

	DIN EN 62226-3-1 (VDE 0848-226-3-1)	DIN
	Diese Norm ist zugleich eine VDE-Bestimmung im Sinne von VDE 0022. Sie ist nach Durchführung des vom VDE-Präsidium beschlossenen Genehmigungsverfahrens unter der oben angeführten Nummer in das VDE-Vorschriftenwerk aufgenommen und in der „etz Elektrotechnik + Automation“ bekannt gegeben worden.	VDE
ICS 17.220.20 Sicherheit in elektrischen oder magnetischen Feldern im niedrigen und mittleren Frequenzbereich – Verfahren zur Berechnung der induzierten Körperstromdichte und des im menschlichen Körper induzierten elektrischen Feldes – Teil 3-1: Exposition gegenüber elektrischen Feldern – Analytische Modelle und numerische 2D-Modelle (IEC 62226-3-1:2007); Deutsche Fassung EN 62226-3-1:2007 Exposure to electric or magnetic fields in the low and intermediate frequency range – Methods for calculating the current density and internal electric field induced in the human body – Part 3-1: Exposure to electric fields – Analytical and 2D numerical models (IEC 62226-3-1:2007); German version EN 62226-3-1:2007 Exposition aux champs électriques ou magnétiques à basse et moyenne fréquence – Méthodes de calcul des densités de courant induit et des champs électriques induits dans le corps humain – Partie 3-1: Exposition à des champs électriques – Modèles analytiques et numériques 2D (CEI 62226-3-1:2007); Version allemande EN 62226-3-1:2007 Gesamtumfang 60 Seiten DKE Deutsche Kommission Elektrotechnik Elektronik Informationstechnik im DIN und VDE		

Beginn der Gültigkeit

Die von CENELEC am 2007-09-01 angenommene EN 62226-3-1 gilt als DIN-Norm ab 2008-06-01.

Nationales Vorwort

Vorausgegangener Norm-Entwurf: E DIN EN 62226-3-1 (VDE 0848-226-3-1):2007-04.

Für diese Norm ist das nationale Arbeitsgremium K 764 „Sicherheit in elektromagnetischen Feldern“ der DKE Deutsche Kommission Elektrotechnik Elektronik Informationstechnik im DIN und VDE (www.dke.de) zuständig.

Die enthaltene IEC-Publikation wurde vom TC 106 „Testing instrumentation and methods for measuring electric and magnetic fields associated with human exposure“ erarbeitet.

Diese Internationale Norm bildet den Teil 3-1 der Reihe IEC 62226, die mehrere Internationale Normen und Technische Berichte im Rahmen der Berechnung von induzierten Stromdichten und im menschlichen Körper induzierter elektrischer Felder zusammenfasst und die mit dem allgemeinen Titel „Sicherheit in elektrischen oder magnetischen Feldern im niedrigen und mittleren Frequenzbereich – Verfahren zur Berechnung der induzierten Körperstromdichte und des im menschlichen Körper induzierten elektrischen Feldes“ veröffentlicht wird.

ANMERKUNG Entsprechend der im zuständigen nationalen Arbeitsgremium K 764 gehandhabten Nomenklatur wird der englische Titel „Exposure to electric or magnetic fields“ durch den deutschen Wortlaut „Sicherheit in elektrischen oder magnetischen Feldern“ ersetzt, um die Zielsetzung der entsprechenden Normenreihe, der Beurteilung der Sicherheit von Personen in elektrischen oder magnetischen Feldern zu dienen, hervorzuheben.

Es ist vorgesehen, diese Reihe entsprechend der folgenden Struktur zu veröffentlichen.

Teil 1: Allgemeines

Teil 2: Exposition gegenüber magnetischen Feldern

Teil 2-1: 2D-Modelle

Teil 2-2: 3D-Modelle

Teil 2-3: Leitfaden für die praktische Anwendung von Kopplungsfaktoren

Teil 3: Exposition gegenüber elektrischen Feldern

Teil 3-1: Analytische und zweidimensionale numerische Modelle

Teil 3-2: Dreidimensionale numerische Modelle

Teil 4: Elektrische Eigenschaften von menschlichem Körpergewebe (Technischer Bericht)

Das IEC-Komitee hat entschieden, dass der Inhalt dieser Publikation bis zu dem Datum (maintenance result date) unverändert bleiben soll, das auf der IEC-Website unter „<http://webstore.iec.ch>“ zu dieser Publikation angegeben ist. Zu diesem Zeitpunkt wird entsprechend der Entscheidung des Komitees die Publikation

- bestätigt,
- zurückgezogen,
- durch eine Folgeausgabe ersetzt oder
- geändert.

Nationaler Anhang NA (informativ)

Zusammenhang mit Europäischen und Internationalen Normen

Für den Fall einer undatierten Verweisung im normativen Text (Verweisung auf eine Norm ohne Angabe des Ausgabedatums und ohne Hinweis auf eine Abschnittsnummer, eine Tabelle, ein Bild usw.) bezieht sich die Verweisung auf die jeweils neueste gültige Ausgabe der in Bezug genommenen Norm.

Für den Fall einer datierten Verweisung im normativen Text bezieht sich die Verweisung immer auf die in Bezug genommene Ausgabe der Norm.

Eine Information über den Zusammenhang der zitierten Normen mit den entsprechenden Deutschen Normen ist in Tabelle NA.1 wiedergegeben.

Tabelle NA.1

Europäische Norm	Internationale Norm	Deutsche Norm	Klassifikation im VDE-Vorschriftenwerk
EN 62226-1:2005	IEC 62226-1:2004	DIN EN 62226-1 (VDE 0848-226-1):2005-10	VDE 0848-226-1

Nationaler Anhang NB (informativ)

Literaturhinweise

DIN EN 62226-1 (VDE 0848-226-1), *Sicherheit in elektrischen oder magnetischen Feldern im niedrigen und mittleren Frequenzbereich – Verfahren zur Berechnung der induzierten Körperstromdichte und des im menschlichen Körper induzierten elektrischen Feldes – Teil 1: Allgemeines*

– Leerseite –

**Sicherheit in elektrischen oder magnetischen Feldern im niedrigen und mittleren Frequenzbereich –
Verfahren zur Berechnung der induzierten Körperstromdichte und des im menschlichen Körper induzierten elektrischen Feldes –
Teil 3-1: Exposition gegenüber elektrischen Feldern – Analytische Modelle und numerische 2D-Modelle
(IEC 62226-3-1:2007)**

Exposure to electric or magnetic fields in the low and intermediate frequency range –
Methods for calculating the current density and internal electric field induced in the human body –

Part 3-1: Exposure to electric fields – Analytical and 2D numerical models
(IEC 62226-3-1:2007)

Exposition aux champs électriques ou magnétiques à basse et moyenne fréquence –
Méthodes de calcul des densités de courant induit et des champs électriques induits dans le corps humain –

Partie 3-1: Exposition à des champs électriques – Modèles analytiques et numériques 2D
(CEI 62226-3-1:2007)

Diese Europäische Norm wurde von CENELEC am 2007-09-01 angenommen. Die CENELEC-Mitglieder sind gehalten, die CEN/CENELEC-Geschäftsordnung zu erfüllen, in der die Bedingungen festgelegt sind, unter denen dieser Europäischen Norm ohne jede Änderung der Status einer nationalen Norm zu geben ist.

Auf dem letzten Stand befindliche Listen dieser nationalen Normen mit ihren bibliographischen Angaben sind beim Zentralsekretariat oder bei jedem CENELEC-Mitglied auf Anfrage erhältlich.

Diese Europäische Norm besteht in drei offiziellen Fassungen (Deutsch, Englisch, Französisch). Eine Fassung in einer anderen Sprache, die von einem CENELEC-Mitglied in eigener Verantwortung durch Übersetzung in seine Landessprache gemacht und dem Zentralsekretariat mitgeteilt worden ist, hat den gleichen Status wie die offiziellen Fassungen.

CENELEC-Mitglieder sind die nationalen elektrotechnischen Komitees von Belgien, Bulgarien, Dänemark, Deutschland, Estland, Finnland, Frankreich, Griechenland, Irland, Island, Italien, Lettland, Litauen, Luxemburg, Malta, den Niederlanden, Norwegen, Österreich, Polen, Portugal, Rumänien, Schweden, der Schweiz, der Slowakei, Slowenien, Spanien, der Tschechischen Republik, Ungarn, dem Vereinigten Königreich und Zypern.

CENELEC

Europäisches Komitee für Elektrotechnische Normung
European Committee for Electrotechnical Standardization
Comité Européen de Normalisation Electrotechnique

Zentralsekretariat: rue de Stassart 35, B-1050 Brüssel

© 2007 CENELEC – Alle Rechte der Verwertung, gleich in welcher Form und in welchem Verfahren, sind weltweit den Mitgliedern von CENELEC vorbehalten.

Ref. Nr. EN 62226-3-1:2007 D

Vorwort

Der Text des Schriftstücks IEC 106/125/FDIS, zukünftige 1. Ausgabe von IEC 62226-3-1, ausgearbeitet von dem IEC/TC 106 „Methods for the assessment of electric, magnetic and electromagnetic fields associated with human exposure“ wurde der IEC-CENELEC Parallelen Abstimmung unterworfen und von CENELEC am 2007-09-01 als EN 62226-3-1 angenommen.

Diese Europäische Norm muss in Verbindung mit IEC 62226-1:2005 angewendet werden.

Nachstehende Daten wurden festgelegt:

- spätestes Datum, zu dem die EN auf nationaler Ebene durch Veröffentlichung einer identischen nationalen Norm oder durch Anerkennung übernommen werden muss (dop): 2008-06-01
- spätestes Datum, zu dem nationale Normen, die der EN entgegenstehen, zurückgezogen werden müssen (dow): 2010-09-01

Anerkennungsnotiz

Der Text der Internationalen Norm IEC 62226-3-1:2007 wurde von CENELEC ohne irgendeine Abänderung als Europäische Norm genehmigt.

Inhalt

	Seite
Vorwort.....	2
Einleitung	6
1 Anwendungsbereich	7
2 Exposition gegenüber elektrischen Feldern	7
3 Allgemeines Verfahren	9
3.1 Formfaktor	9
3.2 Verfahren	10
4 Modelle des menschlichen Körpers.....	10
4.1 Allgemeines	10
4.2 Oberflächenbereich	11
4.3 Halbelliptisches räumliches Modell (halbes Sphäroid)	12
4.4 Achsensymmetrisches Körpermodell	13
5 Berechnung von induzierten Strömen	14
5.1 Allgemeines	14
5.2 Halbelliptisches räumliches Modell (halbes Sphäroid)	14
5.3 Achsensymmetrische Modelle	18
5.4 Vergleich der analytischen und numerischen Modelle	25
6 Einfluss von elektrischen Größen.....	26
6.1 Allgemeines	26
6.2 Einfluss der Permittivität	26
6.3 Einfluss der Leitfähigkeit.....	26
6.4 Inhomogene Leitfähigkeit	27
7 Messungen der durch elektrische Felder induzierten Ströme	27
7.1 Allgemeines	27
7.2 In den Boden fließender Strom.....	27
Anhang A (normativ) Analytische Lösung für ein Sphäroid in einem homogenen elektrischen Feld.....	29
Anhang B (normativ) Achsensymmetrisches Modell des menschlichen Körpers	32
B.1 Allgemeines	32
B.2 Entwicklung von achsensymmetrischen Modellen	32
B.3 Anwendung des achsensymmetrischen Modells	35
Anhang C (informativ) Modell für Kinderkörper	38
C.1 Referenzkind-Modell.....	38
C.2 Ergebnisse.....	39
Anhang D (informativ) Beispiel für die Verwendung dieser Norm	40
D.1 Allgemeines Flussdiagramm	40
D.2 Beispiel für eine Einzelperson	41
Anhang E (informativ) Numerische Berechnungsverfahren	45
E.1 Allgemeines	45

	Seite
E.2 Sphäroid-Modell [46]	45
E.3 Raumpotential-Verfahren [22]	46
E.4 Verfahren der simulierten Ladungen [14], [1], [55], [59], [40]	47
E.5 Verfahren der Integration der Oberflächenladungen [9], [5], [10].....	48
E.6 Finite-Elemente-Methode [10], [12], [13], [26].....	50
E.7 Impedanzverfahren [11].....	51
E.8 Hybridverfahren [50]	51
E.9 FDTD [58], [53], [54]	52
Literaturhinweise	53
Bilder	
Bild 1 – Darstellung des Phänomens von in einem auf dem Boden stehenden menschlichen Körper durch ein elektrisches Feld induzierten Strömen.....	8
Bild 2 – Potentiallinien des elektrisches Feldes, das durch einen unter Spannung stehenden Leiter bei Abwesenheit irgendwelcher Gegenstände erzeugt wird.....	9
Bild 3 – Ein realistisches Körpermodell.....	11
Bild 4 – Schema des halben Sphäroids, das einen auf einer Fläche, deren Potential gleich null ist, stehenden menschlichen Körper nachbildet.....	12
Bild 5 – Äquivalenter Radius des Sphäroids, R , als Funktion der Höhe L für verschiedene Massen M	13
Bild 6 – Achsensymmetrisches Körpermodell für den Referenzmann (links) und die Referenzfrau (rechts).....	14
Bild 7 – Dem elektrischen Feld ausgesetztes leitendes Sphäroid	15
Bild 8 – Berechnung des Formfaktors des elektrischen Feldes, K_E , für ein Sphäroid, das einem ungestörten elektrischen Feld ausgesetzt wird	16
Bild 9 – Durch ein ungestörtes elektrisches Feld (1 kV/m, 50 Hz) in einem Sphäroid induzierte Stromdichte J_s als Funktion von L/R (Werte in $\mu\text{A}/\text{m}^2$)	16
Bild 10 – Abmessungen und Maschennetz des halben Sphäroids.....	17
Bild 11 – Verzerrung der Feldlinien des elektrischen Feldes mit energietechnischer Frequenz in der Nähe des leitenden halben Sphäroids.....	18
Bild 12 – Berechnete induzierte Stromdichte $J_A(h)$ im Körper, der in einem elektrischen Feld mit 50 Hz und 1 kV/m steht.....	20
Bild 13 – Rechnerisch erfasster Bereich	21
Bild 14 – Maschennetz des Referenzmann-Modells und Verzerrung der Feldlinien des netzfrequenten elektrischen Felds in der Nähe des Modells.....	22
Bild 15 – Verzerrung der Äquipotentiallinien und Feldstärke des elektrischen Felds mit 50 Hz (männliches Modell)	22
Bild 16 – Rechnergestützte Berechnung der induzierten Ströme J_A entlang der vertikalen Achse und Verteilung der induzierten Ströme im männlichen Modell in einem elektrischen Feld mit 50 Hz.....	23
Bild 17 – Maschennetz des weiblichen Körpermodells und Verzerrung der Feldlinien des netzfrequenten elektrischen Felds in der Nähe des Modells.....	24
Bild 18 – Verzerrung der Äquipotentiallinien und Feldstärke des elektrischen Felds mit 50 Hz (weibliches Modell)	24
Bild 19 – Rechnergestützte Berechnung der induzierten Ströme J_A entlang der vertikalen Achse und Verteilung der induzierten Ströme im weiblichen Modell in einem elektrischen Feld mit 50 Hz	25

	Seite
Bild A.1 – Einem elektrischen Feld ausgesetztes leitendes Sphäroid.....	29
Bild B.1 – Normalisierte achsensymmetrische Modelle.....	35
Bild C.1 – Darstellung der rechnergestützten Berechnung der induzierten Ströme J_z entlang einer vertikalen Achse und Verteilung der induzierten Ströme im Referenzmodell für einen 10-jährigen Jugendlichen	39
Bild E.1 – Sphäroid-Modell	46
Bild E.2 – Raumpotential-Modell	47
Bild E.3 – Beispiel für das Verfahren der simulierten Ladungen unter Verwendung von Ringen	48
Bild E.4 – Verfahren der Integration der Oberflächenladungen, bei dem der Körper in N Elemente zerlegt wird	49
Bild E.5 – Unter Verwendung von finiten Elementen in Maschen unterteilter Körper	50
Bild E.6 – Impedanzverfahren	51
Bild E.7 – Verfahren nach Yee: Elektrische und magnetische Gitter für die räumliche Diskretisierung	52
Tabellen	
Tabelle 1 – Daten für den Referenzmann und die Referenzfrau.....	11
Tabelle 2 – Werte von $\arcsin(e)/e$ für verschiedene Werte von L/R	13
Tabelle 3 – Für ein Sphäroid für 50 Hz abgeleitete Daten	18
Tabelle 4 – Zur Erzeugung des Basisgrenzwertstroms J_{BG} im Hals erforderliches elektrisches Feld E_{BG} bei 50 Hz	21
Tabelle 5 – Vergleich der Werte des Formfaktors für das elektrische Feld, K_E , und korrespondierende Stromdichten für ein ungestörtes elektrisches Feld mit 50 Hz und 1 kV/m.....	26
Tabelle B.1 – Maße aus der anthropometrischen Übersichtsmessung, die verwendet wurden, um die vertikalen Abmessungen des achsensymmetrischen Modells zu ermitteln [56].....	33
Tabelle B.2 – Maße aus der anthropometrischen Übersichtsmessung, die verwendet wurden, um die radialen Abmessungen des achsensymmetrischen Modells zu ermitteln [56]	34
Tabelle B.3 – Normalisierte Maße des Modells	36
Tabelle B.4 – Maße des achsensymmetrischen Modells für den Referenzmann und die Referenzfrau, deren Masse und Größe durch ICRP [38] definiert wurden und in Tabelle 1 angegeben sind	37
Tabelle C.1 – Von ICRP zur Verfügung gestellte Bezugsdaten für männliche und weibliche Kinder und Jugendliche.....	38
Tabelle C.2 – Maße der Referenzkinder und -jugendliche (in m, außer OB_R in m^2).....	38
Tabelle C.3 – Ergebnisse des analytischen Verfahrens für Referenzkinder und -jugendliche	39
Tabelle D.1 – Normalisierte Maße des gewählten weiblichen Modells	42
Tabelle D.2 – Berechnung der Maße einer spezifischen Person	42

Einleitung

Das öffentliche Interesse hinsichtlich der Sicherheit von Personen in elektrischen und magnetischen Feldern hat internationale und nationale Organisationen dazu bewogen, Grenzwerte auf der Grundlage von anerkannten schädlichen Auswirkungen vorzuschlagen.

Diese Norm gilt für den Frequenzbereich, für den die Expositionsgrenzwerte auf der Induzierung von Spannungen oder Strömen im menschlichen Körper beruhen, wenn Letzterer elektrischen oder magnetischen Feldern ausgesetzt ist. Dieser Frequenzbereich umfasst niedrige und mittlere Frequenzen bis zu 100 kHz. Einige in dieser Norm beschriebene Verfahren können auch bei höheren Frequenzen unter spezifischen Bedingungen verwendet werden.

Die auf biologischen und medizinischen Untersuchungen über diese grundlegenden Induktionsphänomene beruhenden Expositionsgrenzwerte werden üblicherweise als „Basisgrenzwerte“ bezeichnet. Sie beinhalten Sicherheitsfaktoren.

Die (im Körper) induzierten elektrischen Größen sind nicht direkt messbar, so dass aus Vereinfachungsgründen abgeleitete Werte ebenfalls vorgeschlagen werden. Diese als „Referenzwerte“ bezeichneten Werte werden in Form von äußeren elektrischen und magnetischen Feldern angegeben. Sie beruhen auf sehr einfachen Modellen der Einkopplung von äußeren Feldern in den menschlichen Körper. Diese abgeleiteten Werte sind konservativ.

Es wurden ausgeklügelte Modelle für die Berechnung von im Körper induzierten Strömen, die Gegenstand zahlreicher wissenschaftlicher Veröffentlichungen sind, verwendet. Diese Modelle verwenden numerische dreidimensionale Feldberechnungsprogramme und eine detaillierte Modellierung der inneren Struktur des menschlichen Körpers mit spezifischer Charakterisierung der jeweiligen elektrischen Eigenschaften jedes im Körper vorhandenen Gewebes. Jedoch befinden sich solche Modelle nach wie vor noch in der Entwicklung; außerdem besitzen die gegenwärtig verfügbaren Daten über die elektrische Leitfähigkeit beträchtliche verkürzte Annahmen und die räumliche Auflösung der Modelle macht nach wie vor noch Fortschritte. Daher werden solche Modelle nach wie vor im Bereich der wissenschaftlichen Forschung beraten und gegenwärtig ist noch nicht absehbar, ob die durch solche Modelle erzielten Ergebnisse mit unbegrenzter Dauer in Normen niedergelegt werden können. Jedoch ist anzuerkennen, dass solche Modelle einen nützlichen Beitrag im Rahmen des Normungs- bzw. Standardisierungsprozesses liefern können und dieses auch tun – insbesondere für Produktnormen, in denen spezifische Fälle der Exposition behandelt werden. Wenn Ergebnisse aus solchen Modellen in Normen verwendet werden, sollten sie von Zeit zu Zeit überprüft werden, um sicherzustellen, dass sie kontinuierlich den aktuellen Stand der Wissenschaft reflektieren.

1 Anwendungsbereich

Dieser Teil der IEC 62226 gilt für den Frequenzbereich, für den die Expositionsgrenzwerte auf der Induzierung von Spannungen oder Strömen im menschlichen Körper beruhen, wenn Letzterer elektrischen Feldern ausgesetzt ist.

Dieser Teil legt den Koppelfaktor K im Einzelnen fest, der durch die Reihe IEC 62226 eingeführt wird, um die Expositionsbeurteilung bei komplexen Expositionssituationen, wie z. B. inhomogenem magnetischem Feld oder gestörtem elektrischem Feld, für die Fälle zu ermöglichen, bei denen einfache Modelle des menschlichen Körpers homogenen elektrischen Feldern ausgesetzt werden. Der Koppelfaktor K besitzt unterschiedliche physikalische Interpretationen, abhängig davon, ob er sich auf die elektrische oder magnetische Feldexposition bezieht. Er stellt den so genannten „Formfaktor für elektrische Felder“ dar.

Dieser Teil der IEC 62226 kann angewendet werden, wenn das elektrische Feld für Frequenzen bis mindestens 100 kHz als homogen angesehen werden kann.

Diese Situation der Exposition gegenüber einem homogenen elektrischen Feld findet sich meistens in der Nähe von Hochspannungsfreileitungen. Aus diesem Grund werden die in diesem Teil vorhandenen graphischen Darstellungen für energietechnische Frequenzen (Netzfrequenzen) (50 Hz und 60 Hz) gegeben.

2 Exposition gegenüber elektrischen Feldern

Elektrische Wechselfelder werden von stromführenden (d. h. unter Spannung stehenden) Leitern erzeugt. In unmittelbarer Nähe zu elektrischen Hausgeräten, wie z. B. elektrischen Beleuchtungseinrichtungen, Schaltern, Mixern und Bügeleisen, können lokale elektrische Feldstärken von ca. 100 V/m vorgefunden werden. Solche Felder sind inhomogen, aber ihre Feldstärken liegen weit unterhalb der in Sicherheitsrichtlinien empfohlenen Werte, so dass keine Notwendigkeit besteht, die in solchen Expositionssituationen induzierten (Körper-)Ströme zu berechnen.

Höhere elektrische Feldstärken können in der Nähe von Hochspannungseinrichtungen und -anlagen wie z. B. elektrischen Stromversorgungsleitungen vorgefunden werden. In dem von dieser Norm abgedeckten Frequenzbereich wird die Exposition durch Stromversorgungsleitungen als die einzige Expositionsquelle angesehen, die für die Allgemeinbevölkerung im Hinblick auf die Einhaltung von Grenzwerten, die in Sicherheitsrichtlinien angegeben sind, von Bedeutung ist.

Richtlinien zur Sicherheit von Personen in elektrischen Feldern enthalten gewöhnlich Angaben in Form von induzierten (Körper-)Stromdichten oder im Inneren (des menschlichen Körpers) erzeugten elektrischen Feldern. Diese Größen können nicht direkt gemessen werden und der Zweck dieser Norm ist daher, eine Anleitung zur Verfügung zu stellen, wie diese Größen, die durch äußere elektrische Felder (Umgebungsfelder) E_0 im menschlichen Körper induziert werden, zu bewerten sind.

Die induzierte Körperstromdichte J und das innere elektrische Feld E_i sind durch die nachfolgende einfache Beziehung miteinander verknüpft

$$J = \sigma E_i \quad (1)$$

Dabei ist σ die Leitfähigkeit des betrachteten Körpergewebes.

Aus Gründen der Vereinfachung wird der Inhalt dieser Norm in Form der induzierten Körperstromdichten J gegeben, aus denen die Werte des inneren elektrischen Feldes E_i durch Verwendung der vorstehenden Gleichung leicht abgeleitet werden können.

Sämtliche in dieser Norm entwickelte Berechnungsverfahren verwenden die Niederfrequenznäherung, derzufolge Verschiebungsströme vernachlässigbar sind, so dass $\epsilon \omega \sigma$ im Körper kleiner 1 ist. Die Gültigkeit dieser Näherung wurde für den Niederfrequenzbereich mit Hilfe von veröffentlichten Gewebedaten [29, 31]¹⁾

¹⁾ Ziffern in eckigen Klammern beziehen sich auf die Literaturhinweise.

geprüft und es wurde gezeigt, dass sie für Frequenzen bis mindestens 100 kHz und möglicherweise für höhere Frequenzen gültig ist.

Auf ausgeklügelten numerischen Modellen des menschlichen Körpers beruhende Berechnungen (mit Hilfe des Rechners) [24] haben auch gezeigt, dass diese Annahme auch für Frequenzen bis zu mehr als 100 kHz gilt, indem gezeigt wurde, dass die Beziehung zwischen der im Körper induzierten Stromdichte und dem Produkt aus der Frequenz und dem äußeren elektrischen Feld zwischen 50 Hz und 1 MHz kaum variiert und sich nur bei 10 MHz leicht ändert.

Für einfache Berechnungsfälle können analytische Modelle verwendet werden.

Elektrische Felder verursachen Verschiebungen von elektrischen Ladungen in leitenden Gegenständen (einschließlich lebenden Körpern) und diese Ladungen bewegen sich vorwärts und rückwärts, da es sich hierbei um Wechselfelder handelt. Das Ergebnis ist ein „induzierter“ Wechselstrom in dem leitenden Gegenstand. Dieser Strom hängt nur von:

- der Form und Größe des leitenden Gegenstands,
- den Eigenschaften (Höhe, Polarisation, Grad der Inhomogenität usw.) des ungestörten Feldes (Feld, das ohne Vorhandensein irgendwelcher leitender Gegenstände gemessen wird,
- der Frequenz des Feldes,
- der Schwankung der Leitfähigkeit des Gegenstandes (in homogenen Medien hängt die durch elektrische Felder induzierte Stromdichte nicht von der Leitfähigkeit ab)

ab.

Bild 1 zeigt diesen Induktionsvorgang für den Fall, dass der Körper elektrischen Kontakt mit dem Boden (Masse) hat.

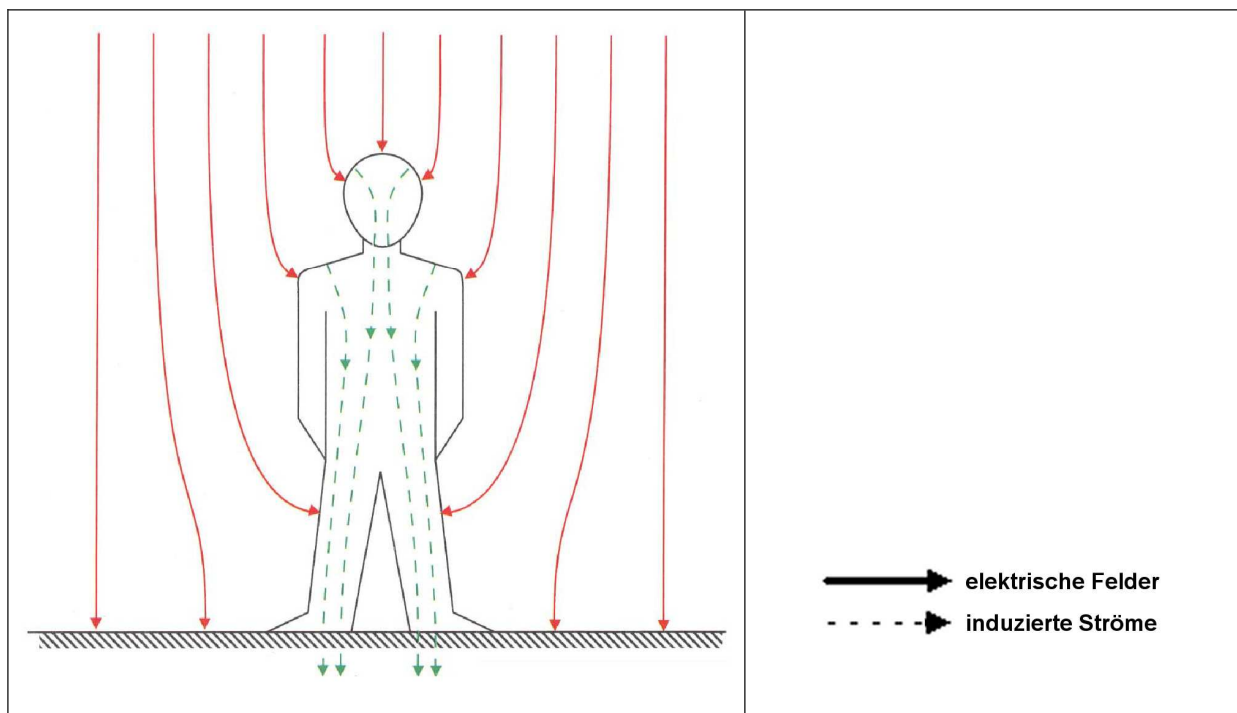


Bild 1 – Darstellung des Phänomens von in einem auf dem Boden stehenden menschlichen Körper durch ein elektrisches Feld induzierten Strömen

Der typische Fall der Exposition der Allgemeinbevölkerung (in der allgemeinen Öffentlichkeit) ist die Exposition unter einer Hochspannungsleitung. In diesem Fall ist die Entfernung zwischen der Quelle des Feldes und dem menschlichen Körper groß und das Feld im Bereich des Bodens, bei Abwesenheit irgendwelcher leitender Gegenstände, kann als homogen angesehen werden (siehe Bild 2).

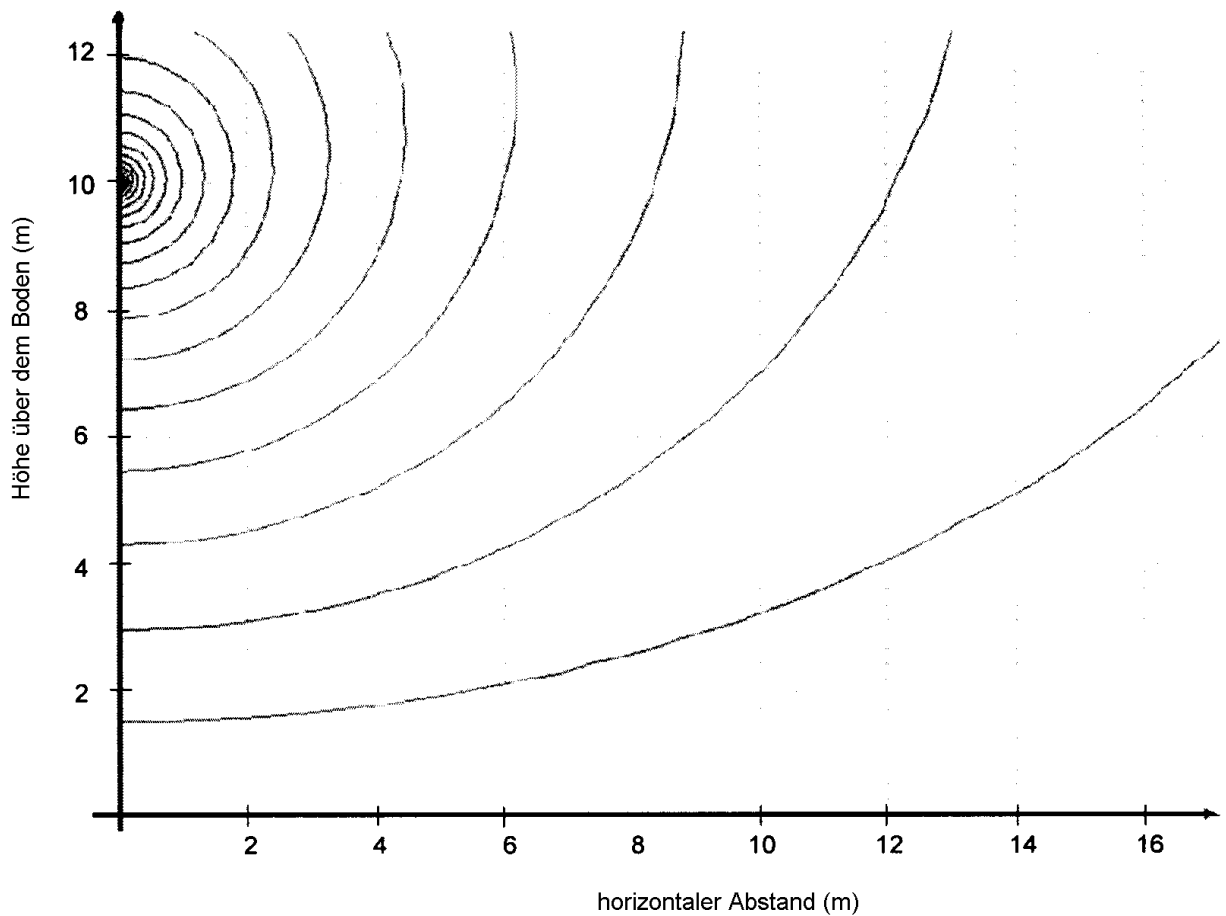


Bild 2 – Potentiallinien des elektrischen Feldes, das durch einen unter Spannung stehenden Leiter bei Abwesenheit irgendwelcher Gegenstände erzeugt wird

3 Allgemeines Verfahren

3.1 Formfaktor

Die Beziehung zwischen dem im menschlichen Körper induzierten Strom J und einem homogenen elektrischen Feld E_0 kann im niedrigen und mittleren Frequenzbereich auf

$$J = K_E \times f \times E_0 \quad (2)$$

reduziert werden.

Dabei ist

f die Frequenz;

E_0 die Höhe des ungestörten elektrischen Feldes;

K_E definiert als Formfaktor des elektrischen Feldes.

K_E hängt von der Größe, der Leitfähigkeit, der Form und der Lage des Modells des menschlichen Körpers ab. Er hängt auch von dem Ort innerhalb des menschlichen Körpers ab, wo die induzierte Stromdichte

ermittelt wird. K_E ist unabhängig von der Frequenz, die für die analytische Beurteilung des durch elektrische Felder induzierten Stroms verwendet wird (siehe [Anhang A](#)).

K_E wird in $\text{AsV}^{-1}\text{m}^{-1}$ oder Farad pro Meter (F/m) ausgedrückt, was auf den Umstand verweist, dass die Exposition gegenüber einem elektrischen Feld physikalisch einer kapazitiven Kopplung zwischen der Quelle des Feldes und dem leitenden Gegenstand, der dem Feld ausgesetzt ist, entspricht.

3.2 Verfahren

Die Stromdichte in einer einzelnen Person kann analytisch abgeschätzt werden, wobei eine dreistufige Vorgehensweise befolgt wird. Der erste Schritt besteht darin, die Stromdichte in einem halben Sphäroid rechnergestützt zu berechnen, wobei die Abmessungen der Halbkugel so gewählt werden, dass sie den betrachteten Körper am besten repräsentieren. Wie in [5.3](#) gezeigt wird, ist die Stromdichte über das gesamte Sphäroid homogen, hängt aber vom Verhältnis der größeren Halbachse L zur kleineren Halbachse R ab (L/R).

Der zweite Schritt besteht in der Verwendung eines realistischen achsensymmetrischen Modells eines menschlichen Körpers, um die Stromdichte in Abhängigkeit von der vertikalen Position im Körper zu bestimmen.

Der dritte Schritt besteht darin, die mittlere Stromdichte in einer bestimmten vertikalen Position in die lokalen Stromdichten in den verschiedenen Körpergeweben in dieser Höhe umzuwandeln. EMF-Gesundheitsrichtlinien nehmen spezifisch Bezug auf die Stromdichte im zentralen Nervensystem, so dass die Wirbelsäule im Hals denjenigen Bereich im menschlichen Körper darstellt, der von besonderem Interesse ist wegen des kleinen Halsquerschnitts, wodurch der Strom in diesem Bereich konzentriert wird.

Induzierte Ströme werden für Männer und Frauen sowie für Kinder unter Verwendung der von ICRP [\[38\]](#) veröffentlichten Bezugsdaten über die Körpergröße, die Körpermasse und die Körperoberfläche berechnet. Ausreichende Informationen werden hier gegeben, um das Verfahren auf Personen beliebigen Gewichts und beliebiger Höhe anzuwenden.

Numerische Berechnungen werden ebenfalls präsentiert, die die Gültigkeit der analytischen Verfahren zeigen.

4 Modelle des menschlichen Körpers

4.1 Allgemeines

In der wissenschaftlichen Literatur werden viele Modelle unterschiedlicher Komplexität für die Beurteilung von Strömen und inneren Feldern, die durch elektrische oder magnetische Felder induziert werden, verwendet (siehe [Bild 3](#)). Beispiele für solche ausgeklügelten Berechnungen sind in den Literaturhinweisen gegeben. Es muss unterstrichen werden, dass diese rechnergestützten Berechnungen unter Verwendung von speziellen Programmen (Software) durchgeführt wurden, die hochspezialisierte Kenntnisse verlangen und nicht breit verfügbar sind. Daher werden solche rechnergestützten Verfahren im Hinblick auf die mit der Normung verbundenen Zwecke als nicht relevant angesehen.

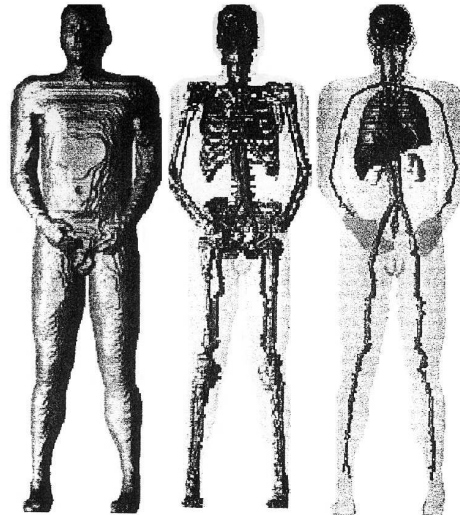


Bild 3 – Ein realistisches Körpermodell

Analytische Berechnungen sind möglich, wenn einfache Modelle wie z. B. eine Kugelform in einem homogenen elektrischen Feld verwendet werden.

4.2 Oberflächenbereich

Der Oberflächenbereich (OB) eines Körpers wird benutzt, um sowohl die kugelförmigen als auch die achsensymmetrischen Körpermodelle für verschieden große Körper zu skalieren. Er hängt von der Körpergröße und Körpermasse ab. Der Bericht der ICRP [38], *Basic Anatomical and Physiological Data for Use in Radiological Protection: Reference values*, stellt einen Algorithmus zur Verfügung, der den gesamten Oberflächenbereich (OB_{ges}) einer Person als Funktion ihrer Größe L (in m) und ihrer Masse M (in kg) ergibt:

$$OB_{\text{ges}} = 0,1644 M^{0,51456} \times L^{0,42246} \quad (3)$$

In unserem Fall wird nur der nach außen zeigende Oberflächenbereich des Körpers betrachtet, der ungefähr 82 % des gesamten Oberflächenbereichs OB_{ges} beträgt. Die Reduktion um 18 % setzt sich aus 3 % für die Fußsohlen, 6 % für den nach innen weisenden Bereich der Beine, wo sie sich gegenseitig berühren können, und 8 % für die nach innen (zum Körper hin) weisende Oberfläche der Arme und die Innenflächen der Hände sowie 1 % für das Perinäum zusammen. Der reduzierte Oberflächenbereich (OB_{red}) ist daher:

$$OB_{\text{red}} = 0,82 OB_{\text{ges}} \quad (4)$$

Tabelle 1 enthält die Ergebnisse für den Referenzmann und die Referenzfrau, die in 4.4 und Anhang B eingeführt werden.

Tabelle 1 – Daten für den Referenzmann und die Referenzfrau

	Referenzmann	Referenzfrau
Größe in m	1,76	1,63
Masse in kg	73	60
gesamter Oberflächenbereich OB_{ges} in m^2	1,889	1,662
reduzierter Oberflächenbereich OB_{red} in m^2	1,557	1,363

4.3 Halbelliptisches räumliches Modell (halbes Sphäroid)

Für die Berechnung der induzierten Stromdichte in einem menschlichen Körper, der auf einer leitenden Fläche steht, ist es notwendig, die Reflexion des Körpers in den Boden zu modellieren. Somit wird der Körper durch eine Hälfte des halben Sphäroids (Bild 4) repräsentiert und die Reflexion durch die andere Hälfte (Bild 7). Die größere Halbachse L des halben Sphäroids wird gleich der Größe der zu repräsentierenden Person gesetzt.

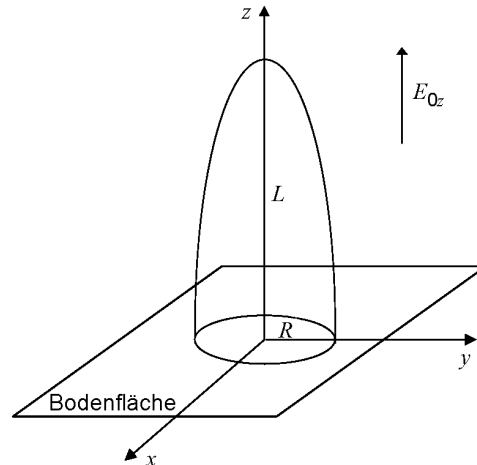


Bild 4 – Schema des halben Sphäroids, das einen auf einer Fläche, deren Potential gleich null ist, stehenden menschlichen Körper nachbildet

Die kleinere Halbachse (d. h. der Radius) R wird so gewählt, dass bei dem Modell der gleiche Gesamtstrom wie bei dem Körper, den es repräsentiert, durch die Unterseite in den Boden fließt, wenn das Modell auf dem Boden steht (geerdet ist). Dies wird erreicht, indem sichergestellt wird, dass das halbe Sphäroid den gleichen nach außen zeigenden Oberflächenbereich (OB_{red}) besitzt wie der Körper, den es repräsentiert.

Der Oberflächenbereich OB_{halb} eines halben Sphäroids mit halber Höhe L und Radius R ist gegeben durch:

$$OB_{\text{halb}} = \pi R^2 \left[1 + \frac{L}{R} \frac{\arcsin(e)}{e} \right] \quad (5)$$

Dabei ist e die Exzentrizität:

$$e = \sqrt{1 - \frac{R^2}{L^2}}$$

R ist als Funktion der Masse M bestimmt und L durch Lösung der Gleichung (5) für R mit $OB_{\text{halb}} = OB_{\text{red}}$, wobei OB_{red} durch die Gleichungen (3) und (4) gegeben wird. Somit ist:

$$R = -\frac{B}{2} \pm \sqrt{\left(\frac{B}{2}\right)^2 + \frac{OB_{\text{halb}}}{\pi}} \quad (6)$$

Dabei ist

$$B = L \frac{\arcsin(e)}{e}$$

B ist eine Funktion von R , aber $\arcsin(e)$ variiert nur langsam mit L/R , wie in Tabelle 2 gezeigt wird. B variiert ebenfalls nur langsam mit L/R und somit kann B unter Verwendung eines Näherungswerts für L/R bestimmt werden.

Tabelle 2 – Werte von $\arcsin(e)/e$ für verschiedene Werte von L/R

L/R	9,0	9,2	9,4	9,6	9,8	10
$\arcsin(e)/e$	1,469	1,471	1,473	1,474	1,476	1,478

Die Verwendung von $L/R = 9,8$ ergibt:

$$B = 1,476L$$

Dies wird in Gleichung (8) eingesetzt, um die Gleichung für R als Funktion von L und OB_{halb} zu ergeben:

$$R = -0,738L + \sqrt{0,545L^2 + \frac{OB_{\text{halb}}}{\pi}} \quad (7)$$

Bild 5 stellt das Ergebnis graphisch dar. Es kann dazu verwendet werden, den Radius R aus der Höhe L und der Masse M einer Person zu ermitteln. Zum Beispiel beträgt der Radius R für den Referenzmann, dessen Masse 73 kg und dessen Höhe 1,76 m beträgt, $R = 0,178$ m und $L/R = 9,86$.

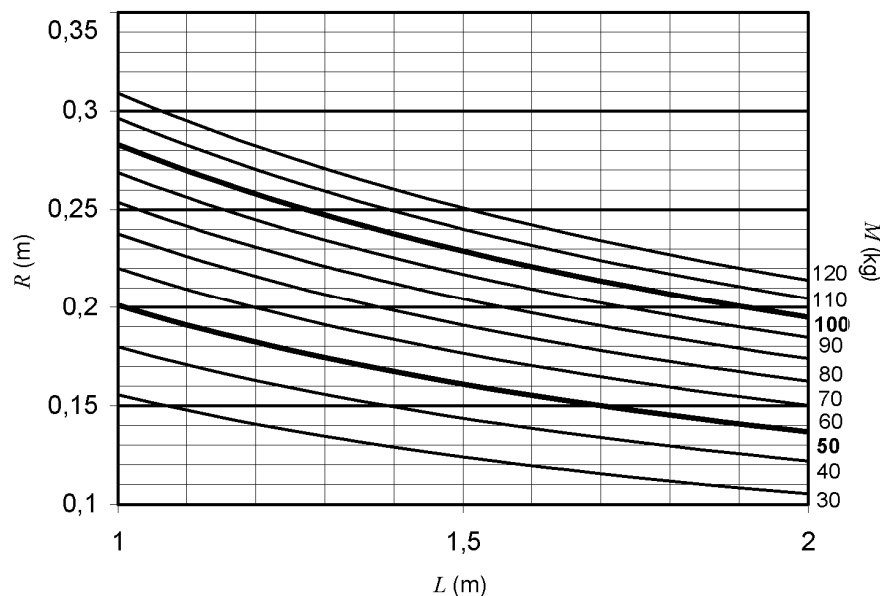


Bild 5 – Äquivalenter Radius des Sphäroids, R , als Funktion der Höhe L für verschiedene Massen M

4.4 Achsensymmetrisches Körpermodell

Das achsensymmetrische Körpermodell repräsentiert die wesentlichen Eigenschaften des menschlichen Körpers: seine Höhe, sein gesamter Oberflächenbereich, die Maße seines Halses und das ungefähre vertikale Profil. Jedoch kann es keine perfekte Repräsentation des menschlichen Körpers leisten, da Letzterer nicht achsensymmetrisch ist. Bild 6 zeigt den radialen Querschnitt des achsensymmetrischen Körpermodells für den Referenzmann und die Referenzfrau.

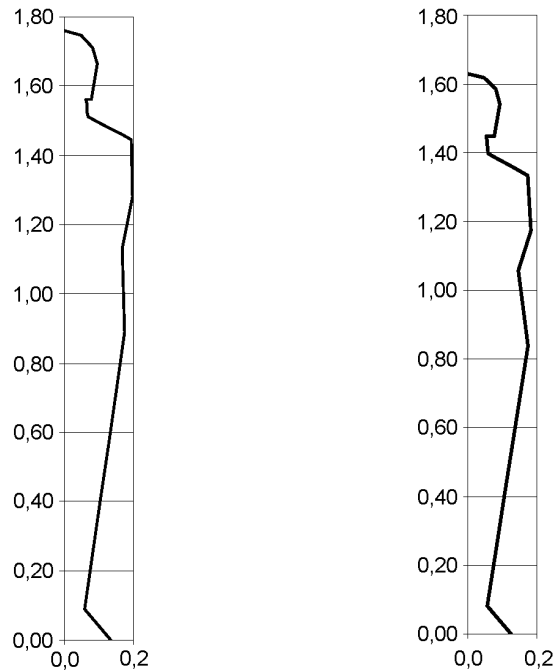


**Bild 6 – Achsensymmetrisches Körpermodell für den Referenzmann (links)
und die Referenzfrau (rechts)**

[Anhang B](#) beschreibt, wie Daten aus einer anthropometrischen Übersichtsmessung unter 2 208 Frauen und 1 174 Männern, die als repräsentative Stichprobe aus den Angehörigen der US-Streitkräfte ausgewählt wurden, verwendet wurden, um das achsensymmetrische Körpermodell zu entwickeln. Das Modell wird durch 13 Koordinaten (Radius, Höhe) definiert.

5 Berechnung von induzierten Strömen

5.1 Allgemeines

Analytische Modelle zur Quantifizierung der Beziehung zwischen induzierten Strömen in leitenden Körpern und äußeren elektrischen Feldern beruhen im Allgemeinen auf der höchst einfachen Annahme, dass die äußeren elektrischen Felder homogen sind und eine einzige Frequenz besitzen und dass die Körper homogen sind und eine Form besitzen, die analytisch beschrieben werden kann (wie das bei kugelförmigen Körpern und Sphäroiden der Fall ist). Daher können sie die Tatsache, dass die Körper eine inhomogene Struktur mit einer komplexen Form aufweisen, nicht auf einfache Weise berücksichtigen.

Nichtsdestotrotz können analytische Modelle für einfache Berechnungsfälle und/oder zum Nachweis der Gültigkeit von numerischen Berechnungen verwendet werden.

Im besonderen Fall des in dieser Norm entwickelten homogenen Körpermodells ist die induzierte Stromdichte von der Leitfähigkeit und der Permittivität (Niederfrequenzannahme) unabhängig.

5.2 Halbelliptisches räumliches Modell (halbes Sphäroid)

5.2.1 Analytisch

[Anhang A](#) präsentiert die detaillierten analytischen Lösungen für ein Sphäroid in einem homogenen elektrischen Feld als Funktion der geometrischen und elektrischen Parameter des Sphäroids und der Größe und Richtung des elektrischen Feldvektors ([Bild 7](#)). Die Darstellung des Sphäroids ist gleich der Darstellung des halben Sphäroids im Fall des Vorhandenseins der in [4.3](#) erklärten Bodenfläche.