte oder genutzte Flächen priorisiert werden, zu denen bereits Zufahrtswege bestehen.

11.7 Gasisolierten Leitungen

Die geringste Beeinträchtigung der Schutzgüter erzielt man, wenn GIL in bereits bestehende Tunnelsysteme integriert werden können.

11.8 Zusammenfassung Vorhabensbündelungen

Auch durch die Bündelung von Vorhaben können Wechselwirkungen auftreten. Die unterschiedlichen Umweltauswirkungen können sich hierbei addieren, potenzieren, kompensieren oder auch aufheben. So ist bei der bei Verlegung einer Freileitungs- oder Erdkabeltrasse entlang einer bestehenden Straße oder eines Schienenweges keine Anlage neuer Zuwegungen erforderlich. Auch der Flächenbedarf kann durch Zusammenlegung mehrerer Vorhaben reduziert werden, wobei aufgrund der Inanspruchnahme bereits vorbelasteter Flächen eine Wirkungsreduzierung möglich ist. Unbeabsichtigte Wechselwirkungen sind während der Bauphase durch Beschädigungen der dicht benachbarten Anlagen möglich. Auch während der Betriebsphase kann es bei der Bündelung von Vorhaben zu unbeabsichtigten Wechselwirkungen kommen. So können bspw. durch die Magnetfelder der Leitungen Induktionsspannungen und damit Korrosionen in sehr nahe gelegenen metallischen Anlagen verursachen. Bei Erdkabeln ist durch das Zusammenwirken verschiedener linienhafter Infrastrukturtrassen eine kumulative thermische Belastung und in Folge eine dauerhafte Veränderung der Bodenstruktur möglich.

12. Empfehlungen für den Netzausbau aus Umweltsicht

Höchstspannungsleitungen sind in Bau- und/oder Betriebsphase stets mit Umweltbeeinträchtigungen verknüpft. Im vorhergehenden Text wurde eine Bestandsaufnahme der Umweltwirkungen unterschiedlicher Übertragungstechnologien durchgeführt und eine Vielfalt an planerischen, technischen, und landschaftspflegerischen Maßnahmen aufgezeigt, um unerwünschte Umweltwirkungen zu vermeiden und zu vermindern. Entsprechende Maßnahmen sollten bei der Planung von Höchstspannungsleitungen frühzeitig berücksichtigt und an aussagekräftigen Beispielen weiterentwickelt werden.

Generell ist die Wahl eines konfliktarmen Trassenverlaufs die wirkungsvollste Methode der Vermeidung oder Verminderung von Beeinträchtigungen und wird nach neuer Gesetzeslage daher zu Recht bereits auf der Ebene der Bundesbedarfsplanung (BBP) bzw. Bundesfachplanung (BFP) berücksichtigt. Umweltkonflikte sind vor allem in Gebieten von naturschutzfachlicher Bedeutung sowie in der Nähe von Siedlungsbereichen zu erwarten.

Schon bei der Wahl der Ausbautechnologie einer Höchstspannungsleitung (Freileitung oder Erdkabel) kommt der Beachtung der Umweltgüter ein hoher Stellenwert zu. Dichte Siedlungsabstände und eine hohe Betroffenheit des Landschafts- und Ortsbildes legen ggf. eine Erprobung von Erdkabelstrecken nahe.

Den in der öffentlichen Diskussion bedeutendsten Umweltaspekt von Höchstspannungsleitungen stellen elektrische und magnetische Felder dar. Die wissenschaftliche Diskussion hierzu offenbart große Wissensunsicherheiten. Unbestritten ist jedoch, dass sich Beeinträchtigungen durch elektrische oder magnetische Felder effektiv durch eine Vergrößerung der Wirkabstände minimieren lassen. Alle Möglichkeiten hierzu sollten ausgeschöpft werden.

Beeinträchtigungen von Tieren und Pflanzen in der Bauphase von Höchstspannungsleitungen können verschiedentlich durch eine gezielte Vorgabe von Bauzeitfenstern vermieden werden.

Die Arbeitsstreifen für den Bau von Höchstspannungsleitungen sollten so schmal wie unter konstruktiven Gesichtspunkten nötig ausgelegt werden. Baustraßen sollten flexibel gehalten und frühzeitig rückgebaut werden. Bodenvermischungen, Bodenverdichtungen und Eingriffe in den Bodenwasserhaushalt sind so gering wie möglich zu halten.

Zum Schutz bestimmter Tier- und Pflanzenhabitate empfiehlt sich bei der Errichtung von Freileitungen eine variable Feinplatzierung der Maststandorte und ggf. eine Überspannung wertvoller Gehölzstandorte – wobei die Auswirkungen auf das Landschaftsbild zu beachten sind.

Im Falle der Anlage von Waldschneisen sollte sowohl bei Freileitungen wie bei Erdkabeln ein ökologisches Trassenmanagement etabliert werden.

Bei der Verlegung von Erdkabeln auf der Höchstspannungsebene sollten alle technischen Möglichkeiten ausgeschöpft werden, die Wärmeentwicklung auf den belebten Boden gering zu halten.

Bei der Planung von Erdkabeltrassen sowie Maststandorten sollten Grundwasserstandorte mit einer sehr hohen und hohen Empfindlichkeit bereits in der Planungsphase berücksichtigt und möglichst ausgeschlossen werden.

Insbesondere bei der Anlage von Freileitungen sollte darauf geachtet werden, dass das Landschaftsbild möglichst nicht beeinträchtigt wird. Hierbei sind die visuelle Einbindung in die Umgebung und die Wahl geeigneter Maststandorte und Masttypen wichtige Punkte.

Vorhandene Vorbelastungen durch andere linienhafte Infrastrukturen sollten vorzugsweise zur Trassenbündelung und Reduktion der gesamten Umweltbeeinträchtigungen genutzt werden. Zur Bündelung sind insbesondere geeignet:

- Vorhandene Freileitungs- und Kabeltrassen,
- Bundesstraßen, Bundesautobahnen,
- Schienenwege für den Zugverkehr, insbesondere elektrifizierte Bahnstrecken,
- Gasversorgungsleitungen,
- Rohrleitungsanlagen zum Befördern von Wasser.

Bündelung darf allerdings kein absoluter Maßstab sein. Bei einer Bündelung sind ggf. kumulative Auswirkungen, die Schwellenwerte einer Gesambelastung überschreiten können, zu berücksichtigen. Bei der Bündelung einer neuen Höchstspannungstrasse mit Trassen einer niedrigeren Spannungsebene sind ggf. vergrößerte Schutzabstände zu beachten.

13. Literaturverzeichnis

- ABB (2011): HVDC Light Cable White Book. Internal Document.
- ABERLE, S., PARTL, E. (2005): Nachhaltiges Trassenmanagement. Forschung im Verbund. Schriftenreihe Band 91. Leitbilder - Steiermark, Kärnten.
- AECOM U. INTERTEC-METOC (2011): Environmental Appraisal Summary Report. Western HVDC Link. http://www.westernhvdc.co.uk/files/_ER_WHVDC_Environmental%20Appraisal%20Summary%20Report%20reduced.pdf (Zugriff: 16.05.2012).
- AG BODEN (2005): Bodenkundliche Kartieranleitung. Hrsg.: Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe und Niedersächsisches Landesamt für Bodenforschung, 5. verbesserte und erweiterte Auflage, Hannover.
- AGNL – ARBEITSGRUPPE FÜR NATURSCHUTZ UND LANDSCHAFTSPFLEGE (2006): Kranichrast in Niedersachsen 1994–2005. Rastgebiete und Bewertung, Habitatwahl, Raum-Zeit-Nutzung, aktuelle Gefährdungssituation und Ursachen. Auftraggeber: Staatliche Vogelschutzwarte Hannover, NLWKN.
- AHLBOM, A., DAY, N., FEYCHTING, M., ROMAN, E., SKINNER, J., DOCKERTY, J., LINET, M., MCBRIDE, M., MICHAELIS, J., OLSEN, J.H., TYNES, T., VERKASALO, P.K. (2000): A pooled analysis of magnetic fields and childhood leukemia. *British Journal of Cancer* 83 (5): 689–692.
- ALSTOM GRID (2010): Gasisolierte Leitungen (GIL): aktuell und zukunftsweisend. Alstom Grid Think Grid 07 – Sommer 2010: 13–16.
- ALTEMÜLLER, M.; REICH, M. (1997): Einfluß von Hochspannungsfreileitungen auf Brutvögel des Grünlandes. *Vogel und Umwelt* (9): 111–127.
- ALTENKAMP, R.; BAUER, H.-G.; STEIOF, K. (2001): Gefährdung von Arten durch Beutegreifer: 462–469.
- AßMUS, M. (2012): Diskussionsbeitrag im „Technischen Dialog“ der Bundesnetzagentur. 17.04.2012, Hannover.
- ATCO ELECTRIC (2010): HVDC Transmission Lines on or near your Property. Information Sheets. http://hvdc.atcoelectric.com/NR/rdonlyres/67D31561-D366-47DF-AA97-A76AD471A44F/0/ATCOInfoSheets_Web.pdf (Zugriff: 29.05.2012).
- BAFU (BUNDESAMT FÜR UMWELT SCHWEIZ) (2009): Niederfrequente Magnetfelder und Krebs. Bewertung von wissenschaftlichen Studien im Niedrigdosisbereich. *Umwelt-Wissen* 34/09, 118 S.
- BALLASUS, H., SOSSINKA, R. (1997): Auswirkungen von Hochspannungstrassen auf die Flächennutzung überwinternder Bleiß- und Saatgänse *Anser albifrons*, *A. fabalis*. *J. Ornithol* (138): 215–228.
- BENATO, R., CARLINI, E.M., DI MARIO, C., FELLIN, L., PAOLUCCI, A., TURRI, R. (2005): Gas insulated transmission lines in railway galleries. *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol. 20, No. 2, April 2005: 704–709.
- BENATO, R., BRUNELLO, P., FELLIN, L. (2010): Thermal Behavior of EHV Gas-Insulated Lines in Brenner Pass Pilot Tunnel. *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol. 25, No. 4, October 2010: 2717–2725.

- BERNHARDT, J. H. (2002): Gesundheitliche Aspekte niederfrequenter Felder der Stromversorgung. – Deutsches Ärzteblatt 99, Ausgabe 27, A–1898.
- BERNSHAUSEN, F., STREIN, M., SAWITZKY, H. (1997): Vogelverhalten an Hochspannungsfreileitungen – Auswirkungen von elektrischen Freileitungen auf Vögel in durchschnittlich strukturierten Kulturlandschaften. Vogel und Umwelt, Bd. 9, Sonderheft: 59–92.
- BET GMBH, IZES GMBH, POWERENGS (2011): Ausbau elektrischer Netze mit Kabel oder Freileitung unter besonderer Berücksichtigung der Einspeisung Erneuerbarer Energien. Eine Studie im Auftrag des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit. 101 S.
- BEVANGER, K., BRØSETH, H. (2004): Impact of power lines on bird mortality in a subalpine area. Animal Biodiversity and Conservation 27 (2): 67–76.
- BFN – BUNDESAMT FÜR NATURSCHUTZ (2006): Rote Liste der gefährdeten Biotoptypen Deutschlands. Zweite fortgeschriebene Fassung. Bonn.
- BFS (BUNDESAMT FÜR STRAHLENSCHUTZ) (2009): Grenzwerte und Vorsorgemaßnahmen. Stand: 06.10.2009. <http://www.bfs.de/de/elektro/nff/schutz/recht.html> (Zugriff: 11.06.2012).
- BFS (BUNDESAMT FÜR STRAHLENSCHUTZ) (2012): Technik-Dialog, Positionspapier „Freileitungen und Erdkabel“. http://www.bundesnetzagentur.de/DE/Sachgebiete/ElektrizitaetGas/VortraegeVeranstaltungen/TechnikDialog_FreileitgnErdkabel_Basepage.html (Zugriff: 11.04.2012).
- BIMSCHG – BUNDES-IMMISIONSSCHUTZGESETZ, in der Fassung vom 26. September 2002 (BGBl. I S. 3830), zuletzt geändert durch Artikel 1 des Gesetzes vom 01. November 2005 (BGBl. I S. 1865).
- BINE ENERGIEFORSCHUNG FÜR DIE PRAXIS (1990): Raumbelastung durch Hochspannungsleitungen. Projekt Info-Service.
- BLUM, W.E.H. (2007): Bodenkunde in Stichworten. Hirts Stichwörterbuch. 6., völlig neu bearbeitete Auflage. Gebr. Borntraeger Verlagsbuchhandlung. Berlin, Stuttgart.
- BORBACH-JAENE, J. (2002): Anthropogen bedingte Verluste von Lebensraum und ihre Folgen. Zur Ökologie und zum Verhalten in der nordwestdeutschen Küstenlandschaft überwinternder arktischer Gänse. Dissertation zur Erlangung des Doktorgrades der Naturwissenschaften, Universität Osnabrück.
- BOSCHERT, M. (2005): Vorkommen und Bestandsentwicklung seltener Brutvogelarten in Deutschland 1997 bis 2003. Vogelwelt 126: 1–51.
- BRAKELMANN, H. (2004): Netzverstärkungs-Trassen zur Übertragung von Windenergie: Freileitung oder Kabel? Im Auftrag Bundesverband WindEnergie e.V. Rheinberg.
- BRAKELMANN, H. (2010): Design and Operation of Cable Installations: Innovative Approaches. International workshop on Power Cables.
- BRAKELMANN, H., ERLICH, I. (2010): Studie: Technische Möglichkeiten und Kosten transeuropäischer Elektrizitätsnetze als Basis einer 100% erneuerbaren Stromversorgung in Deutschland mit dem Zeithorizont 2050: Optionen der elektrischen Energieübertragung und des Netzausbaus. Auftraggeber: Der Rat von Sachverständigen für Umweltfragen. 87 S.
- BRAKELMANN, H., WASCHK, V. (2011): Höchstspannungskabelanlagen. Hohe Betriebssicherheit durch gekapselte Kabel. ew Jg. 110, Heft 24: 52–59.

- BRAKELMANN, H., STEIN, D., STEIN, R., WASCHK, V. (2011): Ausbau des Stromnetzes. Power-Tubes – innovatives Kabel- und Installationssystem. ew Jg. 110, Heft 25–26: 74–81.
- BREUER, W. (2007): Stromopfer und Vogelschutz an Energiefreileitungen. § 53 Bundesnaturschutzgesetz in der Praxis. Naturschutz und Landschaftsplanung 39, Heft 3: 69–72.
- BUND – BUND FÜR UMWELT UND NATURSCHUTZ DEUTSCHLAND (2011): Schutz vor niederfrequenten magnetischen Wechselfeldern bei Hochspannungs-Freileitungen und Erdkabel. Berlin.
- BUNDESVERBAND BODEN (2003): Bodenbezogene Ausgleichs- und Ersatzmaßnahmen in der Bauleitplanung. Vorschläge des Bundesverbandes Boden, Fachausschuss. „Bewertung von Böden in der Bauleitplanung“. In: ROSENKRANZ/BACHMANN/KÖNIG/EINSELE (Hrsg.) (2005): Bodenschutz. Ergänzbare Handbuch der Maßnahmen und Empfehlungen für Schutz, Pflege und Sanierung von Böden, Landschaft und Grundwasser. Band 2. Berlin.
- BUWAL - BUNDESAMT FÜR UMWELT, WALD UND LANDSCHAFT (2005): Elektrosmog in der Umwelt. Bern.
- COLE, S., DE JONGHE, C., BELMANS, R. (2008): Die elektrotechnischen Grundlagen für die Planung der 380kV-Höchstspannungsleitung. KULeuven. 59 S.
- DELBRENNNA, M. (2009): Extra high voltage underground power cables – facilitating & enabling Europe's electricity supply. PP Vortrag.
- DENA (Deutsche Energie-Agentur) (2006): Ausbau des Stromtransportnetzes: Technische Varianten im Vergleich. http://www.50hertz.com/de/file/dena_flyerausbaudess_46206.pdf (Zugriff: 21.05.2012).
- DEUTSCHE UMWELTHILFE – FORUM NETZINTEGRATION ERNEUERBARE ENERGIEN (2010): Plan N – Handlungsempfehlungen für Politik und Planung zum Netzausbau.
- DEUTSCHE UMWELTHILFE – FORUM NETZINTEGRATION ERNEUERBARE ENERGIEN (2012): Plan N 2010 – Handlungsempfehlungen an die Politik zur künftigen Integration erneuerbarer Energien in die Stromnetze. Eine Bilanz im April 2012.
- DEUTSCHER BAUERNVERBAND (2012): Positionspapier für den „Technik-Dialog“ der Bundesnetzagentur „Freileitungen und Erdkabel“.
- DI FABIO, U. (1991): Entscheidungsprobleme der Risikoverwaltung. Natur und Recht 13 (8): 353–359.
- ECOFYS (2008): Study on the comparative merits of overhead electricity transmission lines versus underground cables. Köln.
- ENTSOE U. EUROPACABLE (2011): Gemeinsame Studie: Machbarkeit und technische Aspekte der Teilverlegung von Höchstspannungsleitungen. http://www.europacable.com/images/Document_Uploads/gemeinsame%20studie%20entsoe%20europacable%20september%202011.pdf (Zugriff: 20.04.2012).
- ERM (ENVIRONMENTAL RESOURCES MANAGEMENT GMBH) (2008): 380-kV-Leitung Maade – Conneforde einschließlich Anschluss Maade I (EBLD) und II (EKW). Umweltstudie im Hinblick auf die Erfordernisse gem. § 7ff NNatG und § 6 UVPG. Kiel.
- ERM (ENVIRONMENTAL RESOURCES MANAGEMENT GMBH) (2008a): 380-kV-Höchstspannungsverbindung Wahle-Mecklar. ROV Niedersachsen. Unterlage zur ergänzenden Antragskonferenz.
- ERM (ENVIRONMENTAL RESOURCES MANAGEMENT GMBH) (2010): 380-kV-Höchstspannungsverbindung Wahle-Mecklar Unterlage zum Raumordnungsverfahren Niedersachsen, Band C Umweltverträglichkeitsstudie. Im Auftrag der Transpower Stromübertragungs-GmbH. Bayreuth.

- ERM (ENVIRONMENTAL RESOURCES MANAGEMENT GMBH) (2010a): 380-kV-Höchstspannungsverbindung Wahle-Mecklar Unterlage zum Raumordnungsverfahren Niedersachsen, Band B Vorgelegte Trassenfindung. Im Auftrag der Transpower Stromübertragungs-GmbH. Bayreuth.
- EUROPÄISCHE KOMMISSION (2007): Leitfaden zum strengen Schutzsystem für Tierarten von gemeinschaftlichem Interesse im Rahmen der FFH-Richtlinie 92/43/EWG.
- FANGRATH, M. (2003): Verhaltensbiologische Ursachen von Leitungsanflügen beim Weißstorch (*Ciconia ciconia*). *Fauna Flora Rheinland-Pfalz* 10 (1): 209–228.
- FBG-FREILEITUNGSBAU GMBH (2008): Immissionsbericht für das Projekt / Vorhaben: 380-kV-Leitung Maade-Conneforde, 380-kV- Leitung Anschluss Maade I (EBLD), 380-kV-Leitung Anschluss Maade II (EKW).
- FEHRENSSEN, S. (2009): Zur Anwendung zwingenden Gemeinschaftsrechts in der aktuellen Rechtsprechung des BVerwG zum Artenschutz nach der „Kleinen Novelle“ des Bundesnaturschutzgesetzes. *Natur und Recht*, Vol. 31 (1): 13–19.
- FEIX, O. (2012): Positionspapier der 50Hertz Transmission GmbH zum Thema „Freileitungen und Erdkabel“.
- FEIX, O. OBERMANN, R., STRECKER, M., BRÖTEL, A. (2012): Netzentwicklungsplan Strom 2012. 2. überarbeiteter Entwurf der Übertragungsnetzbetreiber.
<http://www.netzentwicklungsplan.de/content/netzentwicklungsplan-2012>(Zugriff: 31.05.2012).
- FEWS, A.P., HENSHAW, D.L., KEITCH, P.A., CLOSE, J.J., WILDING, R.J. (1999): Increased exposure to pollutant aerosols under high voltage power lines. *Int. J. Radiat. Biol.*, Vol. 75, No. 12: 1505–1521.
- FEWS, A.P., HENSHAW, D.L., WILDING, R.J., KEITCH, P.A. (1999a): Corona ions from powerlines and increased exposure to pollutant aerosols. *Int. J. Radiat. Biol.*, Vol. 75, No. 12: 1523–1531.
- FIEDLER, G., WISSNER, A. (1989): Weißstorch-Unfälle an Freileitungen und Abhilfemaßnahmen. *Schriftenreihe DDA(10)*: 423–424.
- FLADE, M. (1994): Die Brutvogelgemeinschaften Mittel- und Norddeutschlands. – IHW-Verlag, Eching. 879 S.
- FORSCHUNGSGRUPPE UMWELTPSYCHOLOGIE (2010): Umweltpsychologische Untersuchung der Akzeptanz von Maßnahmen zur Netzintegration Erneuerbarer Energien in der Region Wahle – Mecklar (Niedersachsen und Hessen). Abschlussbericht, 31 S.
- FORWIND (2005): Vergleichende Studie zu Stromübertragungstechniken im Höchstspannungsnetz. Technische, betriebswirtschaftliche und umweltfachliche Beurteilung von Freileitung, VPE-Kabel und GIL am Beispiel der 380-kV-Trasse Ganderkesee – St. Hülfe. Oldenburg und Hannover.
- FRICKE, W. (2008): Erwärmungsberechnungen für Kabelanlagen zur Anbindung von Offshore-Windparks im Bereich Norderney. Technischer Bericht, Siemens AG.
- FRÖHLICH, K. (2009): Transport elektrischer Energie mit Höchstspannungen. ETH Zürich. PP Vortrag.
- FROST, D. (2008): The use of ‘flight diverters’ reduces mute swan *Cygnus olor* collision with power lines at Abberton Reservoir, Essex, England. *Conservation Evidence* (5): 83–91.

- GAREIS-GRAHMANN, J. (1993): Landschaftsbild und Umweltverträglichkeitsprüfung. Beiträge zur Umweltgestaltung A 132, Erich Schmidt Verlag, Berlin.
- GARNIEL, A., DAUNICHT, W.D., MIERWALD, U., OJOWSKI, U. (2007): Vögel und Verkehrslärm. Quantifizierung und Bewältigung entscheidungserheblicher Auswirkungen von Verkehrslärm auf die Avifauna. Schlussbericht November 2007/Kurzfassung. FuE Vorhaben 02.237/2003/LR des Bundesministeriums für Verkehr, Bau- und Stadtentwicklung. 273 S. – Bonn und Kiel.
- GASSNER, E. (1995): Das Recht der Landschaft. Gesamtdarstellung für Bund und Länder. Neumann Verlag.
- GATTER, W. (2000): Vogelzug und Vogelbestände in Mitteleuropa: 30 Jahre Beobachtung des Tagzugs am Randecker Maar. Aula-Verlag, 656 Seiten.
- GEISLER, J. (2007): Beachtung des Artenschutzrechtes bei der Planfeststellung. Überarbeitung des Vermerkes vom 31.01.2006 mit Erläuterungen vom 23.05.2006, Kiel.
- GELLERMANN, M. (2009): Europäischer Gebiets- und Artenschutz in der Rechtsprechung. In: Natur und Recht Jg. 31, Heft 8: 8–13.
- GEO (GESELLSCHAFT FÜR ENERGIE UND ÖKOLOGIE MBH), Universität Duisburg - Essen, GFN - Gesellschaft für Freilandökologie und Naturschutzplanung mbH (2009): Naturschutzfachliche Analyse von küstennahen Stromleitungen. FuE-Vorhaben FKZ 80682070. Endbericht.
- GLUTZ VON BLOTZHEIM, U. (1994): Handbuch der Vögel Mitteleuropas. Band 9. Columbiformes – Piciformes Tauben, Kuckucke, Eulen, Ziegenmelker, Segler, Racken, Spechte. 2., durchgesehene Auflage. AULA-Verlag.
- GRUPPE „POWER TUBES“ – NKT CABLES – BILFINGER BERGER INGENIEURBAU – PROF. DR. H. BRAKELMANN – S&P CONSULTING (2012): Positionspapier „Freileitungen und Erdkabel“.
- HAAS, D., NIPKOW, M. (2005): Vorsicht: Stromschlag! Empfehlungen zum Vogelschutz an Energiefreileitungen.
- HAAS, D., NIPKOW, M., FIEDLER, G., SCHNEIDER, R., HAAS, W., SCHÜRENBERG, B. (2003): Vogelschutz an Freileitungen. Tödliche Risiken für Vögel und was dagegen zu tun ist: ein internationales Kompendium.
- HAAS, D., NIPKOW, M. (2008): Stromtod von Vögeln. Grundlagen und Standards zum Vogelschutz an Freileitungen ; Stand der Erkenntnisse, gesetzliche Vorgaben, internationale Abkommen, weltweiter Handlungsbedarf.
- HAMANN, H.J., SCHMIDT, K.H., WILTSCHKO, W. (1998): Mögliche Wirkungen elektrischer und magnetischer Felder auf die Brutbiologie von Vögeln am Beispiel einer Population von höhlenbrütenden Singvögeln an einer Stromtrasse. Vogel und Umwelt (9): 215–246.
- HAVELKA, P.; GÖRZE, H.J.; STEFAN, H. (1997): Vogelarten und Vogelschlagopfer an Freileitungen. Ergebnisse von Trassenbegehungen mit Bestandserhebung und Hundesuche. Vogel und Umwelt (9): 93–110.
- HEALTH SCIENCE GROUP (2011): Western Alberta Transmission Line: Health and Environmental Assessment of the Electrical Environment.
- HEIJNIS, R. (1976): Vogels onderweg Ornithologische mortaliteits en milieu aspecten van bovengrondse hoogspanningstraces. Koog a.d. Zaan: 159.

- HEIJNIS, R. (1980): Vogeltod durch Drahtanflug bei Hochspannungsleitungen. *Ökol. Vögel* (2): 111–129.
- HENDRICKSON, R.C. (2005): Space charge drift from a +/- 400-kV direct current transmission line, *Bioelectromagnetics*, 7: 369-379. doi: 10.1002/bem.2250070404.
- HEYNEN, D. (2008): Auskunft per Email über Heißeleiterseile. Schweizer Vogelwarte.
- HMUELV (HESSISCHES MINISTERIUM FÜR UMWELT, ENERGIE, LANDWIRTSCHAFT UND VERBRAUCHERSCHUTZ) (2011): Leitfaden für die artenschutzrechtliche Prüfung in Hessen. Hilfen für den Umgang mit den Arten des Anhangs IV der FFH-RL und den europäischen Vogelarten in Planungs- und Zulassungsverfahren. 2. Fassung.
- HOERSCHELMANN, H. (1997): Wieviele Vögel fliegen gegen Freileitungen? UVP-report. UVP-Report (3): 166–168.
- HOERSCHELMANN, H., HAAK, A., WOHLGEMUTH, F. (1988): Verluste und Verhalten von Vögeln an einer 380-kV-Freileitung. *Ökol. Vögel* (10): 85–103.
- HOFMANN, L. (2012): Technologien zur Stromübertragung – Einführung, Vortrag beim Technik-Dialog der Bundesnetzagentur, Hannover, 17.-18.04.2012. Leibniz Universität Hannover, Institut für Energieversorgung und Hochspannungstechnik, Fachgebiet Energieversorgung. http://www.bundesnetzagentur.de/SharedDocs/Downloads/DE/BNetzA/Sachgebiete/Energie/VortraegeVeranstaltungen/TechnikDialogFolienFreileitgErdkabl/HofmannUniHannoverTechnologieStromuebertragung.pdf?__blob=publicationFile (Zugriff: 05.06.2012).
- HOFMANN, L., MOHRMANN, M., RATHKE, C. (2012): BMU-Studie „Ökologische Auswirkungen von 380-kV-Erdleitungen und HGÜ-Erdleitungen“. Bericht der Arbeitsgruppe Technik/Ökonomie. Cuvillier Verlag, Göttingen.
- HÖLZINGER, J. (1987): Vogelverluste durch Freileitungen. In: Hölzinger, J. (Hrsg.), *Die Vögel Baden-Württembergs*, Teil 1: 202–224.
- HÖTKER, H. (2004): Vögel der Agrarlandschaft. Bestand, Gefährdung, Schutz. Manuskript.
- HÜBNER, G., POHL, J. (2011): Jein zum Netzausbau. *Erneuerbare Energien* (21): 30–33.
- HÜPPOP, O. (2004): Luftfahrzeuge, Windräder und Freileitungen: Störungen und Hindernisse als Problem für Vögel? Festvortrag anlässlich des 40-jährigen Bestehens des DAVVL e.V. *Vogel und Luftverkehr* 24 (2): 27–45.
- IBNI – INGENIERBÜRO NICKEL GMBH (2008): Umweltverträglichkeitsuntersuchung Erdgasfernleitung OPAL Abschnitt Mecklenburg-Vorpommern. Bad Honnef.
- IBNI – INGENIERBÜRO NICKEL GMBH (2008a): Erdgasfernleitung OPAL Abschnitt Mecklenburg-Vorpommern - Untersuchungen nach §42 BNatSchG. Bad Honnef.
- IBU – INGENIERBÜRO SCHÖNEICHE (2007): Planfestellungsverfahren 380-kV-Freileitung Krümmel-Görries Teilabschnitt Mecklenburg-Vorpommern. Umweltverträglichkeitsstudie UVS Stufe II. Berlin Schöneiche.
- ICNIRP (INTERNATIONAL COMMISSION ON NON-IONIZING RADIATION PROTECTION) (1998): Guidelines for limiting exposure to time-varying electric, magnetic, and electro-magnetic fields (up to 300 GHz). *Health Physics* 74 (4): 494–522.

- ICNIRP (INTERNATIONAL COMMISSION ON NON-IONIZING RADIATION PROTECTION) (2009): Guidelines on limits of exposure to static magnetic fields. *Health Physics* 96 (4): 504–514.
- ICNIRP (INTERNATIONAL COMMISSION ON NON-IONIZING RADIATION PROTECTION) (2010): Guidelines for limiting exposure to time-varying electric and magnetic fields (1 Hz to 100 Hz). <http://www.icnirp.de/documents/LFgdl.pdf> (Zugriff: 18.05.2012).
- INSTITUT FÜR ELEKTRISCHE ANLAGEN UND HOCHSPANNUNGSTECHNIK – ABTEILUNG FÜR HOCHSPANNUNGSTECHNIK (2001): Studie im Auftrag der Gemeinde Empersdorf - Teilverkabelung der 380-kV-Leitung Zwaring – Rotenturm (Kurzfassung).
- IPCC (INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE) (2010): Global emission sources of greenhouse gas emissions from industrial processes: SF₆. Good Practice Guidance and Uncertainty Management in National Greenhouse Gas Inventories. Background paper. http://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/gp/bgp/3_9_Global_Sources_Industrial_Processes_SF6.pdf (Zugriff: 19.04.2012).
- JANSS, G.F. E.; FERRER, M. (1997): Rate of Bird Collision with Power Lines: Effects of Conductor-marking and static Wire-marking. *J. Field Ornithol* 69 (1): 8–17.
- JARASS, L., APFELSTEDT, G., OBERMAIR, G. M. (1996): Hochspannungsleitungen. In: Strom/Bunge (Hrsg.) (2009): *Handbuch der Umweltverträglichkeitsprüfung (HdUVP)*. Berlin.
- KAHLERT, J., HÜPPOP, K., HÜPPOP, O. (2005): Construction of a fixed link across Fehmarnbelt: preliminary risk assessment on birds, National Environmental Research Institute.
- KLÖPPEL, D., KRAUSE, C. (1996): Windkraftparks in der Erholungslandschaft: Standortprobleme unter dem Aspekt von Landschaftsbild und Erholungsqualität. Academia Verlag, St. Augustin.
- KOCH, H. (2002): Gasisolierte Übertragungsleitungen der zweiten Generation für das Hochspannung-snetz. e&i Originalarbeiten, Heft 1 Jänner 2002, 119. Jahrgang: 1–5.
- KOCH, H., BRACHMANN, P. (1997): Energieübertragung mit gasisolierten Übertragungsleitungen (GIL) für hohe Energien über große Entfernungen. e&i, 114. Jahrgang, Heft 10: 630–633.
- KOOPS, F.B. J. (1997): Markierung von Hochspannungsfreileitungen in den Niederlanden – Vogel und Umwelt. Sonderheft Vögel und Freileitungen. *Vogel und Umwelt, Zeitschrift für Vogelkunde und Naturschutz in Hessen* (9): 276–278.
- KRAUSE, C., KLÖPPEL, D. (1996): Landschaftsbild in der Eingriffsregelung - Hinweise zur Berücksichtigung von Landschaftsbildelementen – Ergebnisse aus den F + E-Vorhaben 808 01 139 des Bundesamtes für Naturschutz. Bonn - Bad Godesberg: Bundesamt für Naturschutz, (Angewandte Landschaftsökologie).
- KÜHLING, W., MÜLLER, B.R. (2002): Elektromagnetische Felder geringer Stärke und UVP – Ansätze für ein Vorsorgekonzept. *UVP-report* 16 (1+2): 37–39.
- KÜHLING, W. (2011): Konkretisierung der Vorsorge vor magnetischen Wechselfeldern bei der UVP für Hochspannungs-Freileitungen und Erdkabel. *UVP-report* 25 (5): 270–275.
- LANA – LÄNDERARBEITSGEMEINSCHAFT NATURSCHUTZ (2006): Hinweise der LANA zur Anwendung des europäischen Artenschutzrechts bei der Zulassung von Vorhaben und bei Planungen. Beschlossen auf der 93. LANA-Sitzung am 29.05.2006 und gemäß des Beschlusses der 67. UMK vom 26./27. Oktober im Hinblick auf die in Fn. 3 zitierten Entscheidungen des Bundesverwaltungsgerichts ergänzt.

http://www.naturschutzinformationen-nrw.de/artenschutz/web/babel/media/lana_hinweise_artenschutz.pdf (Zugriff: 04.06.2012).

- LANA – LÄNDERARBEITSGEMEINSCHAFT NATURSCHUTZ (2010): Hinweise zu unbestimmten Rechtsbegriffen des Bundesnaturschutzgesetz.
- LAND BRANDENBURG (1997): Brandenburgisches Naturschutzgesetz – BbgNatSchG. Gesetz über den Naturschutz und die Landschaftspflege im Land Brandenburg. Vom 25. Juni 1992 (GVBl.I/92 S.208), zuletzt geändert durch Gesetz vom 18.12.1997.
- LAND NIEDERSACHSEN (2008): Landes-Raumordnungsprogramm Niedersachsen 2008.
- LANGGEMACH, T. (1997): Stromschlag oder Leitungsanflug? Erfahrungen mit Großvogelopfern in Brandenburg. *Vogel und Umwelt* (9): 167–176.
- LAUKHUF PLANUNGSBÜRO (2007): 380-kV-Freileitung zwischen dem Umspannwerk Hamburg/Nord (Schleswig-Holstein) und dem Umspannwerk Dollern (Niedersachsen).
http://www.transpower.de/pages/tso-netzausbau_de/Projekte/HamburgNord_-_Dollern/Trassenverlauf/HHND_Scopingunterlage_hd.pdf.
- LBEG - LANDESAMT FÜR BERGBAU, ENERGIE UND GEOLOGIE (2008): Schutzwürdige Böden Niedersachsen. In: *GeoBerichte* 8/2008. Hannover.
- LFUG U. FÖA - LANDESAMT FÜR UMWELTSCHUTZ UND GEWERBEAUF SICHT RHEINLAND-PFALZ U. FAUNISTISCHÖKOLOGISCHE ARBEITSGEMEINSCHAFT (1997): Planung vernetzter Biotopsysteme. Bereiche Landkreis Kaiserslautern und Stadt Kaiserslautern. Hrsg.: Ministerium für Umwelt und Forsten Rheinland-Pfalz & Landesamt für Umweltschutz und Gewerbeaufsicht Rheinland-Pfalz. Oppenheim.
- LITZBARSKI, B., LITZBARSKI, H. (1996): Zur Situation der Großtrappe *Otis tarda* in Deutschland. *Vogelwelt* (117): 213–224.
- LOSCH, S., NAKE, R. (1989): Direkte und indirekte Flächenansprüche der technischen Infrastruktur als Problem des Bodenschutzes. Bundesforschungsanstalt für Landeskunde und Raumordnung: Bodenbelastung durch die Flächeninanspruchnahme von Infrastrukturmaßnahmen, Seminare/Symposien/Arbeitspapiere H. 34: 1–40, Bonn.
- LOUIS, H.W. (2000): Bundesnaturschutzgesetz – Kommentar der §§ 1 bis 19f, 1. Teil. 2. Auflage. Schapen Edition, Braunschweig.
- MANITOBA HYDRO (2011): Bipole III Transmission Project. Environmental Impact Statement. <http://www.hydro.mb.ca/projects/bipoleIII/eis.shtml> (Zugriff: 18.05.2012).
- MEYBURG, B.U., MANOWSKY, O., MEYBURG, C. (1995): Bruterfolg von auf Bäumen bzw. Gittermasten brütenden Fischadlern *Pandion haliaetus* in Deutschland. *Vogelwelt* (116): 219–224.
- MILJÖMINISTERIET 2010: Improvement of the visual impact of the 400 kV grid. Studie in Kooperation mit Energinet, DK.
- MINISTERIUM FÜR WIRTSCHAFT, ARBEIT UND TOURISMUS MECKLENBURG-VORPOMMERN (2008): 380-kV-Leitung Krümmel-Schwerin/Görries, Umwelfachlicher Variantenvergleich (Freileitung-Kabel), Schwerin.
- ML (NIEDERSÄCHSISCHES MINISTERIUM FÜR ERNÄHRUNG, LANDWIRTSCHAFT, VERBRAUCHERSCHUTZ UND LANDESENTWICKLUNG) (2008): Landes-Raumordnungsprogramm Niedersachsen i. d.

Fassung vom 8. Mai 2008 (nichtamtlich Textfassung, Lesefassung mit Erläuterungen). Referat 303, Raumordnung und Landesentwicklung.

- ML (NIEDERSÄCHSISCHES MINISTERIUM FÜR ERNÄHRUNG, LANDWIRTSCHAFT, VERBRAUCHERSCHUTZ UND LANDESENTWICKLUNG) (2011): Landesplanerische Feststellung. Raumordnungsverfahren mit integrierter Umweltverträglichkeitsprüfung für eine HGÜ-Kableverbindung zwischen Deutschland und Norwegen (Projekt NorGer). Regierungsvertretung Oldenburg.
- MLUR (MINISTERIUM FÜR LANDWIRTSCHAFT, UMWELTSCHUTZ UND RAUMORDNUNG) (2006): Adlerschutz. Lebensraum Wald 16. Forstliche Naturschutz-Tipps.
- MÖCKEL, R., WIESNER, T. (2007): Zur Wirkung von Windkraftanlagen auf Brut- und Gastvögel in der Niederlausitz (Land Brandenburg). www.abbo-info.de (Zugriff: 09.02.2010).
- MOURITSEN, H., RITZ, T. (2005): Magnetoreception and its use in bird navigation. *Current Opinion in Neurobiology* 15: 406–414.
- MUGV – MINISTERIUM FÜR UMWELT, GESUNDHEIT UND VERBRAUCHERSCHUTZ (2003): Tierökologische Abstandskriterien für die Errichtung von Windenergieanlagen in Brandenburg.
- NEITZKE, H.P., OSTERHOFF, J. (2010): Grenzwerte, Vorschriften und Empfehlungen zum Schutz der Bevölkerung vor niederfrequenten und statischen elektrischen und magnetischen Feldern. Studie im Auftrag des Energieforschungszentrums Niedersachsen. ECOLOG Institut Hannover, 11 Seiten.
- NEITZKE, H.P., OSTERHOFF, J., VOIGT, H. (2010): Ressortforschungsberichte zur kerntechnischen Sicherheit und zum Strahlenschutz. Bestimmung und Vergleich der von Erdkabeln und Hochspannungsfreileitungen verursachten Expositionen gegenüber niederfrequenten elektrischen und magnetischen Feldern – Vorhaben 3608S03011. Im Auftrag des ECOLOG-Instituts.
- NEUMANN, C (2012): Pilotinstallation einer 380 kV erdverlegten, gasisolierten Leitung (GIL)-Errichtung, Prüfung und erste Betriebserfahrungen. Stuttgarter Hochspannungssymposium, 6./7. März 2012. Amprion.
- NIEDERSÄCHSISCHER LANDTAG – 16. Wahlperiode (2012): Entwurf einer Verordnung zur Änderung der Verordnung über das Landes-Raumordnungsprogramm Niedersachsen (LROP). Drucksache 16/4704, ausgegeben am 25.04.2012.
- NIEDERSÄCHSISCHE STAATSKANZLEI REFERAT 104 (2007): Fakten zum Netzausbau. Hannover.
- NIEHS (NATIONAL INSTITUTE OF ENVIRONMENTAL HEALTH SCIENCES) (2002): EMF – Electric and Magnetic Fields Associated with the use of Electric Power. 64 Seiten, USA. http://www.niehs.nih.gov/health/assets/docs_f_o/health_effects_from_exposure_to_powerline_frequency_electric_and_magnetic_fields.pdf.
- NLT (NIEDERSÄCHSISCHER LANDKREISTAG) (2009): Hochspannungsleitungen und Naturschutz. Hinweise zur Anwendung der Eingriffsregelung beim Bau von Hoch- und Höchstspannungsfreileitungen und Erdkabeln. Hannover.
- NLWKN (NIEDERSÄCHSISCHER LANDESBETRIEB FÜR WASSERWIRTSCHAFT KÜSTEN- UND NATURSCHUTZ) (2010b): Vollzugshinweise zum Schutz von Brutvogelarten in Niedersachsen. Teil 2: Wertbestimmende Brutvogelarten der EU-Vogelschutzgebiete mit Priorität für Erhaltungs-

und Entwicklungsmaßnahmen – Schwarzstorch (*Ciconia nigra*). – Niedersächsische Strategie zum Arten- und Biotopschutz, Hannover, 7 S., unveröff.

NLWKN (NIEDERSÄCHSISCHER LANDESBETRIEB FÜR WASSERWIRTSCHAFT KÜSTEN- UND NATURSCHUTZ) (2010c): Vollzugshinweise zum Schutz von Brutvogelarten in Niedersachsen. Teil 2: Wertbestimmende Brutvogelarten der EU-Vogelschutzgebiete – Raufußkauz (*Aegolius funereus*). Niedersächsische Strategie zum Arten- und Biotopschutz, Hannover, 6 S., unveröff.

NLWKN (NIEDERSÄCHSISCHER LANDESBETRIEB FÜR WASSERWIRTSCHAFT KÜSTEN- UND NATURSCHUTZ) (2010d): Vollzugshinweise zum Schutz von Brutvogelarten in Niedersachsen. Teil 2: Wertbestimmende Brutvogelarten der EU-Vogelschutzgebiete – Sperlingskauz (*Glaucidium passerinum*). Niedersächsische Strategie zum Arten- und Biotopschutz, Hannover, 6 S., unveröff.

NLWKN (NIEDERSÄCHSISCHER LANDESBETRIEB FÜR WASSERWIRTSCHAFT KÜSTEN- UND NATURSCHUTZ) (2010e): Vollzugshinweise zum Schutz von Brutvogelarten in Niedersachsen. Teil 2: Wertbestimmende Brutvogelarten der EU-Vogelschutzgebiete – Schwarzspecht (*Dryocopus martius*). Niedersächsische Strategie zum Arten- und Biotopschutz, Hannover, 7 S., unveröff.

NLWKN (NIEDERSÄCHSISCHER LANDESBETRIEB FÜR WASSERWIRTSCHAFT KÜSTEN- UND NATURSCHUTZ) (Hrsg.) (2009): Vollzugshinweise zum Schutz von Brutvogelarten in Niedersachsen. Teil 1: Wertbestimmende Brutvogelarten der Vogelschutzgebiete mit höchster Priorität für Erhaltungs- und Entwicklungsmaßnahmen – Rotmilan (*Milvus milvus*). Niedersächsische Strategie zum Arten- und Biotopschutz, Hannover, 7 S., unveröff.

NOHL, W. (1993): Beeinträchtigungen des Landschaftsbildes durch mastenartige Eingriffe – Materialien für die naturschutzfachliche Bewertung und Kompensationsermittlung. Im Auftrag des Ministeriums für Umwelt, Raumordnung und Landwirtschaft des Landes Nordrhein-Westfalen.

NRL (NATIONAL RADIATION LABORATORY, MINISTRY OF HEALTH, NEW ZEALAND) (2008): Electric and magnetic fields and your health. Information on electric and magnetic fields associated with transmission lines, distribution lines and electrical equipment.

OBERFELD, G. (2006): Prüfkatalog des Fachbereiches Umweltmedizin für das Vorhaben 380kV-Freileitung von St. Peter a. H. zum Umspannwerk Salzach Neu (Salzburgleitung) der Verbund-Austrian Power Grid AG. Amt der Salzburger Landesregierung; Fachabteilung Landessantitätsdirektion; Referat Gesundheit, Hygiene und Umweltmedizin. Salzburg.

ORNL (OAK RIDGE NATIONAL LABORATORY, HRSG.) (1997): HVDC Power Transmission Environmental Issues Review. ORNL/Sub/95-SR893/2. Bearbeiter: Bailey, W.H., Weil, D.E., Stewart, J.R.

PAUL, H.-U. (2007): Kabel oder Freileitung? Informationsveranstaltung zum Ausbau des Hoch- und Höchstspannungsnetzes. 20. September 2007, Hildesheim.

PATIL, R.H., LAEGSMAND, M., OLESEN, J.E., PORTER, J.R. (2010): Growth and yield response of winter wheat to soil warming and rainfall patterns. The Journal of Agriculture Science. Online Publication July 01 2010.

PIPER, W. (1992): 380-kV-Leitung Lüneburg (Studorf)-Krümmel. Ornithologische Begleituntersuchung. Unveröffentlichtes Gutachten, IUNF des Verein Jordsand.

- POHLMANN, H. (2012): Innovative Freileitungskonzepte – Erhöhung der Übertragungskapazität. Vortrag beim Technik-Dialog der Bundesnetzagentur, Hannover, 17.-18.04.2012. SAG GmbH, 50hertz.
- POLSTER, K., REGNER, W., RITTINGHAUS, D., MEHLHORN, K. (2009): Machbarkeitsstudie. Südwest Kuppelleitung Halle–Schweinfurt, Abschnitt AltenfeldvRedwitz zur Teilverkabelung am Rennsteig (Thüringer Wald). Auftraggeber: Vattenfall Europe Transmission GmbH.
- REHTANZ, C. (2011): Kurzgutachten zum Thema „Aspekte der Systemintegration von Übertragungstechnologien“ für das Energie-Forschungszentrum Niedersachsen.
- RICHARZ, K. (1998): Vogelverluste an Freileitungen: Massensterben oder Einzelschicksale? DER FALKE 7/8.
- RICHARZ (2004): Fledermäuse – beobachten, erkennen und schützen. Franck-Kosmos Verlags-GmbH & Co. KG, Stuttgart.
- RICHARZ, K. (2001): Taschenbuch für Vogelschutz. 29 Tabellen. Aula-Verl., Wiebelsheim.
- RICHNER, G., MÜHLETHALER U. (2002): Bodenschutz beim Bau der neuen Gasleitung Däniken-Ruswil. Umwelt Aargau, Boden (17): 11–16.
- ROTH, M. UND GRUEHN, D. (2010): Modellierung von Vielfalt, Eigenart und Schönheit von Natur und Landschaft. Kriterien zur Bestimmung von Landschaftsbildqualitäten für große Räume. Natur und Landschaft 42 (4) 2010: 115-120.
- RYSLAVY, T., PUTZE, M. (2000): Zum Schwarzstorch (*Ciconia nigra* L., 1758) in Brandenburg. Naturschutz und Landschaftspflege in Brandenburg 9 (3): 88–96.
- SAG GMBH (2012): Innovative Freileitungskonzepte für den Netzausbau.
- SCHEFFER F., SCHACHTSCHABEL P. (2010): Lehrbuch der Bodenkunde. 16. Auflage, Spektrum Akademischer Verlag, Heidelberg.
- SCHÖFFNER, G., KUNZE, D., SMITH, I. (2006): Gas Insulated Transmission Lines – Successful Underground Bulk Power Transmission for more than 30 Years. Siemens AG.
- SCHUMACHER, A. (2002): Die Berücksichtigung des Vogelschutzes an Energiefreileitungen im novellierten Bundesnaturschutzgesetz. In: Naturschutz in Recht und Praxis - online 1: 2–12, www.naturschutzrecht.net/online-zeitschrift/NRPO_Heft1.pdf.
- SCHÜZ, J., MICHAELIS, J. (2000): Abschlussbericht der EMF II-Studie: Epidemiologische Studie zur Assoziation von Leukämieerkrankungen bei Kindern und häuslicher Magnetfeldexposition. Institut für Medizinische Statistik und Dokumentation, Johannes Gutenberg-Universität Mainz. <http://doris.bfs.de/jspui/handle/urn:nbn:de:0221-201004211560> (Zugriff: 12.06.2012).
- SCHÜZ, J., GRIGAT, J.-P., BRINKMANN, K., MICHAELIS, J. (2001): Residential magnetic fields as a risk for childhood acute leukemia, results from a German population-based case-control study. International Journal of Cancer 91 (5): 728–735.
- SCHWEIZERISCHER BUNDESRAT (2009): Verordnung über den Schutz vor nichtionisierender Strahlung (NISV) vom 23. Dezember 1999 (Stand am 1. September 2009).
- SCOTT, R.E., ROBERTS, L.J., CADBURY, C.J. (1972): Bird deaths from power lines at Dungeness. British Birds 65: 273–286.

- SELLIN, D. (2000): Ein Jahr unter Hochspannung – Beobachtungen zu den Auswirkungen von Freileitungen auf die Vogelwelt. Ornithologischer Rundbrief für M-V(42): 53–67.
- SELLIN, D. (2010): Anmerkungen zu den Untersuchungen an einer 380-kV-Freileitung nahe des Kernkraftwerkes (KKW) Lubmin. Email vom 21.02.2010, Greifswald.
- SIEMENS AG (2010): Gas-insulated transmission lines (GIL). High power transmission technology. http://www.energy.siemens.com/hq/pool/hq/power-transmission/gas-insulated-transmission-lines/GIL_e.pdf (Zugriff: 19.04.2012).
- SILNY, J. (1997): Die Fauna in den elektromagnetischen Feldern des Alltags. Vogel und Umwelt (9): 29–40.
- SILNY, J. et al. (2001-2011): Forschungsberichte des Forschungszentrums für Elektromagnetische Umweltverträglichkeit (femu). <http://www.femu.rwth-aachen.de/publikationen.php?l=g>.
- SOSSINKA, R. (2000): Hochspannungsfreileitungen in der Landschaft – für Vögel mehr als ein ästhetisches Problem. Forschung an der Universität Bielefeld - Forschung im Dienst der Umwelt (22): 19–22.
- SPONAGEL, H., GROTTENTHALER, W., HARTMANN, K. –J., HARTWICH, R., JANETZKOW, P., JOISTEN, H., KÜHN, D., SABEL, K. –J., TRIDL, R. (2005): Bodenkundliche Kartieranleitung. 5. Auflage. Hannover: Schweizerbart'sche Verlagsbuchhandlung.
- SSK - STRAHLENSCHUTZKOMMISSION (2001): Grenzwerte und Vorsorgemaßnahmen zum Schutz der Bevölkerung vor elektromagnetischen Feldern. Empfehlung der Strahlenschutzkommission mit wissenschaftlicher Begründung. – Berichte der Strahlenschutzkommission (SSK) des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit Heft 29 /2001. München, Jena.
- SSK (STRAHLENSCHUTZKOMMISSION) (2004): Elektromagnetische Felder neuer Technologien. Empfehlung der Strahlenschutzkommission zum Schutz der Bevölkerung und Statusbericht der Strahlenschutzkommission. – Berichte der Strahlenschutzkommission (SSK) des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit Heft 41 (2004). Bonn.
- SSK (STRAHLENSCHUTZKOMMISSION) (2008): Schutz vor elektrischen und magnetischen Feldern der elektrischen Energieversorgung und -anwendung. Empfehlung der Strahlenschutzkommission. Verabschiedet in der 221. Sitzung der Strahlenschutzkommission am 21./22.02.2008.
- SSK (STRAHLENSCHUTZKOMMISSION) (2008a): Jahresbericht 2007 der Strahlenschutzkommission.- Berichte der Strahlenschutzkommission (SSK) des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit. Heft 55/2008. Berlin.
- SSK (STRAHLENSCHUTZKOMMISSION) (2009): Jahresbericht 2008 der Strahlenschutzkommission. – Berichte der Strahlenschutzkommission (SSK) des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit Heft 59 (2009). Berlin.
- TENNET (2007): In ontwikkeling: Nieuwe hoogspanningslijn met gereduceerd magnetisch veld. http://www.tennet.org/english/images/TT%20Wintrack_tcm43-15046.pdf (Zugriff: 22.05.2012).
- TENNET (2011): 380-kV-Leitung Simbach – Landesgrenze (– St. Peter). Unterlagen zum Raumordnungsverfahren. Erläuterungsbericht und allgemein verständliche Zusammenfassung.

http://109.235.143.206/site/binaries/content/assets/netzausbau/projekte/simbach-st-peter/380kv_si-spe_2011-05-18_band_a_eb-avz.pdf (Zugriff 04.06.2012).

- TRANSPower (2010): Raumordnungsverfahren zur 380-kV-Höchstspannungsverbindung Wahle – Mecklar in Niedersachsen. Erläuterungsbericht und allgemein Zusammenfassung. Braunschweig.
- TRAUTNER, J. (2008): Artenschutz im novellierten BNatSchG – Übersicht. In: Institut für Naturschutz und Naturschutzrecht Tübingen (Hg.): Naturschutz in Recht und Praxis - online (Heft 1), Heft 1: 2–20.
- TRÜBY, P. U. UThER, D. (2011): Wärmeemission von Hochspannungserdkabeln -Ergebnisse eines Feldexperiments zur Einschätzung der Auswirkungen auf den Boden. Powerpoint-Präsentation über eine Studie im Auftrag der Amprion GmbH. TU-Hannover 22.2.2011.
- URS CORPORATION (2006): Environmental Impact Report for the proposed Trans Bay Cable Project. Volume 1, Sections 1.0-11-0; Appendix A. Draft.
- UTHER, D., BRAKELMANN, H., STAMMEN, J., ALDINGER, E., TRÜBY, P. (2009): Wärmeemission bei Hoch- und Höchstspannungskabeln - Freilandexperiment und Simulation. VWEW Energieverlag GmbH, Sonderdruck Nr. 6290 aus EW 2009 H. 10, S. 66–74.
- VATTENFALL (2005): Höchstspannungsnetze: Freileitung oder Kabel? Eine Analyse der Vattenfall Europe AG mit dem Beispiel des 380-kV-Kabelprojekts in Berlin.-Vattenfall Europe: Wissen 01/05.
- VDE VERBAND DER ELEKTROTECHNIK ELEKTRONIK INFORMATIONSTECHNIK E.V. (2010): Übertragung elektrischer Energie. VDE- Positionspapier.
- VICTOR, D.G., MACDONALD, G.J. (1999): A model for estimating future emissions of sulfur hexafluoride and perfluorocarbons. Climate Change 42: 633-662.
- WEYER, H., MANN, T, SCHNEIDER, D. (2012): BMU-Studie „Ökologische Auswirkungen von 380-kV-Erdleitungen und HGÜ-Erdleitungen“. Bericht der Arbeitsgruppe Recht, 204 S. Cuvillier Verlag, Göttingen.
- WHO – WORLD HEALTH ORGANISATION (2001): Elektromagnetische Felder und öffentliche Gesundheit. – International EMF Project.
<http://www.who.int/mediacentre/factsheets/fs263/en> (Zugriff: 08.09.2010).
- WHO – WORLD HEALTH ORGANISATION (2006): Research Agenda for Static Fields.
http://www.who.int/peh-emf/research/smf_research_agenda_2006.pdf (Zugriff: 13.06.2012).
- WHO 2010: International EMF-Project. EMF World Wide Standards.
<http://www.who.int/docstore/peh-emf/EMFStandards/who-0102/Worldmap5.htm> (Zugriff: 08.03.2010).
- WIRTSCHAFTSMINISTERIUM DES LANDES BADEN-WÜRTTEMBERG (2001): Windfibel: Windenergienutzung, Technik, Planung und Genehmigung. Stuttgart.
- ZEHFUß, H. D. (2005): Energieversorgungsunternehmen in Rheinland-Pfalz – ein Beitrag zum Weißstorchschutz (I). Pollichia-Kurier 21 (1): 15–20.