

5011

**BGI 5011**



**Beurteilung magnetischer  
Felder von Widerstands-  
schweißeinrichtungen**



# Inhaltsverzeichnis

	Seite
<b>Vorbemerkung</b> .....	<b>5</b>
<b>1 Anwendungsbereich</b> .....	<b>6</b>
<b>2 Begriffsbestimmungen</b> .....	<b>7</b>
<b>3 Widerstandsschweißen</b> .....	<b>11</b>
3.1 Prinzip .....	11
3.1.1 Allgemeines .....	11
3.1.2 Punktschweißen .....	11
3.1.3 Buckelschweißen .....	11
3.1.4 Rollennahtschweißen .....	12
3.1.5 Abbrennstumpfschweißen .....	12
3.2 Bauformen .....	13
3.2.1 Schweißzangen .....	13
3.2.2 Ständermaschinen .....	13
3.3 Schweißstromquellen .....	14
3.3.1 Allgemeines .....	14
3.3.2 50-Hz-Wechselstromquelle .....	14
3.3.3 Gleichstromquellen .....	14
3.3.4 Kondensatorentladungs-Stromquelle .....	15
<b>4 Beurteilung der Exposition</b> .....	<b>16</b>
4.1 Befähigte Personen/Sachkundige .....	16
4.2 Vorgehensweise .....	16
4.3 Ermittlung der auftretenden Felder .....	18
4.3.1 Messung der magnetischen Flussdichte .....	18
4.3.2 Messung der Stromkenngrößen .....	31
4.3.3 Berechnung der magnetischen Flussdichte .....	35
4.4 Bewertung .....	36
4.4.1 Allgemeines .....	36
4.4.2 Physiologische Grundlagen .....	36

	Seite
4.4.3 Zulässige Werte .....	37
4.4.4 Gepulste Felder .....	38
4.4.5 Bewertung gepulster Felder .....	40
4.4.6 Vorgehensweise bei der Bewertung .....	42
4.4.7 Herzschrittmacher .....	49
<b>5 Maßnahmen .....</b>	<b>50</b>
5.1 Allgemeines .....	50
5.2 Technische Maßnahmen .....	50
5.2.1 Handgeführte Schweißzangen .....	50
5.2.2 Stationäre Schweißeinrichtungen .....	54
5.3 Maßnahmen an der Stromquelle .....	56
5.3.1 Ersatz von 50 Hz-Wechselstromquelle durch Gleichstromquelle .....	56
5.3.2 Optimierung des Stromverlaufes .....	56
5.4 Anlagengestaltung .....	57
5.5 Organisatorische Maßnahmen .....	58
5.5.1 Unterweisung .....	58
5.5.2 Kennzeichnung .....	58
5.5.3 Zugangsbeschränkung .....	59
5.5.4 Betriebsanweisung .....	59
5.5.5 Veränderung der Betriebsparameter .....	61
<b>Anhang 1: Beispiele zur Expositionsbewertung .....</b>	<b>62</b>
<b>Anhang 2: Numerische Feldberechnung .....</b>	<b>89</b>
<b>Anhang 3: Vorschriften und Regeln .....</b>	<b>101</b>

**BG-Informationen** enthalten Festlegungen und Informationen, die die Anwendung der vorliegenden Erkenntnisse und Regelungen zu einem bestimmten Sachgebiet oder Sachverhalt bei der praktischen Arbeit erleichtern sollen.

# Vorbemerkung

In Deutschland wird der Schutz versicherter Arbeitnehmer gegen gesundheitliche Risiken, die mit der Exposition gegenüber elektrischen, magnetischen und elektromagnetischen Feldern verbunden sein können, durch die Unfallverhütungsvorschrift „Elektromagnetische Felder“ (BGV B11) sichergestellt. Diese enthält zulässige Werte der Feldstärken und Festlegungen für deren Anwendung.

Die Erarbeitung der vorstehend genannten Unfallverhütungsvorschrift erfolgte im Auftrag des Bundesministeriums für Arbeit und Soziales (BMAS) und des Hauptverbandes der gewerblichen Berufsgenossenschaften und hat somit den Verbindlichkeitsstatus einer gesetzlichen Regelung.

Die zulässigen Werte basieren auf den Guidelines der Internationalen Kommission für den Schutz vor nichtionisierender Strahlung ICNIRP (1998). In speziellen praxisbezogenen Bereichen gehen die Festlegungen der vorstehend genannten Unfallverhütungsvorschrift über die Empfehlungen dieser Guidelines hinaus. Das gilt im besonderen Maße für die Bewertung niederfrequenter gepulster Magnetfelder, für die es national und international zwar wissenschaftliche Grundlagen, jedoch keine Vorbilder gab.

Die für die Bewertung von niederfrequenten gepulsten Feldern gewählte mathematische Beschreibung in der vorstehend genannten Unfallverhütungsvorschrift stellt gegenüber dem realen Zusammenhang zwischen elektrischer Stimulation und biologischer Wirkung (Grundgesetz der Stimulation) eine erhebliche Vereinfachung dar, beschreibt die physiologischen Vorgänge aber mit einer hinreichenden Genauigkeit, so dass eine möglichst exakte und stets sichere Bewertung der Exposition erreicht wird.

Diese Handlungsanleitung soll dem Anwender helfen, die in der Arbeitswelt anzutreffenden niederfrequenten gepulsten Magnetfelder mit den verfügbaren Messgeräten und mit einem angemessenen Zeitaufwand zu bewerten. Ein Teil der hier angebotenen Lösungsvorschläge beruht auf aktuellen Forschungsergebnissen zu Emissionen von Widerstandsschweißrichtungen.

# 1 Anwendungsbereich

- 1.1 Diese BG-Information findet Anwendung bei der Beurteilung magnetischer Felder von Widerstandsschweißeinrichtungen. Sie dient der Anwendung der Unfallverhütungsvorschrift „Elektromagnetische Felder“ (BGV B11).
- 1.2 Diese BG-Information findet sinngemäß auch Anwendung auf Einrichtungen mit vergleichbaren (zeitlich, räumlich) magnetischen Feldern.

## 2 Begriffsbestimmungen

Im Sinne dieser BG-Information werden folgende Begriffe bestimmt:

1. **Befähigte Personen/Sachkundige** sind Personen, die nach § 2 Abs. 7 der Betriebssicherheitsverordnung für diese Tätigkeit über Fachkenntnisse zur Messung, Berechnung und Beurteilung von magnetischen Feldern verfügen, die sie durch
  - Berufsausbildung,
  - Berufserfahrungund
  - zeitnahe berufliche Tätigkeit erworben haben.

Sie müssen für diese Tätigkeiten weisungsfrei gestellt sein.

*Siehe Technische Regeln für Betriebssicherheit TRBS 1203 „Befähigte Personen, allgemeine Anforderungen“.*

2. **Gepulste Felder** sind Felder, die keinen kontinuierlichen, gleichförmigen Verlauf besitzen, d.h. Pausenzeiten ohne Feld beinhalten, zeitliche Variationen ihrer Stärke besitzen oder aus mehreren Frequenzen bestehen. Sie können sich aus einer zeitlichen Abfolge von z.B. sinus-, trapez-, dreieckförmigen oder exponentiellen Einzel- oder Mehrfachpulsen und Pausen oder Gleichfeldanteilen zusammensetzen.
3. **Exposition** ist das Ausgesetzt sein einer Person gegenüber einem auf sie einwirkenden magnetischen Feld.
4. **Grenzfrequenzen** geben bei Messgeräten den Frequenzbereich an, innerhalb dessen die Messgeräte bei Berücksichtigung der systematischen (geräteeigenen) Fehler angewendet werden können.
5. **Schweißvorgang** ist ein Impulszug aus einer oder mehreren Stromzeiten zum Vorwärmen, Schweißen und Nachwärmen der Schweißstelle.

*Ein prinzipieller Ablauf des Schweißvorganges ist in Bild 1 wiedergegeben. Von den dargestellten Impulsen ist mindestens ein Schweißimpuls vorhanden,*

Vorwärm- und Nachwärmimpulse können vorhanden sein. Stromanstiegs- und Stromabfallzeit (mit einer vorgegebenen Geschwindigkeit der Stromänderung) sind in der Regel ohne Pausen mit dem Schweißimpuls verbunden.

Vor- und Nachwärmzeit sind wenn, dann aus metallurgischen Gründen, z. B. Gefügebildung der Werkstoffe, vorhanden und weisen eine niedrigere Stromstärke als der Schweißstrom auf.

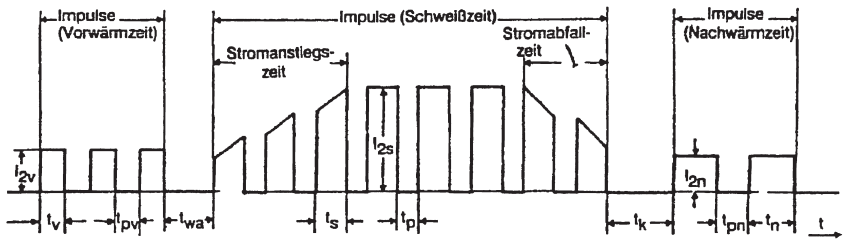


Bild 1: Prinzipieller Ablauf des Schweißvorganges

Siehe DVS-Merkblatt 2904 „Steuerung für Punkt-, Buckel- und Rollennahtschweißeinrichtungen“.

Die Zeiten in **Bild 1** bedeuten:

- |          |  |          |                            |
|----------|--|----------|----------------------------|
| $t_v$    | Stromzeit beim Vorwärmen               | $t_n$    | Stromzeit beim Nachwärmen  |
| $t_{pv}$ | Pausenzeit beim Vorwärmen              | $t_{pn}$ | Pausenzeit beim Nachwärmen |
| $t_{wa}$ | Wärmeausgleichszeit nach dem Vorwärmen | $I_{2v}$ | Vorwärmstrom               |
| $t_s$    | Stromzeit beim Schweißen               | $I_{2s}$ | Schweißstrom               |
| $t_p$    | Pausenzeit beim Schweißen              | $I_{2n}$ | Nachwärmstrom              |
| $t_k$    | Kühlzeit nach dem Schweißen            |          |                            |

Während der einzelnen, als Impulse bezeichneten Zeiten liefert die Schweißstromquelle Strom und es ist ein Magnetfeld vorhanden.

Der Strom der einzelnen Impulse hat dabei je nach Art der Schweißstromquelle einen Zeitverlauf wie in Bild 2 dargestellt.



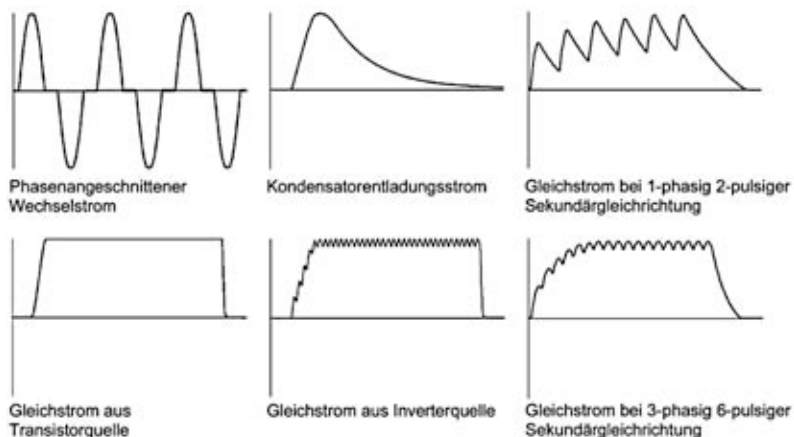


Bild 2: Prinzipielle Form des Zeitverlaufs des Schweißstromes, geordnet nach Typ der Schweißstromquelle

Siehe DVS-Merkblatt 2908 „Messen beim Punkt-, Buckel- und Nahtschweißen“.

## 6. Schweißstrom

Siehe Nummer 5.

7. **Schweißzeit** ist die Summe aller Strom- und Pausenzeiten, jedoch ohne Vor- und Nachwärmzeiten (siehe auch Nummer 5).
8. **Stromzeit** ist die Zeitdauer eines Impulses. Die Zeitdauer des Schweißstromes wird üblicherweise in Millisekunden (bei Invertern) bzw. in Perioden der Netzfrequenz (bei Wechselstrommaschinen bzw. konventionellen Gleichstrommaschinen) eingestellt (siehe auch Nummer 5).
9. **Stromflusszeit** ist die Zeit, in der der Thyristor einer Wechselstrommaschine leitend ist.

Wechselstrommaschinen (50 Hz) werden zumeist mit phasenangeschnittenem Strom betrieben, siehe Bild 2 (Teilbild „Phasenangeschnittener Wechselstrom“),

*d. h. jeweils während eines eingestellten Zeitpunktes innerhalb einer halben Netzperiode (Zündwinkel) wird der Thyristor gezündet, wodurch nicht über die gesamte Periodendauer Strom fließt. Nicht zu verwechseln ist die Stromflusszeit mit der Stromzeit (siehe Nummer 8), die immer in ganzen Perioden bzw. Halbperioden angegeben wird.*

10. Ein **Impulszug** liegt dann vor, wenn der Schweißvorgang aus mehreren Stromzeiten besteht, die durch Pausen getrennt sind und die hinsichtlich Stromstärke und Signalform vergleichbar sind.

*Bei stark unterschiedlichen Signalformen innerhalb eines Schweißvorganges müssen die einzelnen Impulse getrennt bewertet werden.*

11. **Integrationszeit  $T_i$**  ist die Zeit, in der diese bei Schweißvorgängen mit einer Dauer  $< 1s$  mit dem Schweißvorgang (Anwärmen, Schweißen, Nachwärmen) beginnt und mit dem nächsten Schweißvorgang, spätestens jedoch nach  $1s$  endet.

*Bei Schweißvorgängen  $> 1s$  ist die Integrationszeit das  $1s$ -Intervall im Schweißvorgang mit den geringsten Pausenzeiten (zwischen den Impulszügen) oder höchsten Signalamplituden.*

12. **Umrichter/MF-Inverter** werden in der Widerstandsschweißtechnik Gleichstromschweißgeräte mit interner Mittelfrequenzspeisung (meist 1 bis 10 kHz) synonym als Umrichter bzw. Mittelfrequenz(MF)-Inverter-Stromquelle bezeichnet.

# 3 Widerstandsschweißen

## 3.1 Prinzip

### 3.1.1 Allgemeines

Beim Widerstandsschweißen wird durch den Anpressdruck sowie die Wärmewirkung des elektrischen Stromes im Werkstück eine stoffschlüssige Verbindung zwischen Metallteilen hergestellt. Dazu sind in der Regel Schweißströme von mehreren Kiloampere erforderlich. Die häufigsten Widerstandsschweißverfahren sind Punktschweißen, Buckelschweißen, Rollennahtschweißen und Abbrennstumpfschweißen. Zur Erzielung optimaler Schweißverbindungen müssen die Parameter Schweißstrom, Schweißzeit und Elektrodenkraft aufeinander abgestimmt sein.

### 3.1.2 Punktschweißen

Beim Punktschweißen werden die aufeinander gepressten Teile nach ausreichender Erwärmung der Fügestelle punktförmig verbunden. Die Verbindung entsteht durch Schmelzen und Erstarren des Werkstoffs an der Fügestelle. In den durch die Elektrodenkraft zusammengepressten Teilen erfolgt die elektrische Widerstandserwärmung (Joulesches Gesetz  $Q = I^2 \cdot R \cdot t$ ). Schweißstrom und Elektrodenkraft werden durch stiftförmige Elektroden, mit meist ballig geformten Elektrodenarbeitsflächen, übertragen. Die üblicherweise benötigten Schweißströme liegen im Bereich von 6 bis 40 kA.

### 3.1.3 Buckelschweißen

Das Buckelschweißen ist ein Pressschweißverfahren, bei dem elektrischer Strom und Kraft den zu verbindenden Werkstücken durch meist ebene, großflächige Elektroden zugeführt wird. Die Buckelform (gefertigte oder natürliche Buckel) bewirkt die Stromkonzentration an der Fügestelle. Die Buckel werden durch die Elektrodenkraft und die Erwärmung infolge des Stromflusses während des Schweißens zurückverformt. Dabei entstehen an den Schweißstellen nicht lösbare punkt- oder linienförmige Verbindungen.

Der Vorteil des Buckelschweißens ist die Möglichkeit mehrere Schweißverbindungen mit einem Stromimpuls gleichzeitig herzustellen. Es erfordert in der Regel deutlich höhere Schweißströme (bis ca. 120 kA) und Elektrodenkräfte.

### 3.1.4 **Rollennahtschweißen**

Das Rollennahtschweißen ist vom Punktschweißen abgeleitet. Jedoch werden anstelle von stiftförmigen Elektroden Rollen als Elektroden verwendet. Das Rollenpaar berührt ebenso wie Punktelektroden das Werkstück nur auf einer kleinen Fläche, was für eine hohe Stromdichte im Schweißbereich sorgt, so dass der Strom durch einen beschränkten Querschnitt des Werkstückes von Rolle zu Rolle fließt und einen Schweißpunkt erzeugt. Die Rollen drehen sich entsprechend der Weiterbewegung des Werkstücks und brauchen daher nicht abgehoben zu werden. Durch das aufeinander abgestimmte Verhältnis von Strom-, Pausenzeit und Rollen-, bzw. Schweißgeschwindigkeit lassen sich Heft-, Fest- und Dichtnähte erzeugen. Die erforderlichen Schweißströme und Elektrodenkräfte sind mit den Parametern einer entsprechenden Punktschweißung vergleichbar.

### 3.1.5 **Abbrennstumpfschweißen**

Das Abbrennstumpfschweißen ermöglicht die Herstellung von Vollanschlüssen massiver Querschnitte mittels Widerstandserwärmung. Die zu verschweißenden Teile werden fluchtend zu ihren Längsachsen in die Schweißmaschine eingespannt, so dass sich die Stirnflächen gegenüber liegen. Abhängig vom Querschnitt der Teile werden diese dann alternierend bei eingeschalteter Schweißspannung in Kontakt gebracht. Diesen Vorgang nennt man „Reversieren“. Der während der Kontaktzeit fließende Strom erzeugt die für den nachfolgenden Abbrennvorgang notwendige Wärme im Fügespalt. Nach dem Vorwärmen folgt die Abbrennphase. Hierbei werden die Teile mit definierter Geschwindigkeit aufeinander zu bewegt. Der punktuell fließende Schweißstrom erzeugt so genannte Lockerkontakte mit hohen Stromdichten. Die in diesem Bereich stark überhitzte Schmelze wird explosionsartig aus dem Fügespalt heraus geschleudert und sorgt so für eine Reinigung der Fügeflächen. Nach dem Abbrennen folgt der Stauchvorgang, bei dem die Teile mit großer Kraft und Geschwindigkeit verschweißt werden.

## **3.2 Bauformen**

### **3.2.1 Schweißzangen**

#### **3.2.1.1 Kabelzange**

Bei der Kabelzange sind die Schweißstromquelle und die Zange räumlich getrennt. Bedingt dadurch muss der Schweißstrom dem Werkzeug über (zum Teil wassergekühlte) Kabel zugeführt werden. Auf Grund der relativ starren Kabel müssen bei der Handhabung hohe Kräfte aufgewendet werden. Häufig liegen die Kabel sehr nahe am Körper der Bedienperson.

#### **3.2.1.2 Trafozange**

Bei der Trafozange ist der Schweißtransformator Bestandteil der Zange, so dass der Zange nur noch der wesentlich kleinere Primärstrom zugeführt werden muss. Der eingebaute Transformator erhöht gegenüber der Kabelzange die Masse und die Abmessungen der Zange.

### **3.2.2 Ständermaschinen**

#### **3.2.2.1 C-Gestell**

Diese Art der Ständermaschine erhält ihren Namen durch die zum Bediener hin offene Bauweise. Von der Seite betrachtet erkennt man die C-Form, die die gebräuchlichste Form im Bereich der Punkt-, Buckel- und Rollennahtschweißmaschinen ist und die Zuführung des Werkstückes sowohl von der Seite als auch von vorne ermöglicht. Die Bedienung kann stehend oder sitzend erfolgen.

#### **3.2.2.2 Portal**

Diese Maschinenform findet überwiegend Anwendung bei hohen Elektrodenkräften. Die Zuführung des Werkstückes erfolgt durch die Portalöffnung in der Mitte zwischen den beiden Portalsäulen.

### **3.3 Schweißstromquellen**

#### **3.3.1 Allgemeines**

Die zur Verfügung stehende elektrische Energie muss für den Schweißprozess in eine geeignete Form gebracht werden. Die dazu notwendigen Schweißstromquellen können unterteilt werden in 50-Hz-Wechsel-, Gleich-, Inverter- und Kondensator-entladungsstromquellen.

#### **3.3.2 50-Hz-Wechselstromquelle**

Bei einer 50-Hz-Wechselstromquelle wird der Schweißstrom mittels einer Phasenanschnittsteuerung eingestellt.

#### **3.3.3 Gleichstromquellen**

##### **3.3.3.1 Konventionelle Gleichstromquelle**

Bei einer konventionellen Gleichstromquelle erfolgt nach dem Transformieren der Netzspannung auf eine geeignete Schweißspannung eine gesteuerte Gleichrichtung mit anschließender Glättung. Durch eine Phasenanschnittsteuerung wird die benötigte Ausgangsleistung eingestellt.

##### **3.3.3.2 Mittelfrequenz-Inverter-Stromquelle**

Bei Inverterstromquellen wird die Netzspannung gleichgerichtet und geglättet. Anschließend folgen ein Wechselrichter, MF-Transformator und Ausgangsgleichrichter. Durch unterschiedliche Ansteuerung des Wechselrichters werden die für den jeweiligen Schweißprozess erforderlichen Parameter eingestellt. Die Wechselrichtertaktfrequenz liegt dabei meistens im Bereich von 1 bis 20 kHz. Trotz der ausgangsseitigen Gleichrichtung wird das Widerstandsschweißen mit Inverterstromquellen auch als Mittelfrequenzschweißen bezeichnet. Neben der optimalen Einstellung des Schweißstromverlaufes bietet die Inverterstromquelle auch den Vorteil eines leichteren und kompakteren Transformators. Beim Buckel- und Rollennahtschweißen bietet die Mittelfrequenztechnik den Vorteil, dass bei diesen Verfahren eine gute Stromverteilung auf die einzelnen Buckel gegeben ist und ein Puls-Pausen-Verhältnis im Millisekundenbereich eingestellt werden kann. Da elektronische Bauteile in den letzten Jahren leistungsstärker und preisgünstiger geworden sind, werden in zunehmenden Maße Inverterstromquellen eingesetzt.

### 3.3.4 **Kondensatorentladungs-Stromquelle**

Beim Kondensatorentladungsschweißen wird ein extrem hoher Schweißstromimpuls erzeugt, indem eine zur Energiespeicherung dienende Kondensatorbatterie über einen Transformator entladen wird.

Die Energie- bzw. Schweißstromeinstellung wird bei Kondensatorentladungsschweißmaschinen vor allem über eine Variation der Ladespannung ausgeführt. Dabei bleiben die Zeitparameter des Entladestromverlaufes konstant, es ändert sich nur dessen absolute Höhe. Weitere Möglichkeiten sind die Änderung der Gesamtkapazität der Hochspannungskondensatoren und der Transformatorübersetzung.

Ein Sonderverfahren, das hier nicht weiter behandelt wird, da es nicht zu den Widerstandsschweißverfahren gehört, ist das Bolzenschweißen mit direkter Kondensatorentladung.

# 4 Beurteilung der Exposition

## 4.1 Befähigte Personen/Sachkundige

Mit der Messung, Berechnung und Beurteilung von magnetischen Feldern sind befähigte Personen (früher Sachkundige) zu beauftragen.

Die befähigte Person soll durch eine sachgerechte Ermittlung der Exposition die Grundlage für eine fachlich begründete Bewertung dieser Exposition liefern und diese angemessen erläutern können.

Die befähigte Person muss fachlich und organisatorisch in der Lage sein,

- eine Exposition gegenüber Magnetfeldern, gegebenenfalls auch elektrischen oder elektromagnetischen Feldern messtechnisch oder rechnerisch zu bestimmen,
- die für die gemessenen oder errechneten Feldstärken ursächliche(n) Feldquelle(n) zu ermitteln und mit ihren wesentlichen Eigenschaften zu beschreiben,
- die ermittelte Exposition in Relation zu den jeweiligen frequenzabhängigen zulässigen Werten auf Basis der geltenden Unfallverhütungsvorschrift „Elektromagnetische Felder“ (BGV B11) zu beurteilen,
- eine Gefährdungsbeurteilung für Personen mit Körperhilfsmitteln, z.B. Herzschrittmachern, durchzuführen.

## 4.2 Vorgehensweise

Die Exposition kann durch Messung, Berechnung, Herstellerangaben oder Vergleich mit anderen Anlagen ermittelt werden.

Ein Vergleich ist nur bei gleichem Anlagentyp, gleichen geometrischen Anordnungen und gleichen betrieblichen Einstellungen statthaft. Abweichungen selbst nur eines Parameters können erhebliche Auswirkungen auf die Größe der Exposition haben. Die Methode Vergleich ist daher mit äußerster Sorgfalt anzuwenden und sollte im Zweifelsfall durch Stichprobenmessungen oder Berechnungen abgesichert werden.

Berechnungen liefern meist nur punktuelle Werte im Raum. Die physiologischen Effekte von magnetischen Feldern setzen jedoch Flächen oder Volumina voraus,



in denen die Verteilung des Feldes bekannt ist. Es ist daher sicherzustellen, dass eine Information über die Feldverteilung im Raum durch eine ausreichende Anzahl von berechneten Punkten sichergestellt ist. Um eine einfache Vergleichbarkeit von Berechnungen, Messungen und zulässigen Werten zu gewährleisten, sollten annähernd gleiche Integrationsflächen gewählt werden.

Die Geometrie des Schweißstrompfades bestimmt im Wesentlichen die räumliche Feldverteilung. Durch ferromagnetische Stoffe, z. B. Maschinenkörper, in unmittelbarer Umgebung kann diese Verteilung im Raum erheblich beeinflusst werden.

Betriebliche Einstellungen, insbesondere die Schweißstromparameter Amplitude und Schweißzeit, aber auch die elektrischen Komponenten des Schweißstromkreises, z. B. Art und Länge der Kabel sowie Typ der Schweißzange, bestimmen maßgeblich den zeitlichen Verlauf der auftretenden magnetischen Felder. Im Sinne einer Expositionsermittlung für den ungünstigsten Fall sind dabei nur Messwerte bzw. berechnete Werte mit zulässigen Werten zu vergleichen, die für den maximalen Schweißstrom gelten. Wie aus Untersuchungen an verschiedenen Schweißeinrichtungen bekannt ist, erfüllen Schweißstromeinstellungen von 70 bis 100 % bei 50-Hz-Anlagen und 60 bis 90 % bei Mittelfrequenzanlagen diese Forderung im Allgemeinen, da in diesem Einstellbereich nur noch geringe Veränderungen der expositionsrelevanten Parameter auftreten. Insbesondere bei Mittelfrequenzanlagen sollten keine zu hohen Einstellwerte gewählt werden, um ein Eingreifen der Strombegrenzung während der Messung unter allen Umständen zu vermeiden.

Wird eine Anlage betrieblich dauerhaft unterhalb ihrer Maximalparameter betrieben, so ist eine alternative Bewertung dieses Arbeitspunktes nur dann zulässig, wenn durch entsprechende Maßnahmen (dauerhafte Einschränkung des Stellbereichs) ein Verlassen dieses Arbeitspunktes hin zu höheren Expositionen nicht ohne weiteres möglich ist. Die Parameter, für die die Bewertung durchgeführt wurde, sind zu dokumentieren und im Bereich der Schweißeinrichtung bzw. des Bedienplatzes zu hinterlegen. Bei betrieblichen Veränderungen, die Auswirkungen auf die Exposition haben können, ist die Bewertung zu wiederholen.

Kann (z. B. aus betrieblichen Gründen) die Messung der magnetischen Flussdichte (Grundsignal ohne Oberschwingungen) nicht bei dem höchstmöglichen Betriebsstrom durchgeführt werden, so sind die Messwerte nach der Formel

$$B_{\max} = \frac{I_{\max}}{I_{\text{mess}}} \cdot B_{\text{mess}} \quad (1)$$

auf diesen Strom hochzurechnen.

### 4.3 Ermittlung der auftretenden Felder

Die Flussdichten der durch Widerstandsschweißeinrichtungen emittierten magnetischen Felder können nach zwei grundsätzlich unterschiedlichen Verfahren ermittelt werden:

- Direkte Messung aller für die Bewertung der Exposition erforderlichen Feldparameter.

*Dieses Verfahren hat bei Verfügbarkeit geeigneter Messgeräte den Vorteil, sofort Werte zu liefern, die eine erste Einschätzung der Expositionssituation vor Ort zulassen.*

- Messung des die Felder verursachenden Schweißstromes mit Erfassung aller für die Bewertung der Exposition erforderlichen Kenngrößen und nachfolgende Berechnung der räumlichen Verteilung und der Absolutwerte der magnetischen Flussdichte.

*Dieses Verfahren lässt eine weitgehend automatisierte Bewertung zu und verringert damit den messtechnischen Aufwand und gleichzeitig die Möglichkeit von Fehlern. Nachteil hierbei ist, dass diese Messung keine direkte Einschätzung der Exposition vor Ort zulässt.*

#### 4.3.1 Messung der magnetischen Flussdichte

##### 4.3.1.1 Anforderungen an Magnetfeldmessgeräte

Marktübliche Magnetfeldmessgeräte bestehen aus einer – zum Teil auch auswechselbaren – Magnetfeldsonde und einer Auswerteeinheit. Als Messsonden werden entweder Spulen oder Hall-Sensoren genutzt.

Messgeräte mit Spulensystemen basieren auf der Induktion von Spannungen in den Spulen durch die zu messenden zeitveränderlichen Magnetfelder. Daher können derartige Messgeräte prinzipbedingt keine Gleichfelder messen. Spulensysteme zum Messen von Feldern haben eine untere und eine obere Grenzfrequenz  $f_u$  und  $f_o$ .

*Nähere Ausführungen siehe Abschnitt 4.3.1.5.*

Als Spulensysteme sind isotrope (dreidimensionale) Spulenanordnungen mit einer Spulenfläche von 100 cm<sup>2</sup> je Raumachse nach DIN VDE 0848 Teil 1 „Sicherheit in elektrischen, magnetischen und elektromagnetischen Feldern; Teil 1: Definitionen, Mess- und Berechnungsverfahren“ gebräuchlich.

Das Prinzip von Hallsonden beruht auf der Erzeugung von Spannungen in Halbleitern beim Anliegen äußerer Felder. Dem so genannten Halleffekt liegt die Ablenkung von Elektronen im Halbleiter durch das äußere Magnetfeld zugrunde. Durch die zur Messung notwendige Elektronenbewegung besitzen Hallsonden eine obere Grenzfrequenz, aber keine untere. Daher sind Hallensoren vor allem zur Messung von Gleichfeldern geeignet.

Die nachfolgenden Hinweise sollen die Auswahl eines geeigneten Magnetfeldmesssystems erleichtern. Je nach Anwendungsfall müssen nicht alle Kriterien erfüllt werden. Angesichts des kleinen Marktes für derartige Messgeräte wird man möglicherweise keines finden, das alle Kriterien optimal erfüllt.

### **Handlichkeit der Geräte**

Bei Messungen an Widerstandsschweißmaschinen sind oft nicht alle Bereiche im Maschinenumfeld leicht zugänglich. Dazu sollte die Messsonde separat vom Anzeigegerät handhabbar sein. Die Einstellung von Messparametern soll mit wenig Bedienungsaufwand möglich sein.

### **Messwertanzeige**

Zur Beurteilung der Exposition ist die Erfassung des zeitlichen Verlaufs der gepulsten Felder notwendig. Geräte, die nur eine Ziffernanzeige zur Ausgabe der Messwerte haben, sind daher nicht geeignet.

### **Auswechselbare Sonden**

Für Widerstandsschweißeinrichtungen mit Wechselstrom ist die Messung mit einer Wechselfeldsonde ausreichend. Für Messungen an Widerstandsschweißeinrichtungen mit Gleichstrom ist es erforderlich, auch andere Sonden, z. B. Hallsonden, zu nutzen.

### **Isotrope Messsonden**

Bei Messungen von nur kurzzeitig vorliegenden Feldgrößen ist die Verwendung von isotropen Messsonden unbedingt notwendig. Diese Sonden messen die Feldstärke in allen drei Raumachsen gleichzeitig.

### **Trigger- und Speichermöglichkeit**

Für die Messung der hier betrachteten gepulsten Felder ist eine Triggerung auf das Messsignal und eine Speicherung des zeitlichen Verlaufes der Messsignale aller drei Raumachsen unbedingt erforderlich. Die Speicherung kann auch auf einem externen Gerät erfolgen, wenn das Magnetfeldmessgerät die unbewerteten Signale an einem Ausgang ausgibt.

### **Abtastrate**

Die Abtastrate des Messgerätes muss deutlich höher sein als das Doppelte der höchsten auftretenden Signalfrequenz. Folgende Abtastraten werden empfohlen:

- 50-Hz-Wechselstrom- und konventionelle Gleichstromschweißeinrichtungen: Mindestens 5 kHz Abtastrate.
- Mittelfrequenz-Schweißeinrichtungen: Mindestens das 20fache der Wechselrichtertaktfrequenz.

### **Bewertungsmöglichkeit im Messgerät**

Es ist vorteilhaft und zeitsparend, wenn bereits vor Ort eine orientierende Aussage über die Einhaltung der zulässigen Werte für gepulste Felder erfolgen kann. Derzeit erhältliche Messgeräte erfüllen diese Forderung jedoch noch nicht in vollem Umfang.

#### 4.3.1.2 Vorbereitung und Durchführung von Messungen

Feldstärkemessungen an Widerstandsschweißeinrichtungen können sehr zeitaufwändig sein, erfordern besondere Messtechnik und stellen erhöhte Anforderungen an das Messpersonal. Um diese Messungen möglichst effizient durchzuführen,

sind vor Beginn der eigentlichen Messungen möglichst viele Informationen von dem Betreiber oder Hersteller der Schweißeinrichtungen einzuholen und die Messungen sorgfältig vorzubereiten. Dazu gehört:

- Ermittlung des Typs der Widerstandsschweißanlagen sowie Hersteller und Baujahr.
- Einholen von Angaben zu den Schweißstrom-Signalverläufen, z.B. zeitlicher Verlauf, Höhe des Schweißstromes, Dauer der Stromzeit(en), Anzahl der Schweißvorgänge pro Schicht, Frequenzanteile.
- Angaben zur Anzahl der Exponierten, zu Expositionszeiten und typischen Körperhaltungen bei der Bedienung der Widerstandsschweißeinrichtungen (Fotos anfordern).
- Sorgfältige Auswahl, Vorab-Überprüfung und Einstellung der Flussdichte- und/oder Strommesstechnik.
- Sicherstellung der Verfügbarkeit von Fachpersonal auch von Seiten des Mitgliedsbetriebes, um vor Ort präzise technische Auskünfte zu erhalten und gegebenenfalls Schweißparameter der Widerstandsschweißeinrichtungen während der Messungen zu verändern.
- Persönliche Schutzausrüstungen für das Messpersonal bereitstellen, z. B. Schutzbrille, festes Schuhwerk, Schutzhelm. Betriebsspezifische Schutzanforderungen sind zu beachten.

Während der Flussdichtemessungen sind die Messpunkte so zu wählen, dass sie dem realen Abstand zwischen den Feld erzeugenden Komponenten der Widerstandsschweißeinrichtungen und dem Körper der Bedienperson bei normaler Arbeitshaltung entsprechen. Die Messungen sollen durch Fotos dokumentiert werden, die die typischen Arbeitshaltungen bei der Bedienung der Widerstandsschweißeinrichtung festhalten.

Der Messabstand ist der Abstand von der Sondenmitte (Mittelpunkt des Messwertaufnehmers) zur Oberfläche des Messobjekts. In der Nähe der Oberfläche ist der minimale Messabstand häufig durch die Abmessungen der Sonde vorgegeben. Beispielsweise kann der Abstand vom Mittelpunkt einer Sonde mit 100 cm<sup>2</sup> Spulenfläche zur Oberfläche des Messobjektes nicht kleiner als 5,7 cm sein.

Die von Widerstandsschweißanlagen ausgehenden magnetischen Felder und die eingesetzten Magnetfeldmessgeräte werden durch Personen nicht beeinflusst.

Falls erforderlich, können die Messsonden unmittelbar in Körpfernähe des Bedienpersonals positioniert werden.

4.3.1.3 50-Hz-Wechselstrom-Schweißeinrichtungen

Magnetfelder von 50-Hz-Wechselstrom-Schweißeinrichtungen werden üblicherweise mittels isotroper Wechselfeldsonden auf Spulenbasis gemessen. Die magnetische Flussdichte ist eine Vektorgröße, die durch die isotrope Sonde in drei Richtungskomponenten getrennt gemessen wird. Als Ergebnis der Messung erhält man somit drei Zeitverläufe in x-, y- und z-Richtungen wie in Bild 3 abgebildet, die in einem festen Verhältnis zueinander stehen.

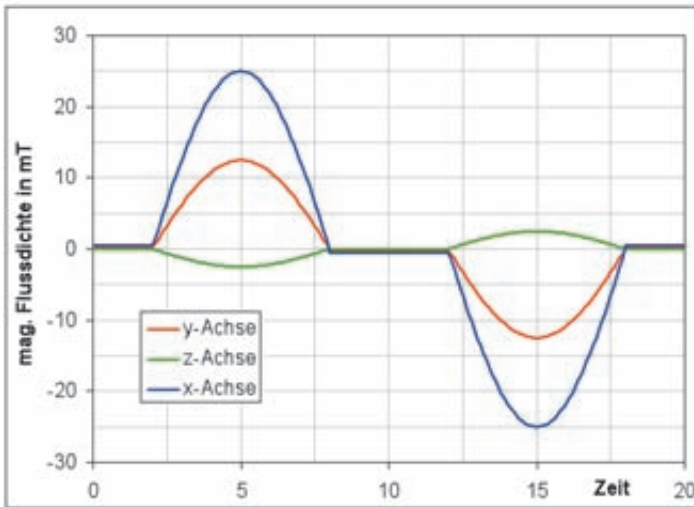


Bild 3: Idealisierter Zeitverlauf der Komponenten der magnetischen Flussdichte an 50-Hz-Wechselstrom-Schweißeinrichtungen

Der in Bild 3 dargestellte Zeitverlauf zeigt die für 50-Hz-Wechselstromquellen typischen sinusähnlichen Feldverläufe mit Pausenanteilen, die sich durch den Phasenanschnitt ergeben.

Aus den Anteilen der einzelnen Feldkomponenten ergibt sich, dass der resultierende Vektor der magnetischen Flussdichte im oberen Beispiel hauptsächlich in Rich-

tion der  $x$ -Achse zeigt. Der Anteil in  $y$ -Richtung ist etwa halb so groß, während der Anteil der  $z$ -Achse vernachlässigbar klein ist. Für die spätere Bewertung ist der Betrag der Flussdichte maßgeblich, der sich nach folgender Formel berechnet:

$$B(t) = \sqrt{B_x^2(t) + B_y^2(t) + B_z^2(t)} \quad (2)$$

Durch die Betragsbildung ergeben sich ausschließlich positive Werte; der ursprüngliche zeitliche Verlauf des Feldes wird somit nicht korrekt abgebildet Bild 4.

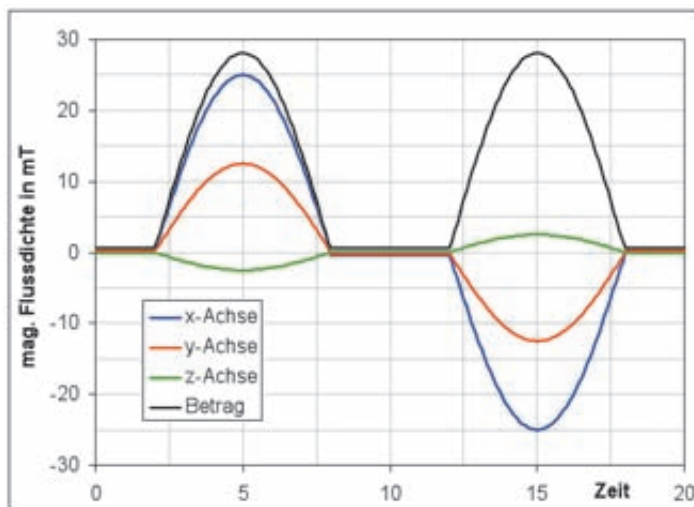


Bild 4: Idealisierter Zeitverlauf der Komponenten der magnetischen Flussdichte und des Flussdichtebetrages an 50-Hz-Wechselstrom-Schweißeinrichtungen

Der Zeitverlauf der resultierenden Magnetflussdichte kann berechnet werden, indem aus den Spitzenwerten der Magnetflussdichten der drei Achsen der resultierende Spitzenwert errechnet wird

$$\hat{B} = \sqrt{\hat{B}_x^2 + \hat{B}_y^2 + \hat{B}_z^2} \quad (2a)$$

und der Zeitverlauf der Magnetflussdichte in der Raumachse mit den höchsten Magnetflussdichtewerten  $B_{\max}(t)$  auf den resultierenden Spitzenwert skaliert wird:

Dabei bezeichnet  $\hat{B}_{\max}$  den Spitzenwert und  $B_{\max}(t)$  den zeitlichen Verlauf der magnetischen Flussdichte derjenigen Raumkomponente mit der größten Amplitude.

$$B(t) = \frac{\hat{B}}{\hat{B}_{\max}} \cdot B_{\max}(t) \tag{2b}$$

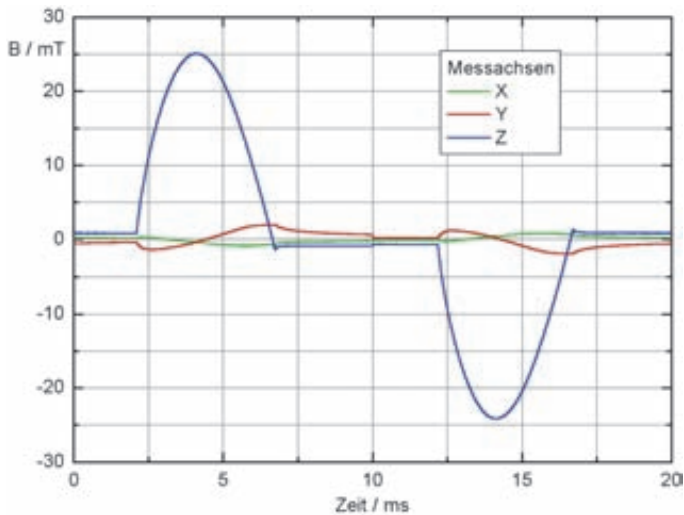


Bild 5: Messung in drei Raumachsen

Ein Messfehler kann auftreten, wenn in den einzelnen Raumachsen stark unterschiedliche Flussdichtewerte gemessen werden. Dabei wird in einzelnen Achsen (in Bild 5 x, y) in einem zu großen Messbereich gemessen, in dem das Gerät unter Umständen keine korrekten – nicht mehr verwertbare – Werte liefert.

Dies resultiert daraus, dass die Messbereichseinstellung meist nur für alle Achsen einheitlich möglich ist und demzufolge entsprechend der Raumachse mit den höchsten Messwerten vorgenommen wird.



Bei Berechnung der resultierenden Magnetflussdichte (Gleichung (2)) wird durch das Quadrieren der Magnetflussdichtewerte der Einfluss dieses Messfehlers gering bleiben.

Deutlich sichtbar ist auch ein häufiger systematischer Messfehler: Aus der unteren Grenzfrequenz der auf Spulenbasis wirkenden Wechselfeldsonde resultiert ein scheinbarer Versatz der Nulllinie. Real ist das Feld zwischen den Stromflusszeiten gleich Null.

#### 4.3.1.4 Gleichstrom-Schweißeinrichtungen

Konventionelle Gleichstrom-Schweißeinrichtungen besitzen einen dreiphasigen Schweißtransformator. Der Ausgangsstrom des Schweißtransformators wird gleichgerichtet. Daraus resultiert ein Gleichstrom mit je nach Schaltgruppe des Schweißtransformators überlagertes 300-Hz- oder 150-Hz-Welligkeit.

Die dabei zu beachtenden Anforderungen an die Messtechnik werden gleichbedeutend im nachfolgenden Kapitel zur Invertertechnik benannt.

#### 4.3.1.5 Inverter-Schweißeinrichtungen

Widerstandsschweißeinrichtungen mit Inverterleistungsteilen liefern als Schweißstrom einen Gleichstrom. Intern arbeiten sie mit einem mittelfrequenten Wechselstrom im Frequenzbereich von 1 bis 20 kHz. Durch den Ausgangsgleichrichter des Schweißtransformators wird der Wechselstrom gleichgerichtet. Aus dieser Gleichrichtung resultiert ein Gleichstrom, dem eine Welligkeit mit der doppelten Wechselrichtertaktfrequenz überlagert ist.

Die häufig verwendeten Wechselfeldsonden auf Spulenbasis können keine Gleichfelder erfassen. Werden sie dennoch zum Messen genutzt, so resultiert daraus ein Abfall des Messsignals, mit nachfolgendem Überschwingen des Messsignals in die Gegenrichtung bei Abschalten des Schweißstromes (siehe Bild 6). Ursache ist die untere Grenzfrequenz  $f_u$  der Wechselfeldsonde.

Allerdings können unter Berücksichtigung der messtechnischen Besonderheiten auch die mit einer Wechselfeldsonde gemessenen Daten verwendet werden. Dabei muss bei der Bewertung die durch den Schweißstrom bestimmte reale Form des Zeitverlaufes zugrunde gelegt werden. Richtig abgebildet von der Wechselfeldsonde

sind die überlagerten Welligkeiten. Der Anstieg des Schweißstromes wird im Allgemeinen noch genau genug erfasst.

Alternativ bietet sich die Messung des Feldes mit Hallsensoren an. Diese sind in der Lage Gleichfelder richtig zu messen.

Im Folgenden werden einige Beispiele von Messungen unter Nutzung von Gleichfeldsonden mit Hallsensoren dargestellt. Dabei wird auf die zu beachtenden Besonderheiten hingewiesen.

Für die Messung der überlagerten 2-kHz-Welligkeit liegt die obere Grenzfrequenz einiger Meßsysteme mit Hallsensoren unter Umständen zu niedrig (siehe Bild 7). Ist dies der Fall so ist eine korrekte Messung nicht möglich.

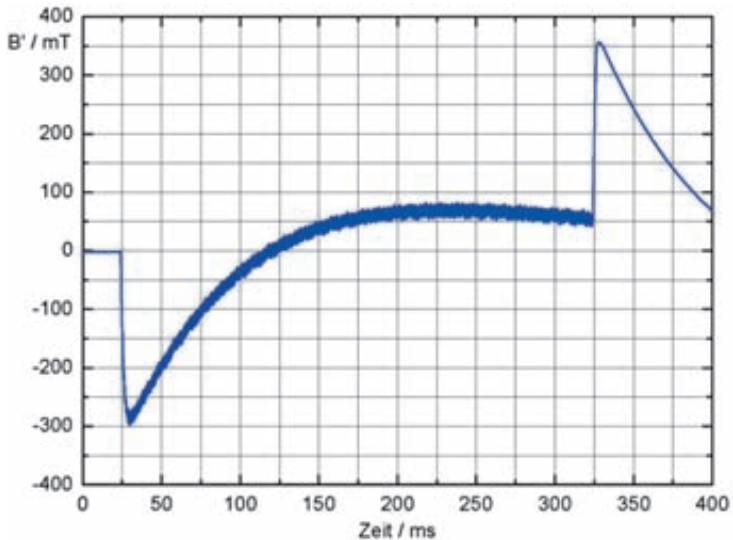


Bild 6: Messung des Magnetfeldes einer Mittelfrequenz-Inverter-Maschine mit einer Wechselfeldsonde,  $f_u$  ca. 5 Hz

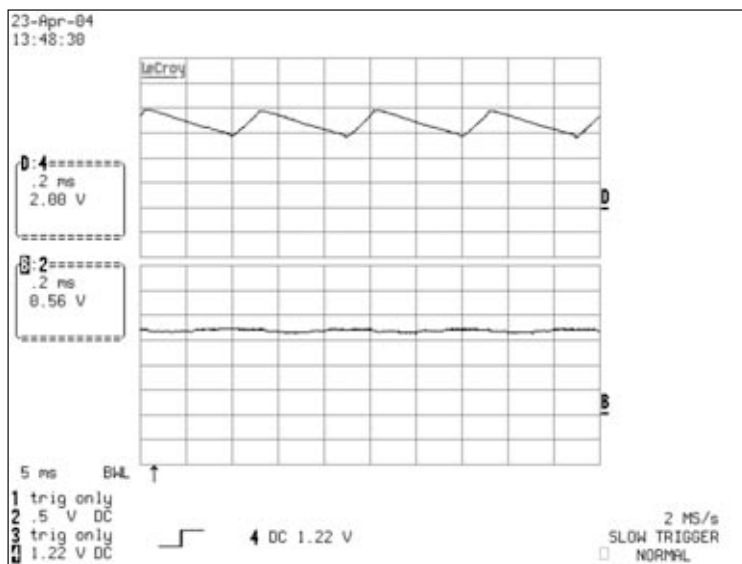


Bild 7: Strom- und Feldverlauf an einer Handschweißzange mit Inverterstromversorgung  
 oben: Stromverlauf, gemessen mit Schweißstrommessgerät (1 kA/Div)  
 unten: Signal des Analogausganges eines Magnetfeldmesssystems mit Hall-  
 sensoren,  $f_0 = 500$  Hz (Skalierung der Flussdichte hier nicht angegeben)

In Bild 7 sind die Zeitverläufe von Strom und Magnetfeld so skaliert, dass sie gleiche Amplituden aufweisen. Auf Grund der Proportionalität von Strom und Magnetfeld müsste auch die überlagerte 2-kHz-Welligkeit beider Verläufe gleich sein, in der grafischen Darstellung erkennbar an einem gleichen Verhältnis von überlagelter Welligkeit und Gleichstrom. Da dies nicht der Fall ist, wird auf Grund der Überschreitung der oberen Grenzfrequenz die überlagerte 2-kHz-Welligkeit nicht mehr wiedergegeben. Deutlicher wird das in der gezoomten Darstellung der beiden Verläufe (siehe Bild 8).

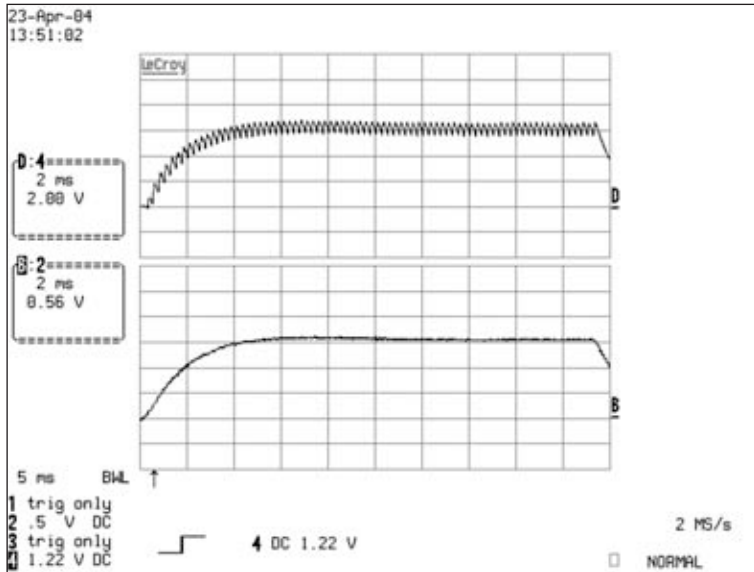


Bild 8: Gezoomter Verlauf aus Bild 7

Bei einer Taktfrequenz des Inverters von 1 kHz ist die sich daraus ergebende 2-kHz-Welligkeit im Signal des Hallensensors gerade noch zu erkennen. Bei noch höheren Taktfrequenzen (siehe Bild 9) ist im Signal des Hallensensors keine Welligkeit mehr erkennbar.

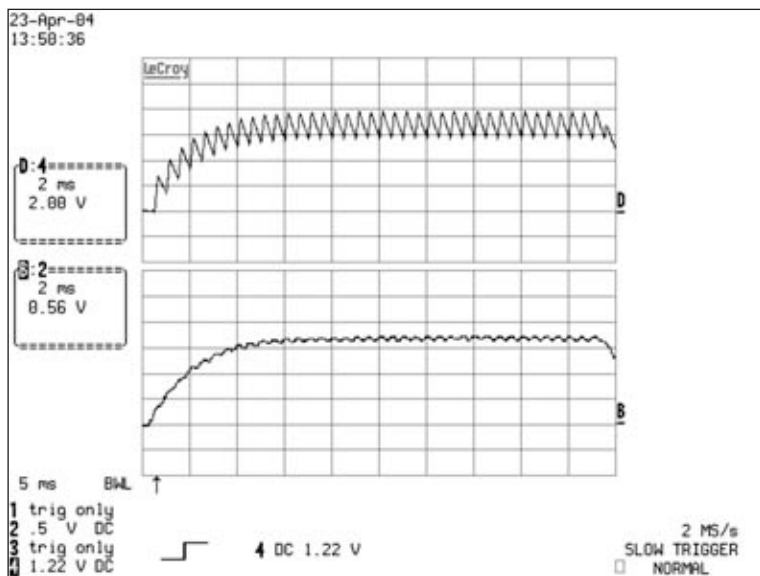


Bild 9: Schweißstrom und Signal des Hallsensors bei einer Invertertaktfrequenz von 2 kHz

oben: Stromverlauf, gemessen mit Schweißstrommessgerät (1 kA/Div)

unten: Signal des Analogausganges eines Magnetfeldmesssystems mit Hallsensoren (Skalierung hier nicht angegeben)

Fazit: Hallsensoren sind geeignet zur Messung von Gleichfeldern und niederfrequenten (50 Hz) Wechselfeldern. Für die Messung der überlagerten Welligkeit üblicher Widerstandsschweißinverter sind sie nur bei genügend hoher oberer Grenzfrequenz geeignet (Herstellerangabe der oberen Grenzfrequenz beachten). Auf Grund von Messungen mit Gleichfeldsonden mit niedriger Grenzfrequenz kann keine Bewertung der überlagerten Welligkeit vorgenommen werden. Alternativ ist entweder die überlagerte Welligkeit getrennt mit einer Wechselfeldsonde zu messen oder auf mit dem Strommesssystem gemessenen Zeitverläufe zurückzugreifen, die die überlagerte Welligkeit richtig wiedergeben.

4.3.1.6 Kondensatorentladungs-Schweißtechnik

Strom- und Magnetfeldverläufe an Kondensatorentladungs-Schweißmaschinen sehen prinzipiell so wie in Bild 10 dargestellt aus. Die Stellung der Schweißparameter (Schweißstrom und -zeit) erfolgt über die Einstellung der Ladespannung der Kondensatoren und (seltener, weil aufwendiger) über die Veränderung der Kapazität der Kondensatoren. Wird nur die Ladespannung geändert, so ändert sich nur die Höhe des Schweißstromes, die Zeitparameter ändern sich nicht. Daher braucht die Ermittlung der zulässigen Werte für jede genutzte Kapazität der Energiespeicherkondensatoren nur einmal durchgeführt werden.

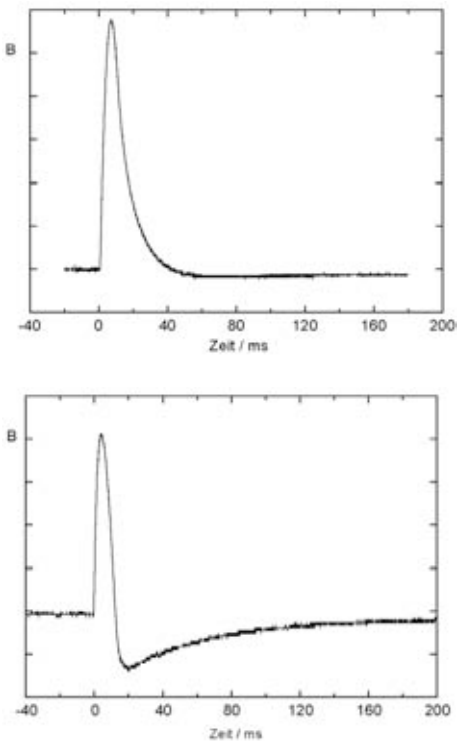


Bild 10: Prinzipieller Zeitverlauf des Magnetfeldes (und des Schweißstromes) an Kondensatorentladungsschweißeinrichtungen oben – ohne, unten – mit Durchschwingen

In Abhängigkeit vom internen elektrischen Aufbau der jeweiligen Maschine kann es einen unipolaren Schweißstrom geben oder ein (einmaliges) Durchschwingen des Stromes auftreten.

### 4.3.2 Messung der Stromkenngrößen

#### 4.3.2.1 Anforderungen an die Messgeräte

Der Schweißstrom ist Hauptquelle des von der Widerstandsschweißeinrichtung emittierten Magnetfeldes. Im Sinne der hier beschriebenen Vorgehensweise der Ermittlung der Zeitparameter kann von einem dem Schweißstrom proportionalen Magnetfeld ausgegangen werden. In die Bestimmung der Zeitparameter geht die absolute Höhe der Magnetfelder nicht ein. Zur Erfassung des zeitlichen Verlaufes des Feldes und Bestimmung der Zeitparameter des Magnetfeldes zur Bewertung kann daher auch der Zeitverlauf des Schweißstromes, zu dem sich das Magnetfeld proportional entwickelt, herangezogen werden.

In diesem Fall muss eine Strommesstechnik Verwendung finden, die entweder eine grafische Darstellung des Schweißstromverlaufes auf einem Bildschirm ermöglicht oder einen Analogausgang besitzt, an den ein externes Digitalspeicheroszilloskop angeschlossen werden kann. Es wird empfohlen den Zeitverlauf des Stromes zur Dokumentation zu speichern. Schweißstrommessgeräte, die die Parameter des Schweißstromes (üblicherweise Effektiv- und Spitzenwert und Stromzeit) lediglich numerisch anzeigen, sind zur Messung der Zeitparameter des Schweißstromes nicht geeignet und werden hier nicht weiter betrachtet.

Die Stromverläufe werden in Abhängigkeit von der eingesetzten Messtechnik nicht immer originalgetreu dargestellt. Der Anwender muss dies wissen und bei der Beurteilung der Messergebnisse berücksichtigen. Dazu ist eine Kenntnis der üblicherweise zu erwartenden prinzipiellen Zeitverläufe erforderlich (siehe Bild 2 in Nr. 5 „Schweißvorgang“ in Abschnitt 2). Die Anstiege, die für die Relevanz der Feldemissionen ausschlaggebend sind, werden in der Regel aber immer richtig dargestellt. Dies gilt zumindest für die Wechselstrom-, konventionelle Gleichstrom- und 1-kHz-Invertertechnik. Für Umrichter mit höheren Taktfrequenzen muss geprüft werden, ob die verwendete Messtechnik für die Abbildung der aus der höheren Taktfrequenz resultierenden Oberwelligkeit noch ausreicht.

*Siehe auch „Abtastrate“ in Abschnitt 4.3.1.1.*

#### 4.3.2.2 Strommesstechnik

Ströme im kA-Bereich können prinzipiell mit

- Rogowski-Spule,
  - Shunt (Hochstrom-Messwiderstand),
  - Flusskompensierte Stromwandler, z.B. LEM-Wandler,
- gemessen werden.

Da bei Verwendung eines Shunts in den Sekundärkreis eingegriffen werden muss und flusskompensierte Stromwandler empfindlich gegenüber Fremdfeldern sein können, hat sich in der Praxis der Einsatz der Rogowski-Spule bewährt.

Eine Rogowski-Spule ist eine langgestreckte Zylinderspule, die zu Messzwecken zu einer Kreisringspule geformt wird. Die Abmessungen der Spule sind so, dass der Windungsdurchmesser gegenüber dem Durchmesser der Kreisringspule vergleichsweise klein ist. Damit kann davon ausgegangen werden, dass im ganzen Feldraum praktisch eine gleich große Induktion bzw. magnetische Flussdichte auftritt. Mit einer Rogowski-Spule kann der Strom eines elektrischen Leiters, vergleichbar der Messung mit einer Stromzange, gemessen werden. Dazu wird die Kreisringspule um den Leiter gelegt, dessen Strom gemessen werden soll. In der Spule wird dann eine Spannung  $U_{\text{ind}}$  proportional zur Änderung des sie durchfließenden magnetischen Flusses induziert. Für eine Spule mit  $n$  Windungen und der Windungsfläche  $A$  wird die induzierte Spannung wie folgt berechnet:

$$U_{\text{ind}} = -n \cdot \frac{d\phi}{dt} = -n \cdot A \cdot \frac{dB}{dt}$$

Die magnetische Flussdichte bzw. der Strom durch einen Leiter wird berechnet in dem die Spannung  $U_{\text{ind}}$  integriert wird.

Schaltungstechnisch bedeutet dies, dass die Rogowski-Spule zur Strommessung bzw. zur Messung der magnetischen Flussdichte nur in Verbindung mit einem Integrator benutzt werden kann (siehe Bild 11). Die Widerstände  $R$  und die Kondensatoren  $C$  des Integrators bestimmen die Integrationskonstante  $\tau$ .

Aus der am Integrator gemessenen Spannung  $U$  kann die magnetische Flussdichte  $B$  bzw. die Stromstärke  $I$  durch den Leiter wie folgt berechnet werden:



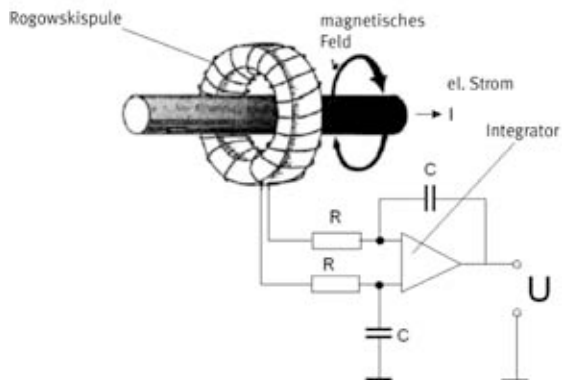


Bild 11: Messung des Schweißstromes mittels Rogowskispule

Magnetische Flussdichte

$$B = \frac{U \cdot \tau}{n \cdot A}$$

Strom durch den Leiter:

$$I = \frac{U \cdot \tau}{n \cdot A \cdot \mu_0}$$

mit

$B$	Magnetische Flussdichte in Vs/m <sup>2</sup>
$I$	Strom durch den Leiter in A
$U$	Spannung am Ausgang des Integrators in V
$\tau$	Integrationskonstante $\tau = R \times C$ in Sekunden
$n$	Anzahl der Windungen
$A$	Windungsquerschnitt in m <sup>2</sup>
$\mu_0$	Permeabilitätskonstante in Vs/Am

Die gebräuchlichsten Schweißstrom- bzw. Hochstrommessgeräte nutzen Rogowskispulen (zum Teil vom Hersteller anders bezeichnet) mit an diese Spulen angepassten Integratoren (extern oder in einem Messgerät integriert). Die Rogowskispulen sind

für bestimmte Frequenzbereiche ausgelegt, gekennzeichnet durch untere und obere Grenzfrequenz  $f_u$  und  $f_o$ . Dabei sind Schweißstrommessgeräte an die typischen niederfrequenten Zeitverläufe von Schweißströmen angepasst und können durch eine dafür geringer ausgelegte untere Grenzfrequenz  $f_u$  auch Gleichanteile von Schweißströmen genau genug abbilden. Zur Messung auch hoher Frequenzen (bis in den MHz-Bereich) ausgelegte Hochstrommesssysteme mit höherer unterer Grenzfrequenz können Gleichanteile nicht richtig abbilden. Dies wird besonders bei Messung typischer Schweißströme von Gleichstrom-Schweißeinrichtungen sichtbar. In Bild 12 wurde derselbe Schweißstrom vergleichsweise mit einem Schweißstrommesssystem mit niedriger unterer Grenzfrequenz und einem Hochstrommesssystem mit höherer unterer Grenzfrequenz gemessen. Dabei führt eine zu hohe untere Grenzfrequenz zu einem Dachabfall des Gleichanteils und beim Abschalten des Schweißstromes zu einem Durchschwingen des Messsignals unter die Nulllinie. Dagegen stellt die mit dem Schweißstrommessgerät gemessene obere Kurve den Verlauf des Schweißstromes richtig dar.

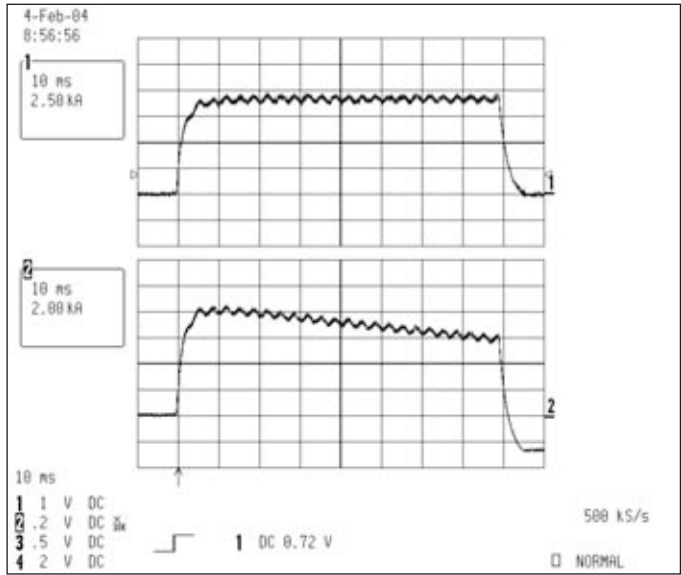


Bild 12: Messung mit Schweißstrommessgerät (oben) und Hochstrommesssystem (unten), Inverterstromquelle, Schweißstrom 8,8 kA (Messung im Kurzschluss)

Bei Messungen von Wechselströmen führt eine zu hohe untere Grenzfrequenz zu einer scheinbaren Verschiebung der Nulllinie des phasenangeschnittenen Schweißstromes: scheinbar schwingt der Schweißstrom bis über die Nulllinie hinweg durch (siehe Bild 13). Tatsächlich ist der Strom in dieser Zeit Null.

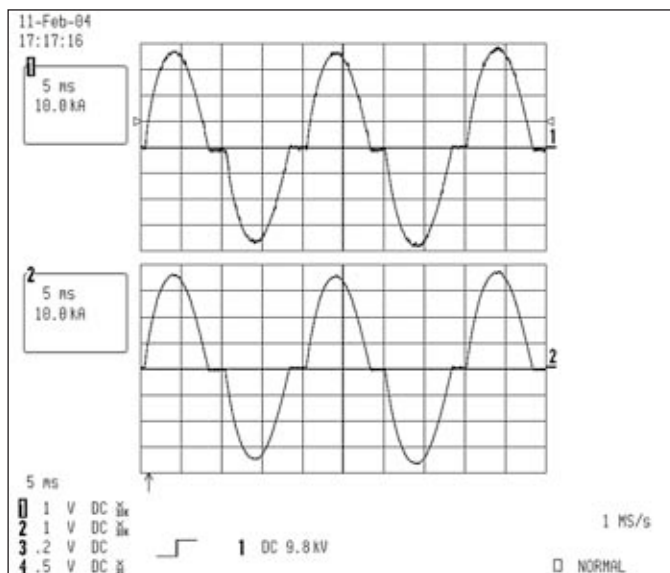


Bild 13: Messung mit Hochstrommessgerät (unten) und Schweißstrommessgerät (oben). Thyristorstromquelle, Schweißstrom  $25 \text{ kA}_{\text{eff}} / 38 \text{ kA}_{\text{pk}}$  (Messung im Kurzschluss)

#### 4.3.3 Berechnung der magnetischen Flussdichte

Die Messung der magnetischen Flussdichte in der unmittelbaren Umgebung stromführender Leiter kann sehr zeitaufwändig sein. Insbesondere an vielen Aufpunkten in der gesamten Maschinenumgebung müssen für jeden Messpunkt die Feldmesssonden auf Grund der zum Teil starken örtlichen Schwankungen der Flussdichte (starke Gradienten der Flussdichte) neu positioniert werden und gegebenenfalls der Messbereich manuell angepasst werden.

Demgegenüber kann mit Berechnungsverfahren der notwendige Aufwand zur Bestimmung der Flussdichtewerte reduziert werden.

Da beim Widerstandsschweißen die relevanten Felder von den Schweißkabeln und der Leiterschleife der Schweißzange ausgehen, kann auf die Berechnung von Streufeldern der Transformatoren verzichtet werden. Anhang 2 enthält detaillierte Angaben und Berechnungsbeispiele sowie einen Katalog von berechneten Flussdichteverteilungen bei unterschiedlichen Schweißsterngeometrien.

An gleicher Stelle befinden sich Hinweise zur Verwendung des auf der Internetseite der Berufsgenossenschaft der Feinmechanik und Elektrotechnik zur Verfügung gestellten Programms zur Berechnung magnetischer Felder in der Umgebung von Widerstandsschweißeinrichtungen.

## **4.4 Bewertung**

### **4.4.1 Allgemeines**

Mit Ausnahme der Unfallverhütungsvorschrift „Elektromagnetische Felder“ (BGV B11) geben alle anderen Regelwerke für den Schutz von Personen in elektrischen, magnetischen und elektromagnetischen Feldern nur zulässige Werte für periodische, sinusförmige Vorgänge jeweils einer Frequenz an.

### **4.4.2 Physiologische Grundlagen**

Die physiologischen Wirkungen elektrischer, magnetischer und elektromagnetischer Felder sind abhängig von der Frequenz. Im Frequenzbereich bis etwa 30 kHz treten bei genügend hohen Feldstärken bzw. Flussdichten überwiegend Reizwirkungen auf. Im Bereich von ca. 30 kHz bis 100 kHz ist eine stetige Abnahme der Reizwirkungen und eine Zunahme der Wärmewirkung zu beobachten. Letztere überwiegt für Frequenzen oberhalb von 100 kHz.

Grundlage dieser physiologischen Effekte ist die Veränderung der elektrischen Gewebefeldstärken, die sich auf Grund von Influenz und Induktion durch die äußeren elektrischen, magnetischen und elektromagnetischen Felder ergibt.

Während bei der Wärmewirkung (HF-Bereich) ein direkter Zusammenhang mit den äußeren Feldgrößen besteht, tritt eine Reizwirkung erst ab einer Schwelle auf, die überschritten werden muss, um eine Erregung auslösen zu können.

Gleichzeitig ist die Auslösung einer Erregung auch vom zeitlichen Verlauf der Änderung der elektrischen Gewebefeldstärke bzw. der Stromdichte im Gewebe abhängig: Zu geringe zeitliche Änderungen dieser Größen (zu niedrige Frequenzen) und zu kurze Reize (zu hohe Frequenzen) können auch bei hoher Reizstärke keine Erregung auslösen.

#### 4.4.3 Zulässige Werte

Der Schutz von Personen vor unzulässigen Expositionen durch magnetische Felder wird durch die Festlegung von frequenzabhängigen Basiswerten sichergestellt. Als Basiswert im NF-Bereich wird international die elektrische Stromdichte oder Gewebefeldstärke im Körper festgelegt.

Die von den Basiswerten abgeleiteten Werte sind so festgelegt, dass selbst unter Zugrundelegung der ungünstigsten Expositionsbedingungen die Basiswerte nicht überschritten werden. Diese abgeleiteten Werte werden angegeben, da sie im Gegensatz zu den Basiswerten direkt gemessen oder berechnet werden können.

Um eine unzulässige Exposition unter allen Umständen zu vermeiden, sind in den Basiswerten und somit auch in den abgeleiteten Werten zum Teil erhebliche Sicherheitsfaktoren enthalten. Im Niederfrequenzbereich bedeutet dies, dass durch die äußeren magnetischen Felder bei Einhaltung der zulässigen Werte keine Stimulation ausgelöst werden kann.

Die Basiswerte gelten nur für Gewebe des zentralen Nervensystems in Kopf und Rumpf. In anderen Körperbereichen dürfen dabei höhere Gewebestromdichten auftreten.

*Siehe „International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection: Response to questions and comments on ICNIRP Guidelines for limiting exposure to time-varying electric, magnetic and electromagnetic fields (up to 300 GHz)“.*

Insbesondere die Basiswerte, aber auch die meisten abgeleiteten Werte sind Effektivwerte und gelten nur für sinusförmige Vorgänge einer Frequenz.

#### 4.4.4 Gepulste Felder

Das Induktionsgesetz stellt den Zusammenhang zwischen der Stromdichte im Gewebe und der magnetischen Flussdichte her:

$$J = K \cdot \frac{r}{2} \cdot \frac{dB(t)}{dt} \quad (1)$$

Dabei wird angenommen, dass der magnetische Fluss  $B$  eine kreisförmige Fläche mit Radius  $r$  gleichförmig durchsetzt.

Gemäß Gleichung (1) wird nur dann eine Stromdichte  $J$  im Gewebe induziert, wenn sich die magnetische Flussdichte ändert. Bleiben sowohl der Gewebeparameter  $\kappa$ , als auch die Schleifenlänge  $r$  konstant, so ist die Höhe der induzierten Gewebestromdichte unmittelbar mit der Stärke der zeitlichen Änderung der Flussdichte verknüpft. Hat die magnetische Flussdichte einen konstanten Wert oder ist sie nicht vorhanden, so wird durch sie auch keine Stromdichte im Gewebe verursacht. Dies bedeutet, dass solche Abschnitte im zeitlichen Verlauf der magnetischen Flussdichte für die Bewertung der Exposition im Wesentlichen ohne Belang sind.

Zur Beschreibung der Feldänderungen wird in der Unfallverhütungsvorschrift „Elektromagnetische Felder“ (BGV B11) der Parameter  $\tau_p$  eingeführt. Sind im Zeitverlauf unterschiedliche Steilheiten und damit unterschiedliche Parameter  $\tau_{p_i}$  vorhanden, so kann es, speziell über mehrere Perioden, zu einer langsamen Verlagerung von Membranpotentialen kommen, wodurch sich der Sicherheitsfaktor verringern kann. Durch die Verwendung der kleinsten Zeitdauer aller Feldänderungen wird sichergestellt, dass der Sicherheitsfaktor nicht unzulässig reduziert wird, ohne diese Signale einer gesonderten Bewertung unterziehen zu müssen.

Da die zulässigen Werte im Allgemeinen über der Frequenz tabelliert sind, muss dem Vorgang noch eine Frequenz zugeordnet werden:

$$f_p = \frac{1}{4 \cdot \tau_p} \quad \text{mit} \quad \tau_p = \min(\tau_{p_i}) \quad (2)$$

Dadurch wird erreicht, dass die maximalen Steilheiten des den zulässigen Werten zugrunde liegenden sinusförmigen Vorgangs nicht überschritten werden. Durch diesen Rückgriff auf die zulässigen Werte wird gleichzeitig die Einhaltung fundamentaler physiologischer Parameter, z.B. die Frequenzabhängigkeit der zur Reizauslösung notwendigen Amplituden, und festgelegter Sicherheitsfaktoren gewährleistet, ohne neue Festlegungen treffen zu müssen. Außerdem wird sichergestellt, dass ein nahtloser Übergang zwischen der Bewertung gepulster Felder und dem Spezialfall der ungepulsten, sinusförmigen Vorgänge einer Frequenz existiert.

Es ist wichtig, sich in Erinnerung zu rufen, dass die Festlegung von Basiswerten und abgeleiteten zulässigen Werten im Niederfrequenzbereich in allen Regelwerken, die sich mit dem Schutz von Personen in elektrischen, magnetischen und elektromagnetischen Feldern befassen, so erfolgt, dass eine Reizwirkung mit Sicherheit vermieden wird. Felder im Niederfrequenzbereich, die die zulässigen Werte einhalten, sind also mit Sicherheit auch unter den ungünstigsten Randbedingungen nicht reizwirksam.

Gegenüber einem entsprechenden kontinuierlich einwirkenden Sinus-Signal einer Frequenz besitzen die induzierten Gewebestromdichten eines gepulsten Signals meist einen geringeren Effektivwert.

Da durch die obigen Festlegungen die maximal zulässigen Signalsteilheiten begrenzt sind, ist es auch unter physiologischen Gesichtspunkten möglich, für kürzere Zeiten höhere Steilheiten und damit höhere induzierte Stromdichten zuzulassen. Der Effektivwert bleibt unverändert, wenn der Gewichtungsfaktor  $V$  folgender Festlegung genügt:

$$V = \sqrt{\frac{T_i}{\tau_D}} \quad (3)$$

Hierbei bedeuten  $T_i$  die Integrationszeit der Effektivwertbildung und  $\tau_D$  die zeitliche Summe aller Feldänderungen im Zeitintervall  $T_i$ .

Durch die zusätzliche Bedingung  $V \leq V_{\max}$  wird die Sicherheit auch bei extrem kurzen Impulsen gewährleistet.

#### 4.4.5. Bewertung gepulster Felder

Der Anwender sieht sich bei der praktischen Umsetzung der Festlegungen der Unfallverhütungsvorschrift „Elektromagnetische Felder“ (BGV B11) in Bezug auf gepulste Felder oftmals mit vielfältigen Schwierigkeiten konfrontiert.

Zum einen existieren auf dem Markt nur wenige Messgeräte, die eine einfache, sichere und praxisgerechte Erfassung und Aufzeichnung von einmaligen Vorgängen gestatten. Wenn die entsprechenden Messdaten vorliegen, ergeben sich weitere Fragen:

- Wie bewertet man die Zeitverläufe der magnetischen Felder aus den 3 senkrecht aufeinander stehenden Raumachsen  $x$ ,  $y$  und  $z$ .
- Der zeitliche Signalverlauf stimmt nicht mit den Abbildungen der Unfallverhütungsvorschrift „Elektromagnetische Felder“ (BGV B11) überein.
- Das Signal ist sehr komplex.

Vorstehende Aufzählung stellt nur einen kleinen Ausschnitt von Fragestellungen dar, mit denen sich viele Anwender bei der Bewertung von gepulsten Feldern konfrontiert sehen.

Im Folgenden werden deshalb einige Hinweise zur korrekten Bewertung von gepulsten Feldern nach der Unfallverhütungsvorschrift „Elektromagnetische Felder“ (BGV B11) gegeben.

Abbildung 3 in Abschnitt 4.3.1.3 zeigt beispielhaft die Zeitverläufe der magnetischen Flussdichte an einer Widerstandsschweißeinrichtung in den drei Raumachsen.

Für die weitere Bewertung wird ein eindimensionales Signal benötigt, das die Expositionssituation möglichst exakt beschreibt. Dazu sind die Signale der Raumkomponenten des magnetischen Feldes auf ein eindimensionales Signal zurückzuführen.

Hierzu geeignet ist der zeitliche Verlauf

- des Stromes in Verbindung mit dem Spitzenwert der magnetischen Flussdichte,
- des Effektivwertes der magnetischen Flussdichte,
- der Hauptkomponente des magnetischen Flussdichtevektors.



Zur Bestimmung der Hauptkomponente des magnetischen Flussdichtevektors ist es möglich, die Feldsonde im Messpunkt solange zu drehen und zu schwenken, bis das Signal in zwei Raumachsen minimal oder im günstigsten Fall zu Null wird. Bei nicht kontinuierlichen Vorgängen, z.B. dem Punktschweißen, würde dies jedoch einen nicht zu tolerierenden zeitlichen Aufwand bedeuten und ist somit nicht praktikabel. Es ist jedoch möglich diese mechanische Drehoperation durch eine entsprechende mathematische Drehoperation auf Basis der Originaldaten zu ersetzen. Auch hier ergibt sich eine Hauptkomponente und zwei senkrecht darauf stehende Nebenkompontenten, die im Idealfall verschwinden. Sollten diese jedoch noch nennenswerte Beträge aufweisen, so trägt mehr als eine räumliche Quelle zur Exposition bei. Diese sollte entweder messtechnisch oder gegebenenfalls auch mathematisch aus dem Datensatz entfernt werden.

Hierbei wird oftmals festgestellt, dass der zu bewertende Signalverlauf nicht mit den in der Unfallverhütungsvorschrift „Elektromagnetische Felder“ (BGV B11) abgebildeten Verläufen übereinstimmt.

Diese Abbildungen sind nur angegeben, um zu zeigen welche Parameter für die weitere Bewertung notwendig sind und wie diese dem Signalverlauf entnommen werden können. Sie stellen keinen Katalog von Signalen dar, die ausschließlich bewertet werden können.

Für sinus-, dreieck- und trapezförmige Signalverläufe ist die Bestimmung der Flankensteilheiten wesentlich, die sich durch eine abschnittsweise, an den Extremwerten und Nulldurchgängen ausgerichtete Linearisierung des originären Signalverlaufs ermitteln lassen. Bei exponentiellen Verläufen ist die Bestimmung zweier Hilfsgrößen notwendig, um  $\tau_p$  und  $\tau_c$  zu ermitteln. Diese grundsätzlichen, elementaren Arbeitsschritte können auch auf komplexe Signale angewendet werden, die aus einer Überlagerung der verschiedenen Grundtypen bestehen können.

Zur korrekten Bewertung des Signalverlaufs ist eine genügende zeitliche Auflösung erforderlich. Dazu muss das Messsystem, eine ausreichende Anzahl von Datenpunkten speichern können und über an die Messaufgabe angepasste Grenzfrequenzen verfügen.

Ebenso wichtig ist es, dass der gesamte Signalverlauf erfasst wird. Speziell bei Impulszügen, die länger als die maximale Integrationszeit von einer Sekunde sind, darf die Messung und Aufzeichnung nicht bereits nach dieser Zeit beendet werden. Vielmehr ist der gesamte Impulszug aufzuzeichnen und derart zu bewerten, dass ein gleitendes Bewertungsfenster mit maximaler Integrationszeit (1 Sekunde) über das Signal geschoben wird. Hierbei dürfen bei keinem Signalabschnitt Überschreitungen der zulässigen Werte auftreten.

#### 4.4.6 Vorgehensweise bei der Bewertung

Bei der Bewertung sollte wie folgt vorgegangen werden:

Aus dem zeitlichen Verlauf der magnetischen Flussdichte oder des Stromes sind die Frequenz der Feldänderung  $f_p$  und der Gewichtungsfaktor  $V$  zu bestimmen. Diese Parameter können auch aus dem zeitlichen Verlauf des Stromes ermittelt werden.

Es ist der Expositionsbereich festzulegen. Grundsätzlich sind Arbeitsplätze an Widerstandsschweißmaschinen dem Expositionsbereich 1 zuzuordnen.

Es sind die zulässigen zeitlichen Änderungen der magnetischen Flussdichte aus den Tabellen 14 und 15 zu bestimmen. Der maximal zulässige Spitzenwert der magnetischen Flussdichte kann aus den Werten der Tabelle 15 ermittelt werden.

Es ist zu prüfen, ob im Signalverlauf die zulässigen zeitlichen Änderungen bzw. der Spitzenwert der magnetischen Flussdichte nicht überschritten werden.

Werden die zulässigen Werte des Expositionsbereich 1 überschritten, können die zulässigen Werte des Bereiches erhöhter Exposition angewendet werden, wenn die Summe der Expositionzeiten zwei Stunden am Tag nicht überschreiten. Die Expositionszeit ist das Produkt aus der Anzahl der Schweißvorgänge pro Tag und der Stromflusszeit pro Schweißvorgang.

Die prinzipielle Vorgehensweise bei der Bewertung der Exposition ist im Bild 14 zusammenfassend dargestellt.

Beispiele für die Vorgehensweise bei der Bewertung für 50-Hz-Wechselstrom- und Mittelfrequenz-Widerstandsschweißeinrichtungen siehe Anhang 1.

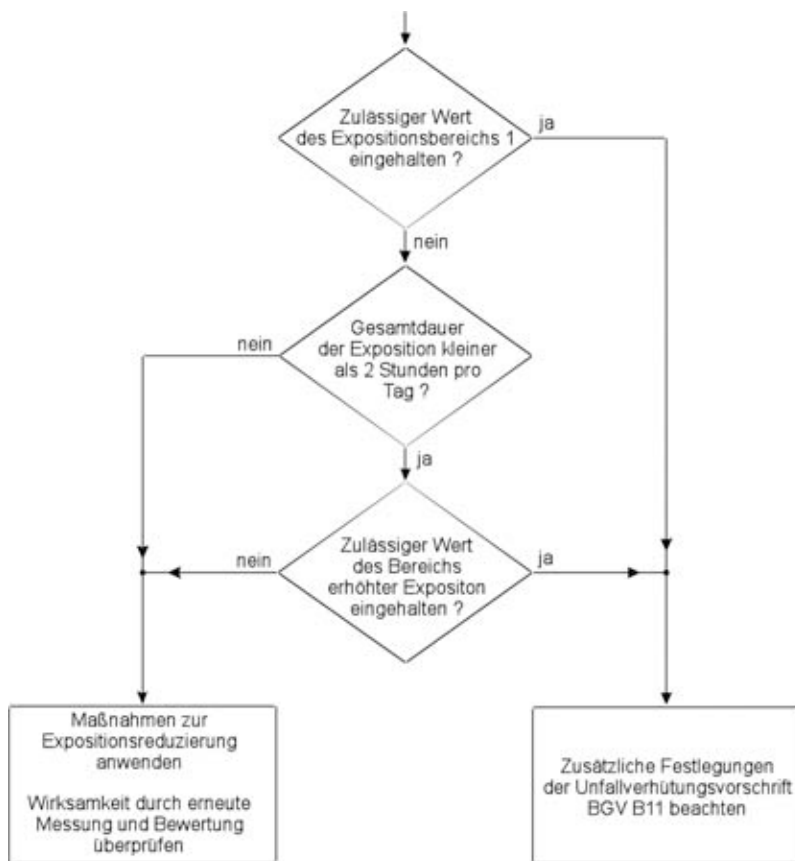


Bild 14: Flussdiagramm zum prinzipiellen Verlauf der Expositionsbeurteilung

4.4.6.1 Näherungsverfahren zur Bestimmung der zulässigen Werte

Im Folgenden werden Näherungsverfahren für

- 50-Hz-Wechselstromschweißeinrichtungen,
- konventionelle Gleichstromschweißeinrichtungen,
- Mittelfrequenz-Inverterschweißeinrichtungen,

vorgelegt.

Sind die über die folgenden Näherungsverfahren ermittelten zulässigen Werte überschritten, so müssen diese anhand der Werte für  $\tau_{pmin}$  und  $\tau_D$  ermittelt werden.

**50-Hz-Wechselstromschweißeinrichtungen**

Bei einem nahezu sinusförmigen Schweißstrom (Stromeinstellung 70 bis 100%) können für eine erste Abschätzung der Exposition die jeweiligen zulässigen Werte in Abhängigkeit von der Schweißzeit aus dem nachfolgenden Diagramm in Bild 15 entnommen werden.

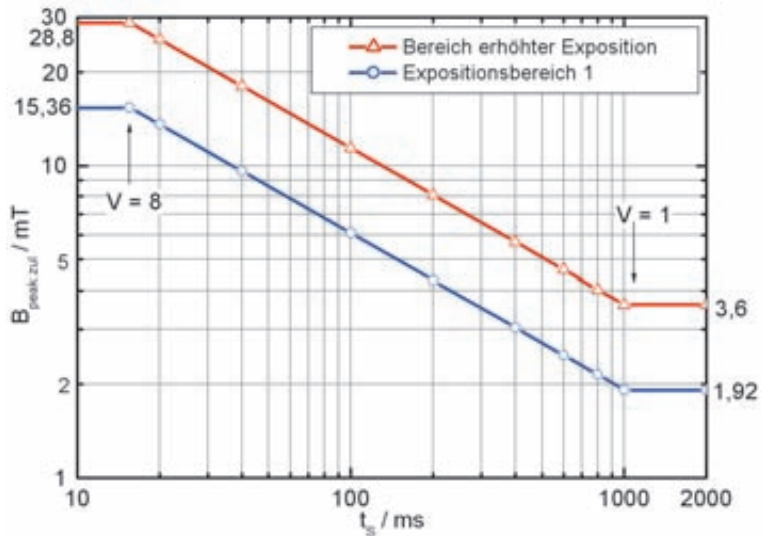


Bild 15: Zulässige Spitzenwerte der Flussdichte  $B_{peak,zul}$  für 50-Hz-Wechselstromschweißeinrichtungen bei sinus-förmigem Strom

Werden die zulässigen Werte bei Stromeinstellungen von 70 bis 100% eingehalten, ist die Überprüfung von kleineren Stromeinstellungen nicht notwendig.

### Konventionelle Gleichstromschweißeinrichtungen

Bei konventionellen Gleichstromschweißeinrichtungen sind die aus den überlagerten Welligkeiten resultierenden Feldanteile für die Bewertung der Exposition relevant.

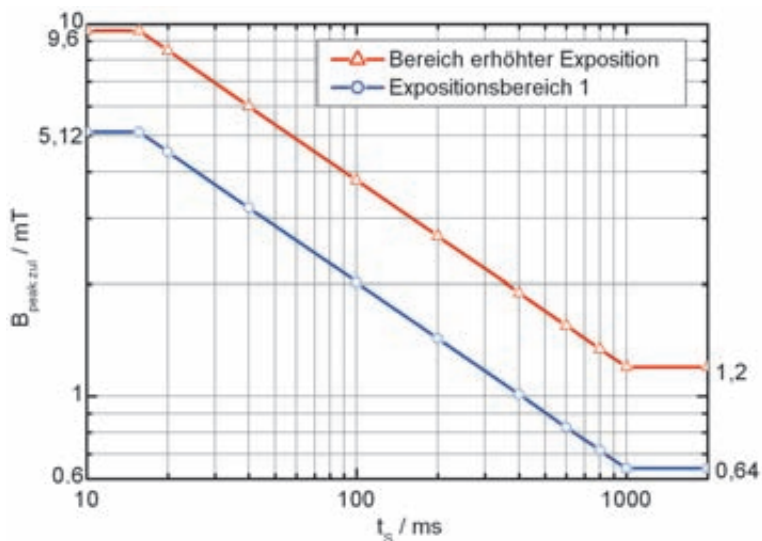


Bild 16: Zulässige Spitzenwerte der Flussdichte  $B_{\text{peak,zul}}$  für die überlagerte 150-Hz-Welligkeit bei konventionellen Gleichstromschweißeinrichtungen

Für die überlagerte Welligkeit von je nach Ausführung des Leistungsteils 150 Hz oder 300 Hz können die zulässigen Spitzenwerte der magnetischen Flussdichte in Abhängigkeit von der Schweißzeit Bild 16 bzw. Bild 17 entnommen werden.

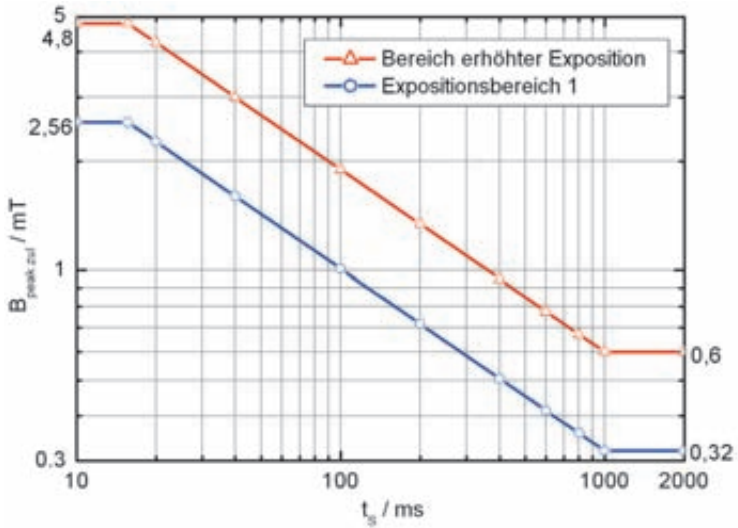


Bild 17: Zulässige Spitzenwerte der Flussdichte  $B_{peak\_zul}$  für die überlagerte 300-Hz-Welligkeit bei konventionellen Gleichstromschweißeinrichtungen

### Mittelfrequenz-Inverterschweißeinrichtungen

Die für die überlagerte 2-kHz-Welligkeit geltenden zulässigen Spitzenwerte der magnetischen Flussdichte können in Abhängigkeit von der Schweißzeit Bild 18 entnommen werden.

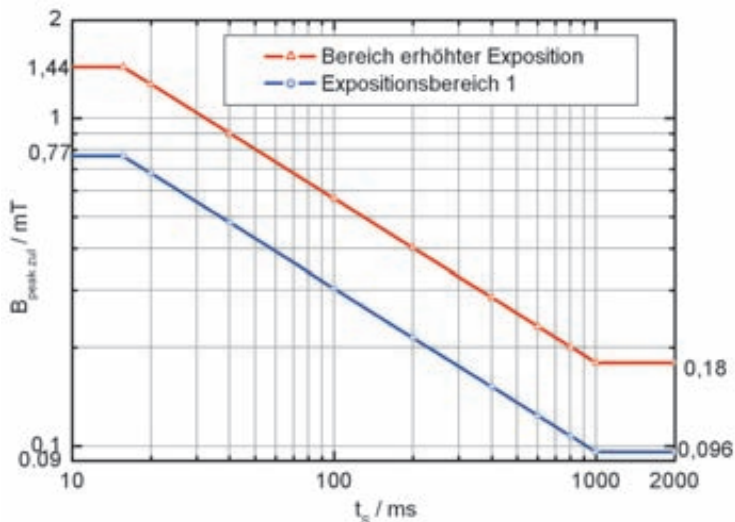


Bild 18: Zulässige Spitzenwerte der Flussdichte  $B_{\text{peak zul}}$  für die überlagerte 2-kHz-Welligkeit bei Inverter-Gleichstromschweißeinrichtungen

4.4.6.2 Näherungsverfahren für die Ermittlung eines Sicherheitsabstandes  
Bei handgeführten Widerstandsschweißeinrichtungen kann der einzuhaltende Abstand für den Bereich erhöhter Exposition bei Ganzkörperexposition mittels folgender Formel abgeschätzt werden:

$$\text{Für 50-Hz-Zangen: } R = 0,6 \cdot \sqrt{D \cdot \hat{I} \cdot \sqrt{P}}$$

$$\text{Für Inverter-Zangen: } R = 0,9 \cdot \sqrt{D \cdot I_{ss} \cdot \sqrt{T}}$$

Dabei ist:

$R$  Sicherheitsabstand in cm  
(Bereich erhöhter Exposition/Ganzkörperexposition).

$D$  Diagonale des Zangenwerkzeuges in cm.

$\hat{I}$  Spitzenwert des Schweißstromes in kA.

$I_{ss}$  Spitze/Spitze-Wert der Oberwelligkeit des Schweißstromes in kA

Die Oberwelligkeit kann gemessen oder vom Hersteller erfragt werden. Für Stromereinstellungen über 30 % kann für  $I_{ss}$  näherungsweise 5 % vom Schweißstrom angenommen werden.

- $P$  Anzahl der Perioden (bei 50-Hz-Zangen). Bei  $P > 50$  kann  $P = 50$  gesetzt werden.
- $T$  Stromflusszeit in ms (bei 1kHz-Inverter-Zangen). Bei  $T > 1000$  ms kann  $T = 1000$  ms gesetzt werden.

Der Abstand gilt für den Bereich seitlich der Zangenfenstermitte. In diesem Bereich treten die höchsten Werte der Flussdichte auf. Für andere Positionen, auch bei Kabelzangen im Bereich der Kabel, ist der Sicherheitsabstand in der Regel kleiner.

Für die Exposition der Extremitäten kann entsprechend den Bestimmungen der Unfallverhütungsvorschrift „Elektromagnetische Felder“ (BGV B11), der Sicherheitsabstand um den Faktor  $\sqrt{2,5} \approx 1,6$  verringert werden.

#### 4.4.6.3 Bewertung der Exposition von Extremitäten

Nach der Unfallverhütungsvorschrift „Elektromagnetische Felder“ (BGV B11) dürfen die zulässigen Werte der magnetischen Flussdichte für Extremitäten (Arme, Beine) um den Faktor 2,5 überschritten werden.

Bei Exposition nur der Hand oder der Finger dürfen die zulässigen Werte der magnetischen Flussdichte aufgrund der geringeren Wirkquerschnitte für die Induktion um den Faktor 20 überschritten werden.

*Siehe – Winkler, Thoralf: „Magnetfeldemission von Widerstandsschweißanordnungen.“ Universität Magdeburg, Dissertation 2006 –*

**Dieser Faktor darf nur dann angewandt werden, wenn im Hand- und Fingerbereich keine metallischen Implantate oder andere metallischen Objekte, z.B. Ringe, Uhren, Ketten, vorhanden sind.**



#### 4.4.7 Herzschrittmacher

Besondere Maßnahmen sind für Personen mit Herzschrittmachern erforderlich, da diese Geräte in ihrer Funktion gestört werden können. Eine Bewertung entsprechend Abschnitt 3.10 der BG-Regel „Elektromagnetische Felder“ (BGR B11) muss durch eine befähigte Person durchgeführt werden.

Hilfsweise können die Werte nach Tabelle B.2 nach E DIN VDE 0848-3-1 „Sicherheit in elektrischen, magnetischen und elektromagnetischen Feldern; Teil 3-1: Schutz von Personen mit aktiven Körperhilfsmitteln im Frequenzbereich 0 Hz bis 300 GHz“ für Herzschrittmacher verwendet werden:

- $B_{\text{eff}} = 65 \mu\text{T}$  bei 50 Hz,
- $B_{\text{eff}} = 5 \mu\text{T}$  für Frequenzen von 650 Hz bis 25 kHz.

Sind im Einzelfall die relevanten Parameter des Herzschrittmachers bekannt, können sich höhere Werte ergeben.

# 5 Maßnahmen

## 5.1 Allgemeines

Im Folgenden werden beispielhaft Lösungsansätze zur Feldreduzierung aufgezeigt, die an den konkreten Fall anzupassen sind. Dabei sind Kombinationen von Maßnahmen möglich.

Einige Maßnahmen können an bestehenden Zangen durch entsprechende Umrüstungen durchgeführt werden. Bei der Planung von neuen Zangen empfiehlt es sich, möglichst frühzeitig die Exposition gegenüber der magnetischen Flussdichte in die Planung mit einzubeziehen.

## 5.2 Technische Maßnahmen

### 5.2.1 Handgeführte Schweißzangen

An handgeführten Schweißzangen bestehen zwei dominierende Feldquellen, die zuführenden Kabel und die Schweißzange selbst. Die folgenden Maßnahmen zielen auf die Reduzierung der Feldemission dieser Quellen.

#### **Feldreduzierte Kabel**

Bei den Kabeln führt die Benutzung von Koaxialkabeln oder sogenannten polgleichgerichteten Kabeln zu einer deutlichen Reduzierung der magnetischen Felder gegenüber dem Einsatz von zwei parallel verlaufenden Einzelkabeln. Die zulässigen Werte werden häufig bereits an der Oberfläche des Kabels eingehalten.



Bild 19: Polgleichgerichtetes Kabel

Allen feldreduzierten Kabeln ist gemeinsam, dass sie durch symmetrische Anordnung der Hin- und Rückleiter eine weitgehende Kompensation der auftretenden Magnetfelder erreichen. Da sich damit auch die resultierenden Kräfte aufheben, bewegt sich das Kabel bei Stromdurchfluss nicht. Aus diesem Grund wird es häufig schon aus Gründen der Haltbarkeit eingesetzt. Wie Bild 19 zeigt, ist der Knickradius trotz des mehradrigeren Aufbaus vergleichbar mit herkömmlichen Kabeln. Allerdings ist die Torsionssteifigkeit deutlich größer als bei zwei getrennten Kabeln, was sich negativ auf die Handhabbarkeit der Zange auswirkt.

Bei der Umstellung konventioneller Zangen auf koaxiale oder polgleichgerichtete Kabel müssen in der Regel die Anschlussterminals an der Zange angepasst werden.

### **Ersatz von Kabelzangen durch Trafozangen**

Bei Trafozangen wird der hohe Sekundärstrom in der Zange erzeugt; die Anschlusskabel sind deutlich dünner als bei der Kabelzange. Je nach Bauart der Zange können die zulässigen Werte bereits an der Oberfläche der Elektrodenarme eingehalten werden. Trotz des höheren Gewichts einer Trafozange gegenüber einer Kabelzange lässt sich die Trafozange häufig leichter handhaben, weil die schweren Kabel nicht mit bewegt werden müssen und die Gewichtsausgleichshilfen („Balancer“) bezüglich des Schwerpunktes optimal platziert werden können.

Durch Griffe muss sichergestellt werden, dass der Schweißer während der Schweißung nicht mit dem Körper in den Bereich des Zangenfensters gelangen kann. Dort treten weiterhin hohe magnetische Flussdichten auf.

### **Handgriffe und Handhabung**

„Abstand halten“ ist die einfachste und wirkungsvollste Maßnahme gegenüber hohen magnetischen Flussdichten. Bei einigen Zangen kann durch ergonomisch günstige Installation von Handgriffen sowohl die Handhabung der Zange vereinfacht, als auch die Exposition deutlich gesenkt werden. Insbesondere bei Zangen, die nur für eine geringe Anzahl von Schweißsituationen eingesetzt werden, können häufig geeignete Griffpositionen gefunden werden.

### **Änderung der Zangengeometrie**

Bei kleinerem Zangenfenster ist bei gleicher Stromstärke die Feldemission in der Umgebung der Zange geringer. Daher ist eine Zange, deren Leiter möglichst lange eng beieinander sind und sich erst in der Nähe des Schweißpunktes aufspreizen, bezüglich der Feldemission günstiger einzustufen als eine rechteckige Zange (siehe auch Bild 20).



Bild 20: Trafozange mit Griffen

In der Regel ist die Zangengeometrie bereits auf die Schweißaufgabe optimiert, so dass nachträgliche Änderungen an bestehenden Zangen nur selten möglich sind.

### **Aktive Feldkompensation**

Durch geeignete Maßnahmen können Felder erzeugt werden, die dem von der Schweißzange erzeugten Feld gegengerichtet sind. Das resultierende Gesamt-Magnetfeld ergibt sich durch Überlagerung beider Felder, wodurch eine Reduzierung der Exposition möglich wird.

Derartige Verfahren befinden sich noch in der Entwicklung, daher können hier keine näheren Anwendungshinweise gegeben werden.

- ⊕ Reduktion der Felder am Schweißfenster durch „Gegenfeld“
- ⊖ Erhöhung der Zangenmasse
- ⊖ Noch in der Entwicklungsphase

### 5.2.2 Stationäre Schweißeinrichtungen

Bei stationären Schweißeinrichtungen ist die Schweißstromquelle in der Regel im Maschinengehäuse integriert. Aus diesem Grund wird die Feldverteilung im Wesentlichen durch die Geometrie des Schweißfensters bestimmt. Die folgenden Maßnahmen zielen daher auf die Reduzierung der Feldemission am Schweißfenster (siehe Bilder 21a und 21b).

#### Abschirmung



Bild 21a: Versuchsanordnung; vor dem Schweißfenster angebrachtes Schirmblech

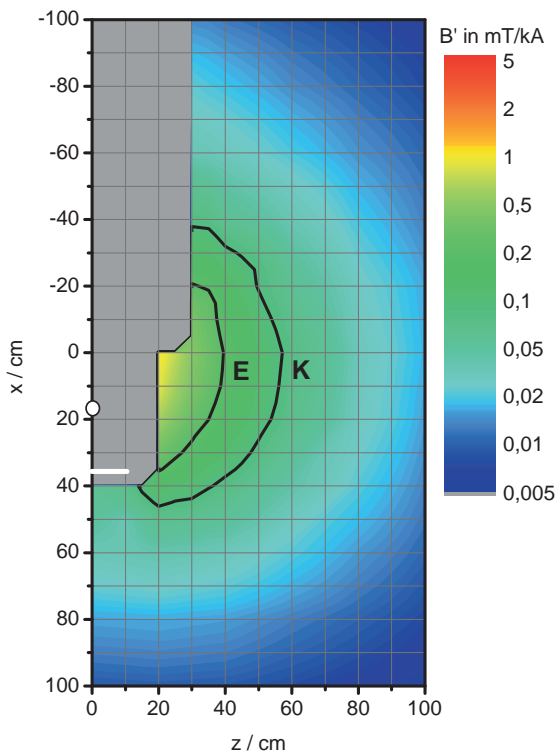


Bild 21b: Verteilung der Magnetflussdichte, Draufsicht auf horizontale Ebene durch die Mitte des Schweißfensters, eingetragene Abstandslinien für  $t_s = 200$  ms,  $I = 60$  kA<sub>eff</sub> (für Bereich erhöhter Exposition):  
K – für Körper, E – für Extremitäten

Ausnutzung des Prinzips der Feldbeeinflussung durch Flussführung oder Wirbelstromdämpfung, meist unter Verwendung kornorientiert gewalzter Metalle.

- ⊕ Abschirmung in Teilbereichen möglich
- ⊖ Materialintensiv
- ⊖ Erfordert Fachwissen bei der Konstruktion und Verarbeitung

### **Änderung der Schweißfenstergeometrie**

Generell gilt: Je kleiner das Zangenfenster, desto weniger Feldemission.  
(siehe auch Abschnitt 5.2).

### **Aktive Feldkompensation**

*Siehe Abschnitt 5.2.*

## **5.3 Maßnahmen an der Stromquelle**

Wie in Abschnitt 4.5 beschrieben, hängt die Höhe der zulässigen Werte vom Zeitverlauf des Stromes ab. Deshalb werden im Folgenden Maßnahmen an der Stromquelle zur Verringerung der Exposition vorgestellt.

Die nachfolgenden Aussagen treffen nur für Anlagenauslastungen über 30 % zu. Bei niedrigeren Auslastungen (lückender Betrieb) ist damit zu rechnen, dass sich ungünstigere Verhältnisse bei der Bewertung ergeben.

### **5.3.1 Ersatz von 50 Hz-Wechselstromquelle durch Gleichstromquelle**

Prinzipiell bietet die Gleichstromquelle gegenüber der 50-Hz-Wechselstromquelle mehr Möglichkeiten der Signalformung (Verringerung der Flankensteilheit) und Optimierung der Schweißqualität. Der Ersatz ist jedoch nur dann sinnvoll, wenn die Restwelligkeit auf dem Gleichstrom kleiner als etwa 15 % ist.

### **5.3.2 Optimierung des zeitlichen Stromverlaufes**

Dieses Verfahren ist nur dann anwendbar, wenn die konkrete Schweißaufgabe eine Variation von Schweißstrom und Schweißzeit zulässt.

In der Regel führt das Abflachen der Stromanstiege zu höheren zulässigen Werten.



## 5.4 Anlagengestaltung

Häufig verlaufen auf Grund der Anlagengestaltung die den Schweißstrom führenden Kabel (getrennter Hin- und Rückleiter) sehr nahe am Körper (Bild 22). Im Sinne der Expositionsreduzierung ist darauf zu achten, dass durch die Gestaltung der Verbindung zwischen Schweißtransformator und -zange eine starke Annäherung der Kabel an den Körper vermieden wird.

Für den Bereich Kopf und Rücken sollte ein Mindestabstand von 15 cm nicht unterschritten werden.



Bild 22: Beispiel für ungünstige Kabelführung

## 5.5 Organisatorische Maßnahmen

### 5.5.1 Unterweisung

In Anlehnung an die Liste aus Abschnitt 3.8 der BG-Regel „Elektromagnetische Felder“ (BGR B11) sollte die Unterweisung unter anderem folgende Inhalte aufweisen:

- **Magnetfelder und Wirkungen (unmittelbar/mittelbar)**

Auftreten, Charakteristik und biologische Wirkungen magnetischer Felder. Beeinflussung von aktiven Implantaten, Schutzeinrichtungen und anderen Geräten (EMV: elektromagnetische Verträglichkeit).

Elektrische Felder sind an Widerstandsschweißeinrichtungen nicht relevant.

- **Schutzvorschriften/Betriebsanweisungen**

Erläutern von relevanten Schutzvorschriften und Betriebsanweisungen.

- **Schutzmaßnahmen/Sicherheitsgerechtes Verhalten**

Anlagenspezifische Sicherheitsabstände, getrennt für Kopf/Rücken, Extremitäten und für Träger von aktiven Implantaten. Für die Hand sind in vielen Fällen die zulässigen Werte für die magnetische Flussdichte bereits an der Kabeloberfläche und der Oberfläche der Elektrodenarme eingehalten. Es gibt keine praxistauglichen persönlichen Schutzausrüstungen gegen niederfrequente Magnetfelder.

### 5.5.2 Kennzeichnung

Kennzeichnungen müssen von den entsprechenden Verkehrs- und Arbeitswegen deutlich wahrgenommen werden können. Sind mehrere Schweißeinrichtungen in einem Bereich vorhanden, sollte die Kennzeichnung an den Bereichsgrenzen (Säulen oder ähnliches) angebracht werden. Die Kennzeichnung an der Schweißzange selbst ist auf Grund der mangelnden Sichtbarkeit nicht sinnvoll. Lediglich bei einzelnen stationären Schweißeinrichtungen, z.B. Buckelschweißanlagen, kann eine Kennzeichnung an der Schweißeinrichtung sinnvoll sein.

Grundsätzlich ist eine Kennzeichnung (z.B. durch Warnzeichen „Warnung vor magnetischem Feld“ nach Anhang 4 der BG-Regel „Elektromagnetische Felder“ (BGR B11), siehe auch Bild 23 in Abschnitt 5.4.4 dieser BG-Information) erst erforderlich, wenn die zulässigen Werte des Expositionsbereiches 1 überschritten sind.



Die Entscheidung, ob eine Kennzeichnung mit dem Verbotssymbol P11 „Verbot für Personen mit Herzschrittmacher“ nach der Unfallverhütungsvorschrift „Sicherheits- und Gesundheitsschutz – Kennzeichnung am Arbeitsplatz“ (BGV A8) erforderlich ist, kann nur durch eine befähigte Person anhand einer Bewertung nach Abschnitt 3.10 der Unfallverhütungsvorschrift „Elektromagnetische Felder“ (BGV B11) getroffen werden (siehe auch Abschnitt 4.4.6).

### **5.5.3 Zugangsbeschränkung**

Die Anforderungen nach § 6 Abs. 7 der Unfallverhütungsvorschrift „Elektromagnetische Felder“ (BGV B11) können an handgeführten Schweißzangen organisatorisch umgesetzt werden, indem durch entsprechende Unterweisung des Schweißers sichergestellt wird, dass sich während des Schweißvorgangs keine Personen im Gefahrenbereich der Schweißzange aufhalten.

### **5.5.4 Betriebsanweisung**

Bild 23 zeigt eine Musterbetriebsanweisung, die an die konkrete Situation angepasst werden muss (siehe Fußnoten 1 bis 3).

<b>Betriebsanweisung</b> <b>gemäß BGV B11 Elektromagnetische Felder</b>		Ausgabedatum
<b>Geltungsbereich</b>		
<b>Ausführende Tätigkeit:</b> Arbeiten an/mit handgeführten Punktschweißzangen <sup>1</sup>		
<b>Kennzeichnung</b>		
<b>Warn- und Verbotsschilder:</b>		
 <p>Warnung vor magnetischem Feld</p>	 <p>Verbot für Personen mit Herzschrittmachern</p>	
<b>Mögliche Gefährdungen</b>		
Beim Auslösen des Schweißvorganges entstehen starke magnetische Felder, die zu <ul style="list-style-type: none"> <li>– Kraftwirkungen auf metallische Gegenstände und Implantate,</li> <li>– Reizwirkungen durch induzierten Körperstrom und zu</li> <li>– Beeinflussungen von Körperhilfsmitteln, z.B. Herzschrittmachern</li> </ul> führen können.		
<b>Schutzmaßnahmen und Verhalten</b>		
Die unmittelbare Umgebung der Schweißzange und der Zuleitungskabel ist ein Gefahrbereich nach BGV B11 Von der Schweißzange und den Zuleitungskabeln ist ein Sicherheitsabstand von XX cm (für Kopf und Rücken) einzuhalten. <sup>2</sup> <b>Beschäftigungsbeschränkungen:</b> Personen mit Herzschrittmachern und anderen aktiven Implantaten müssen einen Sicherheitsabstand von YY m zur Schweißzange einhalten. <sup>3</sup>		
<b>Unfälle / Erste Hilfe Notruf</b>		
<b>Wartung und Instandhaltung</b>		
Wartungs- und Instandhaltungsarbeiten sind von sachkundigem Personal durchzuführen. Bei Änderungen von elektrischen Schweißparametern ist die zuständige Sicherheitsfachkraft zu informieren.		

Diese Betriebsanweisung ersetzt nicht die vorgeschriebene Arbeitsplatzunterweisung.

Bild 23: Musterbetriebsanweisung für handgeführte Punktschweißzangen

### 5.5.5 Veränderung der Betriebsparameter

Bei feldrelevanten Änderungen von betrieblichen Einstellungen, insbesondere die Schweißstromparameter Amplitude und Schweißzeit, aber auch die elektrischen Komponenten des Schweißstromkreises, z. B. Art und Länge der Kabel, Art oder Form der Schweißzange, sind die Bereiche erhöhter Exposition und die Gefahrbereiche neu zu bestimmen und zu dokumentieren siehe § 4 Abs. 4 und § 6 Abs. 2 der Unfallverhütungsvorschrift „Elektromagnetische Felder“ (BGV B11).

Aus diesem Grund darf der Wechsel zu einer unbewerteten betrieblichen Einstellung nicht ohne weiteres möglich sein.

---

Fußnoten zu Bild 23:

- 1) Die betreffenden Anlagen sind eindeutig, z.B. durch Typ oder Aufstellungsort zu bezeichnen. Es können auch mehrere zusammengehörende Schweißeinrichtungen als Gruppe angegeben werden. In diesem Fall müssen ggf. die Schutzmaßnahmen und Verhaltensregeln für die einzelnen Schweißeinrichtungen unterschieden werden.
- 2) Je nach Bauart der Widerstandsschweißeinrichtung ist die Angabe weiterer Schutzabstände notwendig. Falls erforderlich, können auch Sicherheitsabstände für Extremitäten (siehe Abschnitt 4.4.6.3) angegeben werden.
- 3) Hier muss der Sicherheitsabstand für Träger von aktiven Implantaten angegeben werden (siehe Abschnitt 4.4.7).

# Anhang 1

## Beispiele zur Expositionsbewertung

### 1 Allgemeines

Im Folgenden werden die notwendigen Schritte zur Bewertung der Exposition an verschiedenen Widerstandsschweißeinrichtungen erläutert.

Dabei wird vorausgesetzt, dass:

- die Wahl der Messpunkte die Expositionssituation hinreichend berücksichtigt,
- der zeitliche Verlauf des Schweißstromes und der Spitzen- oder Effektivwert der magnetischen Flussdichte bereits gemessen und aufgezeichnet wurden und somit bekannt ist (siehe Abschnitt 4.3),
- innerhalb der maximalen Integrationszeit von  $T_I = 1000$  ms nur ein Schweißvorgang stattfindet.

#### 1.1 50-Hz-Wechselstrom-Schweißeinrichtungen

Den folgenden Betrachtungen werden die in den Bildern 1 und 2 dargestellten zeitlichen Verläufe des Schweißstromes zugrunde gelegt.

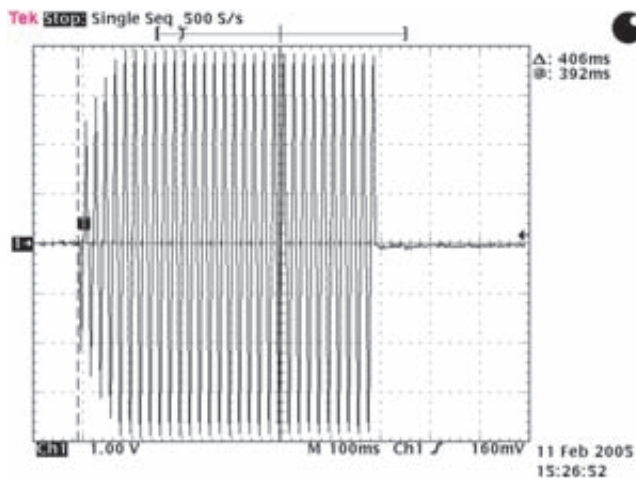


Bild 1: Zeitlicher Verlauf des Schweißstromes während eines Schweißvorganges einer 50-Hz-Widerstandsschweißeinrichtung

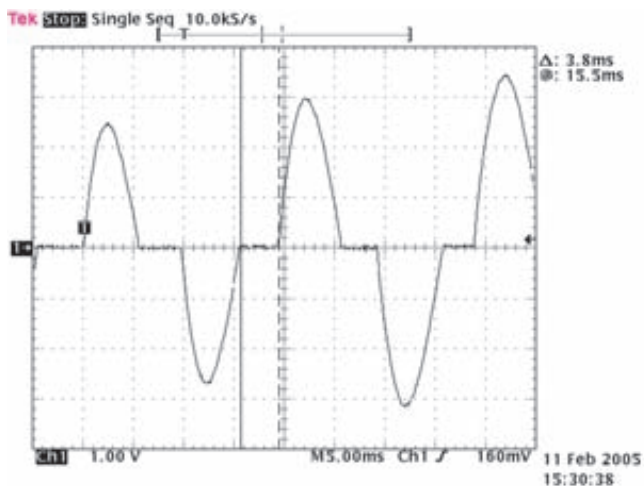


Bild 2: Ausschnitt aus dem im Bild 1 dargestellten zeitlichen Verlauf des Schweißstromes während eines Schweißvorganges

Die Ergebnisse der Messung des Spitzenwertes der magnetischen Flussdichte sind in der Tabelle 1 aufgeführt.

Messort	Spitzenwert der magnetischen Flussdichte $B$ in mT	Exponiertes Körperteil
Abstand zum Schweißpunkt 6 cm	35	Hand
Abstand zum Schweißpunkt 20 cm	5,1	Rumpf
Mitte des Schweißfensters	7,5	ggf. Extremitäten

**Tabelle 1:** An unterschiedlichen Messorten gemessene Spitzenwerte der magnetischen Flussdichte

**Schritt 1:** Bestimmung der zeitlichen Summe aller Feldänderungen aus der Schweißzeit und Stromflusszeit für einen Schweißvorgang.

Die Schweißzeit und die Stromflusszeit werden aus den Bildern 1 und 2 bestimmt.

Aus Bild 1 ist zunächst die Schweißzeit zu bestimmen. Sie beträgt 30 Perioden von je 20 ms und gilt streng genommen nur für einen sinusförmigen Stromverlauf. Auf Grund der eingesetzten Phasenanschnittsteuerungen hat der Schweißstrom, wie im Bild 2 dargestellt, in der Regel einen lückenden Verlauf und weicht damit von der reinen Sinusform ab. Die Stromflusszeit ist damit gegenüber einen sinusförmigen Stromverlauf um die Anzahl der Stromlücken kürzer.

Bei dem im Bild 2 dargestellten Stromverlauf beträgt die Stromlücke in einer Halbwelle  $t_{HL} = 3,8$  ms.

Die Stromflusszeit und damit die Zeit der Feldänderungen  $\tau_D$  betragen bei diesem Beispiel:

$$\tau_D = \sum \tau_{pi} = 60 \cdot (10 \cdot \text{ms} - t_{HL}) = 60 \cdot (10 \cdot \text{ms} - 3,8 \cdot \text{ms}) = 372 \cdot \text{ms}$$



**Schritt 2:** Bestimmung der zeitlichen Dauer eines Impulses/ Impulszuges mit anschließender Pause.

Hier ist die Zeitdauer zwischen zwei Schweißvorgängen zu ermitteln.

Wie vorausgesetzt ist die Zeitdauer zwischen zwei Schweißvorgängen länger als 1 Sekunde (1000 ms). Damit kann die Integrationszeit  $T_i$  auf  $T_i = 1$  s beschränkt werden (siehe Abschnitt 2 Nr. 11).

**Schritt 3:** Berechnung des Gewichtungsfaktors  $V$

Zur Berechnung des Gewichtungsfaktors  $V$  wird nach Abschnitt 3.1 der Anlage 1 zur Unfallverhütungsvorschrift „Elektromagnetische Felder“ (BGV B11) folgende Formel benutzt.

$$V = \sqrt{\frac{T_i}{\tau_D}}$$

mit

$V$  = Gewichtungsfaktor

$T_i$  = Integrationszeit

$\tau_D$  = Zeitliche Summe aller Feldänderungen

In dieser Formel werden die im Schritt 1 und im Schritt 2 ermittelten Zeiten für  $T_i$  und  $\tau_D$  eingesetzt. Für den im Bild 1 dargestellten Schweißvorgang ergibt sich der Gewichtungsfaktor zu:

$$V = \sqrt{\frac{T_i}{\tau_D}} = \sqrt{\frac{1000 \cdot \text{ms}}{372 \cdot \text{ms}}} = 1,64$$

**Schritt 4:** Bestimmung der Frequenz der Feldänderung  $f_p$

Die Frequenz wird aus dem zeitlichen Verlauf des Stromes oder des Feldes ermittelt. Dies sollte an Hand eines Strom- oder Feldverlaufes mit hoher zeitlicher Auflösung, wie im Bild 2 dargestellt, erfolgen.

Nach der Unfallverhütungsvorschrift „Elektromagnetische Felder“ (BGV B11) sind für sinusförmige Feldverläufe die Frequenz bestimmenden zeitlichen Parameter entsprechend Bild 3 zu bestimmen.

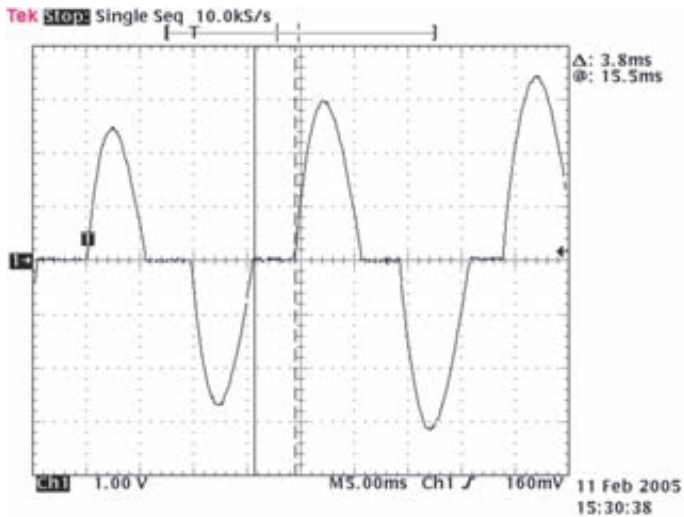


Bild 3: Bestimmung der frequenzbestimmenden zeitlichen Parameter  $\tau_{pi}$ .

Auf Grund des Phasenanschnittes sind die ansteigenden und abfallenden Abschnitte der sinusähnlichen Halbwellen unterschiedlich. Sie haben in diesem betrachteten Fall folgende Zeiten:

Anstiegszeit:  $\tau_{p1} = 2,6 \text{ ms}$

Abfallzeit:  $\tau_{p2} = 3,6 \text{ ms}$

Die Frequenz der Feldänderung  $f_p$  wird nach Abschnitt 3.1 der Anlage 1 zur Unfallverhütungsvorschrift „Elektromagnetische Felder“ (BGV B11) mit folgender Formel berechnet:

$$f_p = \frac{1}{4 \cdot \tau_{p\min}}$$

In dieser Formel steht  $\tau_{p\min}$  für den kleinsten Wert der Zeitdauer einer Feldänderung.

Für das Beispiel bedeutet dies, dass  $\tau_{pmin} = \tau_{p1}$  ist. Die Frequenz  $f_p$  beträgt damit:

$$f_p = \frac{1}{4 \cdot 2,6 \cdot 10^{-3} \text{ s}} = 96,15 \cdot \text{s}^{-1} = 96,15 \cdot \text{Hz}$$

### Schritt 5: Bestimmung der zulässigen Werte

Bei einer 50-Hz-Wechselstrom-Schweißeinrichtung haben der Strom und damit auch das magnetische Feld einen sinusähnlichen Verlauf.

Damit ist die Bestimmung der mittleren zeitlichen Änderung und des Spitzenwertes der magnetischen Flussdichte nach Abschnitt 3.1 der Anlage 1 zur Unfallverhütungsvorschrift „Elektromagnetische Felder“ (BGV B11) ausreichend (siehe auch Abschnitt 4.4.5 dieser BG-Information).

a) Mittlere zulässige zeitliche Änderung der magnetischen Flussdichte  
Zur Bestimmung der mittleren zulässigen zeitlichen Änderung der magnetischen Flussdichte ist die Tabelle 15 der Unfallverhütungsvorschrift „Elektromagnetische Felder“ (BGV B11) anzuwenden. Für eine Frequenz von ca. 96 Hz ergibt sich:

$$\left( \frac{dB}{dt} \right)_{\text{Zul}} = 0,38 \cdot V$$

Mit dem im Schritt 3 berechneten Wert für den Gewichtungsfaktor  $V = 1,64$  ergibt sich die mittlere zulässige zeitliche Änderung der magnetischen Flussdichte zu:

$$\left( \frac{dB}{dt} \right)_{\text{Zul}} = 0,38 \cdot V \cdot \frac{\text{T}}{\text{s}} = 0,38 \cdot 1,64 \cdot \frac{\text{T}}{\text{s}} = 0,62 \cdot \frac{\text{T}}{\text{s}}$$

b) Zulässiger Spitzenwert der magnetischen Flussdichte  
Der zulässige Spitzenwert der magnetischen Flussdichte wird durch Multiplikation des Wertes für die mittlere zulässige zeitliche Änderung der magnetischen Flussdichte mit dem kleinsten Wert für die Zeitdauer einer Feldänderung  $\tau_{pmin}$  berechnet. Bei dem betrachteten Beispiel ist  $\tau_{pmin} = \tau_{p1}$  (siehe Schritt 4). Somit gilt:

$$\hat{B}_{\text{zul}} = \frac{dB}{dt_{\text{zul}}} \cdot \tau_{p1} = 0,62 \cdot \frac{\text{T}}{\text{s}} \cdot 2,6 \cdot 10^{-3} \cdot \text{s} = 1,62 \cdot 10^{-3} \text{ T} = 1,62 \text{ mT}$$

## **Schritt 6:** Beurteilung der Exposition

Die Beurteilung der Exposition erfolgt an Hand des Vergleichs der Messwerte (siehe Tabelle 1) mit dem zulässigen Spitzenwert der magnetischen Flussdichte aus Schritt 5 (siehe Flussdiagramm in Abschnitt 4.4.5).

Im Folgenden erfolgt beispielhaft die Beurteilung (siehe auch Flussdiagramm im Bild 4) für den in der Tabelle 1 aufgeführten Messort „Abstand zum Schweißpunkt 20 cm“, bei dem keine lokale Exposition angenommen wird.

### **1. Vergleich der Messwerte mit dem zulässigen Spitzenwert der magnetischen Flussdichte für den Expositionsbereich 1**

Es sind die im Schritt 5 berechneten zulässigen Werte mit dem in der Tabelle 1 aufgeführten Spitzenwert der magnetischen Flussdichte zu vergleichen.

Für das Beispiel zeigt der Vergleich des maximal zulässigen Spitzenwertes der magnetischen Flussdichte ( $B_{\text{zul}} = 1,62 \text{ mT}$ ) mit den Werten der magnetischen Flussdichte die am Messort für die Exposition des Rumpfes ( $B = 5,1 \text{ mT}$ ) ermittelt wurden, dass der gemessene Wert der magnetischen Flussdichte über den zulässigen Wert liegt. Damit ist zu prüfen, ob nach der Unfallverhütungsvorschrift „Elektromagnetische Felder“ (BGV B11) die zulässigen Werte für den Bereich erhöhter Exposition angewendet werden können.

### **2. Feststellen ob die zulässigen Werte für den Bereich erhöhter Exposition angewendet werden können**

Nach der Unfallverhütungsvorschrift „Elektromagnetische Felder“ (BGV B11) können die zulässigen Werte für den Bereich erhöhter Exposition nur angewendet werden, wenn die Expositionszeit zwei Stunden am Tag nicht überschreitet. Nach Abschnitt 4.4.5 ist die Expositionszeit das Produkt aus der Anzahl der Schweißvorgänge pro Tag und der Stromflusszeit pro Schweißvorgang. Bei diesem Beispiel wurde die Stromflusszeit bereits im Schritt 1 mit  $\tau_0 = 372 \text{ ms}$  ermittelt, zur Bestimmung der Expositionszeit ist daher nur noch die Anzahl der Schweißimpulse pro Tag zu ermitteln. Für das Beispiel werden 5000 Schweißvorgänge pro Tag angenommen (dies ist für manuell ausgelöste Schweißvorgänge eine hohe Anzahl). Die Expositionszeit beträgt somit:

$$t_{\text{Exp0}} = 5000 \cdot \tau_0 = 5000 \cdot 372 \cdot 10^{-3} \text{ s} = 1860 \text{ s}$$

mit

$t_{\text{Exp0}}$  = Expositionszeit in s

$\tau_0$  = Stromflusszeit in s

Die Dauer der Exposition liegt damit unterhalb von zwei Stunden pro Tag. Dies bedeutet, dass zur weiteren Beurteilung der Exposition die zulässigen Werte für den Bereich erhöhter Exposition angewendet werden können .

### 3. Bestimmung der zulässigen Werte für den Bereich erhöhter Exposition

Die zulässigen Werte für den Bereich erhöhter Exposition werden analog zu Schritt 5 berechnet. Für den Bereich erhöhter Exposition beträgt dann der zulässige Spitzenwert die magnetischen Flussdichte 3,07 mT.

### 4. Beurteilung der Messwerte anhand der zulässigen Werte für den Bereich erhöhter Exposition

Die Beurteilung ist analog zu der im Schritt 6 unter Nummer 1 beschriebenen Vorgehensweise durchzuführen. Danach zeigt der Vergleich, dass auch hier die Messwerte über den zulässigen Werten liegen. Das bedeutet, dass eine Gefährdung von Personen nicht mehr ausgeschlossen werden kann und Maßnahmen zur Minderung der Exposition durchgeführt werden müssen.

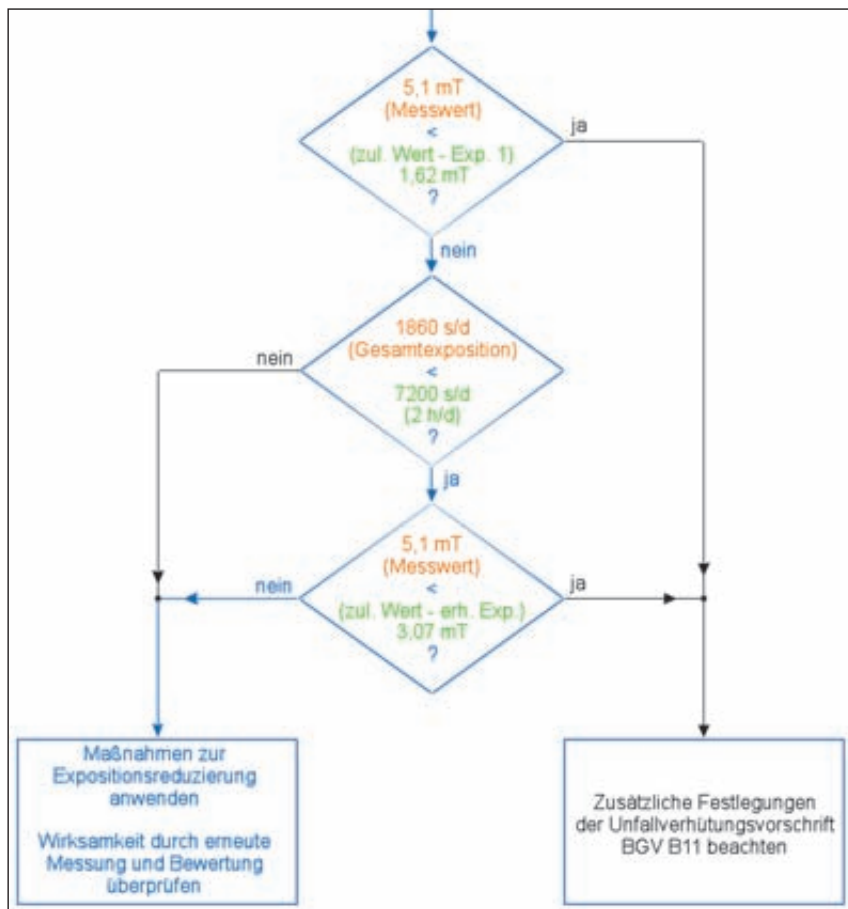


Bild 4: Flussdiagramm zur Expositionsbeurteilung für das Beispiel im Anhang 1 Abschnitt 1.1 „50 Hz Widerstandsschweißeinrichtung“

**Schritt 7:** Überprüfung der Wirksamkeit durchgeführter Maßnahmen zur Reduzierung der Exposition

Falls im Schritt 6 festgestellt wird, dass Maßnahmen zur Reduzierung der Exposition erforderlich sind, sind nach der Auswahl und Umsetzung deren Wirksamkeit zu überprüfen, d.h. die Exposition am Arbeitsplatz muss – wie beschrieben – erneut beurteilt werden.

Hierzu ist der Spitzen- oder Effektivwert der magnetischen Flussdichte neu zu messen und mit den zulässigen Werten zu vergleichen (siehe Schritt 6).

## 1.2 Mittelfrequenz-Inverter-Schweißeinrichtung

Im Bild 5 ist der zeitliche Verlauf des Schweißstromes einer Mittelfrequenz-Inverter-Schweißeinrichtung für einen Schweißvorgang dargestellt.

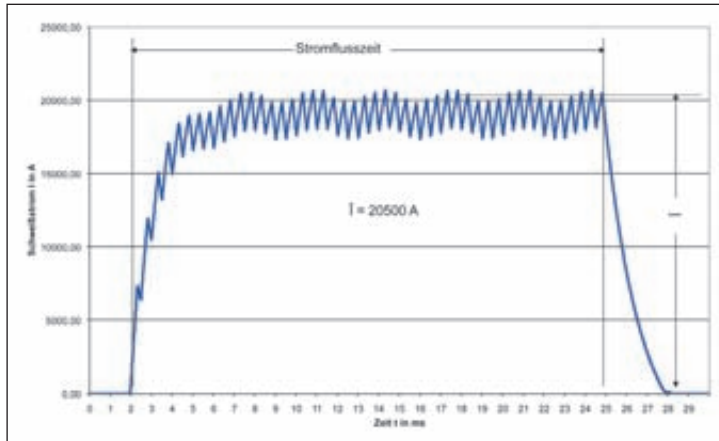


Bild 5: Zeitlicher Verlauf des Schweißstromes während eines Schweißvorganges an einer Mittelfrequenz-Inverter-Schweißeinrichtung

Die Ergebnisse der Messung des Spitzenwertes der magnetischen Flussdichte sind in der Tabelle 2 aufgeführt.

Messort	Spitzenwert der magnetischen Flussdichte in mT	Exponiertes Körperteil
Elektrodenarm Messabstand 6 cm	22	Hand
Schweißfenstermitte Messabstand 40 cm	5,2	Vorderseite Mitte Rumpf

**Tabelle 2:** An unterschiedlichen Messorten gemessene Spitzenwerte der magnetischen Flussdichte

Der für eine Mittelfrequenz-Inverter-Schweißeinrichtung im Bild 5 dargestellte Stromverlauf zeigt einen Stromimpuls aus mehreren überlagerten Funktionen. Im Beispiel sind dies:

- a) ein Gleichstromimpuls mit exponentiell ansteigenden und abfallenden Flanken
- b) Welligkeit
  - b1) aus der Gleichrichtung des Inverterstromes (hier 300 Hz).
  - b2) auf Grund der Schaltfrequenz des Wechselrichters (hier 2 kHz).
  - b3) auf der ansteigenden Flanke des Gleichstromimpulses

Für jede dieser Funktionen ist eine getrennte Bewertung der Exposition durchzuführen.

Die Schritte 1 bis 3 dienen der Bestimmung des Gewichtungsfaktor  $V$  für den gesamten Impulszug. Dieses Ergebnis ist für die Bewertung sowohl des Gleichstromimpulses a) als auch der Welligkeit b) heranzuziehen.

**Schritt 1:** Bestimmung der zeitlichen Summe der Feldänderungen

Bei dem im Bild 5 dargestellten zeitlichen Verlauf des Stromes finden wesentliche Änderungen der magnetischen Flussdichte während des gesamten Schweißvorgangs statt.



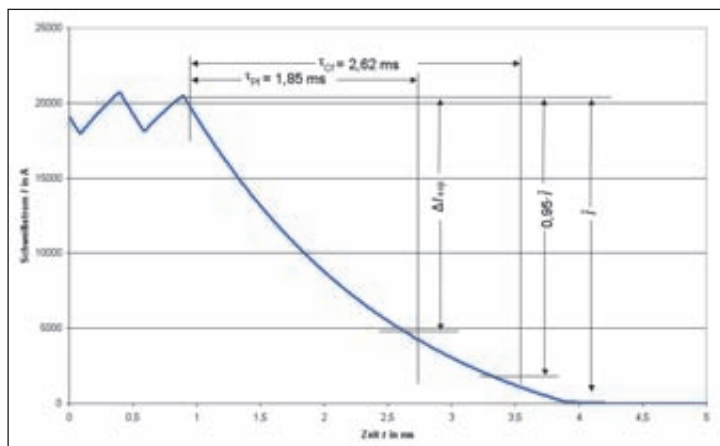


Bild 6: Ausschnitt aus Bild 5 für den zeitlichen Verlauf der abfallenden Flanke des Schweißstromes

Damit ergibt sich die zeitliche Summe der Feldänderungen  $\tau_D$  aus der Summe der Stromzeit  $t_s$  und der Zeitdauer der abfallenden Flanke  $\tau_{cf}$ :

$$\tau_D = t_s + \tau_{cf} = 22,85 \text{ ms} + 2,62 \text{ ms} = 25,47 \text{ ms}$$

**Schritt 2:** Bestimmung der zeitlichen Dauer eines Impulses/ Impulszuges mit anschließender Pause

Die Integrationszeit  $T_I$  kann auf  $T_I = 1 \text{ s}$  beschränkt werden (siehe Anhang 1 Abschnitt 1.1 Schritt 2).

**Schritt 3:** Berechnung des Gewichtungsfaktors  $V$

Der Gewichtungsfaktor wird analog zu Anhang 1 Abschnitt 1.1 Schritt 3 berechnet.

Für den im Bild 5 dargestellten Schweißvorgang hat der Gewichtungsfaktor den Wert:

$$V = \sqrt{\frac{T_I}{\tau_D}} = \sqrt{\frac{1000 \text{ ms}}{25,47 \text{ ms}}} = 6,3$$

### a) Gleichstromimpuls

Auf Grund der Welligkeit des Stromes ist der Anstieg jedoch mehrfach unterbrochen, so dass dessen Bewertung nach Anhang 1 Abschnitt 1.2 Teil b3) „Bewertung der überlagerten Welligkeit auf der ansteigenden Flanke des Gleichstromimpulses“ zu erfolgen hat.

#### Schritt 4: Bestimmung der Frequenz der Feldänderung

Die Frequenz wird aus dem zeitlichen Verlauf der abfallenden Flanke des Stromes oder des Feldes bestimmt. Hierzu sind nach der Unfallverhütungsvorschrift „Elektromagnetische Felder“ (BGV B11) zunächst die Frequenz bestimmenden zeitlichen Parameter für exponentielle Feldverläufe zu ermitteln. Für das Beispiel ist hierzu entsprechend Bild 6 der Zeitpunkt zu ermitteln, bei dem der Strom oder der Feldverlauf der abfallenden Flanke den Wert

$$\Delta I_{\text{exp}} = 1 - \left(1 - e^{\frac{-\pi}{2}}\right) \cdot \hat{I}$$

erreicht und wie im Bild dargestellt die Zeitdauer der Feldänderung  $\tau_p = \tau_{\text{pf}}$  zu bestimmen. Im betrachteten Beispiel ist  $\tau_{\text{pf}} = 1,85$  ms. Damit erhält man für die Frequenz der Feldänderung:

$$f_p = \frac{1}{4 \cdot \tau_{p\text{min}}} = \frac{1}{4 \cdot 1,85 \text{ ms}} = 135,1 \text{ s}^{-1} = 135,1 \text{ Hz}$$

#### Schritt 5: Bestimmung der zulässigen Werte

Es gelten die Erläuterungen gemäß Anhang 1 Abschnitt 1.1 Schritt 5.

Auf Grund der exponentiellen abnehmenden Strom- bzw. Feldverlaufs wird entsprechend der Unfallverhütungsvorschrift „Elektromagnetische Felder“ (BGV B11) zur Beurteilung der Exposition die maximal zulässige zeitliche Änderung der magnetischen Flussdichte benutzt.

Es wird die Tabelle 14 der Unfallverhütungsvorschrift „Elektromagnetische Felder“ (BGV B11) für die Frequenz  $f = 135,1$  Hz und dem Gewichtungsfaktor  $V = 6,3$  angewendet. Daraus ergeben sich die in der Tabelle 3 aufgeführten maximalen zulässigen zeitlichen Änderungen.

Exponiertes Körperteil	Maximal zulässige zeitliche Änderung der magnetischen Flussdichte in T/s
Ganzkörper	3,8
Extremitäten	9,4
Hand	75

**Tabelle 3:** Maximal zulässige zeitliche Änderung der magnetischen Flussdichte für die Frequenz  $f = 135,1$  Hz

**Schritt 6:** Bewertung und Beurteilung

Da sich die magnetische Flussdichte proportional zu dem sie verursachenden Strom verhält, kann die fehlende Feldgröße  $\Delta B$  wie folgt berechnet werden:

$$\frac{\Delta I_{\text{exp}}}{\hat{I}} = \frac{\Delta B_{\text{exp}}}{\hat{B}} = \frac{\Delta B}{\hat{B}}$$

Für die von der Schaltfrequenz herrührende Welligkeit der magnetischen Flussdichte ergibt sich:

$$\Delta B = \hat{B} \cdot \frac{\Delta I_{\text{exp}}}{\hat{I}} = 22 \text{ mT} \cdot \frac{16236 \text{ A}}{20500 \text{ A}} = 17,42 \text{ mT}$$

mit

$\Delta B_{\text{exp}}$  Änderung der magnetische Flussdichte der Flanke bis  $(1 - e^{-\pi/2}) \hat{B}$

$\hat{B}$  Spitzenwert der Amplitude der magnetischen Flussdichte des Schweißimpulses aus Tabelle 2 gemessen am Elektrodenarm

$\Delta I_{\text{exp}}$  Änderung des Schweißstromes der abklingenden Flanke bis  $(1 - e^{-\pi/2}) \hat{I}$

$\hat{I}$  Spitzenwert der Amplitude des Schweißstromes aus Bild 5

Für die maximale zeitliche Änderung der magnetischen Flussdichte der abklingenden Flanke ergibt sich:

$$\frac{\Delta B}{\tau_{pf}} = \frac{17,42 \text{ mT}}{1,85 \text{ ms}} = 9,63 \frac{\text{T}}{\text{s}}$$

Es sind die im Schritt 5 berechneten Werte für die maximal zulässige zeitliche Änderung der magnetischen Flussdichte mit dem berechneten Wert für die maximale zeitliche Änderung der magnetischen Flussdichte der abklingenden Flanke zu vergleichen.

Für das Beispiel zeigt der Vergleich der maximal zulässigen zeitlichen Änderung der magnetischen Flussdichte für die Hand (75 T/s) mit den aus den Messungen berechneten Werten der Änderung der magnetischen Flussdichte (9,63 T/s), dass die die zulässigen Werte für die Exposition der Hand nicht überschritten werden.

**Schritt 7:** Auswahl von Maßnahmen

Da bei der Bewertung der Exposition der Hand keine Überschreitung der zulässigen Werte ermittelt wurde, sind keine besonderen Maßnahmen zur Reduzierung der Exposition notwendig.

Die zusätzlichen Festlegungen des Abschnittes 4.4.6.3 sind zu beachten!

**b) Welligkeiten**

Die dem Schweißstrom überlagerten Welligkeiten sind im Bild 7 dargestellt.

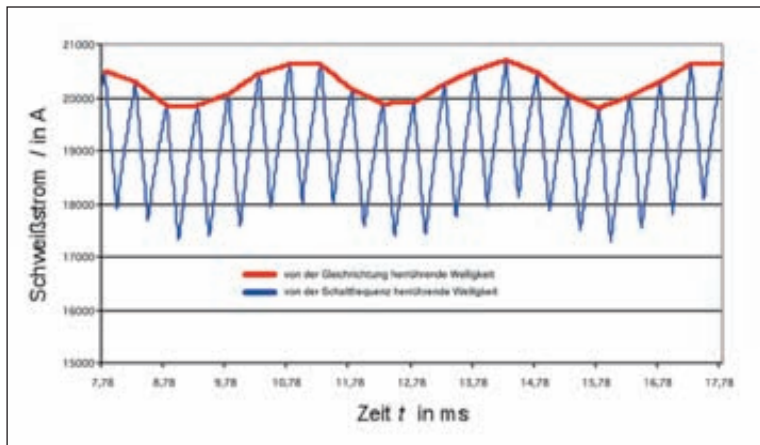


Bild 7: Überlagerte Welligkeiten, Ausschnitt aus dem im Bild 5 dargestellten zeitlichen Verlauf eines Schweißvorganges

Bild 7 zeigt einen sinusähnlichen bzw. dreieckförmigen zeitlichen Stromverlauf für beide Welligkeiten. Die Bewertung der Exposition wird nach der im Anhang 1 Abschnitt 1.1 beschriebenen Vorgehensweise durchgeführt. Im Folgenden werden in den verschiedenen Schritten nur noch die zu berücksichtigenden Besonderheiten der beiden Welligkeiten erläutert.

### **b1) Von der Gleichrichtung herrührende Welligkeit**

Für die im Bild 7 dargestellten Zusammenhänge für den Strom und die Frequenz der von der Gleichrichtung (Index G) und der von der Schaltfrequenz (Index S) herrührenden Welligkeit gilt:

$$\Delta I_G < \Delta I_S$$

$$f_G < f_S$$

mit:

$$f_G < 1000 \text{ Hz}$$

$$f_S > 1000 \text{ Hz}$$

Daraus folgt:

- Für die zulässige zeitliche Änderung der magnetischen Flussdichte:  
Da nach der Unfallverhütungsvorschrift „Elektromagnetische Felder“ (BGV B11) im Frequenzbereich zwischen 1 Hz und 1000 Hz die zulässige zeitliche Änderung der magnetischen Flussdichte konstant ist, d.h. die zulässigen Werte der magnetischen Flussdichte mit zunehmender Frequenz abnehmen, gilt hinsichtlich der zulässigen Werte der beiden Welligkeiten:

$$\Delta B_{zulS} \leq \Delta B_{zulG}$$

mit

$\Delta B_{zulS}$  Zulässiger Änderung der magnetischen Flussdichte von der Schaltfrequenz herrührend

$\Delta B_{zulG}$  Zulässiger Änderung der magnetischen Flussdichte von der Gleichrichtung herrührend

- Für die magnetische Flussdichte:  
Werden anhand von Bild 7 die Stromstärkeänderungen der beiden Welligkeiten miteinander verglichen, so gilt für die magnetischen Flussdichten:

$$\Delta B_S \geq \Delta B_G$$

mit

$\Delta B_S$  Änderung der magnetischen Flussdichte von der Schaltfrequenz herrührend

$\Delta \hat{B}_G$  Änderung der magnetischen Flussdichte von der Gleichrichtung herrührend

Ergebnis: Die Bewertung der Exposition der von der Gleichrichtung herrührenden Welligkeiten kann auf Grund der obigen Abschätzungen unterbleiben.

**b2) Von der Schaltfrequenz herrührende Welligkeit**

Bild 8 zeigt einen Ausschnitt aus dem zeitlichen Verlauf der von der Schaltfrequenz der Schweißstromquelle herrührenden Welligkeit.

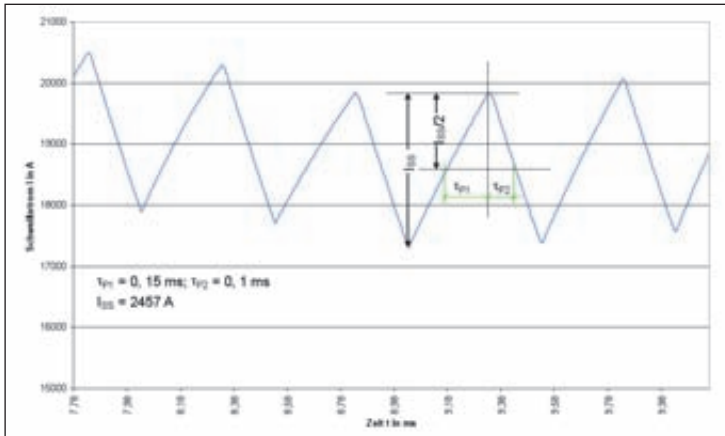


Bild 8: Von der Schaltfrequenz herrührende Welligkeit, Ausschnitt aus dem im Bild 5 dargestellten zeitlichen Verlauf eines Schweißvorganges

Die Schritte 1 bis 3 wurden bereits durchgeführt – siehe Gesamtimpuls

**Schritt 4:** Bestimmung der Frequenz der Feldänderung

Es gelten die Erläuterungen gemäß Anhang 1 Abschnitt 1.1 Schritt 4. Wie im Bild 8 dargestellt, werden die Zeiten  $\tau_{p1}$  und  $\tau_{p2}$  aus dem zeitlichen Verlauf des Stromes der überlagerten Welligkeit ausgelesen.

Für das dargestellte Beispiel ist  $\tau_{p1} = 0,15$  ms und  $\tau_{p2} = 0,1$  ms. Damit ist der kleinste Wert der Zeitdauern  $\tau_{p\min} = \tau_{p1} = 0,1$  ms. Für die Frequenz der Feldänderung  $f_p$  erhält man somit:

$$f_p = \frac{1}{4 \cdot \tau_{p\min}} = \frac{1}{4 \cdot 0,1 \text{ ms}} = 2500 \text{ s}^{-1} = 2500 \text{ Hz}$$

**Schritt 5:** Bestimmung der zulässigen Werte

Es gelten die Erläuterungen gemäß Anhang 1 Abschnitt 1.1 Schritt 5.

Es wird die Tabelle 15 der Unfallverhütungsvorschrift „Elektromagnetische Felder“ (BGV B11) für die Frequenz  $f = 2500$  Hz und dem Gewichtungsfaktor  $V = 6,3$  angewendet. Daraus ergeben sich die in Tabelle 4 dargestellten mittleren zulässigen zeitlichen Änderungen und die zulässigen Spitzenwerte der magnetischen Flussdichte für die Exposition unterschiedlicher Körperteile (siehe Abschnitt **4.4.5.3**).

Exponiertes Körperteil	Magnetischen Flussdichte	
	mittlere zulässige zeitliche Änderung in T/s	Zulässiger Spitzenwert in mT
Ganzkörper	5,95	0,6
Extremitäten	14,9	1,5
Hand	119	12

**Tabelle 4:** Mittlere zulässige zeitliche Änderungen und zulässige Spitzenwerte der magnetischen Flussdichte für die Frequenz  $f = 2500$  Hz

**Schritt 6:** Beurteilung der Exposition

Da sich die magnetische Flussdichte proportional zu dem sie verursachenden Strom verhält, kann die fehlende Feldgröße  $\Delta B$  wie folgt berechnet werden:

$$\frac{I_{ss}/2}{\hat{I}} = \frac{\Delta B}{\hat{B}}$$

Für die von der Schaltfrequenz herrührende Welligkeit der magnetischen Flussdichte ergibt sich:

$$\Delta B = \hat{B} \cdot \frac{I_{ss}/2}{\hat{I}} = 22 \text{ mT} \cdot \frac{2558 \text{ A}/2}{20500 \text{ A}} = 1,38 \text{ mT}$$

mit

$\Delta B$  Spitzenwert der Amplitude der magnetischen Flussdichte der von der Schaltfrequenz herrührenden Welligkeit in T

$\hat{B}$  Spitzenwert der der Amplitude der magnetischen Flussdichte des Schweißimpulses in T aus Tabelle 2

$I_{ss}$  Spitze-Spitze Wert der Amplitude des Stromes der von der Schaltfrequenz herrührenden Welligkeit aus Bild 8

$\hat{I}$  Spitzenwert der Amplitude des Schweißstromes in A aus Bild 5

Es sind die im Schritt 5 berechneten zulässigen Werte mit dem berechneten Wert der Welligkeit der magnetischen Flussdichte  $\Delta B$  zu vergleichen.

Für das Beispiel zeigt der Vergleich des maximal zulässigen Spitzenwertes der magnetischen Flussdichte für die Hand (12,0 mT) mit den Werten der magnetischen Flussdichte, die aus den Messungen ermittelt wurden (1,38 mT), dass die zulässigen Werte für die Exposition der Hand nicht überschritten werden.



**Schritt 7:** Auswahl von Maßnahmen

Da bei der Bewertung der Exposition der Hand keine Überschreitung der zulässigen Werte ermittelt wurde, sind keine besonderen Maßnahmen zur Reduzierung der Exposition notwendig.

Die zusätzlichen Festlegungen des Abschnittes **4.4.6.3** sind zu beachten!

**b3) Bewertung der überlagerten Welligkeit auf der ansteigenden Flanke des Gleichstromimpulses**

Die vorangegangenen Bewertungen der Exposition können unter Umständen nicht ausreichend sein wenn der Anstieg des Schweißstromes innerhalb weniger Perioden der Wechselrichtertaktfrequenz erfolgt.

Eine zusätzliche Bewertung ist immer dann erforderlich, wenn gilt:

$$N < \frac{\hat{I}}{I_{ss}} = \frac{\hat{B}}{2\Delta B}$$

Dabei ist N die Anzahl der Teilschwingungen mit Wechselrichtertaktfrequenz (siehe Bild 9) in der ansteigenden Flanke bis der Schweißstrom der ansteigenden Flanke den Wert:

$$I = \hat{I} \cdot (1 - e^{-\pi/2})$$

erreicht hat.

Für das Beispiel ergeben sich aus dem, in den Bildern 5, 7 und 9 dargestellten Stromverläufen:

$$N = 4 < \frac{\hat{I}}{I_{ss}} = \frac{20500\text{A}}{2558\text{ A}} = 8,01$$

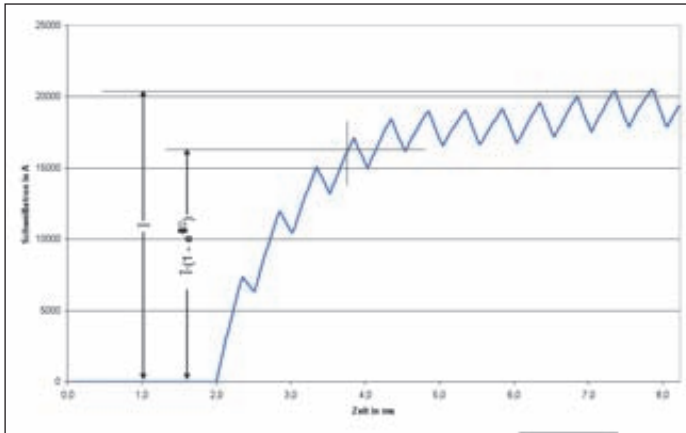


Bild 9: Ansteigende Flanke des Schweißstromes, Ausschnitt aus dem im Bild 5 dargestellten zeitlichen Verlauf eines Schweißvorganges

Die Anzahl der Teilschwingungen  $N$  ist damit kleiner als das Verhältnis des Spitzenwertes des Schweißstromes zum Spitze-Spitze Wert der Amplitude der von der Schaltfrequenz herrührenden Welligkeit. Damit ist eine zusätzliche Bewertung der ansteigenden Flanke des Schweißstromes erforderlich.

Die Schritte 1 bis 3 wurden bereits durchgeführt – siehe Gesamtimpuls

**Schritt 4:** Bestimmung der Frequenz der Feldänderung

Zunächst ist der kleinste Wert der Zeitdauern  $\tau_{pmin} = \tau_p$  zu bestimmen. Dieser Wert ist, für den dargestellten exponentiellen Stromverlauf, aus der ersten Teilschwingung des Wechselrichtertaktes in der ansteigenden Flanke des Schweißstromes zu ermitteln (siehe Bild 10).

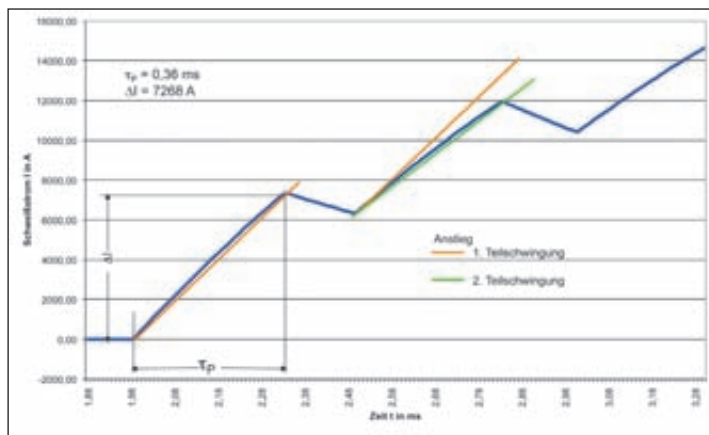


Bild 10: Bestimmung des frequenzbestimmenden zeitlichen Parameters  $\tau_p$

Aus Bild 10 wird für  $\tau_{pmin} = \tau_p = 0,36$  ms ausgelesen.

Die Frequenz der Feldänderung  $f_p$  wird analog zum Anhang 1 Abschnitt 1.1 Schritt 4 berechnet. Man erhält somit:

$$f_p = \frac{1}{4 \cdot \tau_{pmin}} = \frac{1}{4 \cdot 0,36 \text{ ms}} = 695 \text{ s}^{-1} = 695 \text{ Hz}$$

#### Schritt 5: Bestimmung der zulässigen Werte

Es gelten die Erläuterungen gemäß Anhang 1 Abschnitt 1.1 Schritt 5.

Auf Grund der exponentiellen abnehmenden Strom- bzw. Feldverlaufs wird entsprechend der Unfallverhütungsvorschrift „Elektromagnetische Felder“ (BGV B11) zur Beurteilung der Exposition die maximal zulässige zeitliche Änderung der magnetischen Flussdichte benutzt.

Es wird die Tabelle 14 der Unfallverhütungsvorschrift „Elektromagnetische Felder“ (BGV B11) für die Frequenz  $f = 695$  Hz und dem Gewichtungsfaktor  $V = 6,3$  angewendet. Daraus ergeben sich die in der Tabelle 5 aufgeführte maximalen zulässigen zeitlichen Änderungen.

Exponiertes Körperteil	Maximal zulässige zeitliche Änderung der magnetischen Flussdichte in T/s
Ganzkörper	3,8
Extremitäten	9,4
Hand	75

**Tabelle 5:** Maximal zulässige zeitliche Änderungen der magnetischen Flussdichte für die Frequenz  $f = 695 \text{ Hz}$

**Schritt 6:** Beurteilung der Exposition

Für die von der Schaltfrequenz herrührende Welligkeit der magnetischen Flussdichte ergibt sich:

$$\Delta B = \hat{B} \cdot \frac{\Delta I}{\hat{I}} = 22 \text{ mT} \cdot \frac{7268 \text{ A}}{20500 \text{ A}} = 7,8 \text{ mT}$$

mit

$\Delta B$  Änderung der magnetischen Flussdichte der ersten Teilschwingung des Wechselrichtertaktes in der ansteigenden Flanke des Schweißstromes

$\hat{B}$  Spitzenwert der Amplitude der magnetischen Flussdichte des Schweißimpulses aus Tabelle 1 gemessen am Elektrodenarm

$\Delta I$  Änderung des Schweißstromes der ersten Teilschwingung des Wechselrichtertaktes in der ansteigenden Flanke des Schweißstromes aus Bild 10

$\hat{I}$  Spitzenwert der Amplitude des Schweißstromes aus Bild 5

Für die maximale zeitliche Änderung der magnetischen Flussdichte der ersten Teilschwingung ergibt sich:

$$\frac{\Delta B}{\tau_p} = \frac{7,8 \text{ mT}}{0,36 \text{ ms}} = 21,66 \text{ T/s}$$

Es sind die im Schritt 5 berechneten Werte für die maximal zulässige zeitliche Änderung der magnetischen Flussdichte mit dem berechneten Wert für die maximale zeitliche Änderung der magnetischen Flussdichte der abklingenden Flanke zu vergleichen.

Für das Beispiel zeigt der Vergleich der maximal zulässigen zeitlichen Änderung der magnetischen Flussdichte für die Hand (75 T/s) mit den aus den Messungen berechneten Werten der Änderung der magnetischen Flussdichte (21,66 T/s), dass die zulässigen Werte für die Exposition der Hand nicht überschritten werden.

### Schritt 7: Auswahl von Maßnahmen

Da bei der Bewertung der Exposition der Hand keine Überschreitung der zulässigen Werte ermittelt wurde, sind keine besonderen Maßnahmen zur Reduzierung der Exposition notwendig.

Die zusätzlichen Festlegungen des Abschnittes **4.4.6.3** sind zu beachten!

## 1.3 Kondensator-Entladungs-Schweißeinrichtung

Im Bild 11 ist der zeitliche Verlauf des Schweißstromes einer Kondensator-Entladungs-Schweißeinrichtung für einen Schweißvorgang dargestellt.

Dieser besteht aus einer Aneinanderreihung zweier Exponentialfunktionen. Für jede dieser Signalkomponenten muss eine getrennte Bewertung durchgeführt werden.

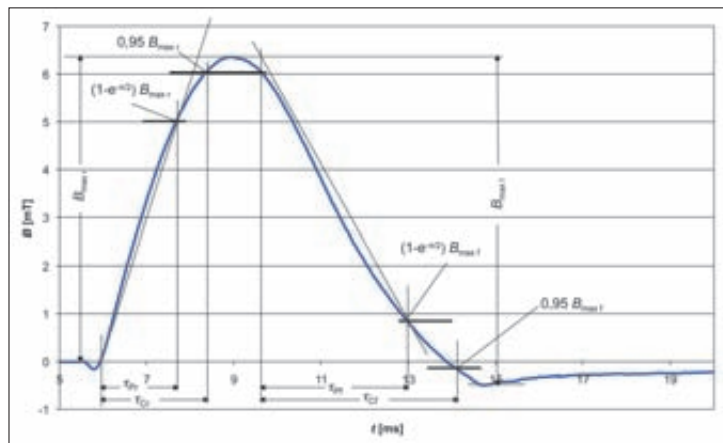


Bild 11: Zeitlicher Verlauf des Schweißstromes während eines Schweißvorganges an einer Kondensator-Entladungs-Schweißeinrichtung

Die für die Expositionsbewertung notwendigen Zeitparameter und Werte der magnetischen Flussdichte können nachfolgender Tabelle entnommen werden.

$\hat{B}_r \hat{=} B_{max r}$	Spitzenwert der magnetischen Flussdichte der ansteigenden Flanke	6,35 mT
$\hat{B}_f \hat{=} B_{max f}$	Spitzenwert der magnetischen Flussdichte der abfallenden Flanke	6,85 mT
$\tau_{Pr}$		1,8 ms
$\tau_{Cr}$		2,5 ms
$\tau_{Pf}$		3,3 ms
$\tau_{Cf}$		4,5 ms

**Tabelle 6:** Zeitparameter und Werte der magnetischen Flussdichte für den Zeitverlauf des Schweißstromes in Bild 11

Die Expositionsbestimmung erfolgt in diesem Fall für die Position Vorderseite Mitte Rumpf.

**Schritt 1:** Bestimmung der zeitlichen Summe der Feldänderungen

Bei dem im Bild 11 dargestellten zeitlichen Verlauf des Stromes finden wesentliche Änderungen der magnetischen Flussdichte während der Zeit gesamten Schweißvorgangs statt.

Damit ergibt sich die zeitliche Summe der Feldänderungen  $\tau_D$  aus der Summe der Zeitdauern der beiden Flanken:

$$\tau_D = \tau_{Cr} + \tau_{Cf} = 2,5 \text{ ms} + 4,5 \text{ ms} = 7 \text{ ms}$$

**Schritt 2:** Bestimmung der zeitlichen Dauer eines Impulses/ Impulszuges mit anschließender Pause

Die Integrationszeit  $T_I$  kann auf  $T = 1 \text{ s}$  beschränkt werden (siehe Anhang 1 Abschnitt 1.1 Schritt 2).

**Schritt 3:** Berechnung des Gewichtungsfaktors  $V$ 

Der Gewichtungsfaktor wird analog zu Anhang 1 Schritt 3 berechnet.

Für den im Bild 5 dargestellten Schweißvorgang hat der Gewichtungsfaktor den Wert:

$$V = \sqrt{\frac{T_1}{\tau_D}} = \sqrt{\frac{1000 \text{ ms}}{7 \text{ ms}}} = 12$$

**Schritt 4:** Bestimmung der Frequenz der Feldänderungen

Die Frequenz wird aus dem zeitlichen Verlauf der jeweiligen Flanke des Stromes oder des Feldes bestimmt. Hierzu sind nach der Unfallverhütungsvorschrift „Elektromagnetische Felder“ (BGV B11) zunächst die Frequenz bestimmenden zeitlichen Parameter für exponentielle Feldverläufe zu ermitteln. Für das Beispiel ist hierzu entsprechend Bild 11 der jeweilige Zeitpunkt für die ansteigende und die abfallende Flanke zu ermitteln. Aus den ermittelten Zeitdauern (siehe Tabelle 6) kann die jeweilige Frequenz bestimmt werden:

$$f_{Pr} = \frac{1}{4 \cdot \tau_{Pr}} = \frac{1}{4 \cdot 1,8 \text{ ms}} = 139 \text{ s}^{-1} = 139 \text{ Hz}$$

$$f_{Pf} = \frac{1}{4 \cdot \tau_{Pf}} = \frac{1}{4 \cdot 3,3 \text{ ms}} = 76 \text{ s}^{-1} = 76 \text{ Hz}$$

**Schritt 5:** Bestimmung der zulässigen Werte

Es gelten die Erläuterungen gemäß Anhang 1 Abschnitt 1.1 Schritt 5.

Auf Grund der exponentiellen abnehmenden Strom- bzw. Feldverlaufs wird entsprechend der Unfallverhütungsvorschrift „Elektromagnetische Felder“ (BGV B11) zur Beurteilung der Exposition die maximal zulässige zeitliche Änderung der magnetischen Flussdichte benutzt.

Die ermittelten Frequenzen liegen beide im Frequenzbereich 1 bis 1000 Hz. Die anzuwendende Tabelle 14 der Unfallverhütungsvorschrift „Elektromagnetische Felder“ (BGV B11) weist bei der Ermittlung der zulässigen Werte keine Abhängigkeit zur Frequenz aus, so dass hierzu lediglich der Gewichtungsfaktor  $V = V_{\max} = 8$  herangezogen werden muss. Damit ergibt sich für die maximal zulässige zeitliche Änderungen der magnetischen Flussdichte für den Expositionsbereich 1 ein Wert von 4,8 T/s.

**Schritt 6:** Bewertung und Beurteilung

Für die maximale zeitliche Änderung der magnetischen Flussdichte der gemessenen ansteigende Flanke ergibt sich:

$$\frac{\hat{B}_r (1 - e^{\pi/2})}{\tau_{pr}} = \frac{5,01 \text{ mT}}{1,8 \text{ ms}} = 2,79 \frac{\text{T}}{\text{s}}$$

Für die maximale zeitliche Änderung der magnetischen Flussdichte der abfallende Flanke ergibt sich:

$$\frac{\hat{B}_f (1 - e^{\pi/2})}{\tau_{pf}} = \frac{5,41 \text{ mT}}{3,3 \text{ ms}} = 1,64 \frac{\text{T}}{\text{s}}$$

Es sind die im Schritt 5 berechneten Werte für die maximal zulässige zeitliche Änderung der magnetischen Flussdichte mit dem berechneten Wert für die maximale zeitliche Änderung der magnetischen Flussdichte der jeweiligen Flanke zu vergleichen.

Hieraus ergibt sich, dass sowohl der Wert aus ansteigenden als auch aus der abfallende Flanke die maximal zulässige zeitliche Änderung der magnetischen Flussdichte von 4,8 T/s nicht überschreiten.

**Schritt 7:** Auswahl von Maßnahmen

Die untersuchte Position stellt für den Bediener eine so genannte Worst-Case-Situation dar, so dass zur Arbeitsplatzbewertung „Bedienposition“ keine weitere Untersuchung notwendig ist. Da bei der Bewertung der Exposition in der gemessenen Position keine Überschreitung des zulässigen Wertes ermittelt wurde, sind hieraus keine Maßnahmen zur Reduzierung der Exposition notwendig.



# Anhang 2

## Numerische Feldberechnung

### 1 Berechnung der magnetischen Flussdichte

#### 1.1 Allgemeines

Die Magnetflussdichtewerte in der Umgebung stromdurchflossener Leiter können auch durch Feld-Simulation, z.B. FEM – Finite-Elemente-Methode, berechnet werden. Die Anwendung derartiger Simulationen erfordert einen übermäßig hohen Aufwand, Einarbeitung, deren Zeitaufwand die zur Messung erforderliche Zeit noch übersteigen kann.

Ein Problem der Anwendung der Feldsimulation ist die notwendige Überprüfung der simulierten Werte mit gemessenen Werten (zumindest an einzelnen Stellen), mit einer dann eventuell notwendigen Anpassung des Modells. Das führt zu einem erhöhten Aufwand.

Mit der FEM-Simulation lassen sich auch Flussdichtewerte an Stellen bestimmen, die den Feldmesssonden wegen deren geometrischer Abmessungen nicht zugänglich sind, z. B. nahe der Leiteroberfläche.

Für alle Berechnungsbeispiele wird in der Umgebung der stromführenden Leiter (Schweißkabel, Leiterschleife des Schweißfenster) die Permeabilität  $\mu_r = 1$  (Luft) angenommen. Betrachtet man die in der Umgebung unterschiedlicher Maschinen gemessenen Felder, so zeigt sich die Zulässigkeit dieser Annahme.

#### 1.2 Schweißkabel

Die Schweißkabel werden näherungsweise als (unendlich lange) Doppelleitung aufgefasst (Bild 1). Dafür ergeben sich vereinfachte Abhängigkeiten der magnetischen Flussdichte vom Abstand.

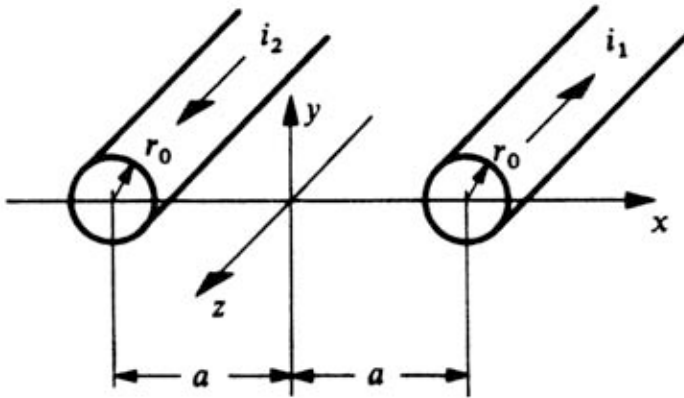


Bild 1: Schweißkabel (Doppelleitung)

Für die Flussdichte in Abhängigkeit von der x-Achse in Höhe der Leiterebene ( $y = 0$ ) ergibt sich für Bereiche außerhalb des Leitermaterials (außerhalb  $r_0$ )

$$B_{y=0}(x) = \frac{\mu_0 I}{\pi} \cdot \frac{a}{a^2 - x^2}$$

Für große Abstände  $x$  von den Schweißkabeln ( $x \gg a$ ) vereinfacht sich die Gleichung zu

$$B_{y=0}(x) \approx \frac{\mu_0 I a}{\pi x^2}$$

Für die Flussdichte in Abhängigkeit von der y-Achse in der Ebene mittig zwischen den Leitern ( $x = 0$ ) ergibt sich:

$$B_{x=0} = \frac{\mu_0 I}{\pi} \cdot \frac{a}{a^2 + y^2}$$

und damit für große Abstände von den Schweißkabeln  $y \gg a$

$$B_{x=0} \approx \frac{\mu_0 I a}{\pi y^2}$$

### 1.3 Nutzung des Katalogs von Flussdichteverteilungen

Im Anhang der Handlungsanleitung befindet sich ein Katalog von Flussdichteverteilungen. Dieser ist entnommen aus [2] und beinhaltet durch FEM-Simulation ermittelte und exemplarisch durch Messungen überprüfte Kurven der Verteilung der Magnetflussdichte entlang charakteristischer Achse: x-, y- z-Achse jeweils mit dem Koordinatenursprung in der Mitte des Schweißfensters und an den Schweißelektroden ( $x_e, z_e, 45^\circ_e$ ). Die Lage der Achsen kann Bild 2 entnommen werden.

Die im Katalog enthaltenen Kurven stellen die magnetische Flussdichte als B'-Werte, also bezogen auf 1 kA dar (Beispiel siehe Bild 3). Diese B'-Werte werden entsprechend der Größe des Schweißfensters abgelesen. Durch Multiplikation der B'-Werte mit dem Werten des Schweißstromes (Amplitude, Betrag der Welligkeit usw.) können für jeden Punkt auf den angegebenen Achsen die entsprechenden Flussdichtewerte über die Beziehung

$$B = B' \cdot I$$

bestimmt werden.

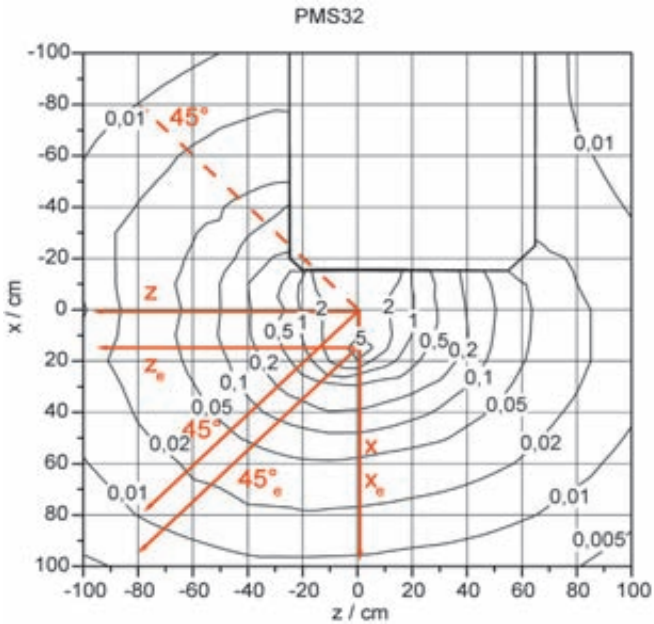
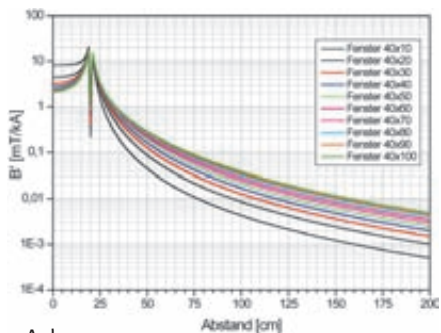
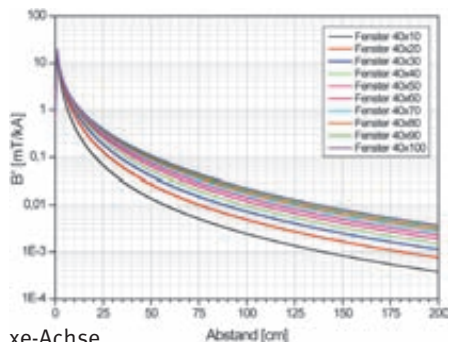


Bild 2: Gemessene Magnetflussdichte in der Umgebung einer Schweißmaschine (Größe des Schweißfensters 345 x 445 mm), horizontale Ebene in Höhe der Mitte des Schweißfensters, eingezeichnete Pfeile: im Katalog der Flussdichtewerte enthaltene Achsen

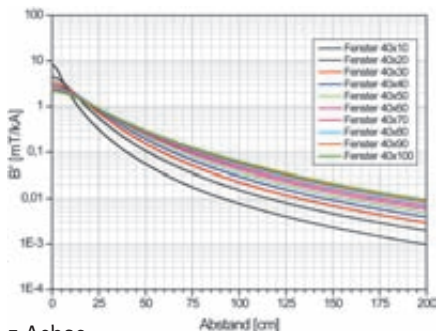
Betrachtet man real gemessene Flussdichtewerte in der Umgebung von Widerstandsschweißeinrichtungen (Bild 2), so zeigt sich, dass die Iso-Flussdichte-Linien (Linien gleicher Flussdichte) kreis- bzw. ellipsenähnliche Formen um das Schweißfenster herum annehmen. Aus diesem Grund kann man, erforderlichenfalls unter Zuhilfenahme einer Skizze, bereits mit Hilfe der im Katalog enthaltenen Flussdichtewerte abschätzen, Zwischenwerte lassen sich interpolieren.



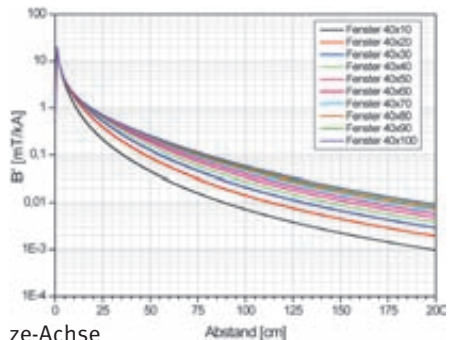
x-Achse



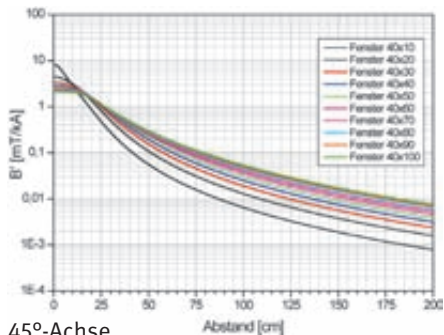
xe-Achse



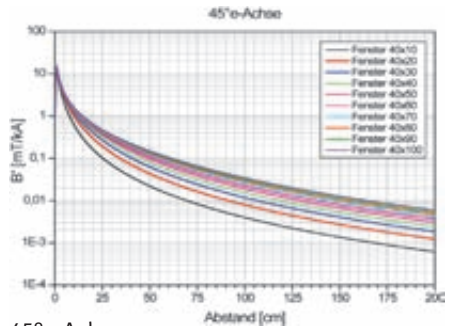
z-Achse



ze-Achse



45°-Achse



45°e-Achse

Bild 3: Beispiele für die im Anhang vorliegenden Ergebnisse der FEM-Simulation

Beispiel der Anwendung des Kataloges der Flussdichteverteilungen – Ermittlung einer bestimmten Iso-Flussdichtelinie:

Zugrundegelegt wird die in Bild 2 dargestellte Flussdichteverteilung. Gesucht sei die Iso-Flussdichtelinie bei 0,1 mT/kA. Ausgehend von der Fenstergröße von 345 x 445 mm (Ausladung x Höhe) werden aus den Diagrammen für die Fenstergrößen 300 x 400 und 400 x 500 mm für die gesuchte Flussdichte B' die Abstände ausgehend vom jeweiligen Koordinatenursprung abgelesen. Die Zwischenwerte werden entsprechend der Fenstergröße näherungsweise linear interpoliert. Allerdings ist damit ein Fehler enthalten im Vergleich zur Abstandsabhängigkeit proportional  $1/r^2 \dots 1/r^3$ . Die auf den von der Fenstermitte bzw. den Elektroden ausgehenden Achsen ermittelten Punkte werden miteinander verbunden. Dabei genügen abschnittsweise kreisähnliche Gebilde (Bild 4).

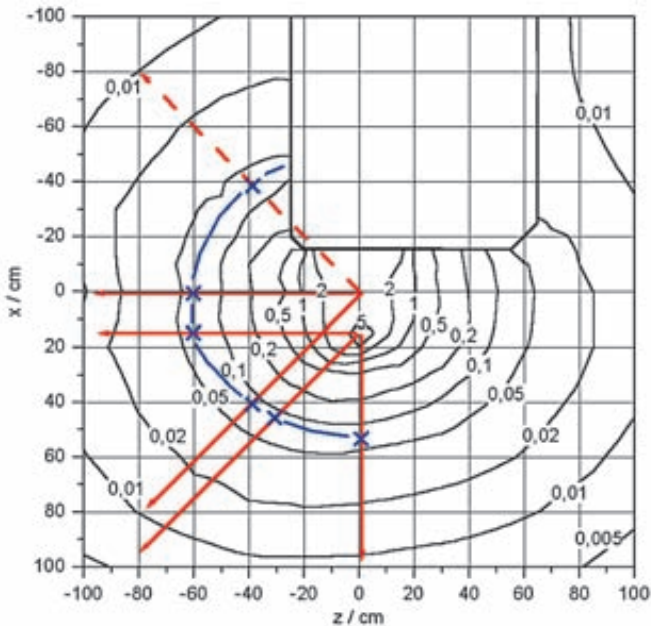


Bild 4: Flussdichteverteilung aus Bild 2, blau eingezeichnet die auf Grundlage des Flussdichtekataloges ermittelte Iso-Flussdichtelinie für  $B' = 0,1 \text{ mT/kA}$

#### 1.4 **Gültigkeit simulierter und gemessener Werte**

Die durch Berechnung bzw. Feldsimulation ermittelten Werte der magnetischen Flussdichte sind durch Messungen zu überprüfen. Dabei kann man von einem stetigen Verlauf der Felder ausgehen. Zur Überprüfung werden einige der berechneten Flussdichtewerte nachgemessen. Wegen der insbesondere in Leiternähe stark inhomogenen Felder wird es immer so sein, dass die Ergebnisse von numerischer Feldberechnung und Feldsimulation höher als die gemessenen liegen. Ursache dieser Unterschiede zwischen Messung und Berechnung ist die integrierende Wirkung der Messspule über die von der Messspule aufgespannte Fläche. Eine Abweichung von 30 bis 40 % kann dabei akzeptiert werden. Dieser Wert klingt zwar sehr hoch, führt aber angesichts der starken Inhomogenität der Felder und der starken Abnahme der Flussdichtewerte dennoch zu vergleichbaren Ergebnissen, was die Bestimmung von evtl. einzuhaltenden Abständen angeht.

Insbesondere wenn die Abschätzung der Flussdichtewerte ergibt, dass die Werte am Arbeitsplatz möglicherweise die zulässigen Werte überschreiten, sollte eine Messung erfolgen. Dagegen kann bei Unterschreitung der zulässigen Werte durch die berechneten um den Faktor 10 auf Messungen verzichtet werden.

Für das Beispiel einer stationären Widerstandsschweißmaschine sind die Ergebnisse von numerischer Berechnung und Feldsimulation gemessenen Werten der magnetischen Flussdichte gegenübergestellt. In Bild 5 ist zu erkennen, dass Berechnung und Simulation zu denselben Ergebnissen führen und diese gegenüber den gemessenen Werten höher liegen.

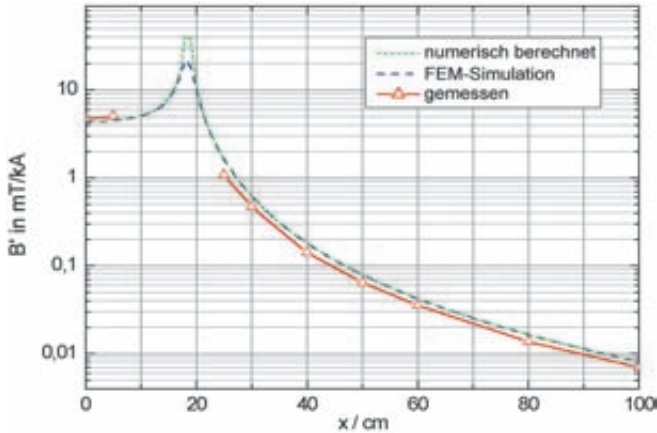


Bild 5: Stationäre Widerstandsschweißmaschine, Vergleich von Berechnung und Messung

Zur Absicherung von berechneten oder simulierten bzw. mit Hilfe des Kataloges der Flussdichteverteilungen ermittelten Flussdichtewerten sollten Messungen an einigen Punkten in der Umgebung der Widerstandsschweißeinrichtung durchgeführt werden. Bei Messungen entlang einer durch den Flussdichtekatalog vorgegebenen Achse sollen diese Messwerte einer Abhängigkeit wie die darin enthaltenen Verläufe folgen.

**1.5 Leiterschleife der Schweißzange**

Die numerische Berechnung beruht darauf, dass durch Integration aller in der Umgebung eines Punktes P (Bild 6) auftretenden Magnetfelder das am Punkt P wirk-same Magnetfeld bestimmt wird. Geht man von einem in einem Leiter fließenden Strom I aus, so kann mittels des Gesetzes von Biot-Savart

$$\vec{B} = \int \frac{\mu_0 I d\vec{l} \times (\vec{r} - \vec{r}')}{4\pi |\vec{r} - \vec{r}'|^3}$$

die Flussdichte an jedem Ort in der Umgebung des Leiters bestimmt werden. Die Anwendung soll an einer rechteckigen Leiterschleife (Bild 6) als Näherung der Form eines rechteckähnlichen Schweißfensters erläutert werden. Zur Vereinfachung



erfolgt eine Betrachtung als geschlossene Schleife, die Kabel zur Leiterschleife werden nicht betrachtet. In dieser Leiterschleife fließt der Strom  $I$ . Aus der für allgemeine Fälle geltenden vorstehend genannte Formel lassen sich für spezielle Fälle Formeln ableiten.

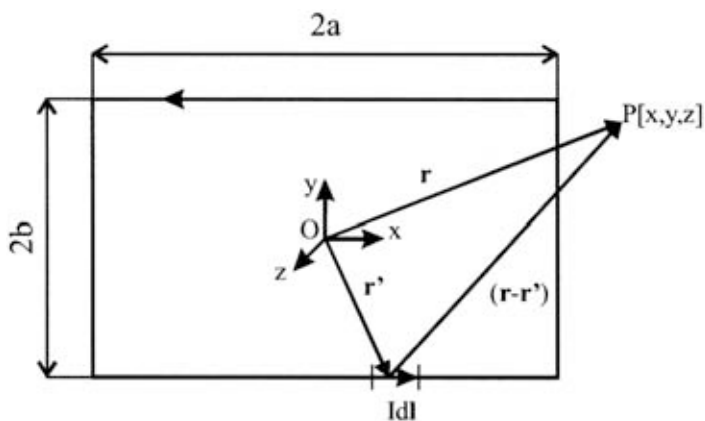


Bild 6: Bestimmung der magnetischen Flussdichte nach Biot-Savart

Für die Flussdichte entlang der Achse x ergibt sich

$$\vec{B}_{z=0}^{y=0}(x) = -\vec{u}_z \frac{\mu_0 I}{2\pi} \left( \frac{b}{a_1(x-a)} - \frac{b}{a_2(x+a)} + \frac{a_2(x-a) - a_1(x+a)}{ba_1a_2} \right)$$

mit

$$a_1 = \sqrt{(x-a)^2 + b^2} \quad \text{und}$$

$$a_2 = \sqrt{(x+a)^2 + b^2}$$

Für die Flussdichte entlang der Achse z ergibt sich

$$\vec{B}_{y=0}^{x=0}(z) = \vec{u}_z \frac{\mu_0 I}{\pi} \frac{ab}{\sqrt{z^2 + a^2 + b^2}} \left( \frac{1}{z^2 + a^2} + \frac{1}{z^2 + b^2} \right)$$

Die Vertauschung der Parameter **a** und **b** in den Formeln für die Magnetflussdichte in der x-Achse ergibt die Formel für die Magnetflussdichte in der y-Achse.

Die angegebenen Formeln gehen von der Annahme eines linienhaften Leiters mit der Leiterdicke 0 aus. Mit Ausnahme der Bereiche in unmittelbarer Nähe des Leiters (innerhalb der ersten cm Abstand) liefert die Berechnung die richtigen Werte.

Mit den genannten Formeln lassen sich bereits charakteristische Werte bestimmen, die zur Beurteilung der Feldexposition genutzt werden können. Berücksichtigt man, dass die Darstellung real gemessener Werte der Magnetflussdichte in Form von Iso-Flussdichte-Linien zu ellipsenähnlichen Formen führt, so kann man mit den genannten Formeln die Flussdichteverhältnisse in den das Schweißfenster mittig schneidenden Ebenen abschätzen.

## 2 Einfaches PC-Programm zur Flussdichteberechnung

Zur Berechnung der magnetischen Flussdichte aus dem gemessenen Strom kann zur ersten Abschätzung das nachfolgende Programm unterstützend eingesetzt werden. Das als Berechnungsgrundlage dienende Gesetz von Biot-Savart wird so eingesetzt, dass für jeden Punkt P im Raum ein Flussdichtewert berechnet werden kann (Bild 7). Die Übereinstimmung der berechneten Werte mit gemessenen natürlichen Werten wurde unter Beachtung sehr geringer Toleranzen von unabhängigen Instituten bestätigt.

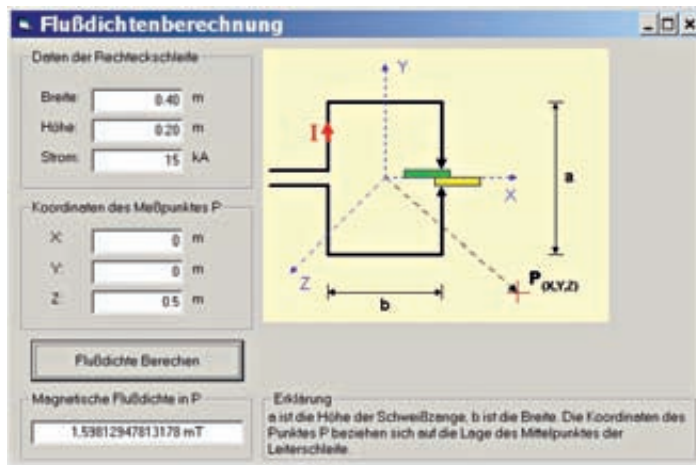


Bild 7: Ansicht des Programms zur Flussdichteberechnung

Auf Grund programmierbedingter Vorgaben muss bei der Eingabe der Daten in den Bereichen „Daten der Rechteckschleife“ und „Koordinaten des Messpunktes P“ das Komma als Punkt eingegeben werden.

### 3 Berechnung feldinduzierter Ströme und Stromdichten

Numerische Feldberechnungsverfahren unter Einbeziehung realitätsnaher Simulationsmodelle des menschlichen Körpers einschließlich der felderzeugenden Werkzeuge und Anlagenteile können die Möglichkeiten der Beurteilung des Gesundheitsrisikos an EMF-Arbeitsplätzen erheblich verbessern. Es lassen sich damit bei vertretbarem Simulationsaufwand sowohl die äußeren Feldbelastungen an Arbeitsplätzen als auch die quantitativen Zusammenhänge zwischen äußeren elektromagnetischen Feldverteilungen und im Körper induzierten Feldern bestimmen. Biologisch wirksame Größen wie Körperstromdichte und SAR (**S**pezifische **A**bsorptions **R**ate) können berechnet und mit den Basis(grenz)werten verglichen werden.

Die wichtigsten numerischen Verfahren sind:

- Finite-Differenzen im Zeitbereich (FDTD)
- Methode der Finiten Elemente (FEM)
- Momentenmethode (MoM)
- und hybride Verfahren.

Die einzelnen Verfahren unterscheiden sich in der Diskretisierung der Körpermodelle, ihrer Flexibilität, den Berechnungsschritten und ihrem Aufwand bezogen auf die Anzahl der Elemente.

Auf Grund der Anforderungen an die räumliche Auflösung der Körpermodelle, die sich aus den Festlegungen der volumen- und flächenelementbezogenen Basiswerte ergeben, hat sich die Methode der Finiten Differenzen im Zeitbereich als ein unter praktischen Gesichtspunkten gut geeignetes Verfahren erwiesen. Mit dieser Methode sind praxisrelevante Simulationen bereits auf PC-Ebene möglich. Hinzu kommen eine anwenderfreundliche unkomplizierte Netzgenerierung sowie eine einfache Orientierung innerhalb der Simulationsmodelle auf Grund des orthogonalen Gitters. Zu beachten ist, dass das FDTD-Verfahren eine direkte Berechnung niederfrequenter elektromagnetischer Felder innerhalb der Körpermodelle nicht zulässt. Die dazu notwendigen langen Simulationslaufzeiten lassen eine sinnvolle Auswertung innerhalb der Modelle nicht mehr zu. Das Problem lässt sich jedoch über Niederfrequenzalgorithmen lösen. Zur Berücksichtigung der dielektrischen Eigenschaften der menschlichen Gewebetypen steht ein international anerkanntes parametrisches Modell (GABRIEL et al., 1996) zur Verfügung, das in die Oberfläche der Simulationssoftware integriert werden kann und eine direkte Übernahme der Gewebeparameter in die Simulation erlaubt.

Die Berechnungssoftware sollte neben einer schnellen Übersicht über die lokale Verteilung der Maxima von Stromdichte oder SAR immer auch eine gewebespezifische Auswertung ermöglichen, d. h. in welchem Gewebe diese Maxima auftreten.

# Anhang 3

## Vorschriften und Regeln

Nachstehend sind die insbesondere zu beachtenden einschlägigen Vorschriften und Regeln zusammengestellt.

### 1. Gesetze, Verordnungen

Bezugsquelle: Buchhandel  
oder  
Carl Heymanns Verlag GmbH,  
Luxemburger Straße 449, 50939 Köln  
E-Mail: [verkauf@heymanns.com](mailto:verkauf@heymanns.com)  
Internet: <http://www.heymanns.com>

Betriebssicherheitsverordnung (BetrSichV) mit zugehörigen Technischen Regeln für Betriebssicherheit (TRBS), insbesondere TRBS 1203 „Befähigte Personen; Allgemeine Anforderungen“.

### 2. Berufsgenossenschaftliche Vorschriften, Regeln und Informationen für Sicherheit und Gesundheit bei der Arbeit sowie Berufsgenossenschaftliche Grundsätze

Bezugsquelle: zuständige Berufsgenossenschaft  
oder  
Carl Heymanns Verlag GmbH,  
Luxemburger Straße 449, 50939 Köln  
E-Mail: [verkauf@heymanns.com](mailto:verkauf@heymanns.com)  
Internet: <http://www.heymanns.com>

Unfallverhütungsvorschrift „Grundsätze der Prävention“ (BGV A1),  
Unfallverhütungsvorschrift „Elektromagnetische Felder“ (BGV B11),  
Unfallverhütungsvorschrift „Sicherheits- und Gesundheitsschutzkennzeichnung am Arbeitsplatz“ (BGV A8),  
BG-Regel „Grundsätze der Prävention“ (BGR A1),  
BG-Regel „Elektromagnetische Felder“ (BGR B11).

### 3. Normen

Bezugsquelle: Beuth Verlag GmbH,  
Burggrafenstraße 6, 10787 Berlin.

- DIN VDE 0848-1** Sicherheit in elektrischen, magnetischen und elektromagnetischen Feldern – Teil 1: Definitionen, Mess- und Berechnungsverfahren“ (August 2000),
- DIN VDE 0848-3-1** Sicherheit in elektrischen, magnetischen und elektromagnetischen Feldern; Teil 3-1: Schutz von Personen mit aktiven Körperhilfsmitteln im Frequenzbereich 0 Hz bis 300 GHz“ (Mai 2002).

### 4. DVS-Merkblätter

Bezugsquelle: Deutscher Verband für Schweißen und verwandte Verfahren e.V.  
Postfach 101965, 40010 Düsseldorf.

- DVS 2904** Steuerung für Punkt-, Buckel- und Rollennahtschweißrichtungen,
- DVS 2908** Messen beim Punkt-, Buckel- und Nahtschweißen.

### 5. Sonstige Schriften

Bezugsquelle: Buchhandel

Directive 2004/40/EC of the European Parliament and the Council of 29th April 2004 on the minimum health and safety requirements regarding the exposure of workers to the risks arising from physical agents (electromagnetic fields). 18th individual Directive within the meaning of Article 16(1) of Directive 89/391/EEC. Official Journal of the European Union L 159 of 30th April 2004, 1 – 26.

International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection: Guidelines for limiting exposure to time-varying electric, magnetic and electromagnetic fields (up to 300 GHz). Health Physics, Vol. 74, No. 4 (1998), 494 – 522.

International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection: Response to questions and comments on ICNIRP Guidelines for limiting exposure to time-varying electric, magnetic and electromagnetic fields (up to 300 GHz). *Health Physics*, Vol. 75, No. 4 (1998), 438 – 439.









Bestellungen: Hauptverwaltung Köln  
 Telefon: 02 21 / 37 78 - 10 20  
 Telefax: 02 21 / 37 78 - 10 21  
 E-Mail: versand@bgetem.de

Präventionsstandort Energie- und Wasserwirtschaft Düsseldorf  
 Telefon: 02 11/93 35 - 42 39  
 Telefax: 02 11/93 35 - 42 19  
 E-Mail: info.energie-wasser@bgetem.de

Bei Rückfragen: Präventionszentren

Köln I	Telefon: 02 21 / 37 78 - 16 10
(Hauptverwaltung)	Telefax: 02 21 / 37 78 - 16 11
Köln II	Telefon: 02 21 / 37 78 - 16 80
(Bad Münstereifel)	Telefax: 02 21 / 37 78 - 16 81
Braunschweig	Telefon: 02 21 / 37 78 - 16 20
	Telefax: 02 21 / 37 78 - 16 21
Berlin	Telefon: 02 21 / 37 78 - 16 30
	Telefax: 02 21 / 37 78 - 16 31
Dresden	Telefon: 02 21 / 37 78 - 16 40
	Telefax: 02 21 / 37 78 - 16 41
Nürnberg	Telefon: 02 21 / 37 78 - 16 50
	Telefax: 02 21 / 37 78 - 16 51
Augsburg	Telefon: 02 21 / 37 78 - 16 60
	Telefax: 02 21 / 37 78 - 16 61
Stuttgart	Telefon: 02 21 / 37 78 - 16 70
	Telefax: 02 21 / 37 78 - 16 71

Präventionsstandort Energie- und Wasserwirtschaft  
 Düsseldorf  
 Telefon: 02 11 / 93 35 - 42 39  
 Telefax: 02 11 / 93 35 - 42 19

Präventionsstandort Druck und Papierverarbeitung  
 Wiesbaden  
 Telefon: 06 11 / 131 - 82 21  
 Telefax: 06 11 / 131 - 82 22

**Berufsgenossenschaft  
Energie Textil Elektro  
Medienerzeugnisse**

Gustav-Heinemann-Ufer 130  
50968 Köln  
Telefon 0221 3778-0  
Telefax 0221 3778-1199  
[www.bgetem.de](http://www.bgetem.de)

Bestell-Nr. BGI 5011