

Teil IV

Elektrische und magnetische Felder der elektrischen Energieversorgung



Überblick Teil IV

1. Einleitung
2. Hochspannungsfreileitungen und Erdkabel
3. Elektrische und magnetische Felder
4. Messtechnik
5. Biologische Wirkungen und Grenzwerte
6. Aktueller Forschungsstand



1. Höchstspannungsnetz (Stand 2020)



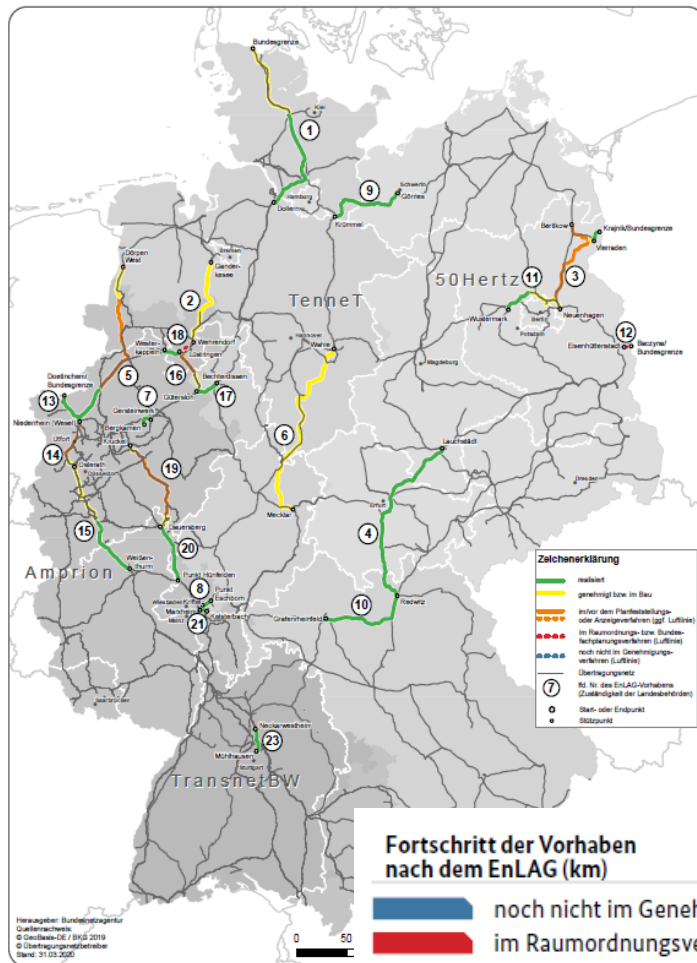
Leistungsverbindungen

- 380 kV / in Bau / in Planung
- 220 kV
- 150 kV / in Bau / in Planung
- HGÜ-Leitung / in Bau / in Planung
- Umspannwerke
- HGÜ-Stationen
- Städte

- "Höchstspannungsnetz" = 380 kV und 220 kV
- eng verbunden mit Nachbarländern

Quelle: VDE FNN 2020

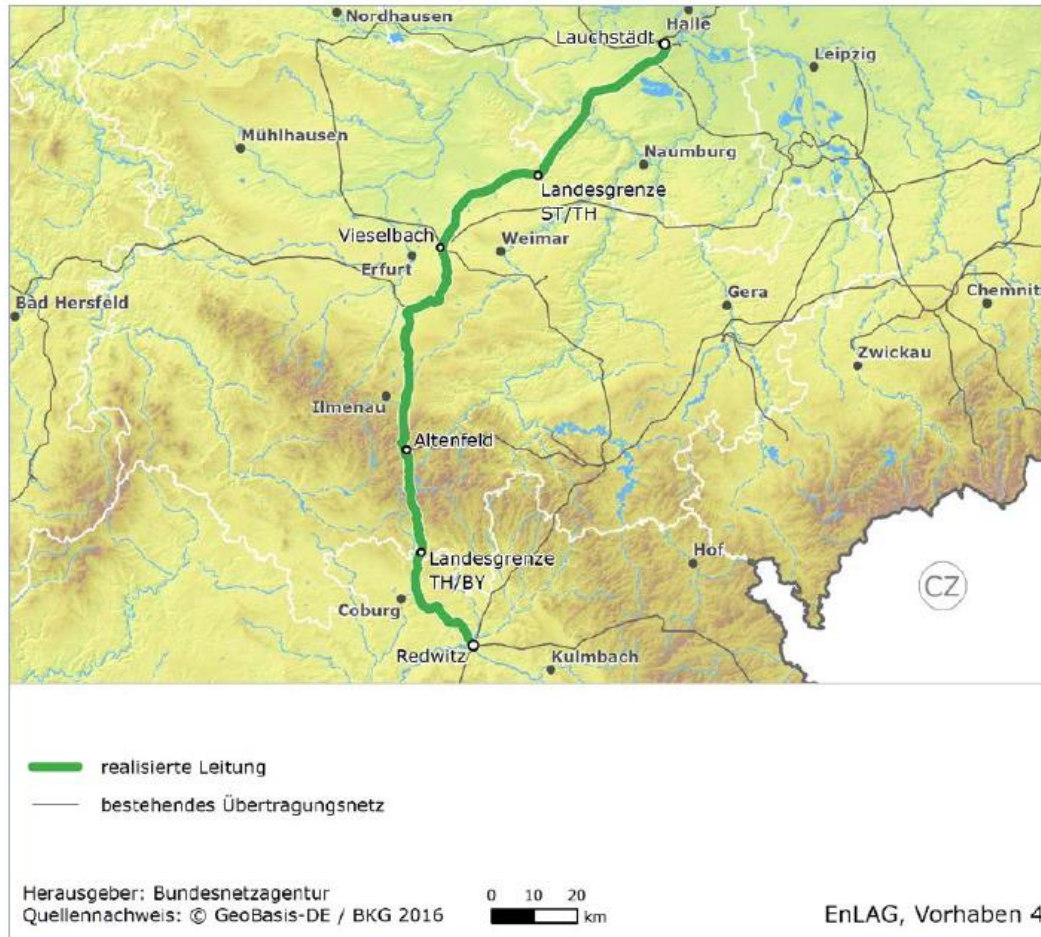
Energieleitungsausbaugesetz (EnLAG)



- Projekte des Energieleitungsausbaugesetzes (EnLAG), Stand Q1/2020
- Gesamtbedarf: ca. 1.825 km
- derzeit ca. 484 km genehmigt und ca. 913 km realisiert
- Realisierungszeiträume typ. 10 Jahre
- Widerstände bei Bürgern, Kommunen, Umwelt- und Naturschutzverbänden

Quelle: Bundesnetzagentur, 2020

EnLAG Nr. 4: Lauchstädt - Redwitz

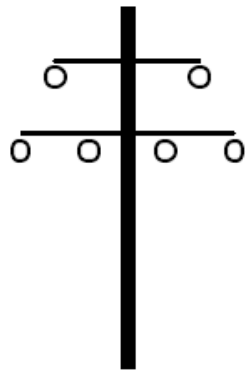


Status:

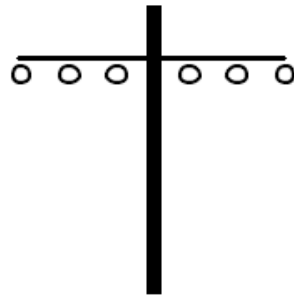
Die Leitung ist seit 2017 in Betrieb

2. Freileitungen

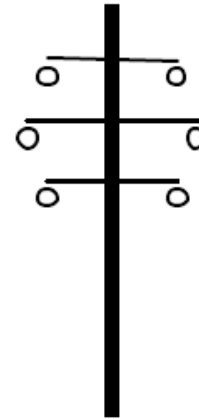
- Für Höchst- (220 und 380 kV) und Hochspannungsebene (>60 bis <220 kV)
- Energieübertragung als Drehstrom (Alternative: HGÜ)
- Mastbauformen:



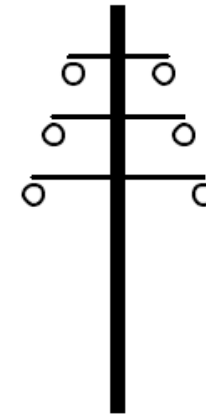
Donaumast



Einebenenmast



Tonnenmast



Tannenbaummast

Quelle: Ecolog 2010

Mastbauformen

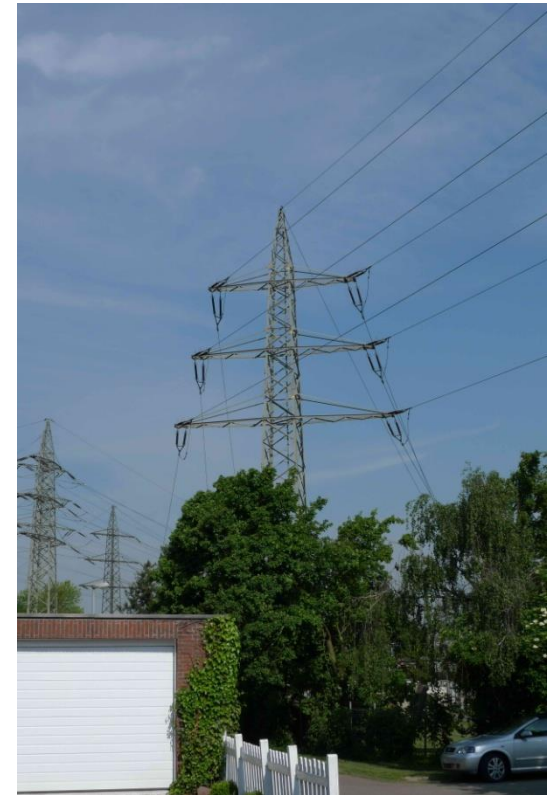
Donaumast



Einebenenmast



Tannenbaummast



Quelle: de.academic.ru



Fachgebiet
HF- und Mikrowellentechnik
www.tu-ilmenau.de/hmt

Dr. Chr. Bornkessel SS2023 Folie IV.7


TECHNISCHE UNIVERSITÄT
ILMENAU

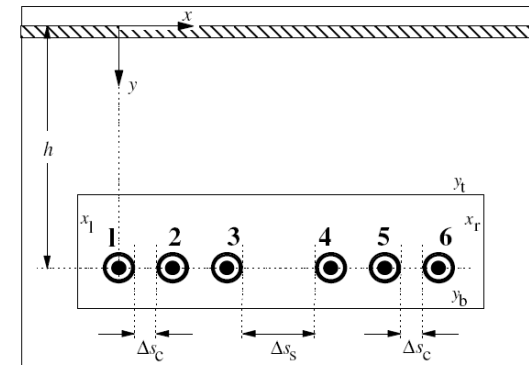
Donau- mit Einebenenmast



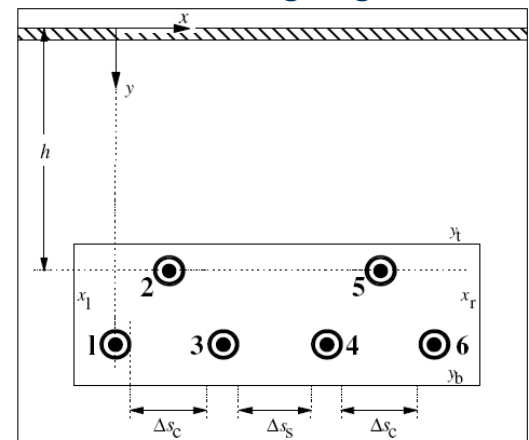
Erdkabel

- Sehr selten auf Höchstspannungsebene; nennenswerter Anteil bei 110 kV Ebene
- Öl- bzw. Ölpapierkabel, heute eher VPE- bzw. VPE/XLPE-Kabel (vernetztes Polyethylen-Isolierung), auch GIL (gasisolierte Rohrleitung)
- Verlegung direkt im Boden oder in Rohren bzw. Tunneln; Verlegetiefe ca. 0,6 – 2,0 m

Flach- bzw. Einebenenverlegung



Dreiecksverlegung



Quelle: Brakelmann 2010

380 kV Kabelanlage in Berlin



Quelle: Oswald 2009



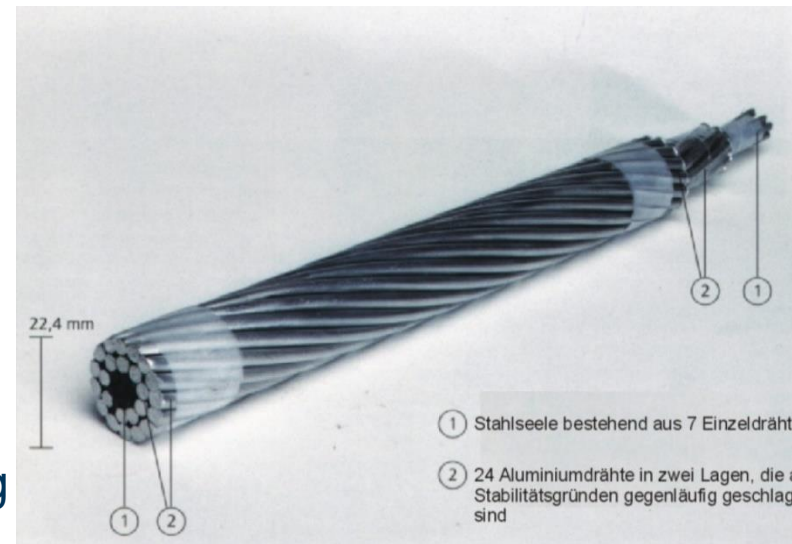
Fachgebiet
HF- und Mikrowellentechnik
www.tu-ilmenau.de/hmt

Dr. Chr. Bornkessel SS2023 Folie IV.10


TECHNISCHE UNIVERSITÄT
ILMENAU

Eigenschaften von Drehstrom-Freileitungen

- Einfach, bewährt und robust
- Kostengünstig
- Sehr hohe Nutzungsdauern
 - > 80 Jahre
- Hohe Grenzleistung
 - > 3000 MVA bei 380 kV
 - Überlastungsreserve durch Ausnutzung klimatischer Verhältnisse
- Hohe Verfügbarkeit; kurze Reparaturdauer
 - aber höhere Empfindlichkeit gegenüber äußeren Einflüssen
- Geringe Kapazität → wenig Blindleistungskompensation
- Große Isolationsabstände der Leitungen
 - breite Trassen, große „Sichtbarkeit“
 - größere el. + magn. Immissionen außerhalb der Trassenmitte als bei Kabel



Quelle: Hofmann, 2012

Eigenschaften von Erdkabeln

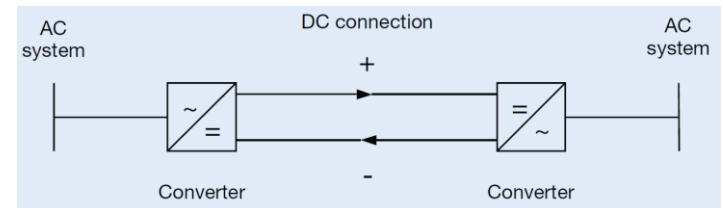
- **Kostenintensiv**
 - Drehstrom-Kabel ca. 3-4 mal teurer,
HGÜ-Kabel ca. 2-9 mal teurer als Drehstrom-Freileitungen
- **Begrenzte Übertragungskapazität**
 - ca. 1000 MVA bei 380 kV
- **Problematik Erdreicherwärmung**
- **Muffenstationen max. alle 900 m**
- **Geringere Empfindlichkeit gegenüber äußeren Einflüssen**
 - aber höherer Reparaturaufwand+Ausfallzeit als bei Freileitung
- **Höhere Kapazität** → Blindleistungskompensation ca. alle 70 km
- **Geringe Isolationsabstände der Leitungen**
 - schmale Trassen, geringe „Sichtbarkeit“
 - geringere elektrische und magnetische Immissionen außerhalb der Trassenmitte als bei Freileitungen, aber höhere Felder in Trassenmitte



Quelle: Nexus

HGÜ im Vergleich zu Drehstrom

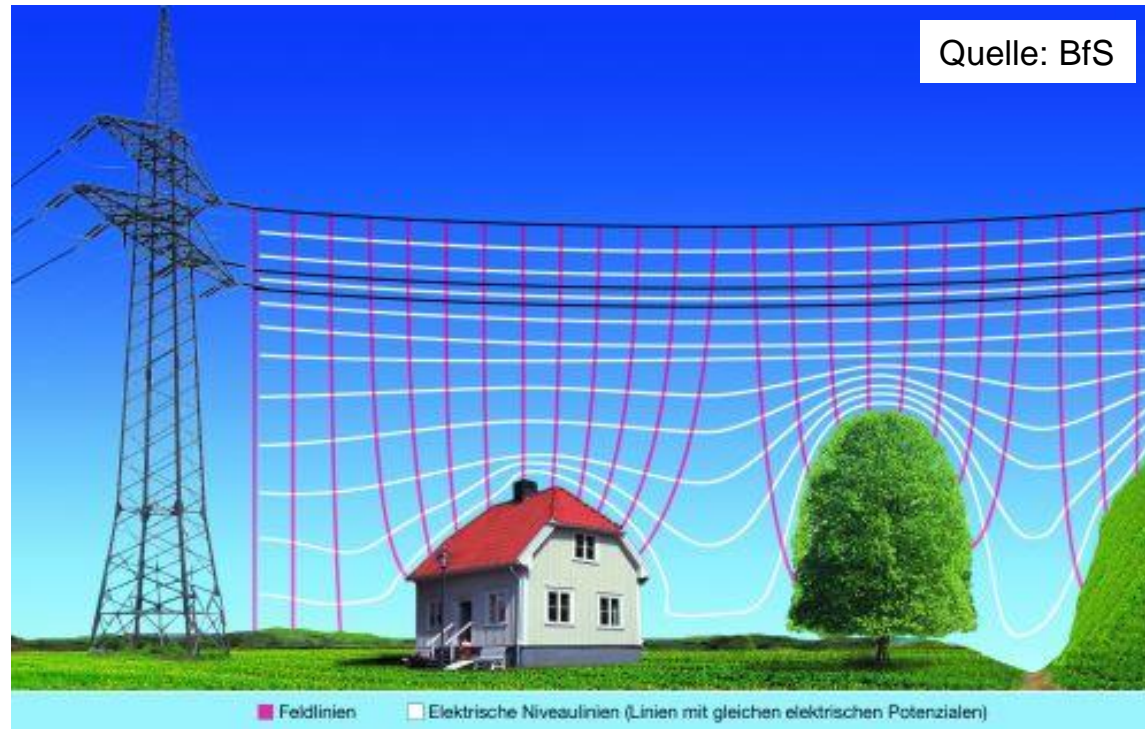
- Vorteile HGÜ gegenüber Drehstromleitung
 - Entfall der kapazitiven Blindströme, deswegen keine Kompensationsspulen notwendig
 - Isolierung weniger aufwendig (keine dielektr. Verluste)
 - bessere Ausnutzung des Leitungsquerschnittes (kein Skineneffekt)
- Nachteile HGÜ gegenüber Drehstromleitung
 - hohe Kosten der Stromrichterstationen (+Platzbedarf)
 - schlechtere Kompensation der Magnetfelder
 - Abzweige schwierig (Integration in Verbund schwierig)



Quelle: DocPlayer.org

→ HGÜ-Einsatz vor allem bei großen Entfernungen über Land (> 500 km) oder unter Wasser (> 30 km)

3. Elektrische Feldstärke einer Hsp.-Leitung



- E-Feldstärke hängt von Spannung und Abstand zur Leitung ab
- Rasche Abnahme des Feldes mit zunehmender Entfernung.
- **Abschirmung** und Verzerrung durch Bauwerk und Vegetation

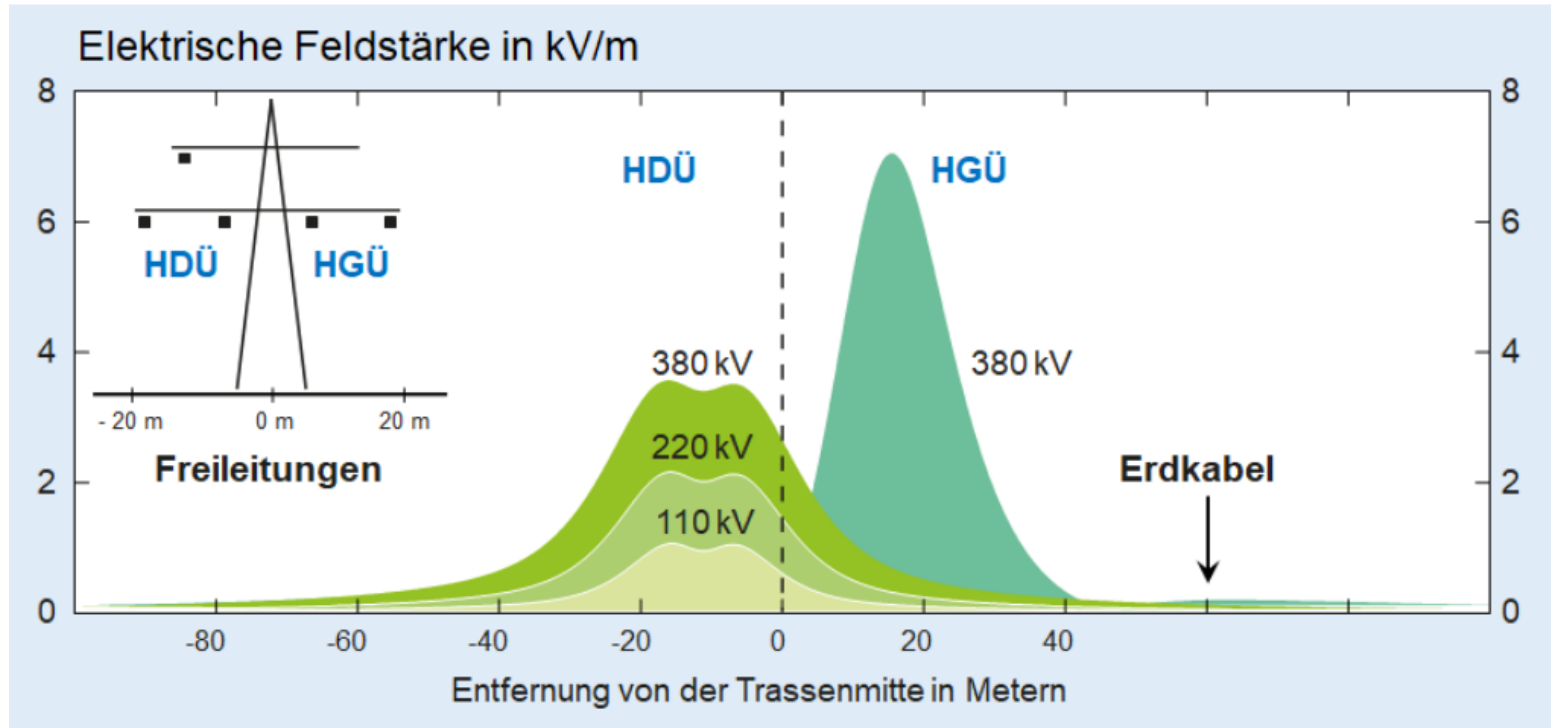
Elektrische Felder bei HWÜ Freileitung und Kabel

- verursacht durch Potenzialunterschied Phase - Erde
- Freileitung
 - maximal an der Stelle des tiefsten Durchhangs
 - direkt unter 380 kV-Leitung können 50 Hz-Grenzwerte (5 kV/m) überschritten werden
 - maßgeblich abhängig von Spannungsebene
 - bis zu einem gewissen Maße lastabhängig (Durchhang)!
 - werden durch elektrisch leitfähige Gebilde (Bäume, Häuser) stark abgeschirmt
- Erdkabel
 - quasi Null, da Phasenleiter mit elektrisch leitfähigem Schirm umgeben sind



E-Felder: Vergleich verschiedener Technologien

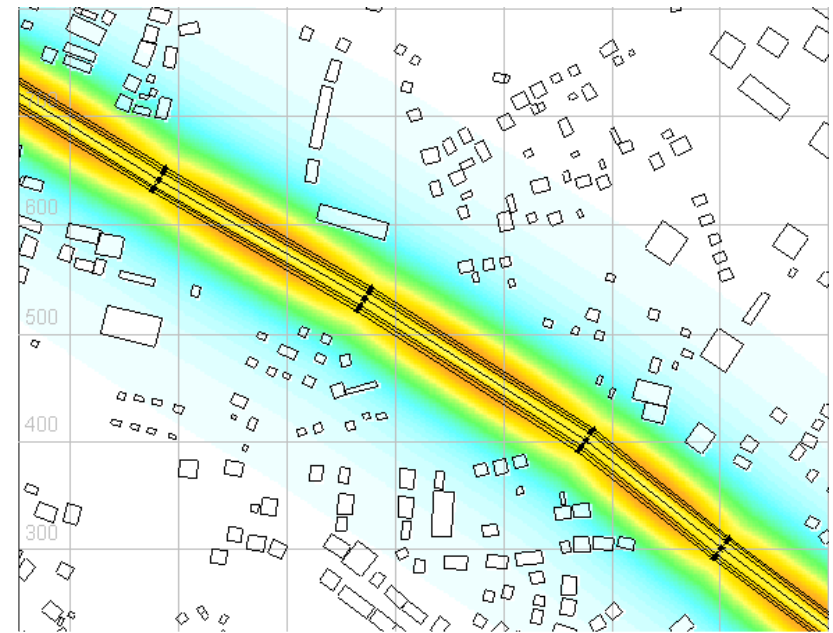
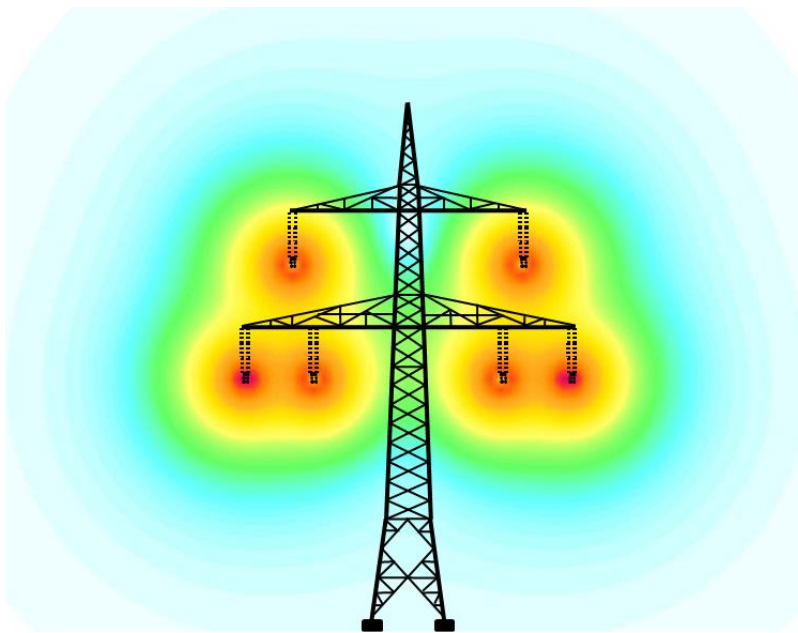
Quelle: Fachverband für Strahlenschutz



HDÜ: Hochspannungs-Drehstrom-Übertragung || HGÜ: Hochspannungs-Gleichstrom-Übertragung



Magnetische Flussdichte einer 50 Hz Freileitung



- Flussdichte am Erdboden ist ***direkt unter den Leiterseilen*** maximal
- Rasche Abnahme des Feldes mit zunehmender Entfernung
- ***Keine Dämpfung*** durch Bauwerk und Vegetation.

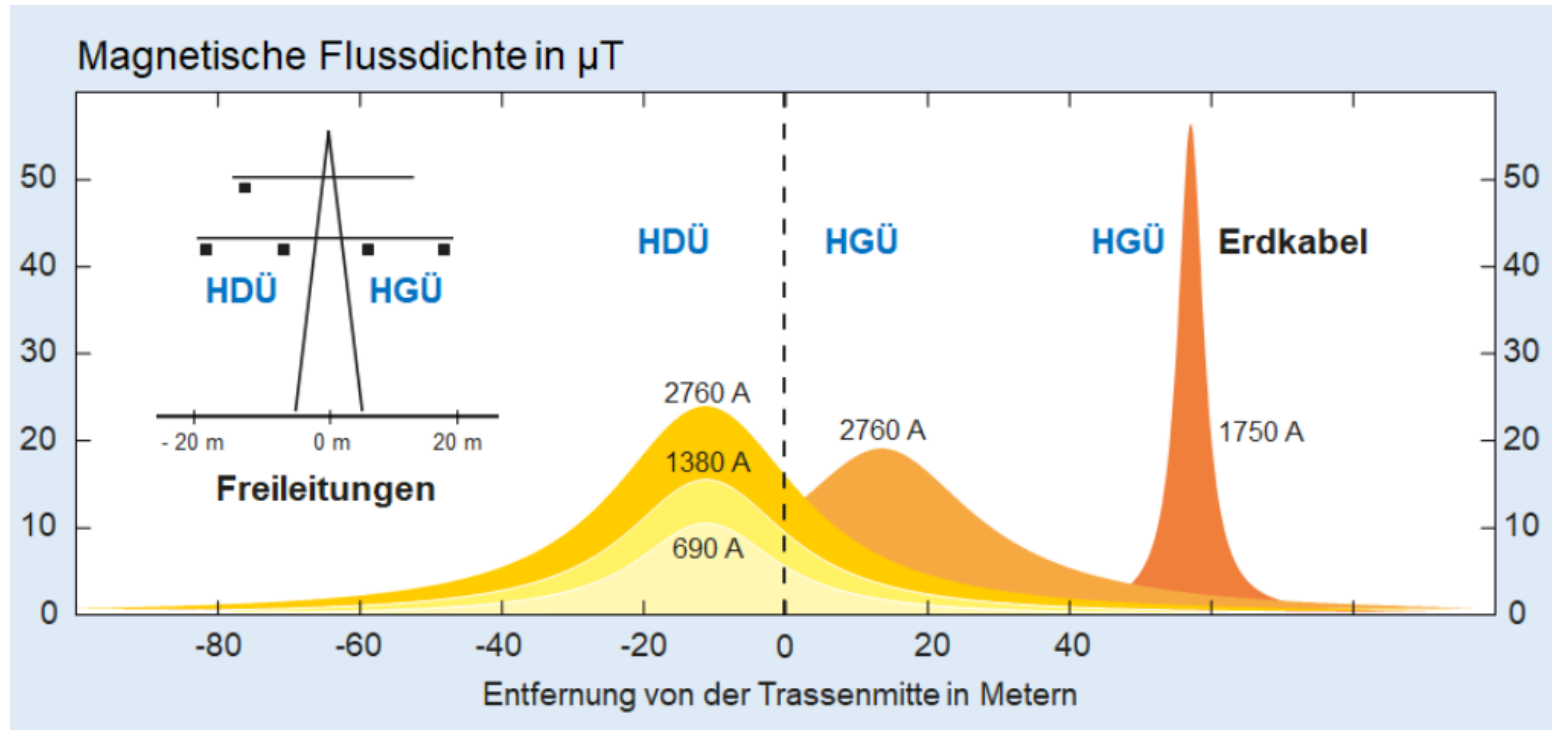
Magnetische Felder bei HWÜ Freileitung und Kabel

- verursacht durch Ströme → lastabhängig!
- Freileitung
 - maximal an der Stelle des tiefsten Durchhangs
 - auch bei thermischem Grenzstrom unterhalb des Grenzwertes (26. BImSchV 50 Hz: 100 μ T)
 - kann minimiert werden durch Mastbauform und Leiteranordnung
- Erdkabel
 - relevante Expositionen vorhanden (Erdreich schirmt Magnetfelder nicht ab!)
 - prinzipiell gute Kompensation durch enge Verlegung
 - erhöht im Bereich von Muffenstationen



H-Felder: Vergleich verschiedener Technologien

Quelle: Fachverband für Strahlenschutz



HDÜ: Hochspannungs-Drehstrom-Übertragung || HGÜ: Hochspannungs-Gleichstrom-Übertragung



Messergebnisse Magnetfeld HWÜ (Ecolog 2010)

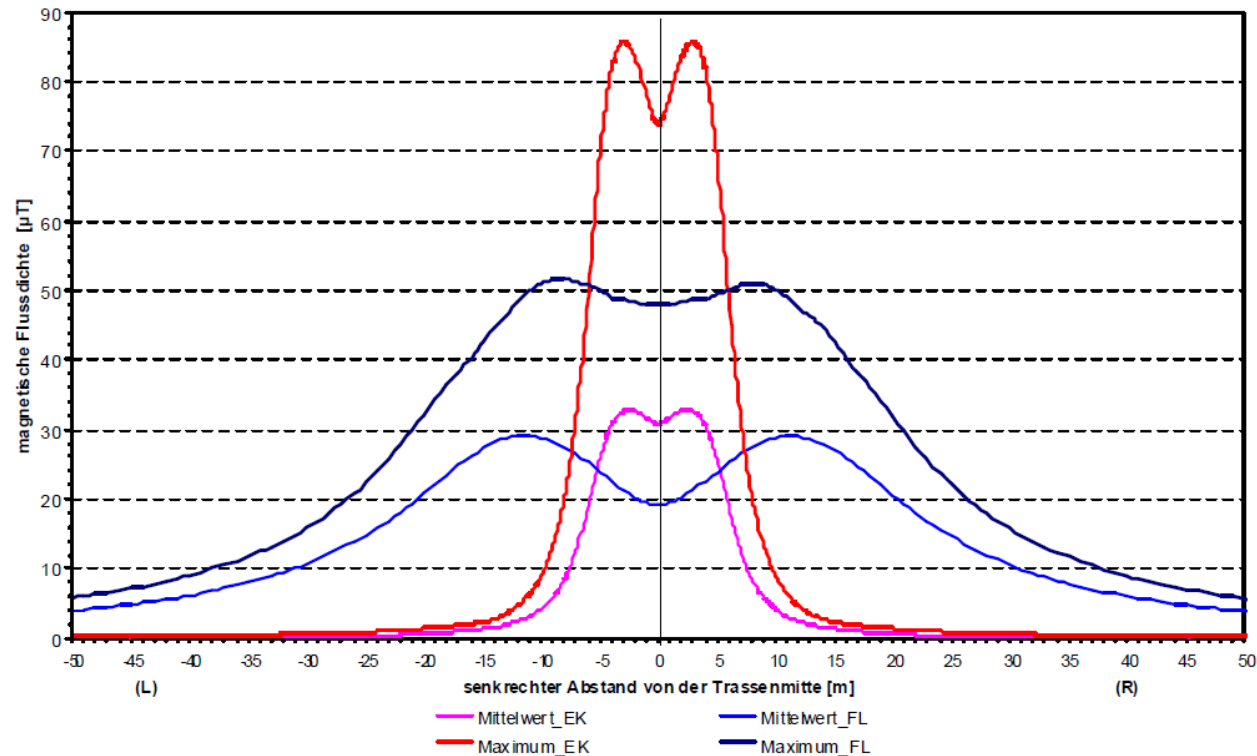
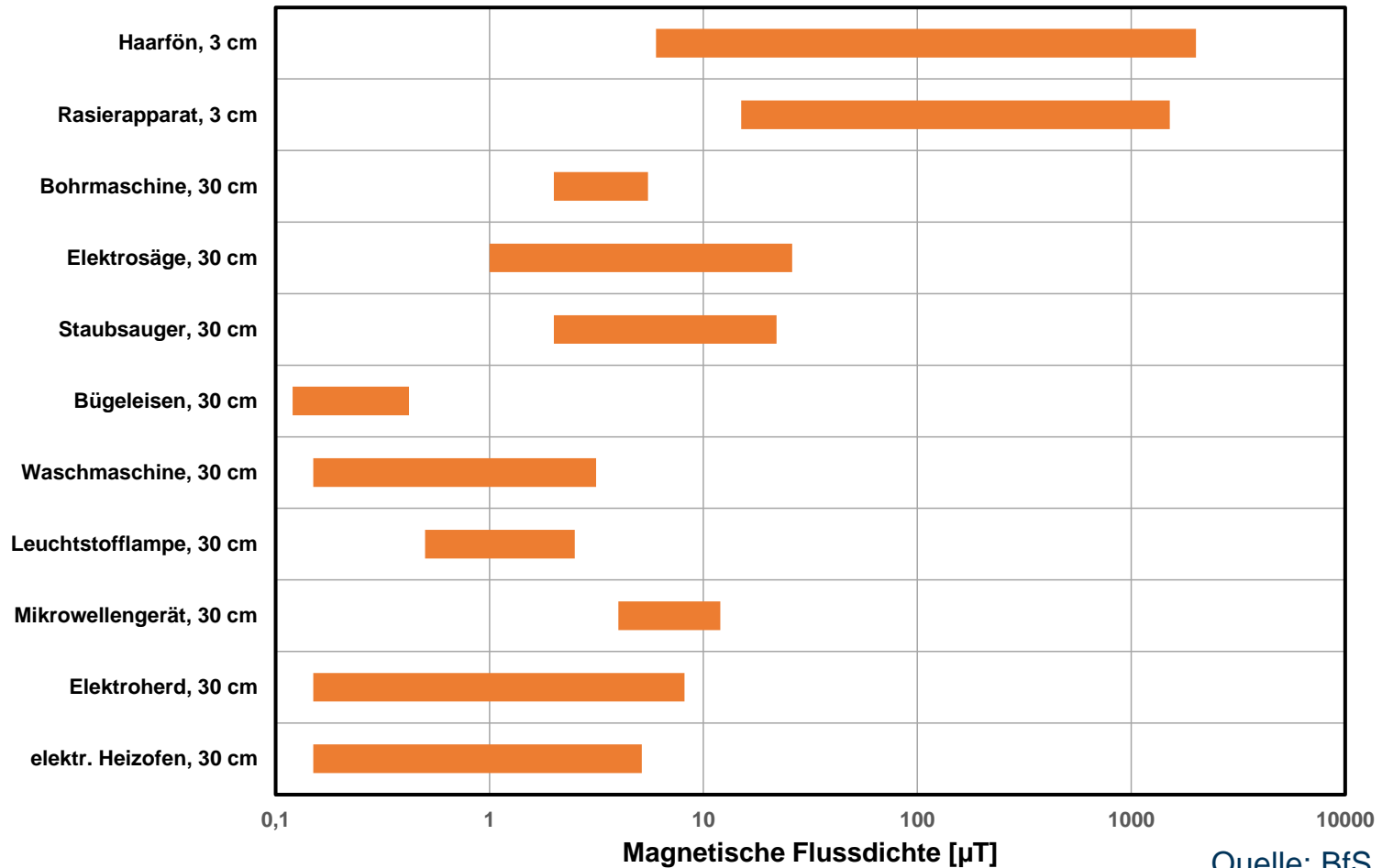


Abbildung 3/225b

Magnetische Felder an 380/220 kV Freileitungs- (FL) und Erdkabeltrassen (EK): Maximalwert- und Mittelwert-Querprofile der für den maximalen Betriebszustand berechneten magnetischen Flussdichte aus allen hier behandelten Freileitungs- und Erdkabelkonfigurationen (FL: 15 Konfigurationen, EK: 8 Konfigurationen)

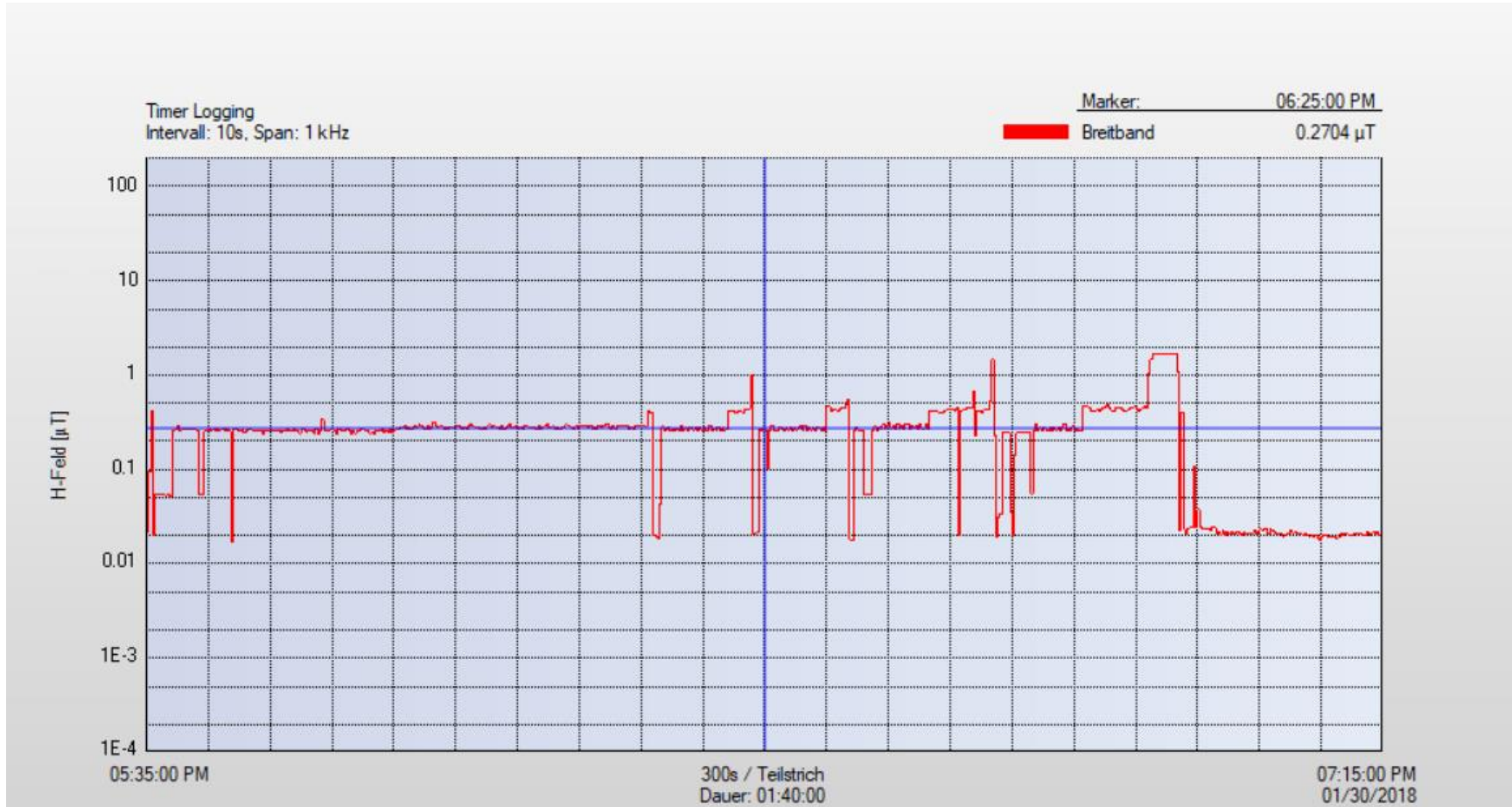
Vergleich: Magnetfelder im Haushalt



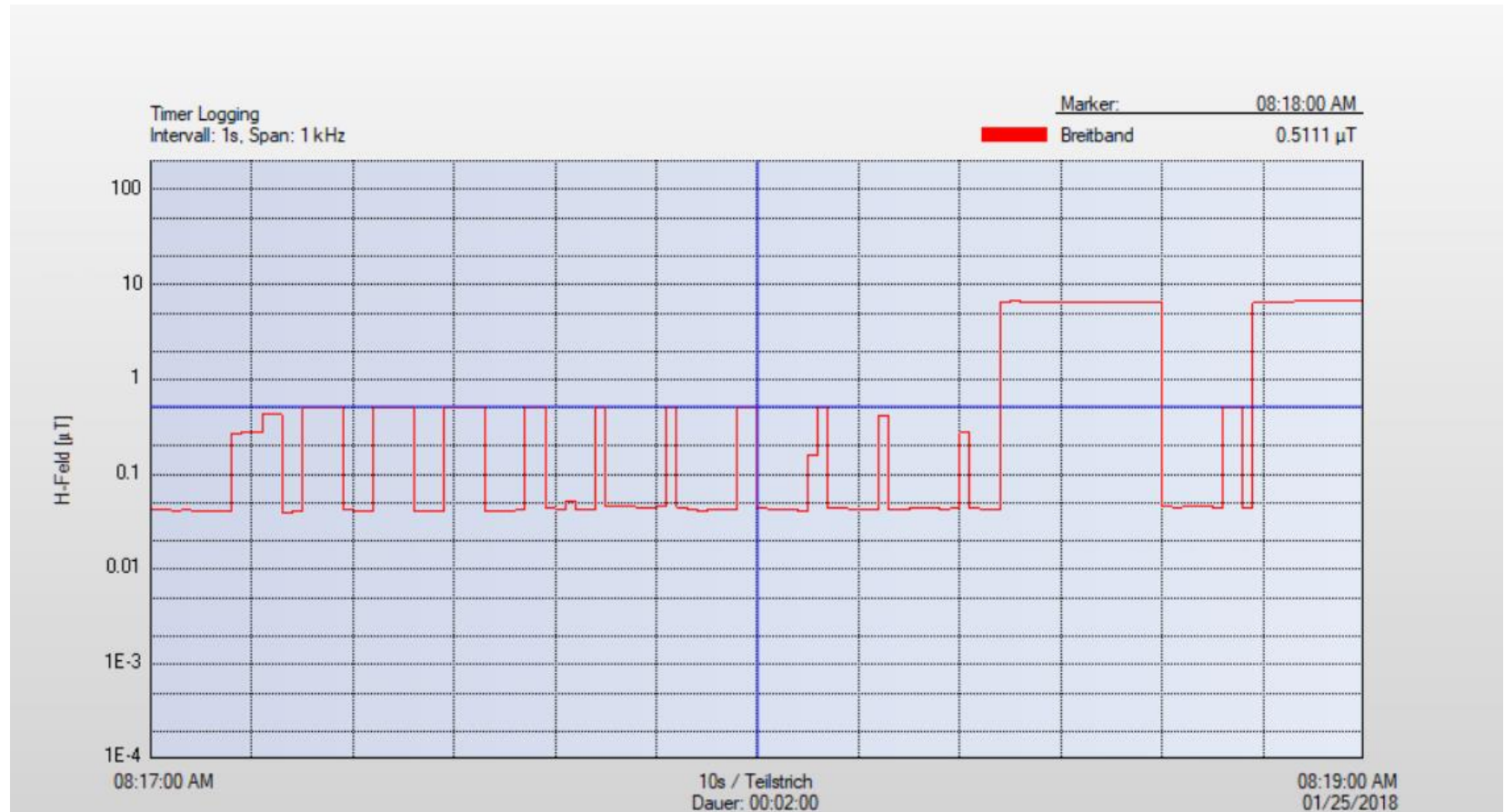
Quelle: BfS, LUBW/LfU



Beispiel: Waschmaschine (ca. 50 cm)



Beispiel: Kaffeemaschine (ca. 30 cm)



Mittlere Magnetfeldimmission im Alltag

- Studie „Erfassung der niederfrequenten magnetischen Exposition der Bürger in Bayern“
- 24 h-Messungen mit Dosimeter 16 2/3 und 50 Hz an 2000 Bürgern, 1996-1997
- Mittlere Exposition 50 Hz:
 - Arithmetischer Mittelwert: 0,101 μT
 - Median: 0,047 μT
- Grenzwert 50 Hz (100 μT) nur bei wenigen Individuen und für wenige Sekunden überschritten (primär Arbeitsplätze)
- Aktuelle Studie durch BfS 2018 vergeben



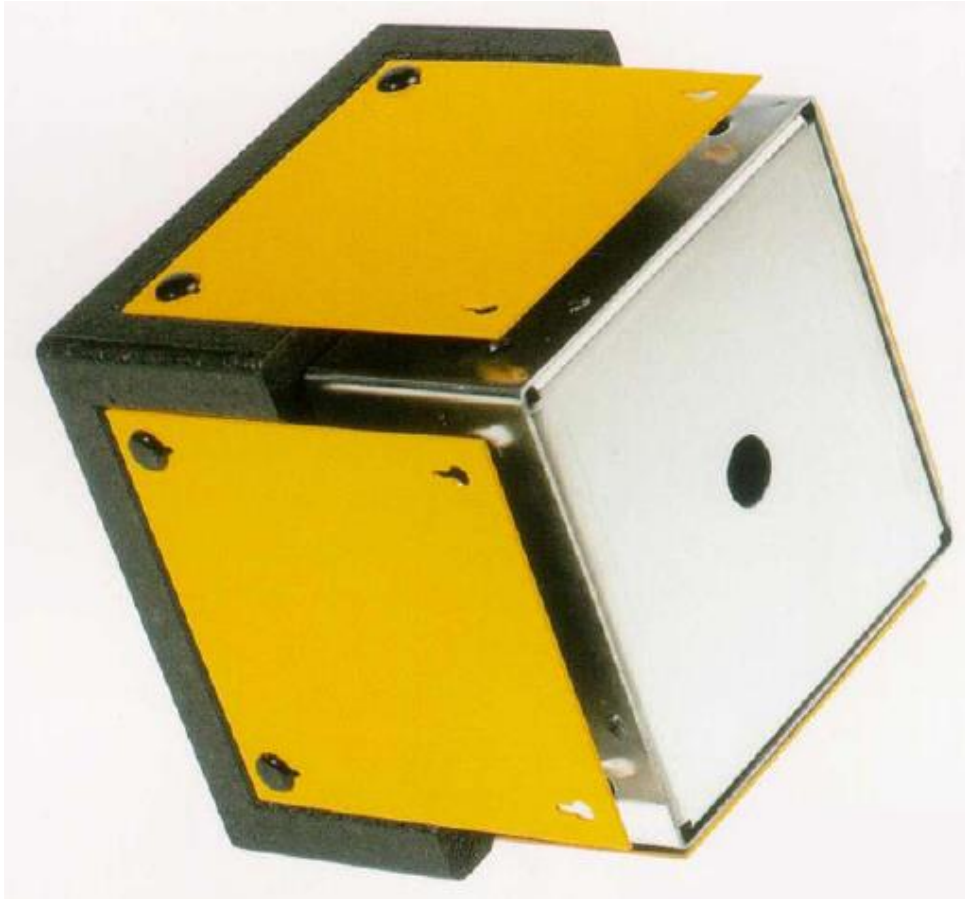
4. Messung von NF-Feldern



Quelle: Narda

- Grundgerät mit Sonden für elektrisches und magnetisches Feld
- dreidimensionale Messung
- Anzeige absolut oder grenzwertbezogen
- verschiedene Frequenzfilter
- Schwierigkeit beim Hochrechnen auf maximale Anlagenauslastung bei mehreren Systemen unterschiedlicher momentaner Auslastung

Elektrische Feldsonde



- 3 Platten orthogonal angeordnet
- dreidimensionale Messung
- die unterschiedlichen Potenziale der Platten werden im Gerät ausgewertet (Plattenkondensator)
- Anbindung der Sonde an das Grundgerät per LWL

Quelle: Steimel 2005

Magnetfeldsonde



Quelle: Steimel 2005

- 3 Spulen orthogonal angeordnet (100 cm^2)
- dreidimensionale Messung
- durch Alufolie gegen Einwirkung von elektrischen Feldern geschützt

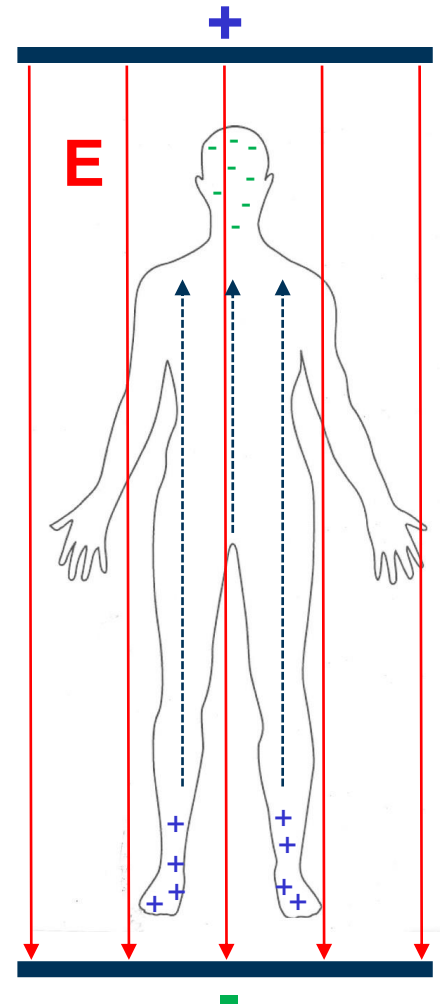
5. Wirkmechanismen statischer Felder (HGÜ)

- Elektrische Felder **E**
 - führen zu Ladungsverschiebungen an der Körperoberfläche (Influenz, Aufrichten von Körperbehaarung); das Körperinnere wird feldfrei
 - hohe Feldstärken können an der Körperoberfläche zu Mikroentladungen führen (indirekte Wirkung)
 - Keine direkte gesundheitliche Wirkung bekannt, daher kein Grenzwert
- Magnetische Felder **H** bzw. Flussdichten **B**
 - können aufgrund der Lorentzkraft bei bewegten Ladungen (Blutfluss) eine Ladungstrennung/ Spannung hervorrufen
 - Keine *direkte* gesundheitliche Wirkung unter 4 T
 - Störwirkung auf Herzschrittmacher (~ 1 mT) als *indirekte* Wirkung



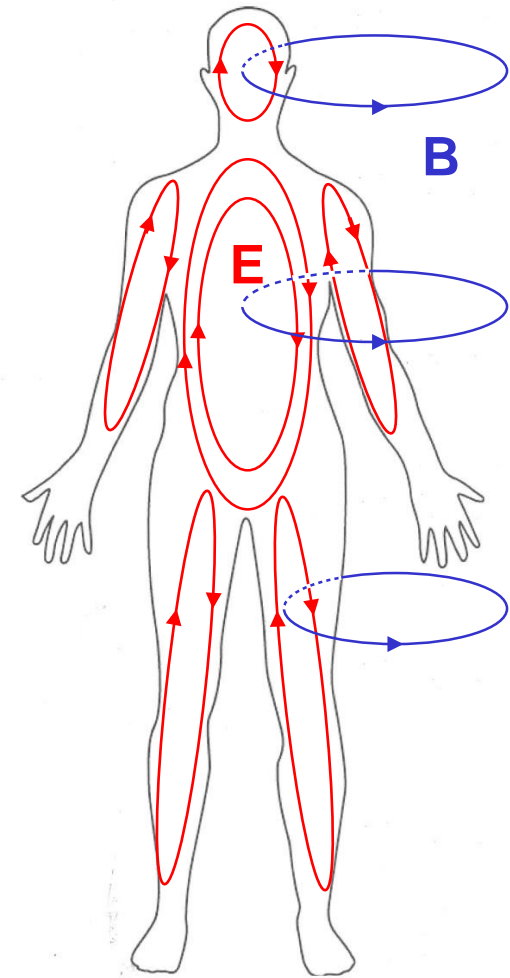
Wirkmechanismen elektrischer Wechselfelder

- Elektrische Wechselfelder **E** führen zu Ladungsverschiebungen an der Körperoberfläche (Influenz) und zu **Ausgleichsströmen** im Körperinneren.
- Diese können Reizwirkungen sowie Phosphene hervorrufen (direkte Wirkungen).
- Zusätzlich kann es bei ausreichender Stärke der Wechselfelder zu **Haarvibrationen und Mikroentladungen** können, die als belästigend empfunden werden können (indirekte Wirkungen).



Wirkmechanismen magnetischer Wechselfelder

- Magnetische Wechselfelder **B** induzieren **elektrische Wirbelfelder E** .
- Diese bilden in leitfähigem Gewebe **elektrische Wirbelströme** aus.
- Ab einem bestimmten Schwellwert kommt es zu einer Stimulation zentraler und peripherer Nerven bzw. zum Auslösen von Nervenimpulsen und Muskelkontraktionen (**Reizwirkung**).
- An der Retina können zusätzlich Lichterscheinungen (**Phosphene**) hervorgerufen werden.



Reizschwellen externer und induzierter E-Felder

- Wahrnehmung (Belästigung)
 - Schwelle $E_{\text{ext}} \sim 2\text{-}20 \text{ kV/m}$ (für 10 % der Probanden)
- Nervenstimulation
 - Schwelle $E_{\text{in situ}} \sim 4\text{-}25 \text{ V/m}$
- Phosphene (Retina)
 - Schwelle (bei 20 Hz) $E_{\text{in situ}} \sim 10\text{-}100 \text{ mV/m}$
- Neuronale Netzwerke
 - Schwelle $E_{\text{in situ}} < 100 \text{ mV/m}$

Die Grenzwerte (26. BImSchV) schützen vor gesundheitlichen Beeinträchtigungen und erheblichen Belästigungen!

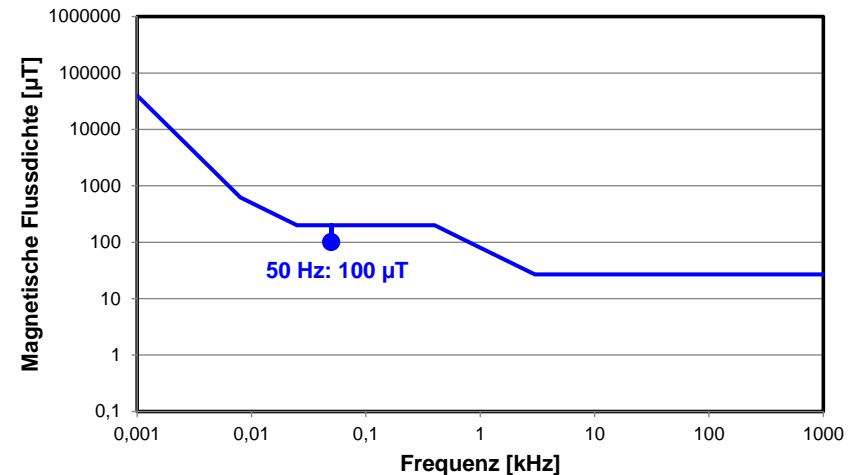
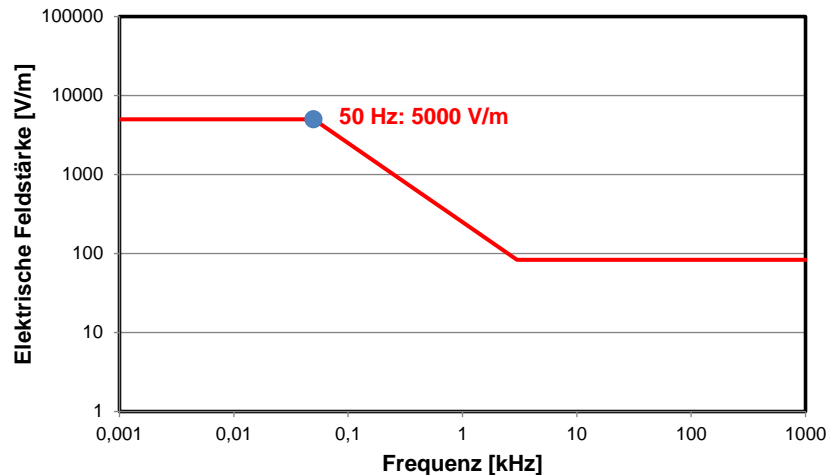


Ableitung der Grenzwerte

- Zweistufiges Konzept nach ICNIRP-Guidelines 2010
- Basiswerte:
 - intrakorporale elektrische Feldstärken (getrennt nach Zentralnervensystem Kopf und allen anderen Kopf- und Körpergeweben)
 - Sicherheitsfaktor 5-10 zum Schwelleneffekt
 - wiss. belegte Wirkungen: Wahrnehmung von Oberflächenladungen, direkte Stimulation von Nerven und Muskeln, Netzhautphosphene
- Referenzwerte:
 - äußere elektrische Feldstärke und magnetische Flussdichte
 - aus Basiswerten abgeleitet + direkte Wahrnehmung E-Feld
 - zur erleichterten Überprüfung in Praxis
 - Referenzwerte nicht anwendbar bei sehr lokaler Exposition, sondern nur bei homogener Exposition (bezogen auf Körper)



Referenzwerte im Niederfrequenzbereich



- 26. Verordnung zur Durchführung des Bundes-Immissionsschutzgesetzes (Verordnung über elektromagnetische Felder - 26. BImSchV), BGBl Jg. 2013 Teil I Nr. 50, 2013
- Grenzwerte basieren auf ICNIRP-Empfehlungen 2010
- Grenzwerte sind frequenzabhängig:
 - Induzierte Felder sind proportional zur Frequenz ($j\omega$)
 - unterschiedliche biologische Wirkungen je nach Frequenz

6. Aktueller Forschungsstand: Leukämie (ALL) im Kindesalter

- Studienlage:**
- Erstbericht 1979 durch Wertheimer und Leeper
 - Folgestudien uneinheitlich, Metastudien: erhöhtes Risiko
 - Schwellenwert 0,3 - 0,4 μT
- Wirkmodell:**
- Kein plausibles Wirkmodell bekannt
 - Keine Hinweise aus tierexperimentellen Studien
- Einstufung:**
- IARC 2002: Einstufung in Klasse 2B („möglicherweise kanzerogen“)
- Attributives Risiko:**
- Nordamerika 2 – 4 %
 - Westeuropa 1 % (D: 6 von ca. 600 Fällen statistisch attributierbar)
 - Viele weitere Risikofaktoren für Leukämien bekannt!
- Stoffe in der Gruppe 2B:**
- Bitumen, Farne, Mixed Pickles, HF EMF (Mobiltelefone)



Aktueller Forschungsstand: Neurodegenerative Erkrankungen

- Studienlage:** - Hauptsächlich *arbeitsmedizinische* Studien
(Trafos, Starkstromleitungen, E-Werke, Triebwagen)
- Ergebnis:**
- konsistent erhöhtes Risiko für Amyotrophe Lateralsklerose
(*cave: Stromschläge als Confounder*) durch NF EMF
 - Parkinson und Multiple Sklerose: Risiko nicht belegt
(wenige nicht konsistente Studien)
 - Alzheimer Demenz: schwacher Zusammenhang;
Alter als Risikofaktor Nr. 1
- Wirkmodell:**
- kein Mechanismus bekannt
 - starke MF (*einige milliTesla*) beeinflussen möglicherweise
oxidative Prozesse und freie Radikale in der Zelle

nach: A. Dehos, G. Ziegelberger (BfS)



Weitere diskutierte Wirkungen

- Nervensystem und Verhalten:**
- unklarer Einfluss von (ausreichend starken) NF MF auf EEG, Schlaf und kognitive Leistungsfähigkeit
 - laut WHO besteht hier Forschungsbedarf
- Neuroendokrines System:**
- Melatonin: Widersprüchliche Ergebnisse
 - Stress- und Wachstumshormone: keine konsistenten Ergebnisse

nach: A. Dehos et al, Gesundheitliche Risiken durch die niederfrequenten Felder der Stromversorgung. UMID Heft 01 (2013) S. 47 ff.



Vorsorgemaßnahmen

- Minimierungsgebot für Niederfrequenz- und Gleichstromanlagen
- Verringerung der wissenschaftlichen Unsicherheiten durch Forschung
 - Umfassendes Forschungsprogramm zu Leukämie im Kindesalter
 - Umfassendes Forschungsprogramm zum Stromnetzausbau



Quantitative Abschätzung von Vorsorgewerten

- Sofern ein Zusammenhang zwischen Kinderleukämie und NF-Magnetfeldern kausal wäre, müsste man einen Vorsorgewert < 300 nT ansetzen.
- Dieser müsste um einen Sicherheitsfaktor (z.B. 2) reduziert werden. Unter Berücksichtigung der hauseigenen Hintergrundfelder (70 nT) würde sich ein Anlagen-Zielwert von 100 nT ergeben.
- Kinderleukämie ist zum Glück selten. Sofern NF-MF kausal beteiligt sind, müsste man für Deutschland von ca. 6 expositionsbedingten Neuerkrankungen pro Jahr ausgehen. Da nur in 1/3 aller Wohnungen mit relevanten MF die magnetischen Immissionen auf ortsfeste Hsp-Anlagen zurückzuführen sind, könnte man durch entsprechende Vorsorgewerte nur maximal 1-2 Neuerkrankungen pro Jahr vermeiden.
- Da ein expositionsbedingter Zusammenhang im Augenblick zu vage ist, sind aufwändige Maßnahmen zur Emissionsreduzierung ortsfester Anlagen (Freihaltebereiche > 500 m, bei Bahnanlagen auch höher) nicht zu rechtfertigen, insbesondere im Hinblick auf die Dringlichkeit von effizienteren Kinderschutzmaßnahmen gegen größere gesicherte Risiken (UV-Strahlung).

