

	DIN EN 62226-2-1 (VDE 0848-226-2-1)	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 13.280;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 2-1: Exposition gegenüber magnetischen Feldern – 2D-Modelle (IEC 62226-2-1:2004); Deutsche Fassung EN 62226-2-1:2005 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 2-1: Exposure to magnetic fields – 2D models (IEC 62226-2-1:2004); German version EN 62226-2-1:2005 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 2-1: Exposition à des champs magnétiques – Modèles 2D (CEI 62226-2-1:2004); Version allemande EN 62226-2-1:2005 Gesamtumfang 70 Seiten DKE Deutsche Kommission Elektrotechnik Elektronik Informationstechnik im DIN und VDE		

Beginn der Gültigkeit

Die von CENELEC am 2004-12-01 angenommene EN 62226-2-1 gilt als DIN-Norm ab 2005-09-01.

Nationales Vorwort

Vorausgegangener Norm-Entwurf: E DIN EN 62226-2-1 (VDE 0848-226-2-1):2004-12.

Für die vorliegende Norm ist das nationale Arbeitsgremium K 764 „Sicherheit in elektromagnetischen Feldern“ der DKE Deutsche Kommission Elektrotechnik Elektronik Informationstechnik im DIN und VDE zuständig.

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

Diese Internationale Norm bildet den Teil 2-1 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 (Technische Bericht)

Das IEC-Komitee hat entschieden, dass der Inhalt dieser Publikation bis zu dem in der IEC-Website unter „<http://webstore.iec.ch>“ mit den Daten zu dieser Publikation angegebenen Datum (maintenance result date)¹⁾ unverändert bleiben soll. Zu diesem Zeitpunkt wird entsprechend der Entscheidung des Komitees die Publikation

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

¹⁾ Die Nationalen Komitees werden gebeten zu beachten, dass diese Publikation bis zum Datum 2008 unverändert bleiben soll.

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 nachstehend 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), *Elektromagnetische Verträglichkeit – Anforderungen an Haushaltgeräte, Elektrowerkzeuge und ähnliche Elektrogeräte – Teil 1: Störfestigkeit*

– 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 2-1: Exposition gegenüber magnetischen Feldern – 2D-Modelle
(IEC 62226-2-1:2004)**

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 2-1: Exposure to magnetic fields – 2D
models
(IEC 62226-2-1:2004)

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 2-1: Exposition à des champs
magnétiques – Modèles 2D
(CEI 62226-2-1:2004)

Diese Europäische Norm wurde von CENELEC am 2004-12-01 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, Dänemark, Deutschland, Estland, Finnland, Frankreich, Griechenland, Irland, Island, Italien, Lettland, Litauen, Luxemburg, Malta, den Niederlanden, Norwegen, Österreich, Polen, Portugal, 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

Vorwort

Der Text des Schriftstücks IEC 106/79/FDIS, zukünftige 1. Ausgabe von IEC 62226-2-1, ausgearbeitet von dem IEC/SC 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 2004-12-01 als EN 62226-2-1 angenommen.

Dieser Teil 2-1 muss in Verbindung mit IEC 62226-1 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): 2005-09-01
- spätestes Datum, zu dem nationale Normen, die der EN entgegenstehen, zurückgezogen werden müssen (dow): 2007-12-01

Anerkennungsnotiz

Der Text der Internationalen Norm IEC 62226-2-1:2004 wurde von CENELEC ohne irgendeine Abänderung als Europäische Norm genehmigt.

Inhalt

	Seite
Vorwort	2
Einleitung	7
1 Anwendungsbereich	8
2 Analytische Modelle	8
2.1 Allgemeines	8
2.2 Grundlegende analytische Modelle für homogene Felder	9
3 Numerische Modelle	10
3.1 Allgemeine Information über numerische Modelle	10
3.2 2D-Modelle – Allgemeiner Ansatz	11
3.3 Leitfähigkeit von lebendem Gewebe	12
3.4 2D-Modelle – Rechenbedingungen	12
3.5 Koppelfaktor für inhomogene magnetische Felder	13
3.6 2D-Modelle – Rechenergebnisse	13
4 Validierung der Modelle	16
Anhang A (normativ) Scheibe in einem homogenen Feld	17
Anhang B (normativ) Scheibe in einem Feld, das durch einen unendlich langen Leiter erzeugt wird	20
B.1 Berechnungen für eine leitfähige Scheibe mit dem Radius $R = 100$ mm	21
B.2 Berechnungen für eine leitfähige Scheibe mit dem Radius $R = 200$ mm	27
Anhang C (normativ) Scheibe in einem Feld, das durch zwei parallele Leiter, die symmetrische Ströme führen, erzeugt wird	31
C.1 Berechnungen für eine leitfähige Scheibe mit dem Radius $R = 100$ mm	32
C.2 Berechnungen für eine leitfähige Scheibe mit dem Radius $R = 200$ mm	39
Anhang D (normativ) Scheibe in einem Feld, das durch eine kreisförmige Spule erzeugt wird	45
D.1 Berechnungen für eine leitfähige Scheibe mit dem Radius $R = 100$ mm	46
D.2 Berechnungen für $R = 200$ mm	54
Anhang E (informativ) Vereinfachter Ansatz für elektromagnetische Phänomene	60
Anhang F (informativ) Analytische Berechnung des durch einfache Induktionssysteme verursachten magnetischen Felds: ein Leiter, zwei parallele Leiter, die symmetrische Ströme führen, und eine kreisförmige Spule	62
F.1 Unendlich langer gerader Leiter	62
F.2 Zwei parallele Leiter, die symmetrische Ströme führen	62
F.3 Kreisförmige Spule	62
Anhang G (informativ) Gleichungen und numerische Modellierung von elektromagnetischen Phänomenen für eine typische Struktur: leitfähige Scheibe im elektromagnetischen Feld	64
Literaturhinweise	66
Bilder	
Bild 1 – Leitfähige Scheibe in einer homogenen magnetischen Flussdichte	9
Bild 2 – Finite-Elemente-Maschenbildung (Dreiecke zweiter Ordnung) bei einer Scheibe und Einzelheiten	11

Bild 3 – Leitfähige Scheibe in einer homogenen magnetischen Flussdichte	11
Bild 4 – Änderung des Koppelfaktors für inhomogene magnetische Felder, K , mit der Entfernung für die drei magnetischen Feldquellen (Scheibenradius $R = 100$ mm).....	14
Bild A.1 – Stromdichtelinien J und Verteilung von J in der Scheibe	17
Bild A.2 – $J = f(r)$: „Spot“-Verteilung der berechneten induzierten Stromdichte entlang einem Durchmesser einer homogenen Scheibe in einem homogenen magnetischen Feld	18
Bild A.3 – $J = f(r)$: Verteilung der berechneten integrierten induzierten Stromdichte entlang einem Durchmesser einer homogenen Scheibe in einem homogenen magnetischen Feld	19
Bild B.1 – Scheibe in einem magnetischen Feld, das durch den Strom in einem unendlich langen geraden Leiter erzeugt wurde	20
Bild B.2 – Stromdichtelinien J und Verteilung von J in der Scheibe (Quelle: einzelner Leiter, der in $d = 10$ mm von der Kante der Scheibe angeordnet ist).....	21
Bild B.3 – „Spot“-Verteilung der induzierten Stromdichte entlang dem Durchmesser AA der Scheibe (Quelle: einzelner Leiter, der in $d = 10$ mm von der Kante der Scheibe angeordnet ist)	22
Bild B.4 – Verteilung der integrierten induzierten Stromdichte entlang dem Durchmesser AA der Scheibe (Quelle: einzelner Leiter, der in $d = 10$ mm von der Kante der Scheibe angeordnet ist)	23
Bild B.5 – Stromdichtelinien J und Verteilung von J in der Scheibe (Quelle: einzelner Leiter, der in $d = 100$ mm von der Kante der Scheibe angeordnet ist).....	23
Bild B.6 – Verteilung der integrierten induzierten Stromdichte entlang dem Durchmesser AA der Scheibe (Quelle: einzelner Leiter, der in $d = 100$ mm von der Kante der Scheibe angeordnet ist)	24
Bild B.7 – Parameterkurve für den Faktor K für Abstände von bis zu 300 mm zu einer Quelle, die von einem unendlich langen Leiter gebildet wird (Scheibe: $R = 100$ mm)	25
Bild B.8 – Parameterkurve für den Faktor K für Abstände von bis zu 1 900 mm zu einer Quelle, die von einem unendlich langen Leiter gebildet wird (Scheibe: $R = 100$ mm)	26
Bild B.9 – Parameterkurve für den Faktor K für Abstände von bis zu 300 mm zu einer Quelle, die von einem unendlich langen Leiter gebildet wird (Scheibe: $R = 200$ mm)	28
Bild B.10 – Parameterkurve für den Faktor K für Abstände von bis zu 1 900 mm zu einer Quelle, die von einem unendlich langen Leiter gebildet wird (Scheibe: $R = 200$ mm)	29
Bild C.1 – Scheibe in einem magnetischen Feld, das durch zwei parallele Leiter, die symmetrische Ströme führen, erzeugt wurde	32
Bild C.2 – Stromdichtelinien J und Verteilung von J in der Scheibe (Quelle: zwei parallele Leiter, die symmetrische Ströme führen, durch 5 mm voneinander getrennt sind und in $d = 7,5$ mm von der Kante der Scheibe angeordnet sind).....	32
Bild C.3 – $J_i = f[r]$: Verteilung der integrierten induzierten Stromdichte entlang dem Durchmesser AA der Scheibe (Quelle: zwei parallele Leiter, die symmetrische Ströme führen, durch 5 mm voneinander getrennt sind und in $d = 7,5$ mm von der Kante der Scheibe angeordnet sind)	33
Bild C.4 – Stromdichtelinien J und Verteilung von J in der Scheibe (Quelle: zwei parallele Leiter, die symmetrische Ströme führen, durch 5 mm voneinander getrennt sind und in $d = 97,5$ mm von der Kante der Scheibe angeordnet sind).....	34
Bild C.5 – $J_i = f[r]$: Verteilung der integrierten induzierten Stromdichte entlang dem Durchmesser AA der Scheibe (Quelle: zwei parallele Leiter, die symmetrische Ströme führen, durch 5 mm voneinander getrennt sind und in $d = 97,5$ mm von der Kante der Scheibe angeordnet sind)	34
Bild C.6 – Parameterkurve für den Faktor K für Abstände von bis zu 300 mm zu einer Quelle, die von zwei parallelen Leitern, die symmetrische Ströme führen, gebildet wird, und für verschiedene Abstände e zwischen den beiden Leitern (homogene Scheibe: $R = 100$ mm)	35
Bild C.7 – Parameterkurve für den Faktor K für Abstände von bis zu 1 900 mm zu einer Quelle, die von zwei parallelen Leitern, die symmetrische Ströme führen, gebildet wird, und für verschiedene Abstände e zwischen den beiden Leitern (homogene Scheibe: $R = 100$ mm)	37

Bild C.8 – Parameterkurve für den Faktor K für Abstände von bis zu 300 mm zu einer Quelle, die von zwei parallelen Leitern, die symmetrische Ströme führen, gebildet wird, und für verschiedene Abstände e zwischen den beiden Leitern (homogene Scheibe: $R = 200$ mm)	40
Bild C.9 – Parameterkurve für den Faktor K für Abstände von bis zu 1 900 mm zu einer Quelle, die von zwei parallelen Leitern, die symmetrische Ströme führen, gebildet wird, und für verschiedene Abstände e zwischen den beiden Leitern (homogene Scheibe: $R = 200$ mm)	42
Bild D.1 – Leitfähige Scheibe in einem durch eine Spule erzeugten magnetischen Feld	45
Bild D.2 – Stromdichtelinien J und Verteilung von J in der Scheibe (Quelle: Spule mit dem Radius $r = 50$ mm, leitfähige Scheibe $R = 100$ mm, $d = 5$ mm)	46
Bild D.3 – $J_i = f[r]$: Verteilung der integrierten induzierten Stromdichte entlang dem Durchmesser AA der Scheibe (Quelle: Spule mit dem Radius $r = 50$ mm, leitfähige Scheibe $R = 100$ mm, $d = 5$ mm)	47
Bild D.4 – Stromdichtelinien J und Verteilung von J in der Scheibe (Quelle: Spule mit dem Radius $r = 200$ mm, leitfähige Scheibe $R = 100$ mm, $d = 5$ mm)	48
Bild D.5 – $J_i = f[r]$: Verteilung der integrierten induzierten Stromdichte entlang dem Durchmesser AA der Scheibe (Quelle: Spule mit dem Radius $r = 200$ mm, leitfähige Scheibe $R = 100$ mm, $d = 5$ mm)	48
Bild D.6 – Stromdichtelinien J und Verteilung von J in der Scheibe (Quelle: Spule mit dem Radius $r = 10$ mm, leitfähige Scheibe $R = 100$ mm, $d = 5$ mm)	49
Bild D.7 – $J_i = f[r]$: Verteilung der integrierten induzierten Stromdichte entlang dem Durchmesser AA der Scheibe (Quelle: Spule mit dem Radius $r = 10$ mm, leitfähige Scheibe $R = 100$ mm, $d = 5$ mm)	49
Bild D.8 – Parameterkurve für den Faktor K für Abstände von bis zu 300 mm zu einer Quelle, die aus einer Spule mit verschiedenem Radius r besteht (homogene Scheibe: $R = 100$ mm)	50
Bild D.9 – Parameterkurve für den Faktor K für Abstände von bis zu 1 900 mm zu einer Quelle, die aus einer Spule mit verschiedenem Radius r besteht (homogene Scheibe: $R = 100$ mm)	52
Bild D.10 – Parameterkurve für den Faktor K für Abstände von bis zu 300 mm zu einer Quelle, die aus einer Spule mit verschiedenem Radius r besteht (homogene Scheibe: $R = 200$ mm)	55
Bild D.11 – Parameterkurve für den Faktor K für Abstände von bis zu 1 900 mm zu einer Quelle, die aus einer Spule mit verschiedenem Radius r besteht (homogene Scheibe: $R = 200$ mm)	57

Tabellen

Tabelle 1 – Numerische Werte des Koppelfaktors für inhomogene magnetische Felder, K , für verschiedene Arten von magnetischen Feldquellen und verschiedene Entfernungen zwischen Quelle und leitfähiger Scheibe ($R = 100$ mm)	15
Tabelle B.1 – Numerische Werte für den Faktor K für Abstände von bis zu 300 mm zu einer Quelle, die von einem unendlich langen Leiter gebildet wird (Scheibe: $R = 100$ mm)	25
Tabelle B.2 – Numerische Werte für den Faktor K für Abstände von bis zu 1 900 mm zu einer Quelle, die von einem unendlich langen Leiter gebildet wird (Scheibe: $R = 100$ mm)	27
Tabelle B.3 – Numerische Werte für den Faktor K für Abstände von bis zu 300 mm zu einer Quelle, die von einem unendlich langen Leiter gebildet wird (Scheibe: $R = 200$ mm)	28
Tabelle B.4 – Numerische Werte für den Faktor K für Abstände von bis zu 1 900 mm zu einer Quelle, die von einem unendlich langen Leiter gebildet wird (Scheibe: $R = 200$ mm)	30
Tabelle C.1 – Numerische Werte für den Faktor K für Abstände von bis zu 300 mm zu einer Quelle, die von zwei parallelen Leitern, die symmetrische Ströme führen, gebildet wird (homogene Scheibe: $R = 100$ mm)	36
Tabelle C.2 – Numerische Werte für den Faktor K für Abstände von bis zu 1 900 mm zu einer Quelle, die von zwei parallelen Leitern, die symmetrische Ströme führen, gebildet wird (homogene Scheibe: $R = 100$ mm)	38

Tabelle C.3 – Numerische Werte für den Faktor K für Abstände von bis zu 300 mm zu einer Quelle, die von zwei parallelen Leitern, die symmetrische Ströme führen, gebildet wird (*homogene Scheibe: $R = 200\text{ mm}$*) 41

Tabelle C.4 – Numerische Werte für den Faktor K für Abstände von bis zu 1 900 mm zu einer Quelle, die von zwei parallelen Leitern, die symmetrische Ströme führen, gebildet wird (*homogene Scheibe: $R = 200\text{ mm}$*) 43

Tabelle D.1 – Numerische Werte für den Faktor K für Abstände von bis zu 300 mm zu einer Quelle, die aus einer Spule besteht (*homogene Scheibe: $R = 100\text{ mm}$*) 51

Tabelle D.2 – Numerische Werte für den Faktor K für Abstände von bis zu 1 900 mm zu einer Quelle, die aus einer Spule besteht (*homogene Scheibe: $R = 100\text{ mm}$*) 53

Tabelle D.3 – Numerische Werte für den Faktor K für Abstände von bis zu 300 mm zu einer Quelle, die aus einer Spule besteht (*homogene Scheibe: $R = 200\text{ mm}$*) 56

Tabelle D.4 – Numerische Werte für den Faktor K für Abstände von bis zu 1 900 mm zu einer Quelle, die aus einer Spule besteht (*homogene Scheibe: $R = 200\text{ mm}$*) 58

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 letztere elektrischen oder magnetischen Feldern ausgesetzt sind. 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 wird nach wie vor noch vergrößert. 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 führt den Koppelfaktor K ein, um die Expositionsbeurteilung bei komplexen Expositionssituationen, wie z. B. inhomogenem magnetischem Feld oder gestörtem elektrischem Feld, zu ermöglichen. Der Koppelfaktor K besitzt unterschiedliche physikalische Interpretationen, abhängig davon, ob er sich auf die elektrische oder magnetische Feldexposition bezieht.

Zweck dieser Norm ist, diesen Koppelfaktor K für die Fälle zu definieren, bei denen einfache Modelle des menschlichen Körpers inhomogenen magnetischen Feldern ausgesetzt werden. Er wird daher als „Koppelfaktor K für inhomogene magnetische Felder“ bezeichnet.

Alle im Rahmen dieses Schriftstücks entwickelten Berechnungen verwenden eine Näherung für den niederfrequenten Bereich, bei der Verschiebungsströme vernachlässigt werden. Die Gültigkeit dieser Näherung wurde für den niederfrequenten Bereich für die Exposition von menschlichen Körpern, bei denen $\varepsilon\omega \ll \sigma$ ist, nachgewiesen.

Für Frequenzen bis zu einigen wenigen kHz sollte das Verhältnis von Leitfähigkeit und Dielektrizitätskonstante berechnet werden, um die Gültigkeit dieser Hypothese nachzuweisen.

2 Analytische Modelle

2.1 Allgemeines

Basisgrenzwerte in Richtlinien für die Exposition von Personen gegenüber magnetischen Feldern werden bis etwa 100 kHz üblicherweise in Form der induzierten Körperstromdichte oder des inneren elektrischen Feldes angegeben. Diese (im Körper) induzierten elektrischen Größen können nicht direkt gemessen werden und der Zweck dieses Schriftstücks ist daher, Verfahren und Werkzeuge zur Verfügung zu stellen, mit deren Hilfe diese Größen ausgehend vom äußeren magnetischen Feld bewertet werden können.

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

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

Dabei ist σ die Leitfähigkeit von lebendem Gewebe.

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 durch Verwendung der vorstehenden Gleichung leicht abgeleitet werden können.

Analytische Modelle wurden in EMF-Gesundheitsrichtlinien verwendet, um die Beziehung zwischen induzierten Körperströmen oder inneren elektrischen Feldern und den äußeren Feldern zu quantifizieren. Diesen liegt die Annahme von stark vereinfachten Körpergeometrien mit homogener Leitfähigkeit und der Anwendung von homogenen magnetischen Feldern zu Grunde. Solche Modelle besitzen ernsthafte Beschränkungen. Der menschliche Körper besitzt eine wesentlich kompliziertere inhomogene Struktur, und das angewendete Feld ist im Allgemeinen inhomogen, weil es von Strömen hervorgerufen wird, die durch komplexe Anordnungen von Leitern und Spulen fließen.

Zum Beispiel ist das magnetische Feld bei einem Induktionswärmesystem die Überlagerung eines erregenden Feldes (erzeugt durch die Spulen) und eines reagierenden Feldes (erzeugt durch die induzierten Ströme in dem System). Dieses reagierende Feld ist im Körper vernachlässigbar und kann ignoriert werden.

Die [Anhänge E](#) und [F](#) präsentieren die analytische Berechnung des magnetischen Felds H , das durch einfache Quellen erzeugt wird, und [Anhang G](#) präsentiert das analytische Verfahren zur Berechnung des in einer leitfähigen Scheibe induzierten Stroms.

2.2 Grundlegende analytische Modelle für homogene Felder

Die einfachsten in EMF-Gesundheitsrichtlinien verwendeten analytischen Modelle beruhen auf der Annahme der Einkopplung eines homogenen äußeren magnetischen Feldes mit einer einzelnen Frequenz in eine homogene Scheibe mit gegebener Leitfähigkeit, die den zu betrachtenden Körperteil stellvertretend darstellen soll, wie in Bild 1 gezeigt wird. Solche Modelle werden z. B. in den ICNIRP¹⁾- und NRPB²⁾-Richtlinien verwendet.

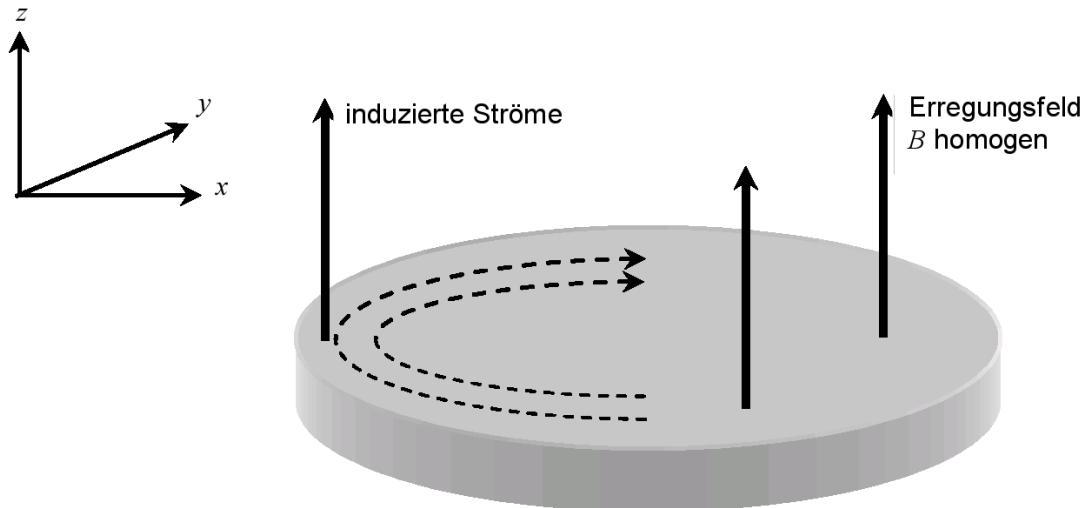


Bild 1 – Leitfähige Scheibe in einer homogenen magnetischen Flussdichte

Zweck einer solchen Modellierung ist, ein einfaches Verfahren zur Ermittlung von induzierten Strömen und inneren elektrischen Feldern zur Verfügung zu stellen. Dieser erste Ansatz ist einfach und ergibt konservative Werte der berechneten elektrischen Größen.

Bei Wechselfeldern liegt der Berechnung die Annahme zu Grunde, dass der dem Feld ausgesetzte Körper oder Körperteil eine kreisrunde Scheibe mit dem Radius r und der Leitfähigkeit σ ist. Die Berechnung wird für die Bedingung maximaler Einkopplung durchgeführt, d. h. für ein senkrecht auf dieser Scheibe stehendes homogenes magnetisches Feld. In diesem Fall ergibt sich der induzierte Strom bei einem Radius r durch:

$$J(r) = \frac{r\sigma \, dB}{2 \, dt} \quad (2)$$

Dabei ist B die magnetische Flussdichte.

Für eine einzelne Frequenz f wird dieser zu:

$$J(r) = \sigma r f B \quad (3)$$

Wie in Bild 1 gezeigt wird (siehe auch [Anhang A](#)) verteilen sich die induzierten Ströme in der Scheibe, dabei einer Rotationssymmetrie um die zentrale Achse der Scheibe gehorchend. Die Werte der induzierten Ströme sind minimal (null) im Mittelpunkt und maximal an der Kante der Scheibe.

¹⁾ Health Physics (vol. 74, No.° 4, April 1998, p. 494-522).

²⁾ NRPB:1993: *Board Statement on Restrictions on Human Exposure to Static and Time-varying Electromagnetic Fields and Radiation*, Vol. 4, No. 5, 1.

3 Numerische Modelle

3.1 Allgemeine Information über numerische Modelle

Einfache Modelle, die Feldeigenschaften berücksichtigen, sind realistischer als solche Modelle, wie z. B. analytische Modelle, die nur homogene Felder betrachten.

Elektromagnetische Felder werden durch die Maxwell'schen Gleichungen bestimmt. Diese Gleichungen können in zwei- und dreidimensionalen Strukturen (2D- oder 3D-Berechnungen) mit Hilfe von verschiedenen numerischen Verfahren genau gelöst werden, wie z. B.

- Finite-Elemente-Methode (FEM);
- Grenz-Integralgleichungs-Methode (BIE oder BEM) oder Momentenmethode;
- Finite-Differenzen-Methode (FD);
- Impedanzmethode (IM).

Andere Verfahren sind von den vorstehenden Verfahren abgeleitet. Zum Beispiel sind die nachfolgenden Verfahren von der Finite-Differenzen-Methode abgeleitet:

- Finite-Differenzen-Methode im Zeitbereich (FDTD);
- frequenzabhängige Finite-Differenzen-Methode im Zeitbereich $((FD)^2TD)$;
- skalare Potenzial-Finite-Differenzen-Methode (SPFD).

Kombinierte Verfahren (Hybridverfahren) wurden ebenfalls entwickelt, um die Modellierung zu verbessern (z. B. FE + BIE).

Im Handel erhältliche Rechnerprogramme können die Maxwell'schen Gleichungen genau lösen, indem sie tatsächliche geometrische Strukturen und physikalische Eigenschaften von Materialien als auch den Strom im eingeschwungenen oder transienten Zustand berücksichtigen.

Die Auswahl des numerischen Verfahrens wird durch einen Kompromiss aus Genauigkeit, der Leistungsfähigkeit des Rechners, dem zur Verfügung stehenden Speicherplatz bestimmt und hängt von vielen Parametern ab, wie z. B.:

- simulierte Feldexposition;
- Größe und Form der zu modellierenden menschlichen Person;
- Beschreibungstiefe oder -dichte des menschlichen Körpers (Anzahl der Voxel) oder Feinheit der Maschenstruktur;
- Frequenzbereich, um einige Teile der Maxwell'schen Gleichungen vernachlässigen zu können (z. B. den Ausdruck für den Verschiebungsstrom bei Niederfrequenz);
- elektrisches Versorgungssignal (sinusförmig, periodisch oder transient);
- Art der Auflösung (2D oder 3D);
- mathematische Formulierung;
- lineare oder nicht lineare physikalische Parameter (Leitfähigkeit usw.);
- Eigenschaften des numerischen Verfahrens;
- usw.

Die Rechenzeit kann daher beträchtlich schwanken.

(Mit dem Rechner) Berechnete elektromagnetische Werte können auf viele Arten dargestellt werden, einschließlich:

- Verteilungen des magnetischen Felds H , der magnetischen Flussdichte B , des elektrischen Felds E , der Stromdichte J . Diese Verteilungen können in Form von farbigen, ISO-skalierten Linien und/oder Kurven dargestellt werden, die eine optische Beurteilung des Phänomens und möglicher kritischer Stellen („hot points“) erlauben;

- lokal oder räumlich gemittelte Integralwerte von H , B , E , J usw.;
- globale Höhenwerte: aktive Leistung.

Diese Verfahren sind sehr hilfreich bei der Lösung von spezifischen Problemen, jedoch können sie zur Untersuchung von allgemeinen Problemen nicht zuverlässig angewandt werden.

3.2 2D-Modelle – Allgemeiner Ansatz

Um schnell die im menschlichen Körper induzierten Ströme verstehen zu können, können zweidimensionale Simulationen unter Verwendung einer einfachen Darstellung des Körpers (leitfähige Scheibe: ein Beispiel für eine Modellierung ist im Bild 2 gegeben) in einem inhomogenen Feld durchgeführt werden, wie in Bild 3 gezeigt wird.

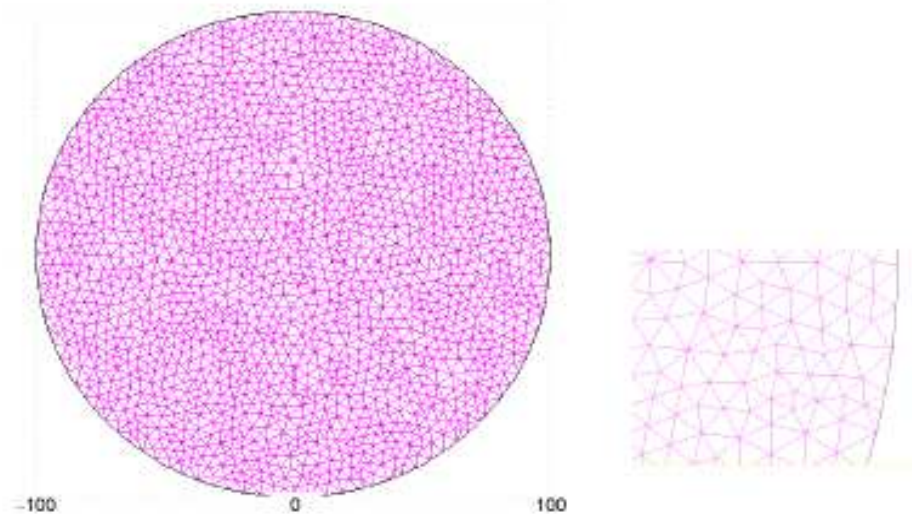


Bild 2 – Finite-Elemente-Maschenbildung (Dreiecke zweiter Ordnung) bei einer Scheibe und Einzelheiten

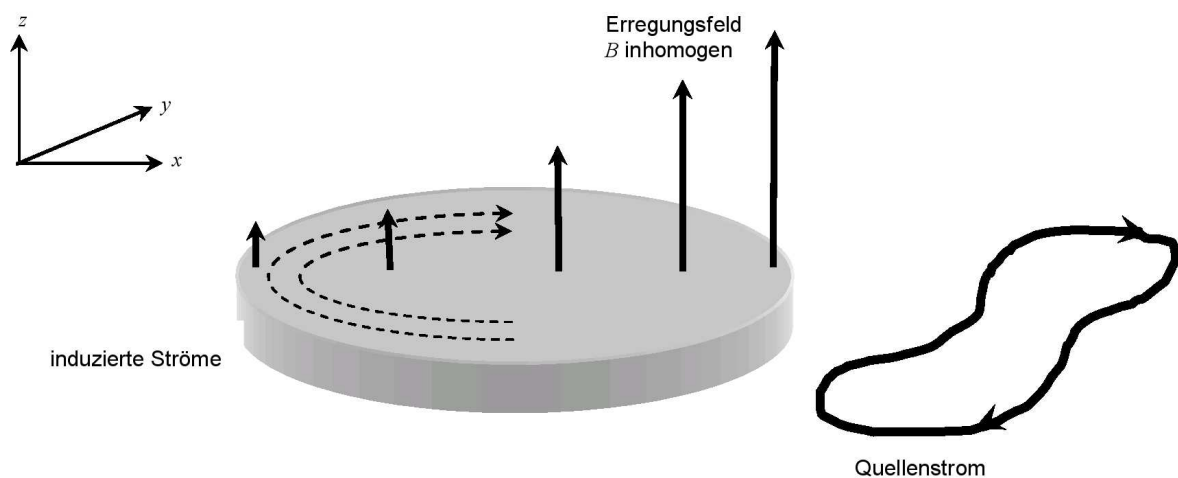


Bild 3 – Leitfähige Scheibe in einer homogenen magnetischen Flussdichte

Ausgehend von den Maxwell'schen Gleichungen (niederfrequente Näherung) ergibt sich eine einfache Gleichung mit spezifischer mathematischer Formulierung (siehe [Anhang G](#)):

$$\frac{1}{\sigma} \nabla^2 \vec{H}_r - \mu_0 \frac{\partial \vec{H}_r}{\partial t} = \mu_0 \frac{\partial \vec{H}_{ex}}{\partial t} \quad (4)$$

Dabei ist:

H_{ex} das von den Quellenströmen erzeugte Erregungsfeld,

H_r das von den induzierten Strömen erzeugte reagierende Feld.

$$\vec{J} = \text{Rot}(\vec{H}_r) \quad (5)$$

Gleichung (4) kann für eine zweidimensionale Geometrie mit Hilfe der Finite-Elemente-Methode, die auf die im [Bild 2](#) dargestellten Maschen angewendet wird, gelöst werden.

Das Erregungsfeld H_{ex} wird für drei Quellen inhomogener Felder mit Hilfe der im [Anhang F](#) gegebenen analytischen Ausdrücke berechnet. Die drei modellierten Quellen sind: ein durch einen unendlich langen Leiter fließender Strom, zwei parallele Leiter, die symmetrische Ströme führen, und eine Stromschleife.

Es werden X-, Y-, Z-Koordinaten verwendet. Die XY-Ebene ist die zu untersuchende Ebene der Scheibe, in der induzierte Ströme erzeugt werden. Außer in dem besonderen Fall, dass H_{ex} homogen ist, befinden sich die Quellenströme in der gleichen Ebene. Es wird nur die Komponente von H_{ex} entlang der Z-Achse berücksichtigt. Die in der Scheibe induzierten Ströme besitzen zwei Komponenten J_x und J_y .

Beispiele von numerischen Ergebnissen finden sich in den [Anhängen A bis D](#).

3.3 Leitfähigkeit von lebendem Gewebe

Die rechnergestützte Berechnung von im Körper durch äußere magnetische Felder induzierten Strömen wird stark beeinflusst durch die Leitfähigkeit der verschiedenen Gewebe im Körper und ihren anisotropen Eigenschaften. Die in diesem Schriftstücke dargestellten Ergebnisse beruhen auf der Annahme einer homogenen Leitfähigkeit mit einem Wert von 0,2 S/m. Dieser Wert stimmt mit dem in EMF-Gesundheitsrichtlinien angenommenen mittleren Wert überein.

Die neueste Beurteilung der verfügbaren Daten zeigt an, dass die Leitfähigkeit geringfügig größer ist: 0,22 S/m. Weitere experimentelle Untersuchungen sind im Gange, um vertrauenswürdige Informationen über die Leitfähigkeit zu liefern. Die bevorzugte mittlere Leitfähigkeit könnte sich in Zukunft ändern, wenn bessere Informationen verfügbar werden. In dieser Situation sollten die Werte für die induzierten Ströme, die in diesem Bericht angegeben werden, proportional zur Leitfähigkeit geändert werden. Nichtsdestotrotz ist der vorhergehend definierte Koppelfaktor für inhomogene magnetische Felder, K , von der Leitfähigkeit unabhängig.

3.4 2D-Modelle – Rechenbedingungen

Zur Nachbildung der in einer leitfähigen Scheibe durch ein von vier verschiedenen Quellen erzeugtes magnetisches Wechselfeld mit der Frequenz f induzierten Ströme können 2D-Rechnercodes verwendet werden:

- homogenes und unidirektionales Feld im gesamten betrachteten Raum ([Anhang A](#));
- ein durch einen unendlich langen Leiter fließender Strom ([Anhang B](#));
- zwei parallele Leiter mit symmetrischen Strömen ([Anhang C](#));
- durch eine kreisförmige Spule fließender Strom ([Anhang D](#)).

Um den Vergleich mit analytischen Modellen zu erleichtern, werden in dieser Norm alle numerischen Werte von Rechenparametern durchgängig festgelegt:

- Radius der Scheibe: $R = 100 \text{ mm}$ und $R = 200 \text{ mm}$;

- Leitfähigkeit der Scheibe: $\sigma = 0,2 \text{ S/m}$;
- Feldquellen mit einer Frequenz von 50 Hz.

Außer bei der ersten der vier Feldquellen ist das magnetische Feld der Quelle homogen und nimmt mit zunehmendem Abstand von der Quelle ab. In diesen Fällen ist der Feldwert der Wert an der Kante der Scheibe, die der Quelle am nächsten ist.

Das durch die in der Scheibe induzierten Ströme erzeugte reagierende Feld ist (auf Grund der sehr niedrigen Leitfähigkeit der Scheibe) vernachlässigbar und wird nicht berücksichtigt.

3.5 Koppelfaktor für inhomogene magnetische Felder

Die durch eine lokale Quelle magnetischer Felder in einer leitfähigen Scheibe induzierte Stromdichte (dadurch ein inhomogenes magnetisches Feld erzeugend) ist stets kleiner als die Stromdichte, die durch ein homogenes magnetisches Feld erzeugt würde, dass die gleiche Stärke wie das inhomogene magnetische Feld an der Kante der Scheibe, die der lokalen Quelle am nächsten ist, besitzt. Diese Reduktion des von Quellen inhomogener Felder induzierten Stromes wird unter Verwendung des nachfolgend definierten Koppelfaktors K für inhomogene magnetische Felder beziffert:

$$K = \frac{J_{\text{inhomogen}}}{J_{\text{homogen}}} \quad (6)$$

Dabei ist:

- $J_{\text{inhomogen}}$ die maximale in einer Scheibe durch das inhomogene magnetische Feld einer lokalen Quelle induzierte Stromdichte;
- J_{homogen} die maximale in einer Scheibe durch ein homogenes magnetisches Feld induzierte Stromdichte;
- J_{homogen} wird aus Gleichung (3) abgeleitet:

$$J_{\text{homogen}} = J(r = R) = \sigma R / B \quad (7)$$

Zu beachten ist, dass $K = 1$ ist, wenn das Feld homogen ist. [Anhang A](#) stellt die Stromverteilung in einer Scheibe mit dem Radius $R = 100 \text{ mm}$ bei einem angewendeten homogenen magnetischen Feld mit $B = 1,25 \text{ }\mu\text{T}$ graphisch dar. Der Koppelfaktor für inhomogene magnetische Felder, K , wird für die drei Quellen inhomogener magnetischen Felder in [Anhang B](#), [Anhang C](#) bzw. [Anhang D](#) numerisch berechnet.

ANMERKUNG 1 Berechnete überhöhte Einzelwerte der induzierten Stromdichten wurden in diesem Schriftstück gemittelt (siehe [Anhänge B bis D](#)). Somit sind die hier gegebenen Werte für J_{homogen} und $J_{\text{inhomogen}}$ gemittelte Werte, die über einen Querschnitt von 1 cm^2 senkrecht zur Stromflussrichtung integriert wurden.

ANMERKUNG 2 Die Werte von K wurden für eine Frequenz von 50 Hz berechnet. Nichtsdestotrotz gelten diese Werte auf Grund der niederfrequenten Näherung für den gesamten von dieser Norm erfassten Frequenzbereich, d. h. bis herauf zu 100 kHz. Außerdem ist K auf Grund der niederfrequenten Näherung von der Leitfähigkeit unabhängig.

In realen Fällen kann die räumliche Anordnung des Feldes nicht leicht mit Hilfe von Gleichungen beschrieben und der Koppelfaktor kann nur abgeschätzt werden (z. B. unter Verwendung der in Anhängen gegebenen Tabellenwerte).

3.6 2D-Modelle – Rechenergebnisse

Dieser Abschnitt fasst die in den [Anhängen B, C und D](#) gegebenen detaillierten numerischen Ergebnisse, die für die drei Arten von Quellen gelten, zusammen. Unabhängig von der Quelle wurde als Modell für den menschlichen Körper eine homogene Scheibe genommen:

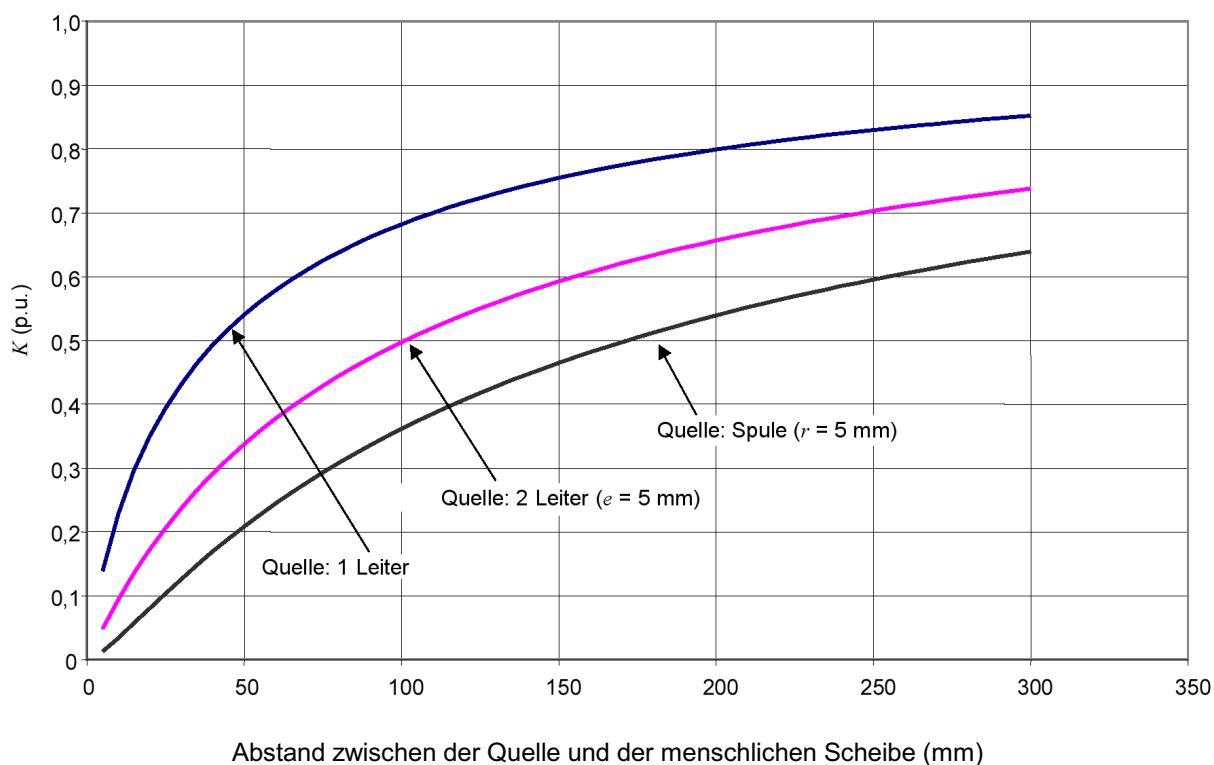
- Radius der Scheibe: $R = 100 \text{ mm}$ und $R = 200 \text{ mm}$;
- Leitfähigkeit der Scheibe: $\sigma = 0,2 \text{ S/m}$.

Für den Vergleich zwischen den verschiedenen Arten von Quellen (d. h. Kopplungsmodellen) wurde der Wert des lokalen maximalen magnetischen Felds normalisiert. Unabhängig von der Quelle ist die Größe des magnetischen Felds an der Kante der Scheibe, die der Quelle am nächsten ist, gleich der Größe des homogenen Felds (d. h. $B = 1,25 \mu\text{T}$, siehe [Anhang A](#)).

Die [Tabelle 1](#) präsentiert eine Auswahl der numerischen Werte für den Faktor K aus den [Anhängen B, C](#) und [D](#) für die drei verschiedenen Quellen und für einen Scheibenradius von $R = 100 \text{ mm}$. Diese Ergebnisse werden im Bild 4 auch graphisch dargestellt.

Alle Werte in [Tabelle 1](#) sind kleiner als 1 und manchmal um einen Faktor bis zu etwa 100 viel kleiner als 1. Dies zeigt, dass für eine festgelegte maximale Stromdichte in der Scheibe das korrespondierende magnetische Feld an der Kante der Scheibe einen weiten Wertebereich annehmen kann, abhängig von den Eigenschaften der Feldquelle und der Entfernung zwischen der Scheibe und der Quelle.

Die Annäherung an ein homogenes Feld (für das $K = 1$) ist nur geeignet, wenn der Abstand zwischen der Quelle und der „menschlichen Scheibe“ groß wird im Vergleich zu den Maßen der Scheibe (typischerweise das 10fache des Scheibenradius). Bei den gebräuchlicheren (kürzeren) Entfernungen wie z. B. bei Haushaltgeräten muss die Inhomogenität des Feldes mit der Entfernung bei der Art der Darstellung in dieser Norm berücksichtigt werden.



ANMERKUNG Werte für Entfernungen bis zu 1 900 mm und für andere Entfernungen zwischen Leitern und andere Spulenabmessungen sind in den [Anhängen B, C](#) und [D](#) gegeben.

Bild 4 – Änderung des Koppelfaktors für inhomogene magnetische Felder, K , mit der Entfernung für die drei magnetischen Feldquellen (Scheibenradius $R = 100 \text{ mm}$)

Tabelle 1 – Numerische Werte des Koppelfaktors für inhomogene magnetische Felder, K , für verschiedene Arten von magnetischen Feldquellen und verschiedene Entfernungen zwischen Quelle und leitfähiger Scheibe ($R = 100$ mm)

K-Faktor für verschiedene Quellen			
Entfernung zwischen der Quelle und der Scheibe mm	Ein unendlicher Leiter	Zwei parallele Leiter mit symmetrischen Strömen, um 5 mm voneinander getrennt	Eine kreisförmige Spule 2,5 mm Radius
10	0,229	0,094	0,034
20	0,350	0,172	0,080
30	0,432	0,237	0,126
40	0,492	0,291	0,169
50	0,540	0,337	0,208
60	0,579	0,378	0,244
70	0,611	0,413	0,277
80	0,638	0,444	0,308
90	0,661	0,472	0,336
100	0,682	0,497	0,361
110	0,700	0,520	0,385
120	0,716	0,540	0,407
130	0,730	0,559	0,428
140	0,743	0,576	0,447
150	0,754	0,592	0,465
160	0,765	0,607	0,482
170	0,775	0,621	0,497
180	0,783	0,634	0,512
190	0,792	0,645	0,526
200	0,799	0,657	0,539
210	0,806	0,667	0,552
220	0,813	0,677	0,563
230	0,819	0,686	0,575
240	0,824	0,695	0,585
250	0,830	0,703	0,595
260	0,835	0,711	0,605
270	0,839	0,718	0,614
280	0,844	0,725	0,623
290	0,848	0,732	0,631
300	0,852	0,738	0,639

ANMERKUNG Werte für Entfernungen bis zu 1 900 mm und für andere Entfernungen zwischen Leitern und andere Spulenabmessungen sind in den [Anhängen B, C und D](#) gegeben.

4 Validierung der Modelle

Die Validierung der für die (rechnergestützte) Berechnung der induzierten Stromdichten verwendeten numerischen Modelle muss durch Vergleich mit den Ergebnissen, die in den Anhängen dieser Norm gegeben sind, durchgeführt werden. Letztere wurden durch den Vergleich mit der wissenschaftlichen Literatur validiert.

Zusätzliche Informationen hinsichtlich der Validierung der für numerische Berechnungen verwendeten Rechnerprogramme können in den Literaturhinweisen in Teil 1 der vorliegenden Norm gefunden werden.

Anhang A (normativ)

Scheibe in einem homogenen Feld

Die induzierten Ströme wurden für eine Scheibe mit homogener Leitfähigkeit berechnet. Um den Vergleich zwischen verschiedenen Anordnungen von Feldquellen zu erlauben (abhängig von der Geometrie der Quelle und der Entfernung zur Scheibe, siehe [Anhänge B bis D](#)), wurden die folgenden genormten Werte gewählt:

- Frequenz $f = 50$ Hz (siehe Anmerkung 2 in [3.5](#));
- homogene magnetische Flussdichte $B = 1,25$ μT ;
- Radius der leitfähigen Scheibe $R = 100$ mm;
- Leitfähigkeit (homogen) $\sigma = 0,2$ S/m.

Einsetzen dieser Werte in die Gleichung (3) ergibt an der Kante der Scheibe:

$$J_{\max} = 0,393 \times 10^{-5} \text{ A/m}^2 \text{ (analytische Berechnung)}$$

Ergebnisse von mit dem Rechner durchgeführten Berechnungen unter Verwendung von Finite-Elemente-Methoden werden nachstehend in Form von graphischen Darstellungen, die die Form der Verteilung der induzierten Ströme in der Scheibe zeigen ([Bild A.1](#)), sowie von Kurven, die die numerischen Werte von lokal induzierten Strömen zeigen ([Bild A.2](#)), präsentiert.

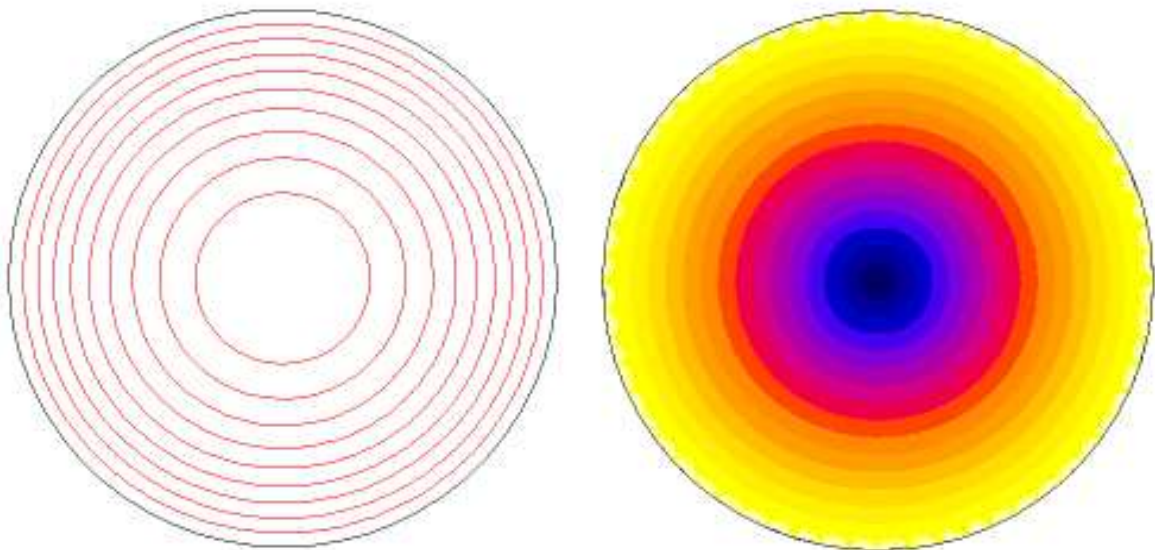


Bild A.1 – Stromdichtelinien J und Verteilung von J in der Scheibe

Diese mit dem Rechner durchgeführte Berechnung ergibt an der Kante der Scheibe einen Wert von:

$$J_{\max} = 0,390 \times 10^{-5} \text{ A/m}^2$$

Unter Berücksichtigung des Mascheneffekts von numerischen Modellen kann dieser numerische Wert von $J_{\max}$ als gleich zu demjenigen aus der analytischen Berechnung angesehen werden. Somit ergeben numerische und analytische Ansätze in diesem einfachen Fall sehr ähnliche Resultate.