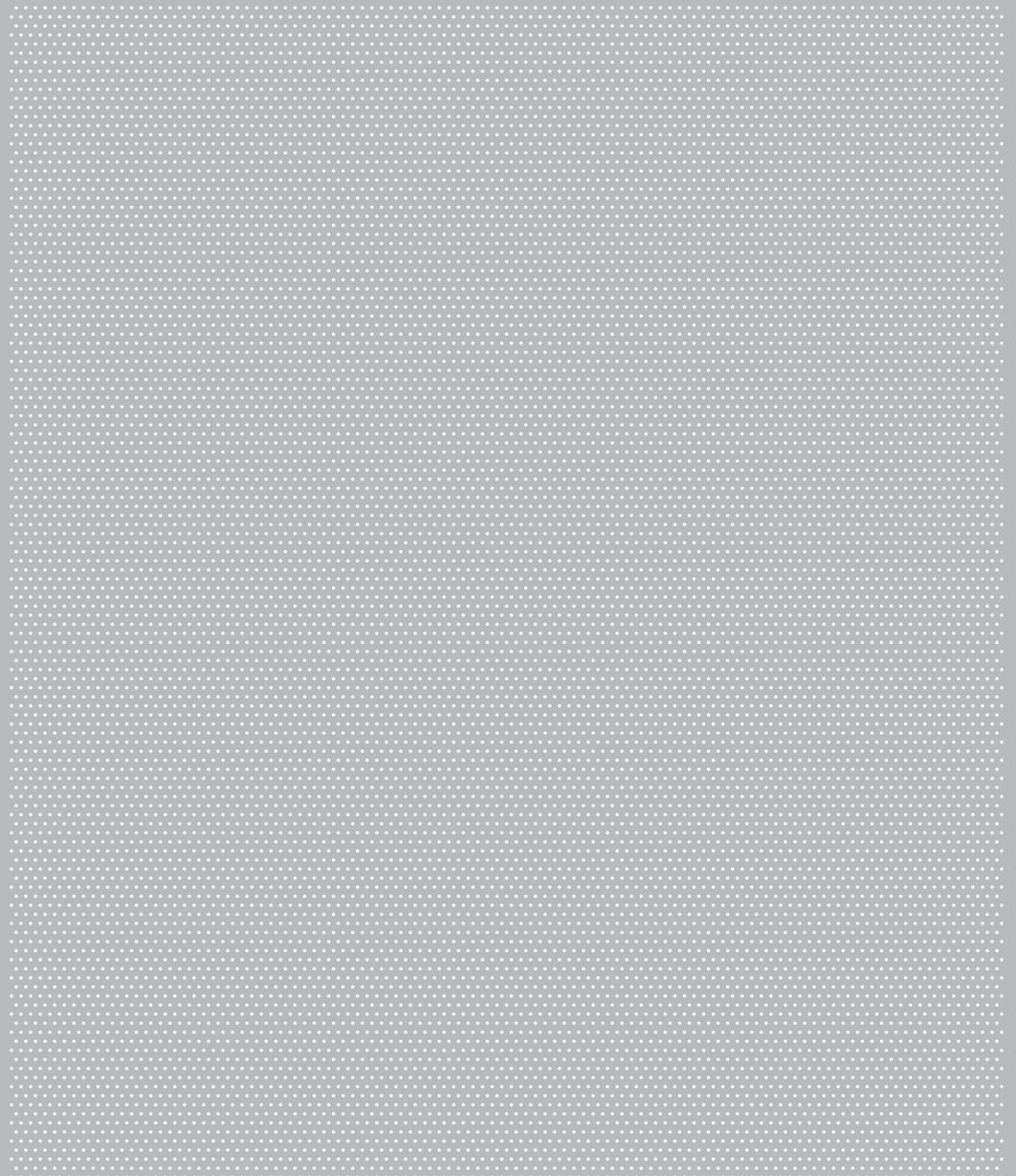


4/2013

IFA Report

Elektromagnetische Felder an handgeführten Mittelfrequenz-/ Inverter-Punktschweißzangen



Verfasser: Fritz Börner

Institut für Arbeitsschutz der
Deutschen Gesetzlichen Unfallversicherung (IFA)
Alte Heerstraße 111
53757 Sankt Augustin
Germany
Telefon: +49 2241 231 02
Telefax: +49 2241 231 2234
Internet: www.dguv.de/ifa
E-mail: ifa@dguv.de

Herausgeber: Deutsche Gesetzliche Unfallversicherung (DGUV)
Mittelstraße 51
10117 Berlin
Germany
Telefon: +49 30 288 7638 00
Telefax: +49 30 288 76 38 08
Internet: www.dguv.de
E-mail: info@dguv.de
— Mai 2013 —

Satz und Layout: Deutsche Gesetzliche Unfallversicherung e.V., Berlin

ISBN: 978-3-86423-085-1

ISSN: 2190-7994

Kurzfassung

Elektromagnetische Felder an handgeführten Mittelfrequenz-/Inverter-Punktschweißzangen

Beim Schweißen mit handgeführten Mittelfrequenz-/Inverter-Punktschweißzangen kann eine Überschreitung der zulässigen Werte nach der Unfallverhütungsvorschrift BGV B11 für die magnetischen Felder nicht ausgeschlossen werden. Ob diese aber zu einer Gesundheitsgefährdung führen, hängt letztlich von der Höhe der induzierten elektrischen Feldstärke bzw. der induzierten Körperstromdichte im Gewebe des Menschen ab. Im Rahmen des Projektes „Elektromagnetische Felder an handgeführten Mittelfrequenz-/Inverter-Punktschweißzangen“ wurde an Schweißzangen mit Zangenfenster unterschiedlicher Bauform und Größe die Verteilung des magnetischen Feldes und die Wirkungen dieses Feldes in einem Körpermodell berechnet und visualisiert. Die Berechnungen erfolgten für Schweißströme mit einer normierten Stromstärke von 1 A. Untersucht und bewertet wurden die physiologischen Wirkungen dieses Stroms in Abhängigkeit von der Frequenz. Hierzu wurde die „Welligkeit“ des Schweißstroms hinsichtlich physiologischer Wirkungen im Gewebe eines Menschen analysiert.

Für die ermittelten wirksamen Frequenzen wurde – unter Berücksichtigung häufig vorkommender Arbeitssituationen – die Verteilung der induzierten elektrischen Stromdichten und Feldstärken im Gewebe eines inhomogenen Körpermodells berechnet. Die Ergebnisse wurden für ausgewählte Körperschichten (Rumpf, Hals, Kopf) visualisiert und mit den Werten der ICNIRP-Guidelines für niederfrequente magnetische Felder verglichen und bewertet. Für zwei Punktschweißzangen mit Zangenfenstern unterschiedlicher Baugröße (100 mm x 150 mm und 500 mm x 700 mm) wurde ein Verfahren erarbeitet, mit dem auf der Basis der Analyse des zeitlichen Verlaufs des Schweißstroms eine Beurteilung der Exposition der Schweißer gegenüber magnetischen Feldern anhand der „basic restrictions“ der ICNIRP-Guidelines für magnetische Felder im Frequenzbereich von 1 Hz bis 100 kHz möglich ist.

Abstract

Electromagnetic fields on hand-held medium-frequency inverter spot-welding guns

When welding with hand-held medium-frequency inverter spot-welding guns, it is impossible to rule out the transgression of the permissible values in accordance with the accident prevention regulations BGV B11 for magnetic fields. Whether this poses a health risk depends ultimately on the magnitude of the induced electrical field strength or of the induced body current density in human tissue. In the project “Electromagnetic fields on hand-held medium-frequency inverter spot-welding guns”, the distribution of the magnetic field on welding guns with electrode windows of different designs and sizes and the effect of this field was calculated and visualised in a body model. The calculations were performed for welding currents with a standardised current strength of 1 A. The physiological effects of this current as a function of frequency were investigated and calculated. To this end, the “waviness” of the welding current was analysed for its physiological effects in human tissue.

Taking account of frequently occurring work situations, the distribution of the induced electrical current densities and field strengths in the tissue of an inhomogeneous body model were calculated for the effective frequencies obtained. The results were visualised for selected body layers (trunk, neck, head), compared to the values of the ICNIRP guidelines for low-frequency magnetic fields and assessed. For two spot-welding guns with electrode windows of different sizes (100 x 150 mm and 500 x 700 mm), a process was devised with which, on the basis of the analysis of the change in welding current over time, an assessment of welder exposure to magnetic fields is possible with reference to the basic restrictions of the ICNIRP guidelines for magnetic fields in the frequency range of $1 \text{ Hz} < f < 100 \text{ kHz}$.

Résumé

Champs électromagnétiques créés par des pinces à souder par points manuelles alimentées par onduleur à moyenne fréquence

Lors du soudage avec des pinces à souder par points manuelles alimentées par onduleur à moyenne fréquence, un dépassement des valeurs admissibles pour les champs magnétiques selon le règlement de prévention BGV B11 ne peut être exclu. La dangerosité de ces champs magnétiques pour la santé dépend, en fin de compte, de l'intensité du champ électrique induit et de la densité de courant induit dans les tissus du corps humain. Dans le cadre du projet « Champs électromagnétiques créés par des pinces à souder par points manuelles alimentées par onduleur à moyenne fréquence », la répartition du champ magnétique et les effets de ce champ dans un modèle corporel ont été calculés et visualisés pour des pinces à souder ayant des bras de différentes formes et tailles. Les calculs ont été effectués pour des courants de soudage ayant une intensité normée de 1 A. Les effets physiologiques de ce courant ont été analysés et évalués en fonction la fréquence. L'ondulation du courant de soudage a également été prise en considération lors de l'analyse des effets physiologiques dans les tissus du corps humain.

Pour les fréquences efficaces déterminées, la répartition des densités de courant électrique induit et des intensités du champ électrique induit dans les tissus d'un modèle corporel non-homogène a été déterminée pour des situations de travail rencontrées fréquemment. Les résultats ont été visualisés pour des parties du corps humain sélectionnées (tronc, cou, tête) et comparées avec les valeurs mentionnées dans les directives de l'ICNIRP pour les champs magnétiques à basse fréquence. Pour deux pinces à souder par points ayant des bras de différentes tailles (100 mm x 150 mm et 500 mm x 700 mm), une méthode qui permet, sur la base de l'analyse des variations dans le temps du courant de soudage, une évaluation de l'exposition des soudeurs aux champs magnétiques ayant une fréquence comprise dans la plage $1 \text{ Hz} < f < 100 \text{ kHz}$ à l'aide des « basic restrictions » des directives de l'ICNIRP a été élaborée.

Resumen

Campos electromagnéticos en pinzas manuales para soldadura por puntos inversora / de media frecuencia

Al soldar con pinzas manuales para soldadura por puntos inversora o de media frecuencia no puede descartarse un rebasamiento de los valores permitidos conforme a las normas de prevención de riesgos laborales de las normas BGV B11 (normas sindicales laborales alemanas) para campos magnéticos. El hecho de si pueden afectar a la salud depende en última instancia de la intensidad de los campos eléctricos inducidos o de la densidad de corriente inducida en el cuerpo humano. En el marco del proyecto “Campos electromagnéticos en pinzas manuales para soldadura por puntos inversora o de media frecuencia” se calculó y visualizó la distribución del campo magnético y los efectos de este campo en las pinzas de soldadura con pinzas de diferente forma y tamaño sobre un maniquí. Los cálculos se realizaron en base a corrientes de soldadura con una potencia de corriente estandar de 1 A. Se analizaron y evaluaron los efectos fisiológicos de esta corriente en función de la frecuencia. Para ello, se analizó la “ondabilidad” de la corriente de soldadura con respecto a los efectos fisiológicos sobre el cuerpo humano.

Para las frecuencias válidas establecidas se calculó, teniendo en cuenta las situaciones laborales más frecuentes, la distribución de la densidad de la corriente eléctrica inducida y la intensidad de los campos sobre el cuerpo de un maniquí irregular. Los resultados se visualizaron en ciertas partes del cuerpo (tronco, cuello, cabeza) y se compararon y evaluaron con los valores indicados en las directrices de la Comisión Internacional para la Protección contra las Radiaciones No Ionizantes (ICNIRP, por sus siglas en inglés) para campos magnéticos de baja frecuencia. Para dos pinzas para soldadura por puntos con pinzas de diferente tamaño (100 mm x 150 mm y 500 mm x 700 mm) se elaboró un procedimiento con el que, en base a los análisis sobre el desarrollo temporal de la corriente de soldadura, es posible evaluar la exposición del soldador frente a los campos magnéticos con ayuda de las “Restricciones Básicas” de las directrices de la ICNIRP para campos magnéticos en el rango de frecuencia $1 \text{ Hz} < f < 100 \text{ kHz}$.

Inhaltsverzeichnis

1	Ziel des Projektes	4
2	Problembeschreibung	4
3	Beschreibung der Untersuchungsobjekte	5
4	Durchführung der Untersuchungen	6
5	Analyse des zeitlichen Verlaufs gemessener magnetischer Felder	7
5.1	Ziel der Untersuchung	7
5.2	Zeitliche Verläufe der magnetischen Flussdichte	7
5.3	Analyse der Verläufe der magnetischen Flussdichte	12
5.4	Ergebnisse	13
5.5	Schlussfolgerungen für das weitere Vorgehen	13
6	Berechnung und Visualisierung der induzierten Körperstromdichte und elektrischen Gewebefeldstärken in einem Körpermodell	13
6.1	Allgemeines	13
6.2	Ziel der Berechnung	14
6.3	Nachbildungen	14
6.3.1	Feldquellen	14
6.3.2	Körpermodell	15
6.4	Grundlagen und Voraussetzungen bei den Berechnungen	15
6.5	Berechnung der Basisgrößen	16
6.5.1	Simulationsebenen	19
6.6	Ergebnisse der Feldsimulation	20
6.6.1	Punktschweißzange mit dem 150-mm-Zangenfenster.....	20
6.6.2	Punktschweißzange mit dem 700-mm-Zangenfenster	36
6.6.3	Zusammenfassung.....	42
7	Hinweise zum Schutz der Beschäftigten beim Arbeiten an handgeführten Mittelfrequenz-Punktschweißzangen	44
7.1	Grenzwerte	44
7.2	Bewertung	46
8	Zusammenfassung Diskussion	49
	Literatur	51

1 Ziel des Projektes

Auf Initiative der Berufsgenossenschaft Holz und Metall untersucht das Institut für Arbeitsschutz der Deutschen Gesetzlichen Unfallversicherung (IFA) seit April 2010 bis heute die Exposition von Schweißern gegenüber magnetischen Feldern an handgeführten Mittelfrequenz-/Inverter-Punktschweißzangen. Ziel der Untersuchung ist es, ein Verfahren zu entwickeln, das bei einer Überschreitung der abgeleiteten zulässigen Werte der Unfallverhütungsvorschrift BGV B11 [1] für magnetische Felder an Punktschweißzangen eine Expositionsbeurteilung ermöglicht.

Dazu wurden die Basiswerte der BGV B11, die „basic restrictions“ der ICNIRP-Guidelines [2] der International Commission on non-ionizing Radiation Protection, d. h. der induzierten elektrischen Feldstärke im Gewebe und die Expositionsgrenzwerte des Forschungsberichtes FB 400 des Bundesministeriums für Arbeit und Soziales (BMAS) herangezogen [3].

2 Problembeschreibung

In der Automobilindustrie werden zum Schweißen von Karosserieteilen in zunehmendem Maße handgeführte Mittelfrequenz- oder Inverter-Punktschweißzangen (MPZ) eingesetzt. Beim Schweißen treten in der unmittelbaren Umgebung der Schweißzange hohe impulsförmige magnetische Felder auf. Die Felder sind die Folge von hohen (einigen kA) und kurzzeitig (einige 100 ms) fließenden Gleichströmen, mit überlagerten Welligkeiten im Frequenzbereich zwischen 50 Hz und 100 kHz. Aufgrund der hohen Stromstärken und der Welligkeit des Schweißstroms können Änderungen der magnetischen Flussdichte auftreten, die über den zulässigen Werten der Beurteilungsgrundlagen [1 bis 6] liegen. Eine Gefährdung für die Gesundheit der Schweißer aufgrund starker magnetischer Felder, beispielsweise durch Stimulation von Nerven- und Muskelzellen, kann daher nicht ausgeschlossen werden. Für Schweißer, die mit und an MPZ arbeiten, muss daher untersucht werden, ob dies tatsächlich zutrifft.

Bei vorhergehenden Untersuchungen des IFA an handgeführten Punktschweißzangen mit separater 50-Hz-Wechselstromquelle [7] konnte gezeigt werden, dass in den üblichen Arbeitspositionen des Schweißers die „Grenzwerte“ (Basiswerte, basic restrictions, Expositionsgrenzwerte) der Beurteilungsgrundlagen auch bei einer Überschreitung der zulässigen abgeleiteten Werte eingehalten werden. Im Rahmen eines Projektes sollte daher untersucht werden, ob dies auch für Mittelfrequenz-Punktschweißzangen zutrifft.

Dazu muss zunächst die Exposition ermittelt und bewertet werden. Zur Bewertung können die Vorschriften und Regeln der Unfallversicherungsträger, der ICNIRP und des BMAS zugrunde gelegt werden. In diesen wird zwischen den sogenannten Basiswerten, die die Wirkungen eines äußeren elektromagnetischen Feldes im menschlichen Körper beschreiben, und den sogenannten abgeleiteten Werten, den messbaren Feldgrößen, unterschieden. Beispiel für die Basiswerte sind die induzierten elektrischen Feldstärken im Gewebe.

Da die induzierte elektrische Feldstärke im menschlichen Körper nur mit hohem Aufwand gemessen werden kann, basiert die Beurteilung der Exposition zurzeit auf dem Ergebnis des Vergleichs der gemessenen magnetischen Flussdichte mit den zulässigen abgeleiteten Werten der Unfallverhütungsvorschrift BGV B11. Bei Einhaltung dieser Werte ist sichergestellt, dass die Grenzwerte, die Basiswerte nach [1] und die „basic restrictions“ nach [2], in diesem Fall die elektrische Feldstärke im menschlichen Körper/Gewebe, eingehalten werden.

Daraus kann jedoch nicht geschlossen werden, dass bei einer Überschreitung der zulässigen abgeleiteten Werte auch die Grenzwerte, d. h. die Basiswerte bzw. die „basic restrictions“, überschritten werden. Das hat zur Folge, dass bei einer Überschreitung der zulässigen abgeleiteten Werte die Einhaltung der Grenzwerte durch zusätzliche Untersuchungen, z. B. durch Berechnung der induzierten elektrischen Feldstärke im Gewebe, festgestellt werden muss. Aufgrund der schwierigen messtechnischen Erfassung der im Gewebe induzierten elektrischen Feldstärke wird die Exposition durch Anwendung numerischer Feldberechnungsprogramme in einem inhomogenen menschlichen Körpermodell berechnet und visualisiert.

Hierzu werden in Abhängigkeit von der Stärke und dem Ein- und Ausschaltverhalten des Schweißgleichstroms sowie von der Frequenz und der Welligkeit des überlagerten Wechselstroms die induzierten Körperstromdichten und die elektrischen Gewebefeldstärken im zentralen und/oder peripheren Nervensystem systematisch berechnet.

3 Beschreibung der Untersuchungsobjekte

Bei den untersuchten Schweißeinrichtungen handelt es sich um handgeführte Mittelfrequenz-/Inverter-Punktschweißzangen (MPZ). Sie bestehen im Wesentlichen aus einer Steuereinheit mit einem Gleich- und Umrichter, einer Schweißstromquelle (Mittelfrequenzschweißtransformator), der Schweißzange (Elektrodenarme, Elektroden und Elektrodenträger), dem Antriebssystem zum Öffnen und Schließen der Elektroden sowie der Kühleinrichtung für die Elektroden. Die verschiedenen Komponenten sind zu einer baulichen Einheit, der MPZ, zusammengefasst. Die Steuereinheit wird eingangsseitig an das 400/230-V-Netz angeschlossen. Die Ausgangsseite dieser Einheit, d. h. der Ausgang des Umrichters (Inverters), ist mit dem Mittelfrequenzschweißtransformator (Frequenz $f = 1000$ Hz und höher) verbunden. Sekundärseitig ist der Transformator über einen Gleichrichter an die Schweißzange angeschlossen.

Der Schweißstrom wird an der Steuereinheit eingestellt. Neben den zeitlichen Verläufen von Schweißstrom und -spannung können z. B. auch die Verläufe von Elektrodenkraft und -weg eingestellt werden.

Die untersuchten Schweißzangen hatten unterschiedliche Formen und Größen. Es wurde zwischen kleinen und großen Schweißzangen unterschieden. Beim Schweißen können Schweißströme mit Stromstärken bis etwa 10 kA fließen. Die Dauer eines Schweißvorgangs beträgt ca. 300 bis 1200 ms. Diese Zeit setzt sich je nach Werkstück aus mehreren Stromzeiten zusammen (siehe [6]).

4 Durchführung der Untersuchungen

Bei den Untersuchungen über die Wirkungen magnetischer Felder an MPZ im menschlichen Gewebe wurden die im Rahmen von Betriebsmessungen ermittelten Werte der magnetischen Flussdichte, der Frequenz des magnetischen Feldes, des zeitlichen Verlaufs des Schweißstroms und der Geometrie der Punktschweißzange in ein Rechenmodell eingebracht. Mit dem Rechenmodell wurden verschiedene Expositionsszenarien beim Schweißen mit Punktschweißzangen nachgebildet. Um die Wirkungen des magnetischen Feldes zu beurteilen, wurde in das Rechenmodell ein menschliches Körpermodell mit mehr als 40 unterschiedlichen, nach anatomischen Gesichtspunkten angeordneten Gewebearten integriert. In dem Körpermodell wurde die Verteilung der elektrischen Feldstärken im Gewebe berechnet und mit den Grenzwerten der ICNIRP, den „basic restrictions“, verglichen. Anhand der Ergebnisse wurden Maßnahmen zum Schutz der Schweißer abgeleitet.

Die Untersuchungen umfassten drei Schritte:

1. Analyse der bei Betriebsmessungen ermittelten Ergebnisse zur Exposition und zum zeitlichen Verlauf der magnetischen Felder an handgeführten Mittelfrequenz-Punktschweißzangen
2. Berechnung und Visualisierung der im Gewebe eines Körpermodells induzierten elektrischen Stromdichten und Feldstärken
3. Erarbeitung von Hinweisen zur Expositionsbewertung unter Einbeziehung induzierter Feldgrößen im Gewebe und zum Schutz der Beschäftigten beim Arbeiten an handgeführten Mittelfrequenz-Punktschweißzangen

5 Analyse des zeitlichen Verlaufs gemessener magnetischer Felder

5.1 Ziel der Untersuchung

In diesem Untersuchungsschritt sollten die an Mittelfrequenz-Punktschweißzangen beim Schweißen auftretenden magnetischen Felder unter Berücksichtigung von Abschnitt 3 der Anlage 1 der Anforderungen der Unfallverhütungsvorschrift BGV B11 [1] und der Hinweise der BGI 5011 [6] hinsichtlich der im menschlichen Gewebe wirksamen physiologisch wirksamen Frequenzen analysiert werden. Ziel dieser Analyse war es, anhand der Ergebnisse die Frequenzen für die Berechnung der induzierten elektrischen Stromdichten und Feldstärken festzulegen.

5.2 Zeitliche Verläufe der magnetischen Flussdichte

Beispielhaft wurden aus drei ausgewählten, an unterschiedlichen MPZ gemessenen zeitlichen Verläufen der magnetischen Flussdichte die charakteristischen Daten des Schweißvorgangs zur Expositionsbestimmung der Schweißer ermittelt. Die ausgewählten Verläufe der magnetischen Flussdichte sind in den Abbildungen 1 bis 3 dargestellt. Sie wurden mit isotrop messenden Gleichfeld und/oder Wechselfeldsonden gemessen und aufgezeichnet. Die Abbildungen 1a, 2a und 3a zeigen den gemessenen zeitlichen Verlauf der magnetischen Flussdichte in den drei senkrecht zueinander stehenden Messachsen X, Y und Z, die Abbildungen 1b, 2b und 3b den Zeitverlauf des Spitzenwertes der Magnetflussdichte. Dieser wurde aus den Flussdichten in den drei Feldrichtungen X, Y und Z (Abbildung 1a, 2a und 3a) nach Formel (1) berechnet:

$$\hat{B} = \sqrt{\hat{B}_x^2 + \hat{B}_y^2 + \hat{B}_z^2} \quad (1)$$

5.3 Analyse der Verläufe der magnetischen Flussdichte

Die in den Abbildungen 1 bis 3 aufgeführten zeitlichen Verläufe der magnetischen Flussdichte wurden entsprechend dem Verfahren der Unfallverhütungsvorschrift BGV B11, Anlage 1, Abschnitt 3 und der BGI 5011 analysiert. Die Ergebnisse sind in Tabelle 1 aufgeführt.

5.4 Ergebnisse

Die Verläufe der magnetischen Flussdichte in den Abbildungen 1 bis 3 und die in Tabelle 1 aufgeführten Ergebnisse der analysierten Feldverläufe zeigen, dass jedem Schweißimpuls mehrere Welligkeiten unterschiedlicher Frequenz überlagert sind. An der Punktschweißzange 1 sind dies beispielsweise die Frequenzen 174, 171, 263 und 2500 Hz. Ursache für diese Frequenzen sind die verschiedenen Komponenten einer MPZ. Im Wesentlichen wird die Frequenz für den zeitlichen Verlauf der magnetischen Flussdichte durch die Schaltgruppe des Schweißtransformators, die Frequenz des Schweißumrichters und die Induktivität und den Widerstand des Schweißkreises bestimmt. Je nach Schaltgruppe des Schweißtransformators ist dem Magnetfeld eine Welligkeit mit einer Frequenz von 300 Hz oder von 150 Hz und in Abhängigkeit von der Wechselrichtertaktfrequenz des Schweißumrichters eine Welligkeit mit der doppelten Wechselrichterfrequenz (2 bis 40 kHz) überlagert. Die Abweichungen von diesen Frequenzen werden im Wesentlichen von den elektrischen Eigenschaften (Induktivität und Widerstand) des Schweißkreises hervorgerufen. Sie sind, wie sich aus den Werten der Tabelle 1 ermitteln lässt, im Vergleich zu den Frequenzen der frequenzbestimmenden Komponenten einer MPZ gering.

5.5 Schlussfolgerungen für das weitere Vorgehen

Für das weitere Vorgehen bedeuten die Ergebnisse, dass zur Beurteilung der Wirkungen des magnetischen Feldes in einem Körpermodell auf die Nachbildung des Magnetfeldimpulses verzichtet werden kann. Aufgrund der geringen Abweichungen ist es ausreichend, zur Berechnung der im Gewebe induzierten elektrischen Feldstärken die Frequenzen der frequenzbestimmenden Komponenten der MPZ zugrunde zu legen.

Abbildung 1:

Zeitlicher Verlauf der magnetischen Flussdichte, gemessen mit einer Gleichfeldsonde an der Mittelfrequenz-Punktschweißzange 1 (MPZ 1)

a): Magnetische Flussdichte in drei Messachsen (x: gelb, y: rot, z: blau), b) Spitzenwert der Magnetflussdichte

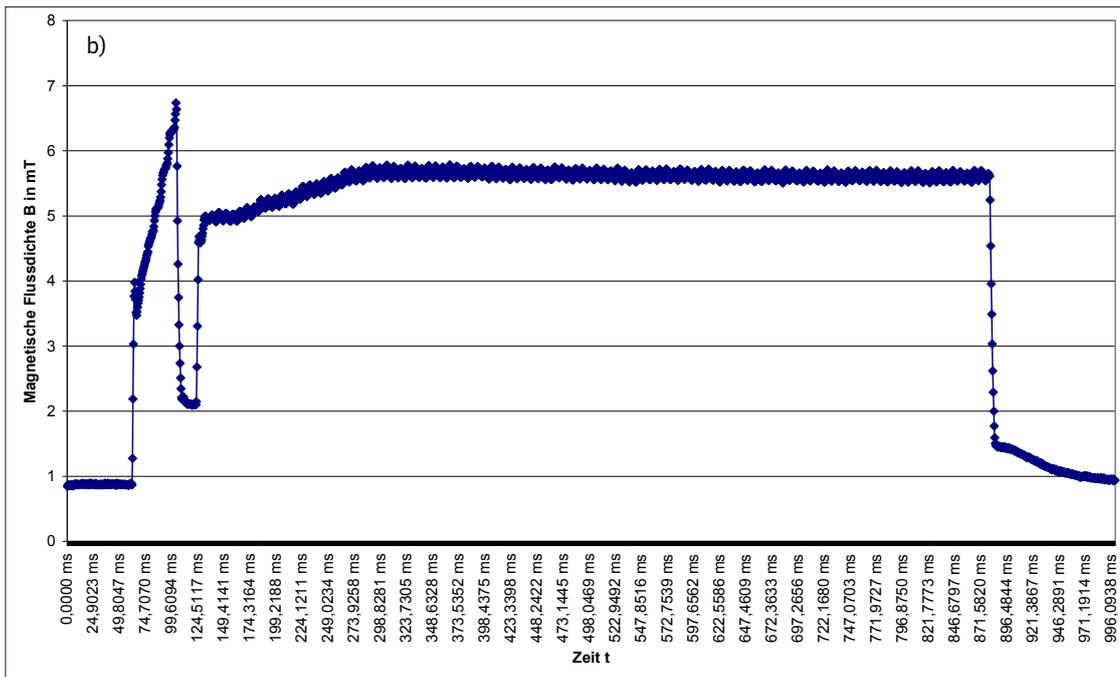
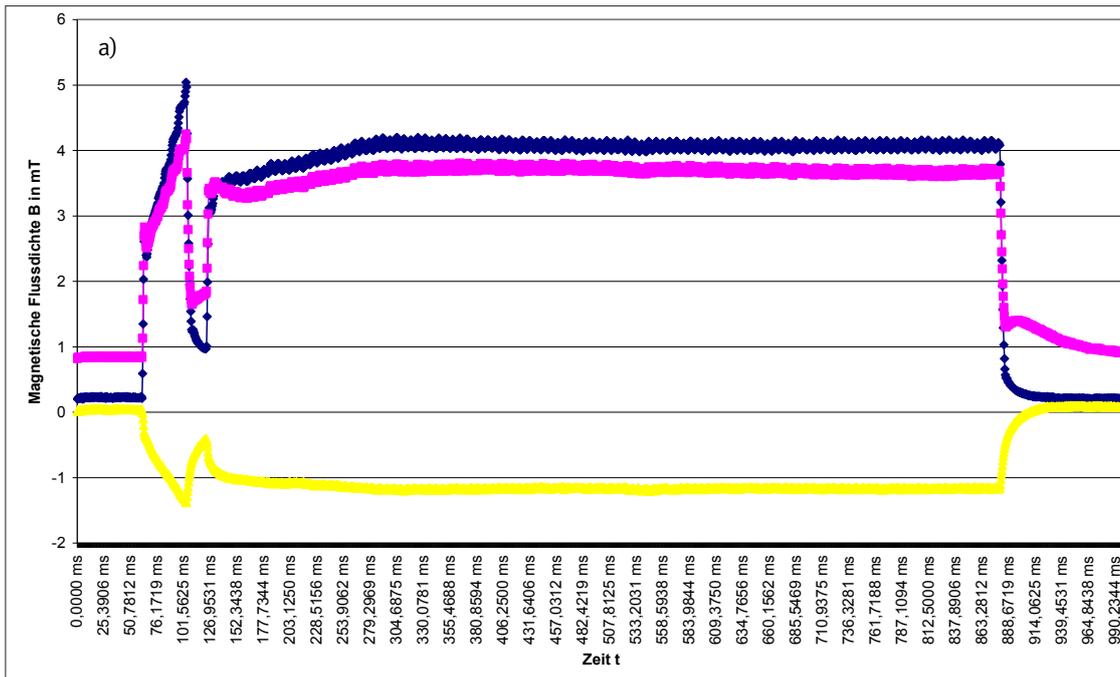


Abbildung 2:

Zeitlicher Verlauf der magnetischen Flussdichte, gemessen mit einer Gleichfeldsonde an der Mittelfrequenz-Punktschweißzange 2 (MPZ 2)

a) Magnetische Flussdichte in drei Messachsen (x: gelb, y: rot, z: blau), b) Spitzenwert der Magnetflussdichte

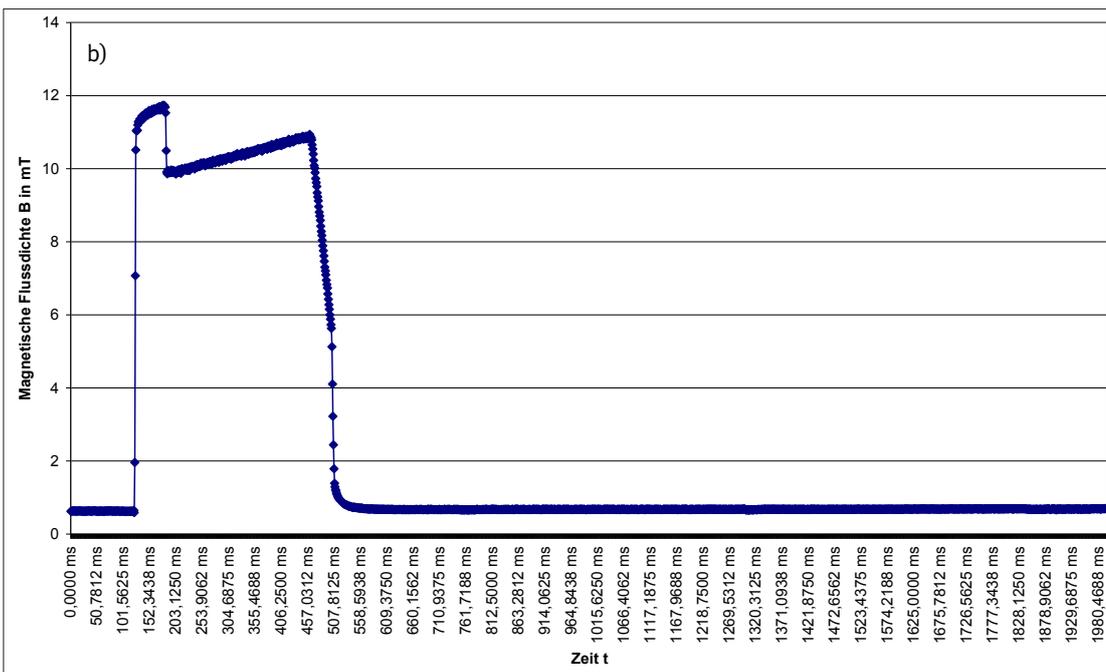
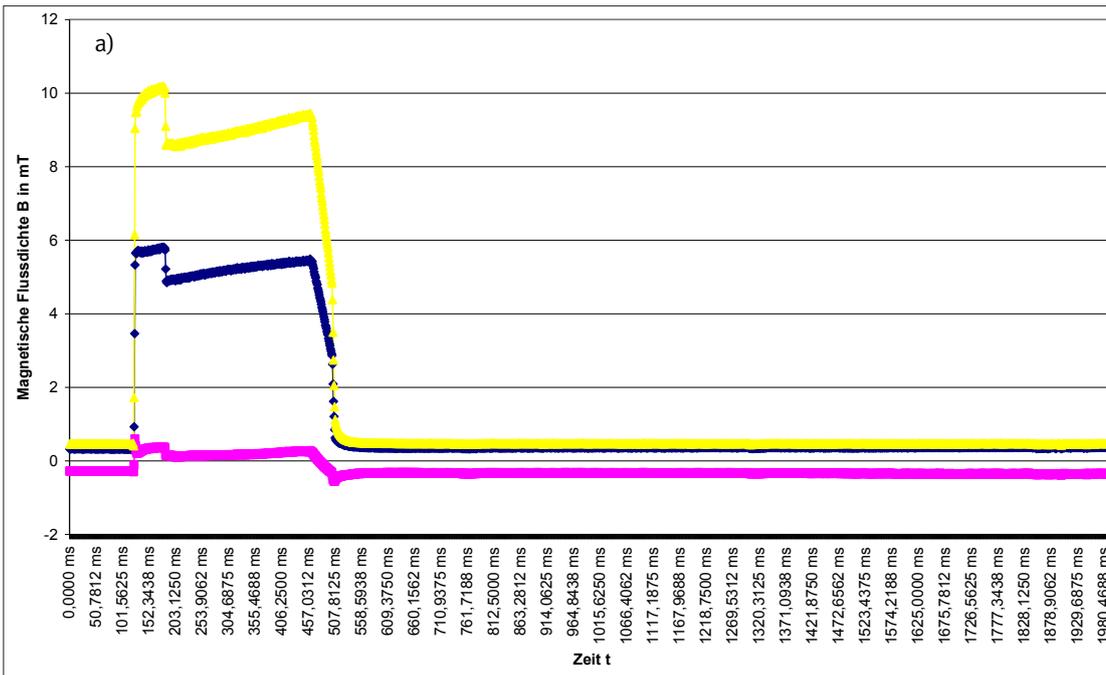


Abbildung 3:

Zeitlicher Verlauf der magnetischen Flussdichte, gemessen mit einer Wechselfeldsonde an der Mittelfrequenz-Punktschweißzange 3 (MPZ 3)

a): Magnetische Flussdichte in drei Messachsen (x: gelb, y: rot, z: blau), b) Spitzenwert der Magnetflussdichte

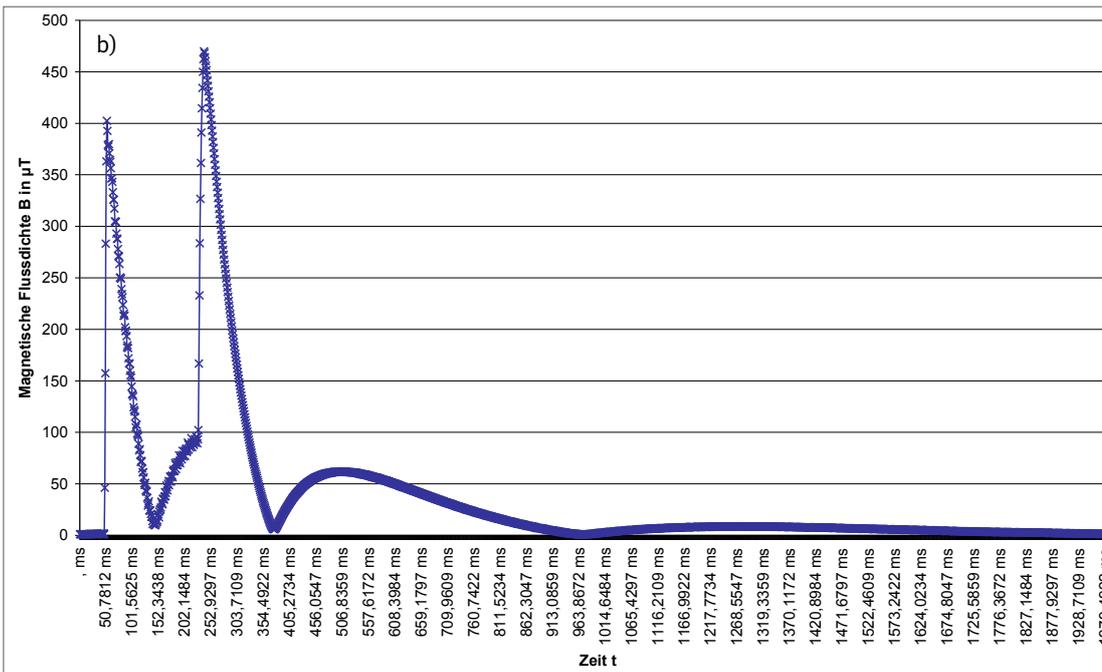
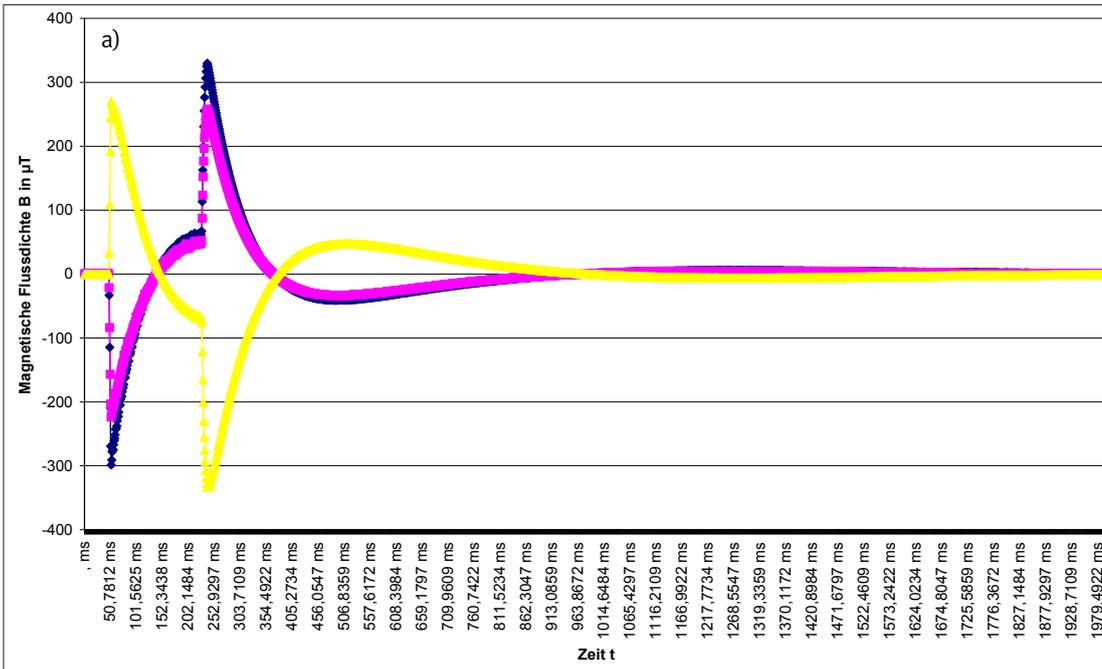


Tabelle 1:
Ergebnisse der analysierten Feldverläufe

Lfd. Nr.	Charakteristische Daten	Punktschweißzange		
		1	2	3
1	Schweißimpuls			
	Stromzeit des Schweißimpulses in ms	770	400	1780
	Gewichtungsfaktor nach BGV B11	1,14	1,46	1
	Spitzenwert der magnetischen Flussdichte	7 mT	2,08 mT	400 μ T
2	Abfallende Flanke			
	Maximale Änderung der Flussdichte der abfallenden Flanke	4 mT	1,64 mT	320 μ T
	Minimale Zeitdauer der Änderung der Flussdichte der abfallenden Flanke in ms	1,43	-	5
	Zeitdauer der abfallenden Flanke in ms	7	63	10
	Zeitdauer der Änderung der abfallenden Flanke bis $0,79 B_{\max}$ in ms	1,43	47	5
	Maximale Frequenz der Feldänderung in Hz	174	5	50
3	Ansteigende Flanke			
	Spitzenwert der Änderung der Flussdichte der Flanke	2,5 mT	450 μ T	400 μ T
	Minimale Zeitdauer der Feldänderung in ms	1,46	0,4	2
	Frequenz der Feldänderung in Hz	171	625	125
	Maximale zeitliche Änderung der magnetischen Flussdichte in T/s	1,71	1,2	0,2
4	Welligkeit Gleichrichter			
	Spitzenwert der Flussdichte in μ T	125	15	10
	Zeitdauer der Feldänderung in ms	0,95	5	1
	Frequenz der Feldänderung in Hz	263	100	250
5	Welligkeit des Umrichters			
	Spitzenwert der Flussdichte in μ T	6	35	20
	Zeitdauer der Feldänderung in ms	0,2	0,76	0,3
	Frequenz der Feldänderung Hz	2500	1315	1666

6 Berechnung und Visualisierung der induzierten Körperstromdichte und elektrischen Gewebefeldstärken in einem Körpermodell

6.1 Allgemeines

Zur Berechnung der magnetischen Felder an den MPZ und von induzierten elektrischen Feldstärken im Gewebe wurde das Feldberechnungsprogramm EMPIRE XCcel des Instituts für Mobil- und Satellitenfunktechnik (IMST) benutzt. Mit dem Programm können Felder und Stromdichten von vorgegebenen Strukturen durch Berechnung ermittelt und visualisiert werden. Das Programm umfasst mehrere Module, deren Funktionalitäten auf der Oberfläche eines CAD-Programms aufsetzen. Dieses fungiert als Benutzerschnittstelle.

Über diese Schnittstelle werden die geometrische Struktur, die Abmessungen, die Materialeigenschaften, der konstruktive Aufbau und die Anordnung der Mittelfrequenz-Punktschweißzange und der Betrachtungsraum erstellt. Zur Berechnung der magnetischen Felder wird die Methode der finiten Differenzen im Zeitbereich (FDTD, Finite Difference Time Domain) angewendet.

6.2 Ziel der Berechnung

Ziel der Berechnung ist es, die Zusammenhänge zwischen der Stromstärke der verwendeten Punktschweißzange, der Arbeitsposition des Schweißers und den Wirkungen eines magnetischen Feldes im Gewebe zu ermitteln und eine Expositions-

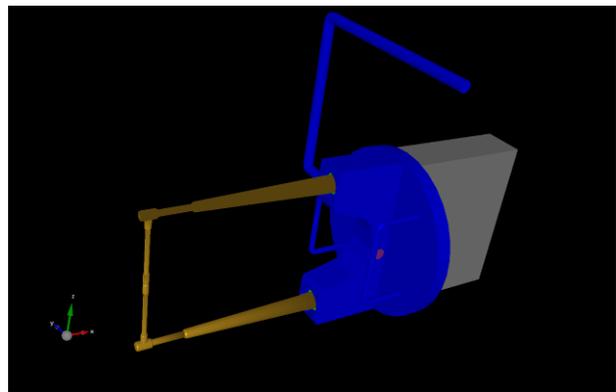
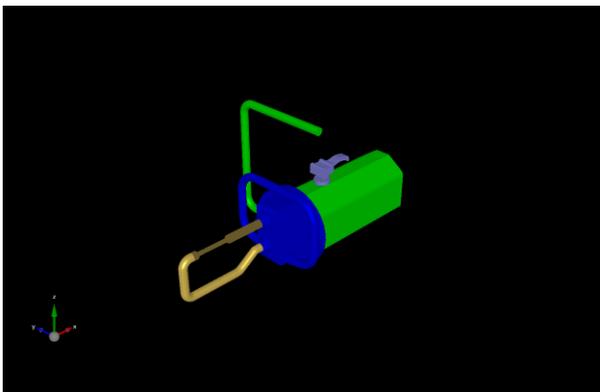
beurteilung anhand der Grenzwerte, d. h. der elektrischen Feldstärke im Gewebe, durchzuführen. Dazu wurden die induzierten elektrischen Feldstärken im Gewebe in Abhängigkeit von ermittelten physiologisch wirksamen Frequenzen des Schweißstroms bei einer Schweißstromstärke von 1 A in einem Körpermodell für zwei Punktschweißzangen mit unterschiedlichen Zangenfenstern (groß und klein) ermittelt und mit den „basic restrictions“ der ICNIRP verglichen und bewertet. Ferner sollen anhand der Ergebnisse Grenzen aufgezeigt werden, die zur Expositionsbeurteilung herangezogen werden können.

6.3 Nachbildungen

6.3.1 Feldquellen

Als Grundlage für die Berechnungen der Feldverteilung dienen die in Abbildung 4 dargestellten Nachbildungen von Mittelfrequenz-Punktschweißzangen. Abbildung 4 links zeigt eine Punktschweißzange in C-Bauform mit kleinem Zangenfenster. Die inneren Abmessungen des Zangenfensters betragen 150 mm · 100 mm (Länge · Höhe). In Abbildung 4 rechts ist die Punktschweißzange mit dem großen Zangenfenster zu sehen. Das Zangenfenster ist in L-Bauform ausgeführt, d. h. die beiden Elektrodenarme sind L-förmig angeordnet. Die Größe des Zangenfensters beträgt 700 mm · 500 mm (Länge · Höhe).

Abbildung 4:
Modelle der Mittelfrequenz-Punktschweißzangen;
links: Punktschweißzange mit 150-mm-Zangenfenster (MPZ-150), rechts: Punktschweißzange mit 700-mm-Zangenfenster (MPZ-700)



Hinweis:

Baugröße der Zangenfenster

Die Größe der Zangenfenster wurde so gewählt, dass sie den Extremen der in der betrieblichen Praxis anzutreffenden Größen entspricht. Es wird davon ausgegangen, dass anhand der Ergebnisse der Feldberechnungen Grenzwerte für Schweißstromstärken ermittelt werden, die zur Beurteilung der Exposition an Mittelfrequenz-Punktschweißzangen genutzt werden können.

6.3.2 Körpermodell

Zur Berechnung induzierter elektrischer Feldstärken im menschlichen Gewebe wird ein dreidimensionales Anatomiemodell des menschlichen Körpers in ein Feldsimulationsmodell integriert. Als Körpermodell wurde das im Rahmen des „Visible Human Project“ im Air Force Research Laboratorium entwickelte Modell eingesetzt. Es enthält 46 unterschiedliche, nach anatomischen Gesichtspunkten angeordnete Gewebearten, wie Muskeln, Lunge, Hirn, Haut, Knochen, Fett, Augen und Blut mit einer Auflösung/Voxel von $(3 \cdot 3 \cdot 3) \text{ mm}^3$. Die Größe des verwendeten Körpermodells beträgt in den drei senkrecht zueinander stehenden Achsen $x = 196$, $y = 114$ und $z = 626$ Voxel. Das entspricht den folgenden Körpermodellabmessungen: Schulterbreite 588 mm, Körperbreite 342 mm und Körpergröße 1878 mm.

6.4 Grundlagen und Voraussetzungen bei den Berechnungen

Zur Nachbildung der Expositionsbedingungen eines Schweißers wurde das Körpermodell entsprechend den üblichen Arbeitspositionen eines Schweißers an der MPZ positioniert. Um die Anzahl der Simulationen zu begrenzen, wurde die Position des Körpermodells schrittweise parallel und senkrecht zur Zangenfenstermitte variiert. Dabei wurde davon ausgegangen, dass die Punktschweißzange von einem Balancer gehalten und vom Schweißer vor dem Rumpf des Körpers geführt wird. Alle Berechnungen wurden für einen Schweißstrom mit einer Stromstärke von 1 A ausgeführt. Aufgrund der Proportionalität von Stromstärke und Feldstärke können bei einer bekannten Stromstärke die induzierten elektrischen Feldstärken entsprechend Formel (2) berechnet werden.

$$\frac{I_{\text{Schweiß}}/A}{1/A} = \frac{E_i}{E_{i,1A}} \quad (2)$$

mit

$I_{\text{Schweiß}}$	Schweißstromstärke in A
E_i	induzierte elektrische Feldstärke im Gewebe
$E_{i,1A}$	induzierte elektrische Feldstärke normiert auf eine Schweißstromstärke von 1 A

Der in dem Projekt interessierende Frequenzbereich erstreckt sich von 50 Hz bis zu etwa 100 kHz (siehe hierzu auch die Ergebnisse aus der Analyse der Feldverläufe, Abschnitt 5.3). Bei der Berechnung der elektrischen Feldstärke im Gewebe des Körpermodells wurden ausschließlich Frequenzen zugrunde gelegt, die aus der Schaltgruppe des Schweißtransformators und der

Inverterfrequenz hergeleitet werden können. Die Berechnungen selbst wurden mit breitbandigen Signalen (50 MHz) durchgeführt und mittels einer Frequenzskalierung auf die zu betrachtende Frequenz, z. B. 300 Hz, umgerechnet. Ferner wurden die dielektrischen Gewbeeigenschaften des Körpermodells auf die der jeweiligen Rechnung (Simulation) zugrunde gelegten wirksamen Frequenz parametrisiert. Die Berechnung der induzierten elektrischen Feldstärke erfolgt dadurch frequenzselektiv.

Die Auswahl der MPZ beschränkte sich auf ein Modell mit kleinem Zangenfenster und eines mit großem Zangenfenster. Dabei wird davon ausgegangen, dass mit beiden Modellen der Rahmen für die Beurteilung der Exposition an einem Schweißarbeitsplatz bestimmt werden kann.

6.5 Berechnung der Basisgrößen

Die Berechnungen der induzierten elektrischen Feldstärke erfolgten in einem Körpermodell an einer Punktschweißzange mit kleinem Zangenfenster und an einer Punktschweißzange mit großem Zangenfenster (Abbildungen 5). Beide Abbildungen zeigen die Lage der Punktschweißzange zum Körpermodell in der als Grundstellung festgelegten Position, d. h. das Körpermodell befindet sich in der Zangenfenstermitte. Der Abstand des Körpermodells zur Mitte der Punktschweißzange beträgt 200 mm.

Ausgehend von dieser Position wurde die Exposition des Schweißers bei unterschiedlichen Abständen an der MPZ untersucht. Im Rahmen dieser Untersuchungen wurde

1. die Position des Körpermodells parallel zum Zangenfenster in Richtung Schweißtransformator in 100-mm-Schritten geändert
2. der Abstand des Körpermodells senkrecht zur Zangenfenstermitte in 100-mm-Schritten geändert.

Bei den sich daraus ergebenden Positionen wurde die induzierte elektrische Feldstärke bei den Frequenzen 50, 100, 150, 300, 1000 und 2000 Hz sowie 10, 20, 45 und 90 kHz berechnet.

Beispiele für an der MPZ 150 und MPZ 700 untersuchte Positionen des Körpermodells sind in den Tabellen 2 und 3 dargestellt. In Tabelle 2 zeigen die Abbildungen a) bis c) die Positionen des Körpermodells bei einer seitlichen Änderung parallel zum Zangenfenster der MPZ 150 und die Abbildungen d) und e) die Positionen bei der Änderung senkrecht zum Zangenfenster.

In Tabelle 3 sind die untersuchten Positionen des Körpermodells an der MPZ 700 dargestellt.

Abbildung 5:
 Simulationsmodelle – Körpermodell mit Mittelfrequenz-Punktschweißzange;
 links: Punktschweißzange mit kleinem Zangenfenster, rechts: Punktschweißzange mit großem Zangenfenster

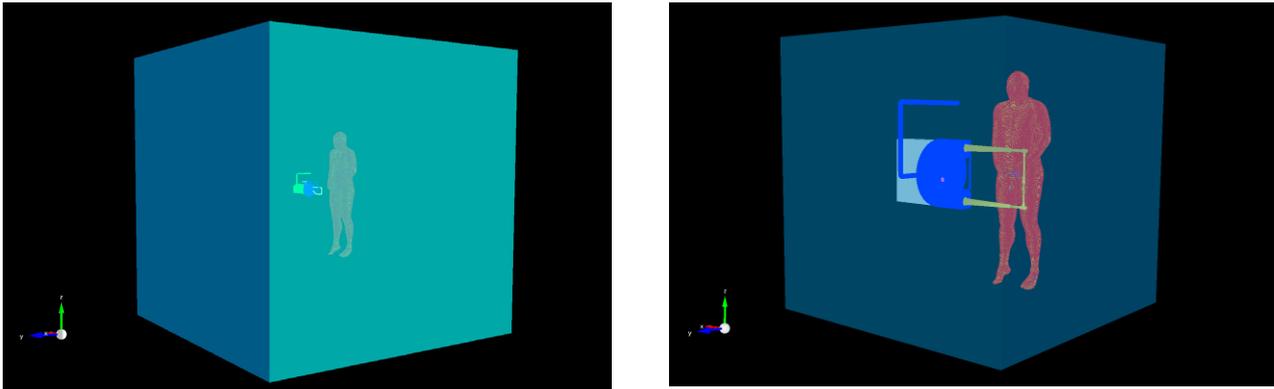


Tabelle 2:
 Untersuchte Positionen des Körpermodells an der MPZ 150

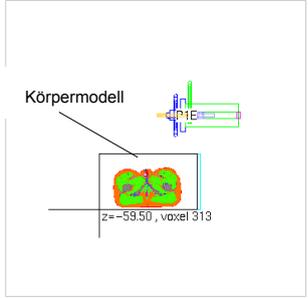
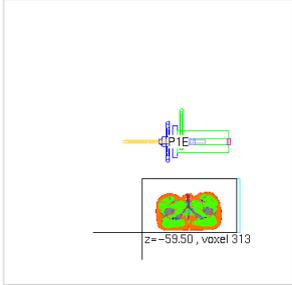
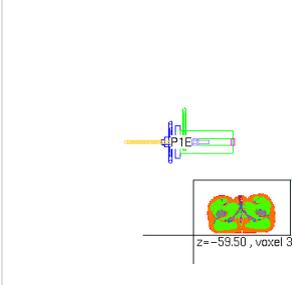
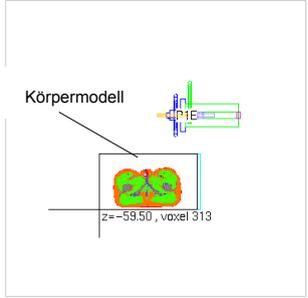
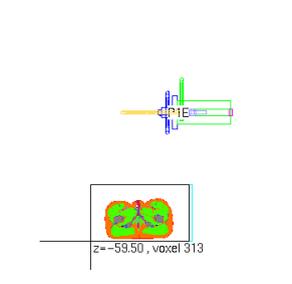
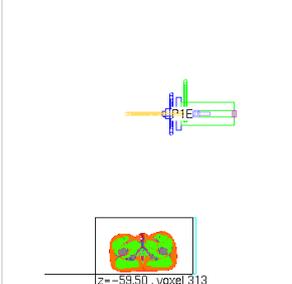
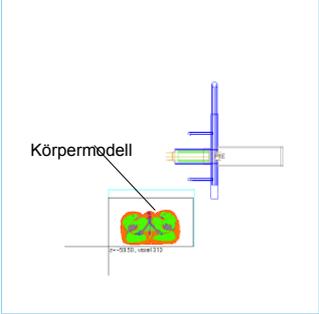
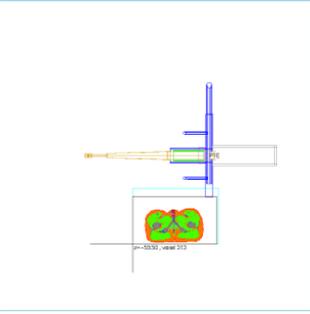
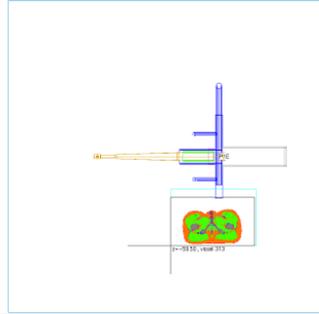
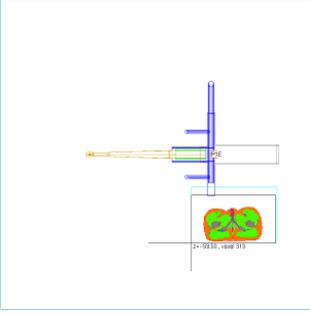
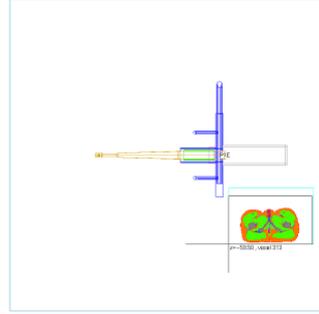
Änderung des Körpermodells	Untersuchte Positionen des Körpermodells		
Seitlich zum Zangenfenster			
		b) 300 mm aus der Grundstellung	c) 600 mm aus der Grundstellung
Senkrecht zum Zangenfenster			
	a) Grundstellung	e) 200 mm aus der Grundstellung	f) 400 mm aus der Grundstellung

Tabelle 3 :
Untersuchte Positionen des Körpermodells an der MPZ 700

Änderung des Körpermodells	Untersuchte Positionen des Körpermodells		
Seitlich zum Zangenfester			
		b) 200 mm aus der Grundstellung	c) 400 mm aus der Grundstellung
			
		e) 600 mm aus der Grundstellung	f) 800 mm aus der Grundstellung

6.5.1 Simulationsebenen

Aufgrund des hohen Rechenaufwandes wurde die Verteilung der induzierten elektrischen Feldstärken im Gewebe im Körpermodell mit unterschiedlichen Auflösungen berechnet. Mit hoher Auflösung, entsprechend der Voxelgröße des Körpermodells, wurde in fünf Simulationsebenen gerechnet (Abbildung 6). Diese Ebenen wurden später zur Beurteilung der Exposition herangezogen. Vom Boden aus gemessen liegen diese in einer Höhe von 1000, 1200, 1400, 1650 und 1775 mm. Die Simulationsebenen wurden so gewählt, dass die Verteilungen der Körperstromdichten im Rumpf (1000, 1200 und 1400 mm), im Hals/Nacken (1650 mm) und im Kopf/Gehirn (1775 mm) ermittelt werden konnten. In Abbildung 6 sind die Zuordnung und die Lage der betrachteten Ebenen im Körpermodell an der MPZ mit dem kleinen Zangenfenster und an der MPZ mit dem großen Zangenfenster dargestellt.

6.6 Ergebnisse der Feldsimulation

6.6.1 Punktschweißzange mit dem 150-mm-Zangenfenster

6.6.1.1 Seitliche Änderung der Position des Körpermodells zum Zangenfenster

Für die Grundstellung des Körpermodells an der Mittelfrequenzpunktschweißzange mit dem 150-mm-Zangenfenster (siehe Tabelle 2, Abbildung a) sind in Tabelle 4 für die relevanten Frequenzen der magnetischen Felder die Verteilungen der induzierten elektrischen Feldstärken im Gewebe des Körpermodells beispielhaft für die Schnitthöhen 1200 und 1775 mm dargestellt.

Abbildung 6:
Simulationsebenen im Körpermodell zur Bestimmung der elektrischen Feldstärken im Gewebe

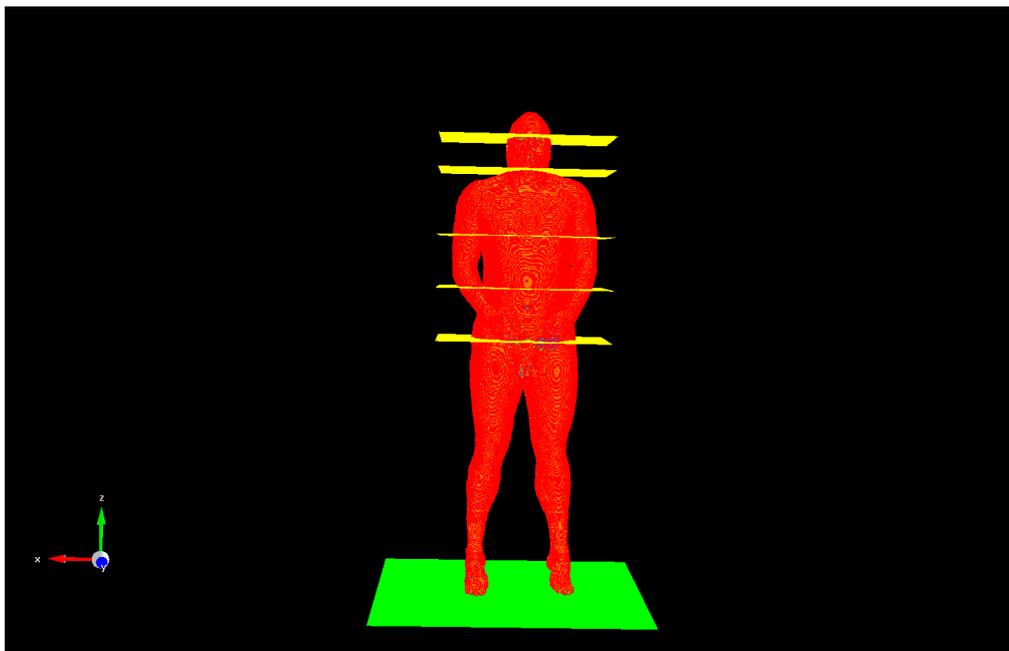


Tabelle 4:
Verteilung der induzierten elektrischen Felder im Gewebe des Körpermodells in der Grundstellung bei einer Schweißstromstärke von 1 A in den Schnitthöhen 1200 und 1775 mm

Frequenz in Hz	Schnitthöhe		Legende
	1200 mm	1775 mm	
50			<p>Legend v-opt-00001-Gabfreqvar=50-Menschxvar=0/sub-1/f_dump.dbx, f</p> <p>ACD Maxima in Animation Bounding Box, Average = 0.0 f=50.000 Hz MAX ACD = 132.000 nV/m MAX POS -0.120 -0.375 0.658, ORIGINAL</p> <ul style="list-style-type: none"> 1.500 uV/m (+0.00 dB) 150.000 nV/m (-20.00 dB) 15.000 nV/m (-40.00 dB) 1.500 nV/m (-60.00 dB) 150.000 pV/m (-80.00 dB) 15.000 pV/m (-100.00 dB)
100			<p>Legend v-opt-00001-Menschxvar=0/sub-1/f_dump.dbx, f</p> <p>ACD Maxima in Animation Bounding Box, Average = 0.0 f=100.000 Hz MAX ACD = 326.800 nV/m MAX POS -0.123 -0.366 0.810, ORIGINAL</p> <ul style="list-style-type: none"> 1.500 uV/m (+0.00 dB) 150.000 nV/m (-20.00 dB) 15.000 nV/m (-40.00 dB) 1.500 nV/m (-60.00 dB) 150.000 pV/m (-80.00 dB) 15.000 pV/m (-100.00 dB)
150			<p>Legend v-opt-00001-Menschxvar=0/sub-1/f_dump.dbx, f</p> <p>ACD Maxima in Animation Bounding Box, Average = 0.0 f=150.000 Hz MAX ACD = 2.580 uV/m MAX POS -0.228 -0.423 0.229, ORIGINAL</p> <ul style="list-style-type: none"> 1.500 uV/m (+0.00 dB) 150.000 nV/m (-20.00 dB) 15.000 nV/m (-40.00 dB) 1.500 nV/m (-60.00 dB) 150.000 pV/m (-80.00 dB) 15.000 pV/m (-100.00 dB)
300			<p>Legend v-opt-00001-Menschxvar=0/sub-1/f_dump.dbx, f</p> <p>ACD Maxima in Animation Bounding Box, Average = 0.0 f=300.000 Hz MAX ACD = 981.200 nV/m MAX POS -0.123 -0.366 0.810, ORIGINAL</p> <ul style="list-style-type: none"> 10.000 uV/m (+0.00 dB) 1.000 uV/m (-20.00 dB) 100.000 nV/m (-40.00 dB) 10.000 nV/m (-60.00 dB) 1.000 nV/m (-80.00 dB) 100.000 pV/m (-100.00 dB)

Frequenz in Hz	Schnitthöhe		Legende
	1200 mm	1775 mm	
1 000			<p>Legend v-opt-00001-Menschxvar=0/sub-1/f_dump.dbx, i</p> <p>ACD Maxima in Animation Bounding Box, Average = 0.1 f= 1.000 kHz MAX ACD = 3.274 uV/m MAX POS -0.123 -0.366 0.810, ORIGINAL</p> <ul style="list-style-type: none"> 50.000 uV/m (+0.00 dB) 5.000 uV/m (-20.00 dB) 500.000 nV/m (-40.00 dB) 50.000 nV/m (-60.00 dB) 5.000 nV/m (-80.00 dB) 500.000 pV/m (-100.00 dB)
2 000			<p>Legend v-opt-00001-Menschxvar=0/sub-1/f_dump.dbx, i</p> <p>ACD Maxima in Animation Bounding Box, Average = 0.1 f= 2.000 kHz MAX ACD = 38.280 uV/m MAX POS 0.107 -0.408 0.163, ORIGINAL</p> <ul style="list-style-type: none"> 50.000 uV/m (+0.00 dB) 5.000 uV/m (-20.00 dB) 500.000 nV/m (-40.00 dB) 50.000 nV/m (-60.00 dB) 5.000 nV/m (-80.00 dB) 500.000 pV/m (-100.00 dB)
10 000			<p>Legend v-opt-00001-Menschxvar=0/sub-1/f_dump.dbx, i</p> <p>ACD Maxima in Animation Bounding Box, Average = 0.1 f= 10.000 kHz MAX ACD = 32.720 uV/m MAX POS -0.123 -0.366 0.810, ORIGINAL</p> <ul style="list-style-type: none"> 200.000 uV/m (+0.00 dB) 20.000 uV/m (-20.00 dB) 2.000 uV/m (-40.00 dB) 200.000 nV/m (-60.00 dB) 20.000 nV/m (-80.00 dB) 2.000 nV/m (-100.00 dB)
20 000			<p>Legend v-opt-00001-Menschxvar=0/sub-1/f_dump.dbx, i</p> <p>ACD Maxima in Animation Bounding Box, Average = 0.1 f= 20.000 kHz MAX ACD = 398.200 uV/m MAX POS 0.107 -0.408 0.163, ORIGINAL</p> <ul style="list-style-type: none"> 500.000 uV/m (+0.00 dB) 50.000 uV/m (-20.00 dB) 5.000 uV/m (-40.00 dB) 500.000 nV/m (-60.00 dB) 50.000 nV/m (-80.00 dB) 5.000 nV/m (-100.00 dB)
45 000			<p>Legend v-opt-00001-Menschxvar=0/sub-1/f_dump.dbx, i</p> <p>ACD Maxima in Animation Bounding Box, Average = 0.1 f= 45.000 kHz MAX ACD = 906.400 uV/m MAX POS 0.107 -0.408 0.163, ORIGINAL</p> <ul style="list-style-type: none"> 1.500 mV/m (+0.00 dB) 150.000 uV/m (-20.00 dB) 15.000 uV/m (-40.00 dB) 1.500 uV/m (-60.00 dB) 150.000 nV/m (-80.00 dB) 15.000 nV/m (-100.00 dB)
90 000			<p>Legend v-opt-00005-Menschyvar=0/sub-1/f_dump.dbx, i</p> <p>ACD Maxima in Animation Bounding Box, Average = 0.1 f= 90.000 kHz MAX ACD = 2.282 mV/m MAX POS 0.112 -0.417 0.203, ORIGINAL</p> <ul style="list-style-type: none"> 5.000 mV/m (+0.00 dB) 500.000 uV/m (-20.00 dB) 50.000 uV/m (-40.00 dB) 5.000 uV/m (-60.00 dB) 500.000 nV/m (-80.00 dB) 50.000 nV/m (-100.00 dB)

Hinweis:

In Tabelle 4 ist die Skalierung der Feldverteilung aufgrund der Darstellung unterschiedlicher Feldstärken nicht einheitlich.

Die Schnittbilder der Abbildungen in Tabelle 4 weisen bei den untersuchten Frequenzen eine inhomogene Verteilung der elektrischen Feldstärke im Gewebe auf. Die höchsten induzierten elektrischen Feldstärken treten an der Oberfläche des Körpermodells, d. h. an der Haut, auf. Insbesondere an sich gegenüberliegenden Körperteilen, z. B. zwischen dem Rumpf und den Armen, den Beinen und dem Kopf und Hals treten Feldstärken auf, die bis zum Zehnfachen über den Spitzenwerten der elektrischen

Feldstärken im inneren Gewebe des Körpermodells liegen. Ferner zeigen die Abbildungen, dass die induzierte elektrische Feldstärke annähernd proportional zur Frequenz zunimmt.

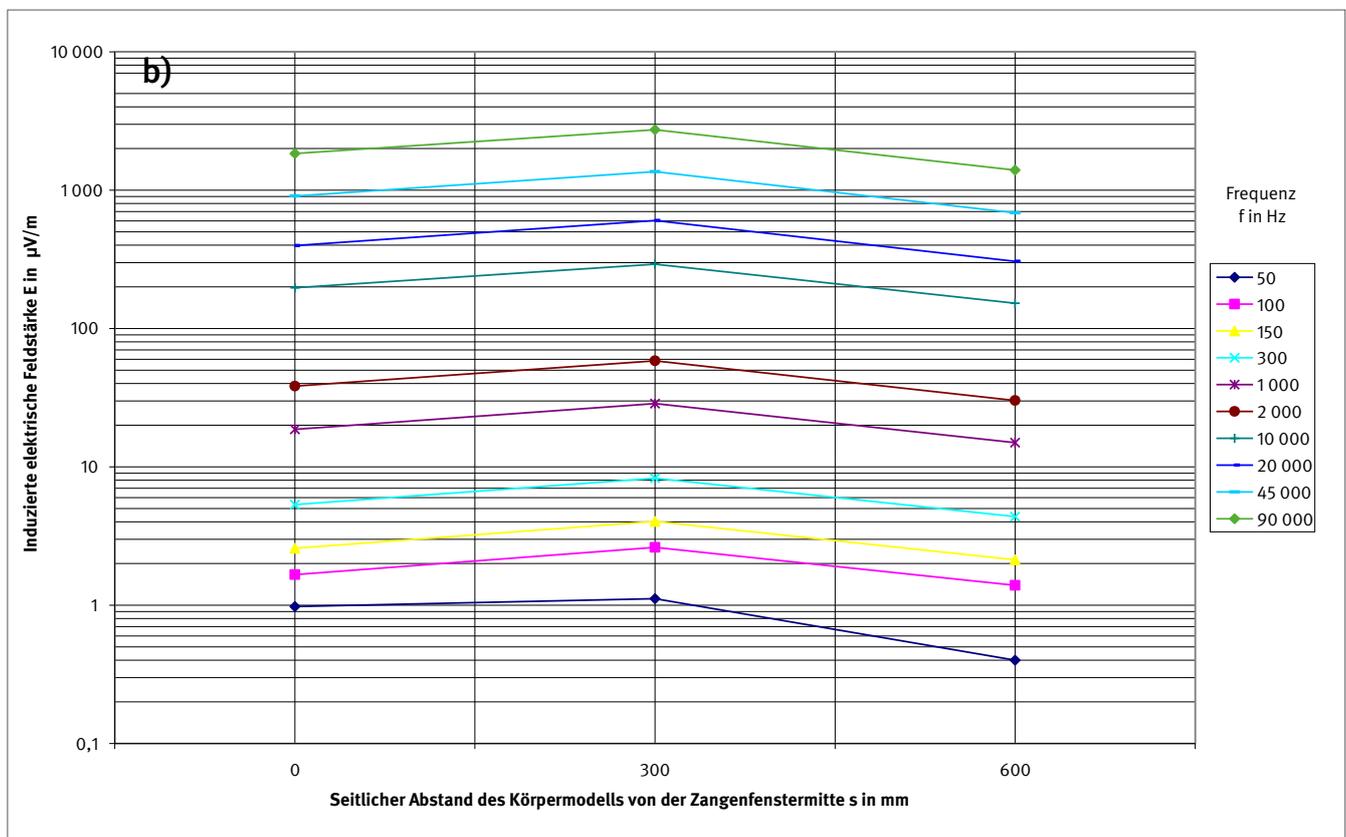
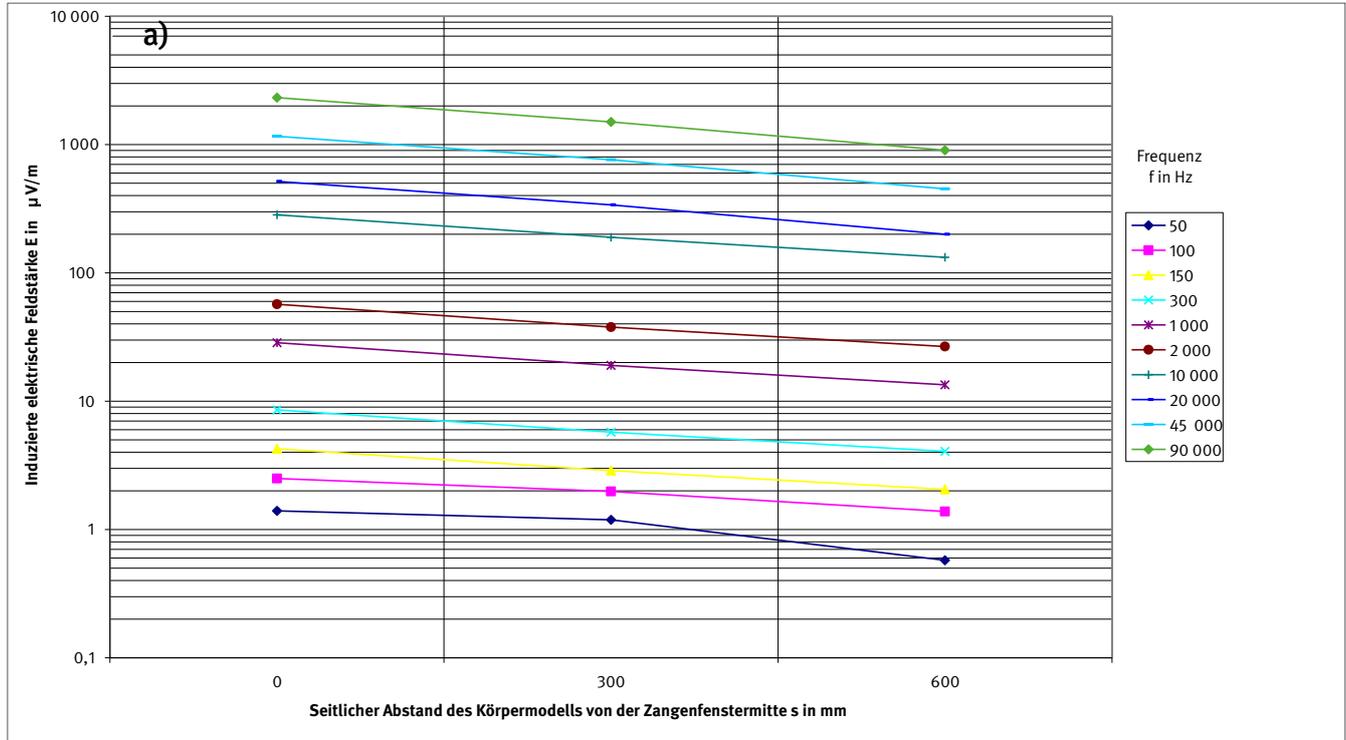
Einen Überblick über die Höhe der elektrischen Feldstärke im Gewebe des Körpermodells geben Abbildungen 7a bis 7e. Die Abbildungen zeigen für die im Abschnitt 6.4.1 aufgeführten Simulationsebenen den Verlauf des Spitzenwertes der induzier-

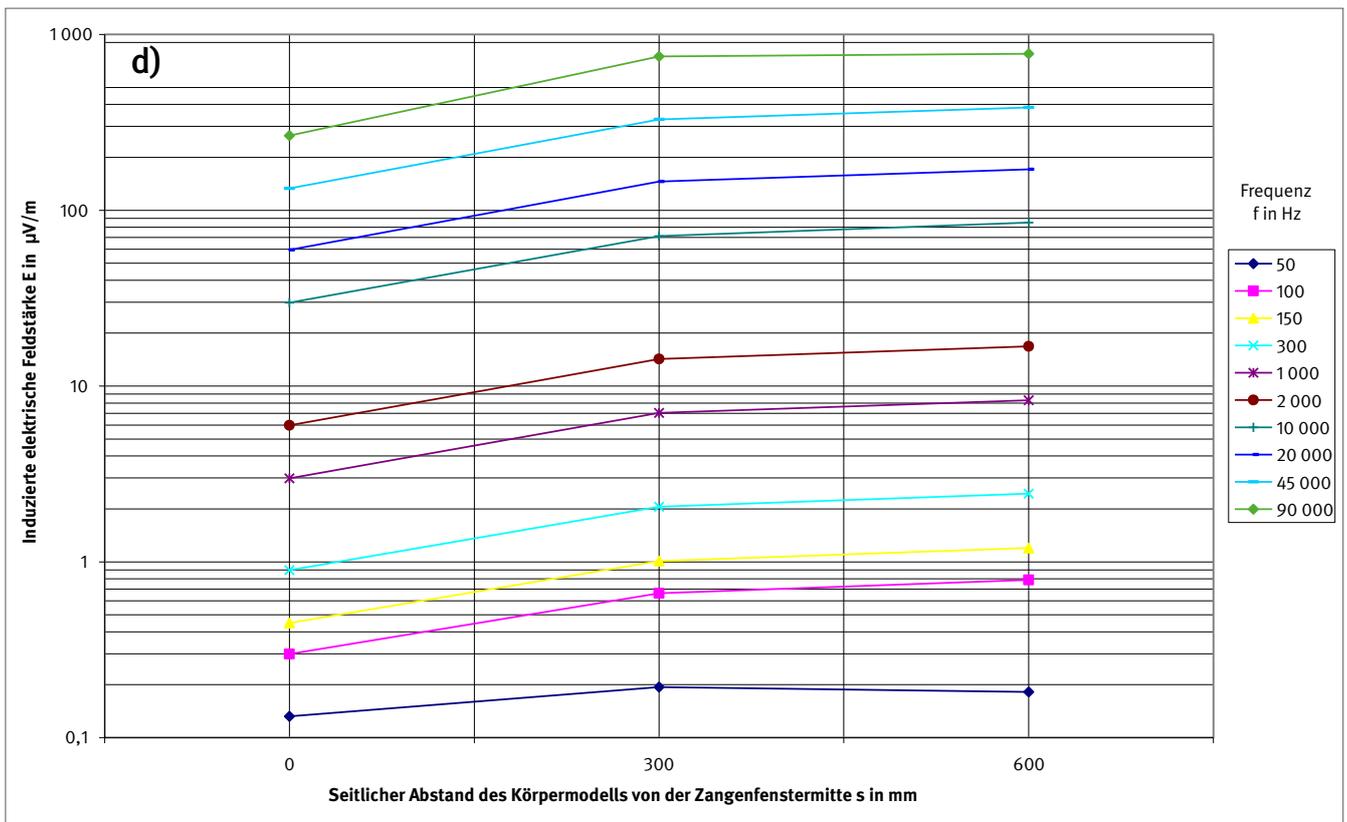
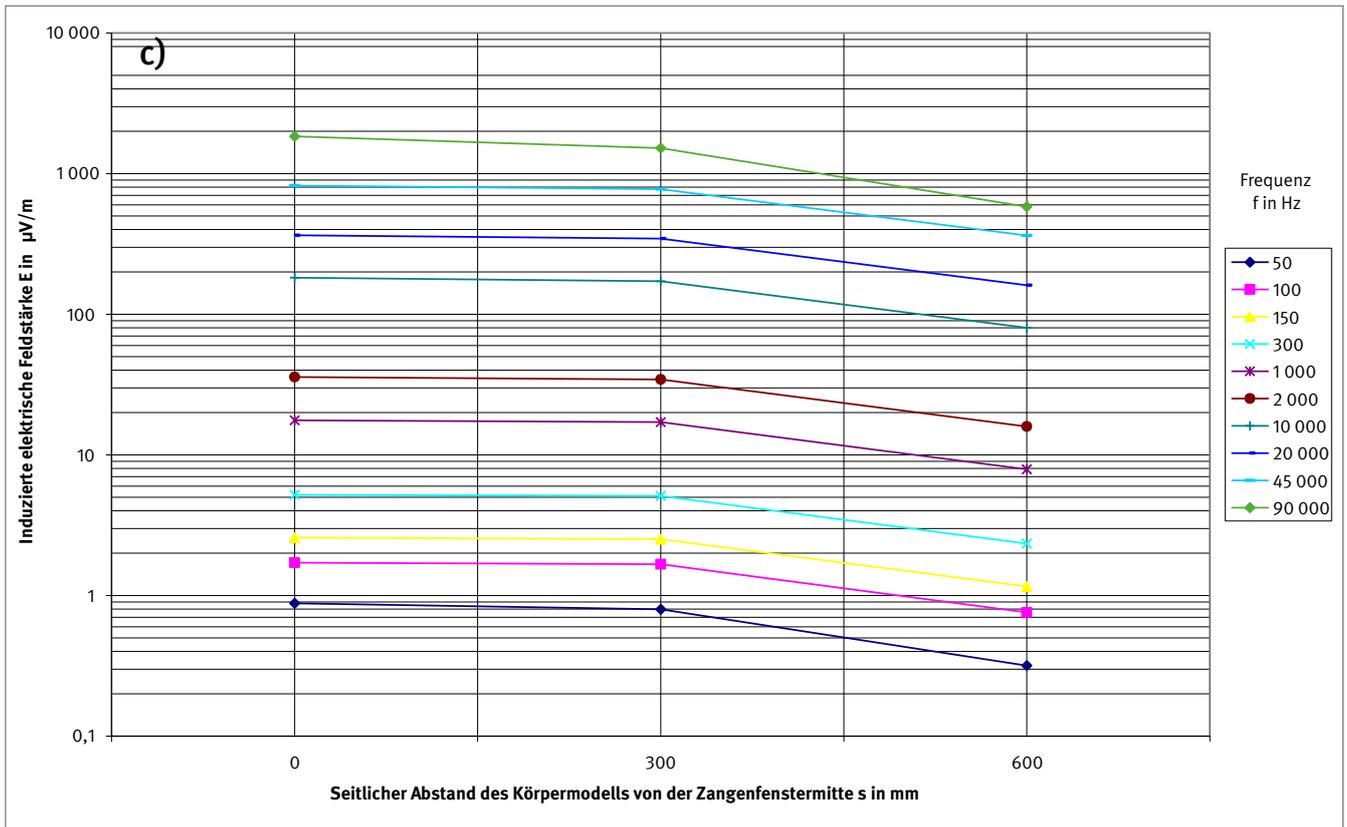
ten elektrischen Feldstärke im Gewebe. Dargestellt ist die Feldstärke für die Frequenzen 50, 100, 150, 300, 1000, 2000, 10 000 und 20 000 Hz sowie 45 und 90 kHz in der Grundstellung des

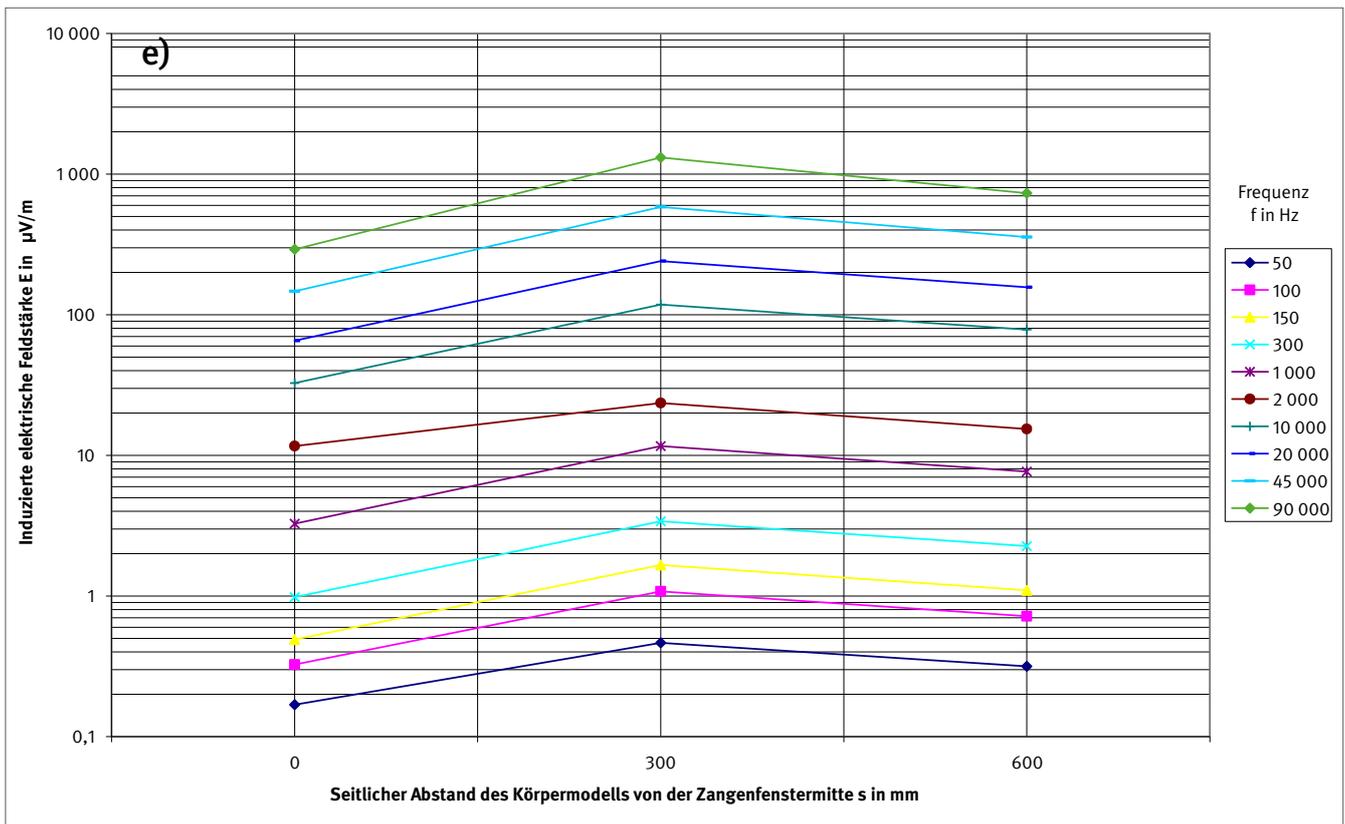
Körpermodells (Abstand 0 mm) und bei den seitlichen Abständen (Abstand zwischen der Mitte des Zangenfensters und des Körpermodells) von 300 und 600 mm.

Abbildung 7:

Verlauf des Spitzenwertes der induzierten elektrischen Feldstärke in Abhängigkeit von der Frequenz bei unterschiedlichen seitlichen Abständen des Körpermodells zum Zangenfenster; a) Simulationsebene, Schnitthöhe 1000 mm, b) Simulationsebene Schnitthöhe 1200 mm, c) Simulationsebene, 1400 mm, d) Simulationsebene, Schnitthöhe 1650 mm, e) Simulationsebene, Schnitthöhe 1775 mm







Wie die Verläufe der induzierten elektrischen Feldstärke im Gewebe des Körpermodells der Abbildungen 7a bis e zeigen, nimmt die Feldstärke im Gewebe in allen Schnittebenen mit der Frequenz zu. Bei konstanter äußerer magnetischer Feldstärke/Flussdichte, aber variabler Frequenz treten die höchsten elektrischen Gewebefeldstärken bei der Frequenz 90 000 Hz auf, d. h. der höchsten Frequenz des äußeren Feldes. Ferner ändert sich die Höhe der induzierten elektrischen Gewebefeldstärke in Abhängigkeit von der Stellung des Körpermodells. Den Kurvenverläufen in den Abbildungen 7a bis 7e ist zu entnehmen, dass sich die induzierte elektrische Feldstärke im Gewebe gegenüber den Werten in der Grundstellung des Körpermodells mit zunehmendem seitlichem Abstand je nach Frequenz in den verschiedenen Gewebeebenen (Schnittebenen) unterschiedlich verhält. In den Schnittebenen 1200, 1400 und 1775 mm nimmt die induzierte Gewebefeldstärke zunächst zu, erreicht bei 300 mm ein Maximum und nimmt danach wieder ab. In der Schnittebene 1000 mm nimmt die induzierte Gewebefeldstärke von der Grundstellung aus mit zunehmendem Abstand ab. Genau entgegengesetzt ist der Feldstärkeverlauf in der Schnittebene 1650 mm. Letzteres trifft jedoch nicht für ein äußeres

Magnetfeld mit der Frequenz 50 Hz zu. Bei dieser Frequenz entspricht der Verlauf der Feldstärke den Feldstärkeverläufen in den Schnittebenen 1200, 1400 und 1775 mm. Bezogen auf den niedrigsten Wert in einer Arbeitsposition unterscheiden sich die Spitzenwerte der induzierten Gewebefeldstärken bei den aufgeführten Abständen je nach Frequenz und Schnittebene um den Faktor 2 bis 3.

Beispielsweise kann Abbildung 8 (Schnittebene 1 200 mm) bei der Frequenz $f = 20\,000$ Hz als höchste induzierte elektrische Feldstärke im Gewebe ein Wert von $602\ \mu\text{V}/\text{m}$ und als niedrigste elektrische Feldstärke ein Wert von $305\ \mu\text{V}/\text{m}$ entnommen werden.

Innerhalb des Körpermodells ändert sich die induzierte elektrische Feldstärke im Gewebe in Abhängigkeit von der Gewebestruktur, dem seitlichen Abstand des Körpermodells zur Zangenfenstermitte und der betrachteten Schnitthöhe (Schnittebene). Die Abbildungen 9 und 10 zeigen den Verlauf der induzierten elektrischen Gewebefeldstärke in Abhängigkeit von den Schnittebenen für die Frequenzen 50 und 2 000 Hz.

Abbildung 8:

Spitzenwerte der induzierten elektrischen Gewebefeldstärke in Abhängigkeit von der Frequenz des Schweißstroms mit einer Stromstärke von 1 A und des seitlichen Abstandes des Körpermodells von der Zangenfenstermitte in der Schnitthöhe 1200 mm

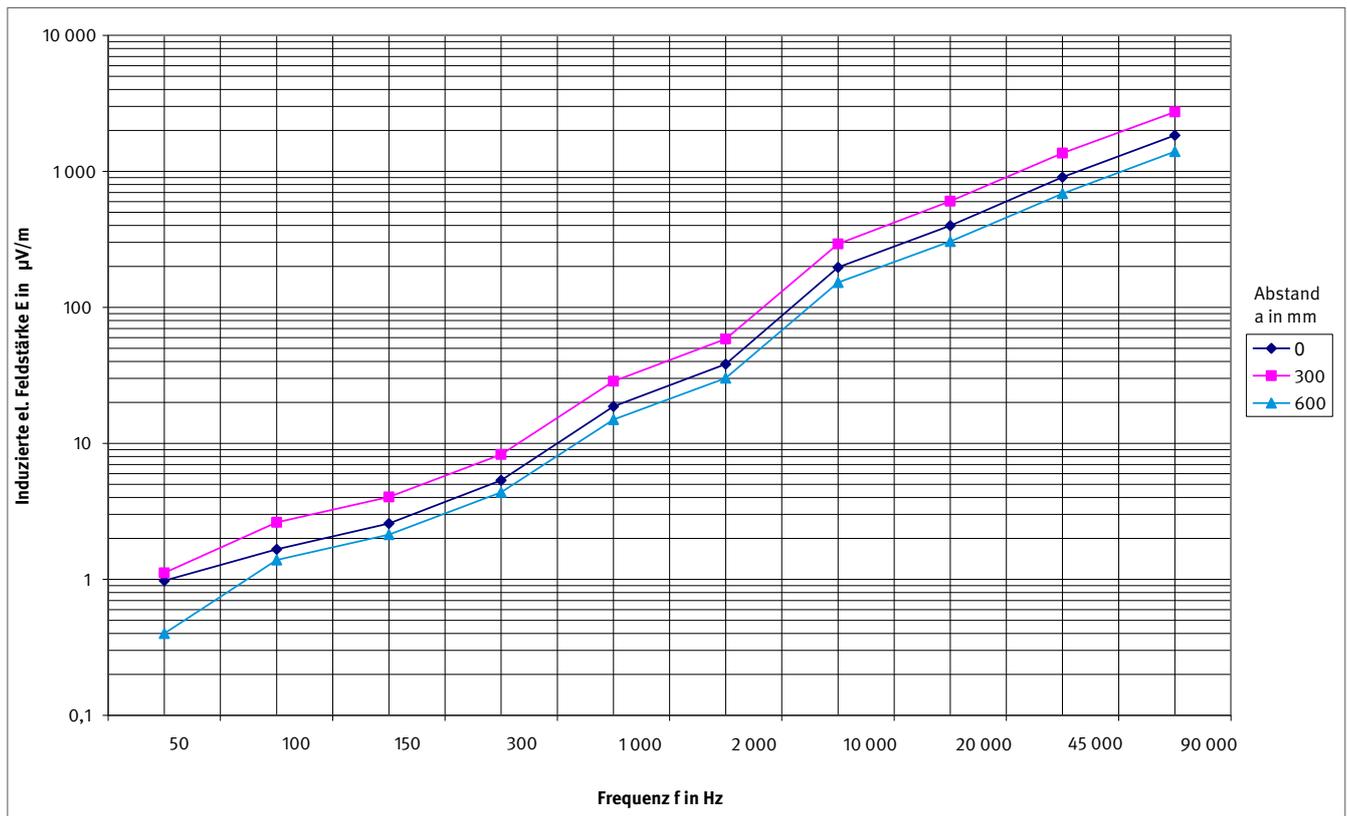


Abbildung 9:

Verlauf der induzierten elektrischen Feldstärke in Abhängigkeit vom Betrachtungsort im Körpermodell und dem seitlichen Abstand des Körpermodells zur Zangenfenstermitte bei einem äußeren magnetischen Feld mit der Frequenz $f = 50$ Hz und einem Schweißstrom mit einer Stromstärke von 1 A

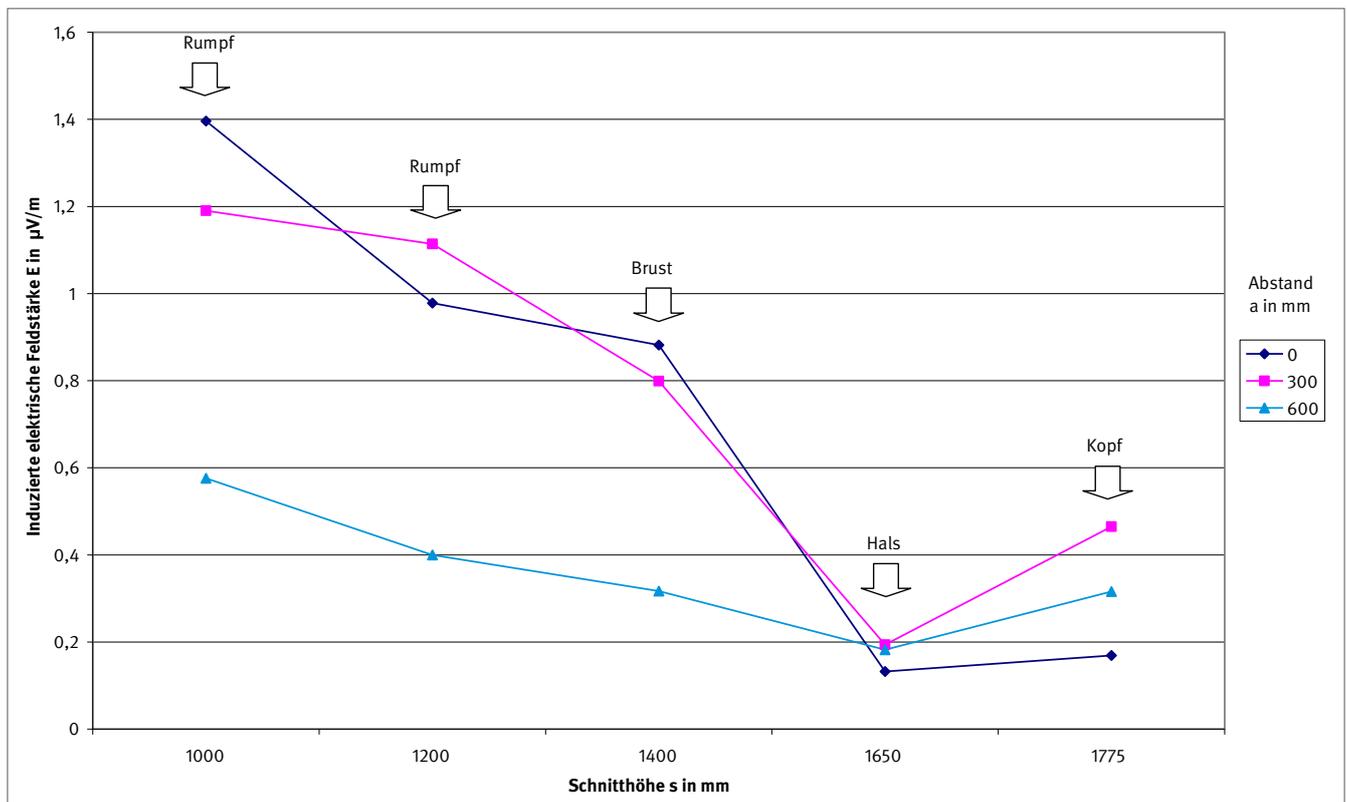
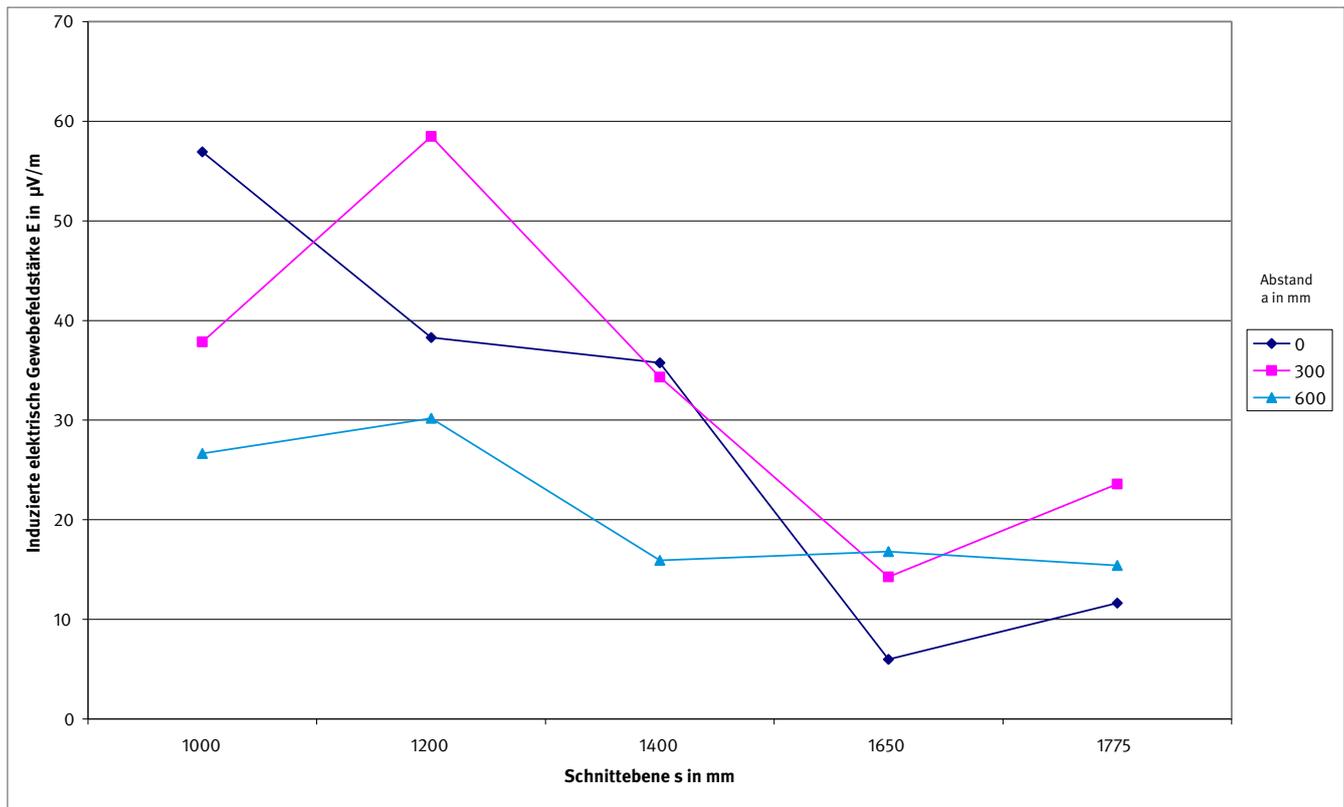


Abbildung 10:

Verlauf der induzierten elektrischen Feldstärke in Abhängigkeit vom Betrachtungsort im Körpermodell und dem seitlichen Abstand des Körpermodells zur Zangenfenstermitte bei einem äußeren magnetischen Feld mit der Frequenz $f = 2\,000\text{ Hz}$ und einem Schweißstrom mit einer Stromstärke von 1 A



Die in den Abbildungen 9 und 10 dargestellten Verläufe der elektrischen Feldstärke in Abhängigkeit von der betrachteten Schnitthöhe im Körpermodell und dem Abstand zwischen dem Körpermodell und der Mitte des Zangenfensters für die Frequenzen 50 und $2\,000\text{ Hz}$ sind prinzipiell gleich. Sie unterscheiden sich nur in der Höhe der Feldstärke.

Ausgehend von der Schnitthöhe $1\,000\text{ mm}$ nimmt die elektrische Feldstärke bis zur Schnitthöhe $1\,650\text{ mm}$ nahezu kontinuierlich ab und steigt dann wieder geringfügig in der Schnitthöhe $1\,775\text{ mm}$ an. Abweichend hiervon ist der Verlauf der induzierten Feldstärke in Abbildung 10 bei einem seitlichen Abstand von 300 mm : Hier nimmt die elektrische Feldstärke im Gewebe zunächst bis zur Schnitthöhe $1\,200\text{ mm}$ zu und fällt dann ebenfalls bis zur Schnitthöhe $1\,650\text{ mm}$ ab. Je nach Position des Zangenfensters zum Körpermodell unterscheiden sich die Werte der elektrischen Feldstärken innerhalb des Körpermodells zwischen den verschiedenen Simulationsebenen um bis zu einer Zehnerpotenz.

6.6.1.2 Änderungen der Position des Körpermodells senkrecht zur Zangenfenstermitte

In den Abbildungen 11a bis 11e sind für verschiedene Schnittebenen (Abbildung 6) die berechneten Spitzenwerte der induzierten elektrischen Feldstärke im Gewebe in Abhängigkeit vom Abstand des Körpermodells zur Mitte des Zangenfensters dargestellt. Die Abbildungen zeigen die Spitzenwerte für die Frequenzen 50 , 100 , 150 , 300 , $1\,000$, $2\,000$, $10\,000$ und $20\,000\text{ Hz}$ sowie 45 und 90 kHz in der Grundstellung des Körpermodells

(Abstand 0 mm) und für die Abstände 100 , 200 und 400 mm (Abstand senkrecht gemessen zwischen der Zangenfenstermitte und der Vorderseite des Körpermodells). Alle Kurven zeigen eine Abnahme der induzierten Spitzenwerte der elektrischen Gewebefeldstärke mit größer werdendem Abstand. Über die betrachtete Strecke (400 mm) reduziert sich der Spitzenwert der elektrischen Feldstärke im Gewebe kontinuierlich. Je nach Schnittebene nimmt die induzierte elektrische Feldstärke bei den untersuchten Frequenzen um den Faktor 2 bis 7 ab. Die größte Abnahme tritt in den Schnittebenen $1\,000$, $1\,200$ und $1\,400\text{ mm}$ auf. In den Schnittebenen $1\,650$ und $1\,775\text{ mm}$ ist die Abnahme der induzierten Feldstärke wesentlich geringer.

Der typische Verlauf des induzierten elektrischen Feldes im Gewebe ist in Abhängigkeit von der Frequenz des äußeren magnetischen Feldes an der Punktschweißzange unter Berücksichtigung der in Abbildung 11a dargestellten Ergebnisse für die Schnitthöhe $1\,000\text{ mm}$ und die untersuchten Abstände 0 , 100 , 200 und 400 mm in Abbildung 12 dargestellt.

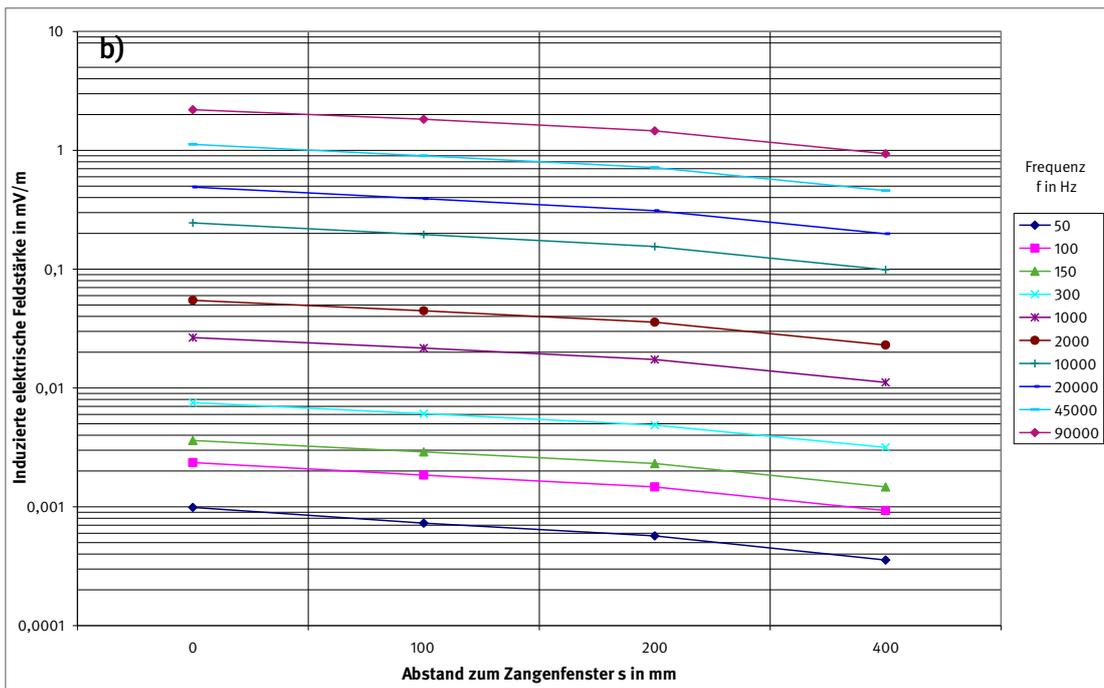
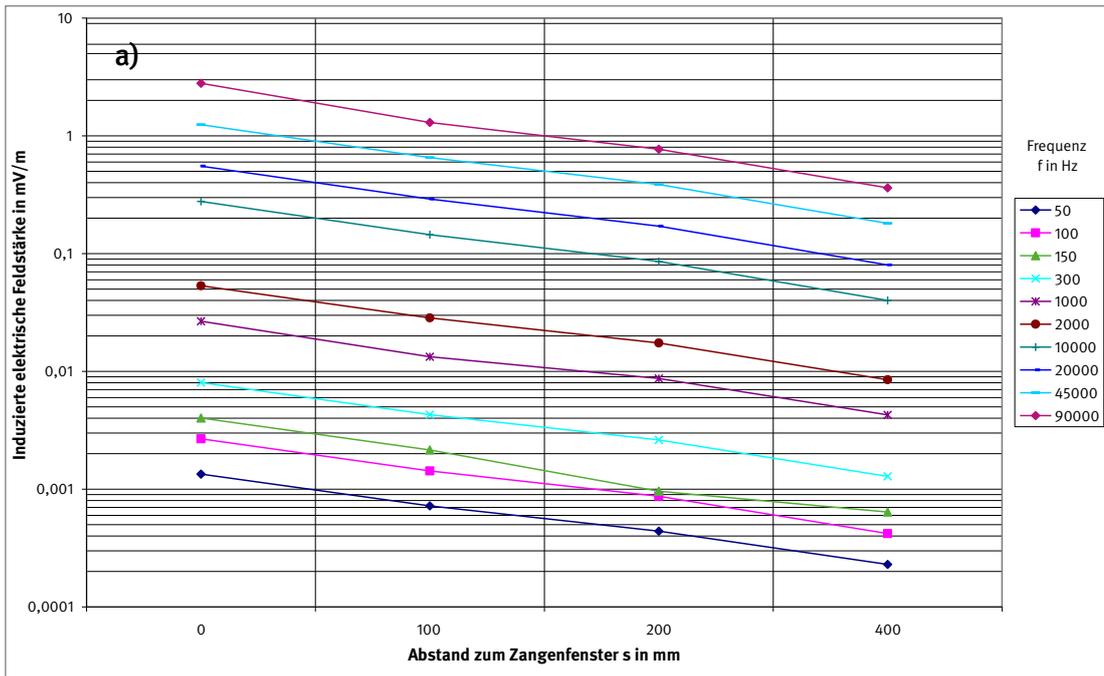
Die Verläufe des induzierten elektrischen Feldes in Abbildung 12 zeigen in Übereinstimmung mit dem Induktionsgesetz eine mit der Frequenz nahezu proportionale Zunahme der elektrischen Feldstärke. Die höchsten elektrischen Feldstärken im Gewebe treten daher, wie in Abbildung 12 dargestellt, bei der höchsten untersuchten Frequenz $90\,000\text{ Hz}$ des äußeren magnetischen Feldes auf. In der Grundstellung des Körpermodells beträgt beispielsweise der Spitzenwert der induzierten elektrischen Feldstärke $0,0027\text{ mV/m}$ bei 100 Hz und $2,8\text{ mV/m}$ bei $90\,000\text{ Hz}$. Das bedeutet, dass sich im Frequenzbereich zwischen 100 Hz

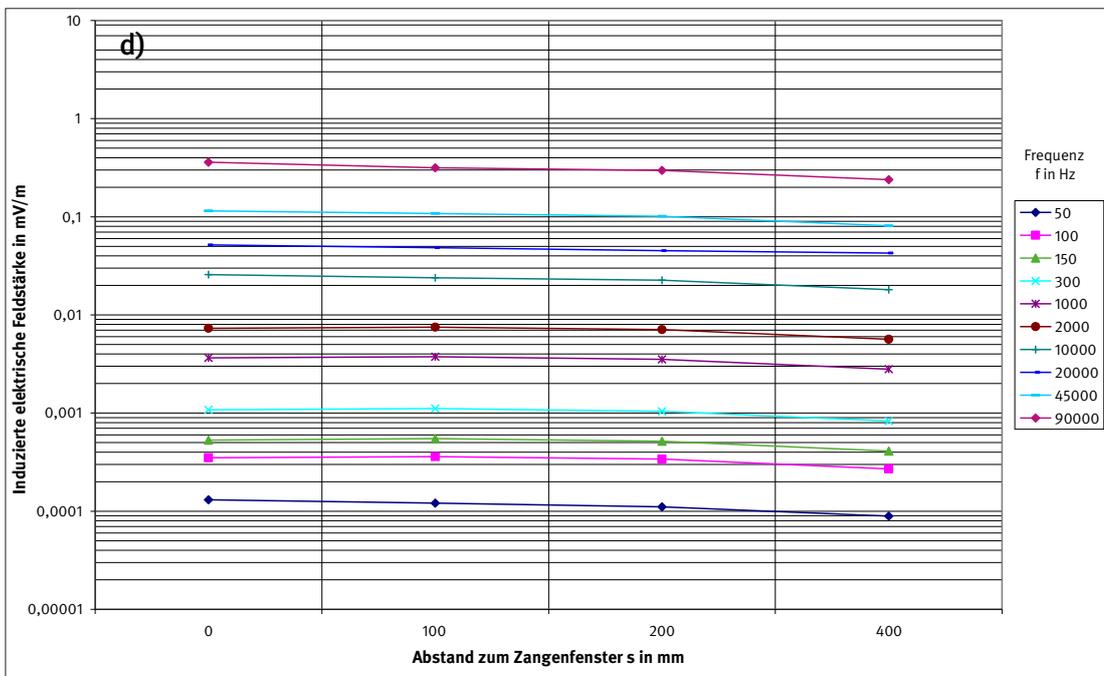
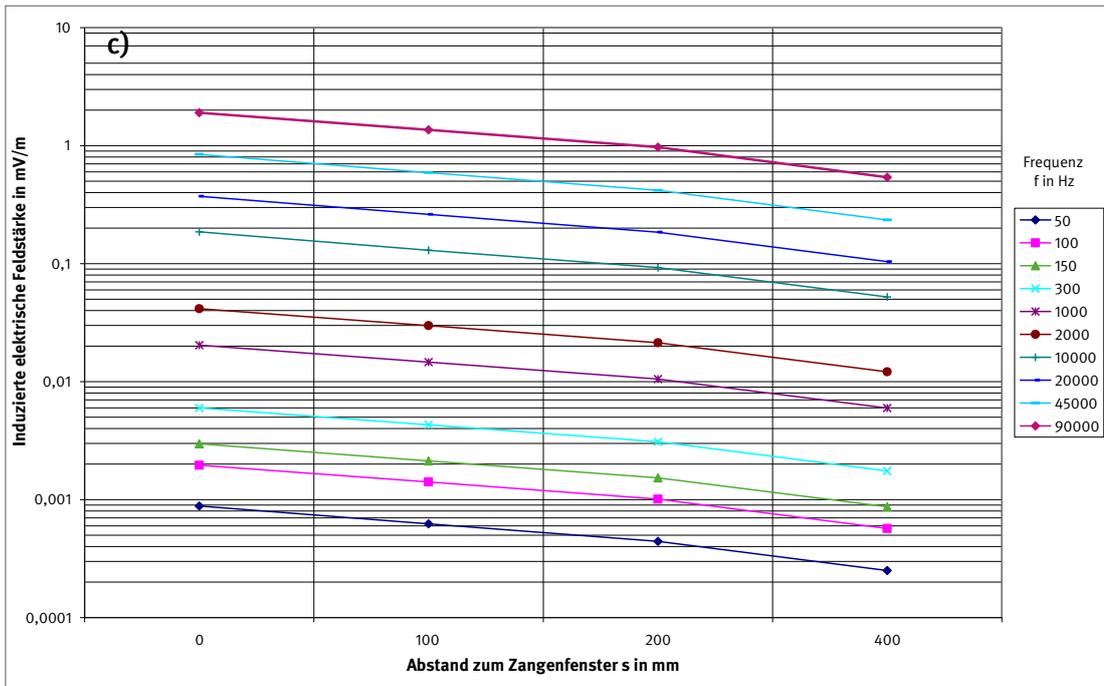
und 90 kHz die Feldstärke etwa um drei Zehnerpotenzen ändert. Ferner zeigt Abbildung 12 den Einfluss des Abstandes zwischen MPZ und Körpermodell auf die induzierte elektrische Feldstärke im Gewebe. Mit zunehmendem Abstand nimmt die induzierte elektrische Feldstärke ab. Ausgehend von der Grundstellung des Körpermodells beträgt die induzierte elektrische Feldstärke bei einem Abstand von 400 mm (senkrecht zur Grundstellung) nur etwa 15 % des Wertes in der Grundstellung.

Die Änderung der induzierten elektrischen Feldstärke im Gewebe in Abhängigkeit vom senkrechten Abstand des Kör-

permodells zur Zangenfenstermitte und dem Betrachtungsort (Schnittebenen) im Körpermodell ist in den Abbildungen 13 und 14 dargestellt. Abbildung 13 zeigt für die verschiedenen Schnittebenen den Verlauf der Spitzenwerte der induzierten elektrischen Feldstärke im Gewebe in Abhängigkeit vom senkrechten Abstand zwischen der MPZ und dem Körpermodell. Abbildung 14 zeigt den typischen Verlauf der induzierten elektrischen Feldstärke im Gewebe in Abhängigkeit von den untersuchten Schnittebenen und dem senkrechten Abstand zwischen MPZ und dem Körpermodell.

Abbildung 11: Verlauf der induzierten elektrischen Feldstärke in Abhängigkeit vom Abstand des Körpermodells senkrecht zur Zangenfenstermitte bei den für Mittelfrequenz-/Inverter-Punktschweißzangen typischen Frequenzen in den untersuchten Schnitthöhen; a) Schnitthöhe 1000 mm, b) 1200 mm, c) 1400 mm, d) 1650 mm, e) 1775 mm





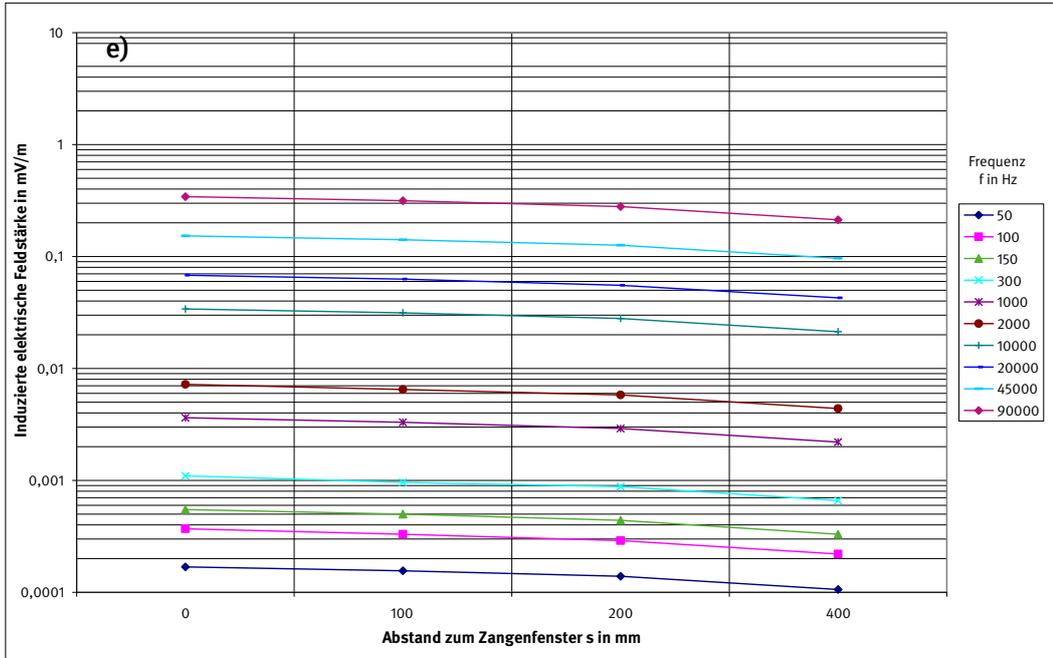


Abbildung 12: Spitzenwert der induzierten elektrischen Feldstärke in Abhängigkeit vom Abstand des Körper-modells zum Zangenfenster bei den typischen Frequenzen des Schweißstroms bei einer Stromstärke von 1 A für eine Schnitthöhe von 1000 mm

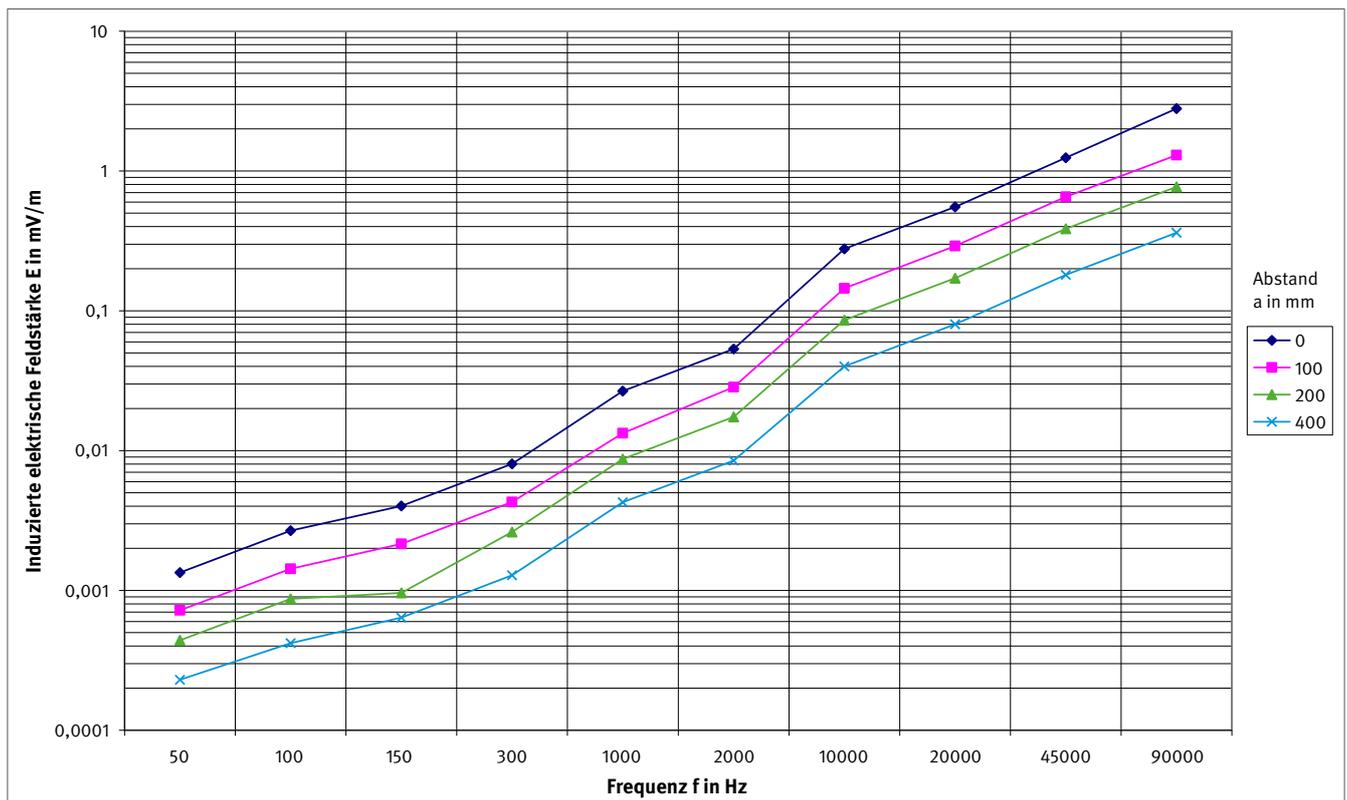


Abbildung 13:

Verlauf der induzierten elektrischen Feldstärke in Abhängigkeit vom senkrechten Abstand des Körpermodells zur Zangenfenstermitte für die verschiedenen Positionen bei einem äußeren magnetischen Feld mit der Frequenz $f = 50$ Hz und einem Schweißstrom mit einer Stromstärke von 1 A

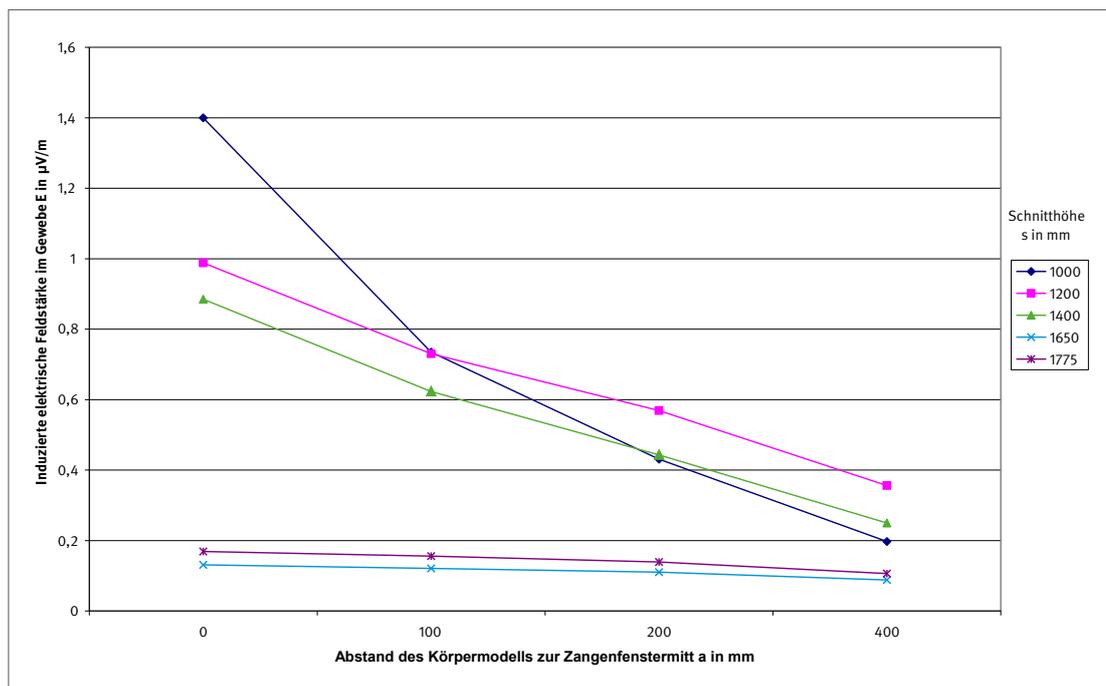
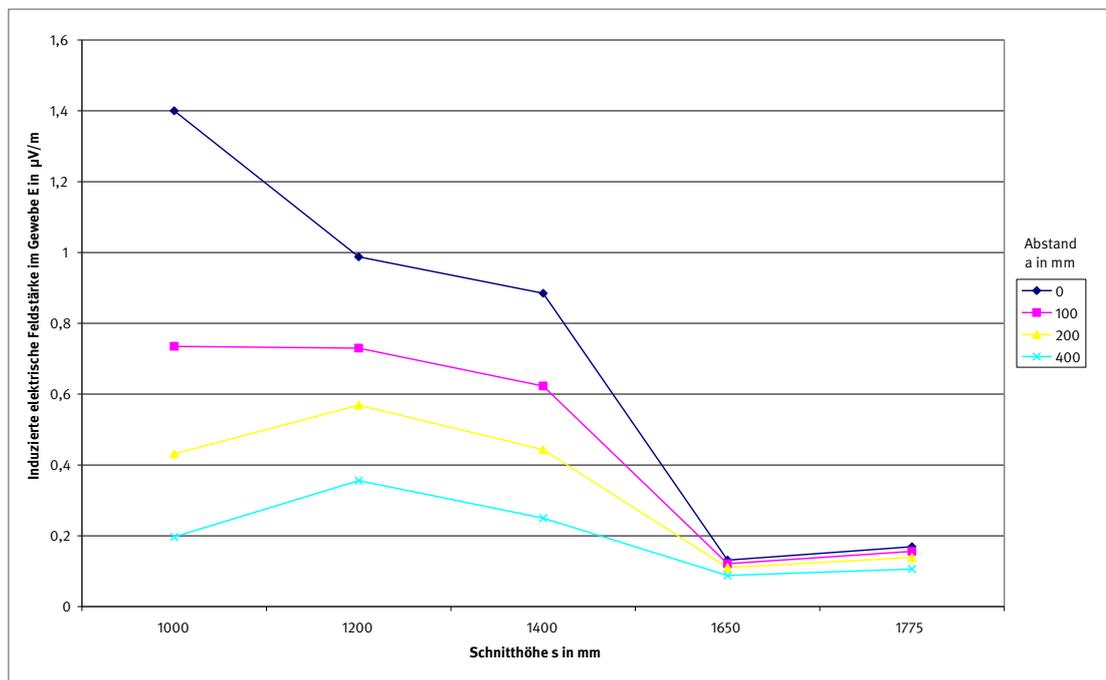


Abbildung 14:

Verlauf der induzierten elektrischen Feldstärke im Gewebe in Abhängigkeit von den untersuchten Schnittebenen bei einem äußeren magnetischen Feld mit der Frequenz $f = 50$ Hz und einem Schweißstrom mit einer Stromstärke von 1 A



6.6.1.3 Zusammenfassung der Ergebnisse für die MPZ mit dem 150-mm-Zangenfenster

Die Ergebnisse zeigen, dass die höchsten Spitzenwerte der induzierten elektrischen Feldstärke im Gewebe bei einer seitlichen Position des Körpermodells zur Grundstellung parallel zum Zangenfenster auftreten (siehe Abbildung 15). Die höchsten Werte des induzierten elektrischen Feldes im Körpermodell

wurden bei einem seitlichen Abstand von 300 mm zur Zangenfenstermitte ermittelt (Abbildung 15).

Für die Position des Körpermodells sind die einzelnen Ergebnisse in Abbildung 16 dargestellt. Die Abbildung zeigt den Verlauf der Höchstwerte des induzierten elektrischen Feldes für die verschiedenen Schnitthöhen in Abhängigkeit von der Frequenz bezogen auf einen Schweißstrom mit einer Stromstärke von 1 A.

Abbildung 15:
Position der Punktschweißzange vor dem Körpermodell, bei der die höchste Exposition ermittelt wurde

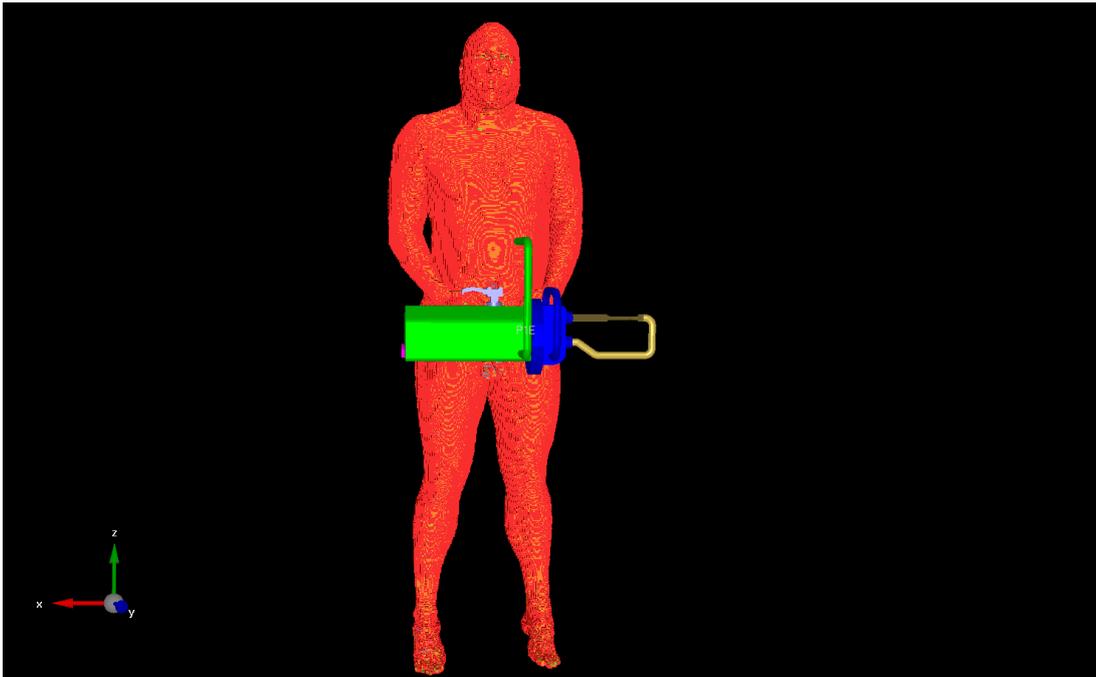
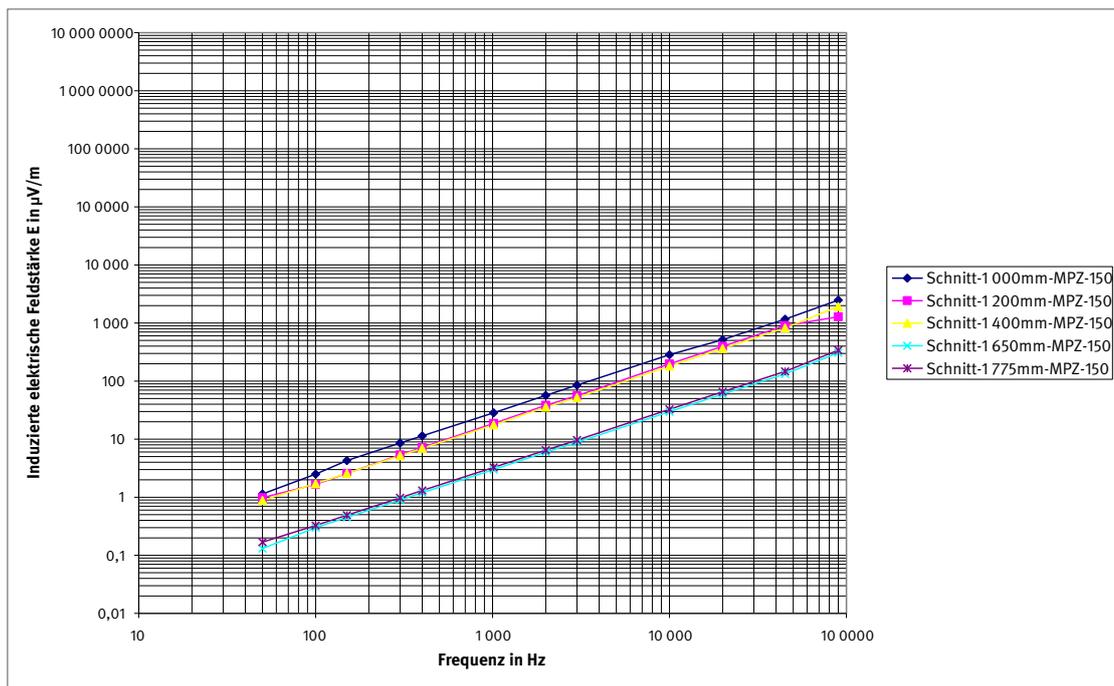


Abbildung 16:
Höchstwerte des induzierten elektrischen Feldes in den untersuchten Schnittebenen des Körpermodells in Abhängigkeit von der Frequenz für eine Schweißstromstärke von 1 A



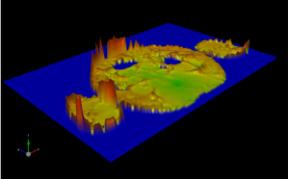
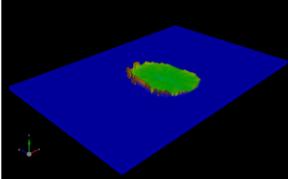
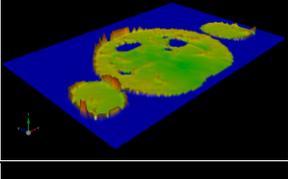
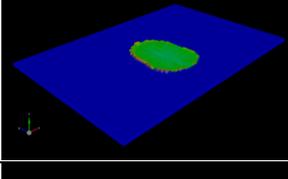
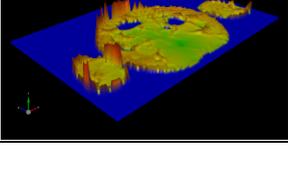
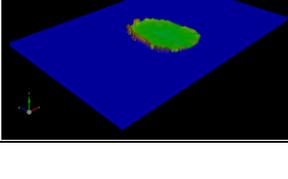
Die höchsten induzierten elektrischen Feldstärken treten im Gewebe des stehenden Körpermodells in der transversalen Schnittebene bei einer Schnitthöhe von 1000 mm über dem Boden auf. Bei den Schnitthöhen 1200 und 1400 mm sind die ermittelten Höchstwerte etwa um den Faktor 2 niedriger. Noch niedriger sind die induzierten Feldstärken in den Schnitthöhen 1650 und 1775 mm. Gegenüber den Werten in der Schnitthöhe 1000 mm tritt bei diesen Schnitthöhen eine Reduktion um den Faktor 10 auf.

6.6.2 Punktschweißzange mit dem 700-mm-Zangenfenster

Aufbauend auf den Ergebnissen aus Abschnitt 6.6.1 wurden die Ergebnisse der Expositionsrechnungen zunächst für die Grundstellung des Körpermodells ausgewertet. Einen Überblick über die berechnete Verteilung des induzierten elektrischen Feldes in den Schnitthöhen 1200 und 1775 mm des Gewebes im Körpermodell geben die Abbildungen in Tabelle 5.

Tabelle 5:
Verteilung der induzierten elektrischen Felder im Gewebe des Körpermodells in der Grundstellung an der Mittelfrequenz-Punktschweißzange mit dem 700-mm-Zangenfesten bei einer Schweißstromstärke von 1 A in den Schnitthöhen 1200 mm und 1775 mm

Frequenz in Hz	Schnitthöhe		Legende
	1 200 mm	1 775mm	
50			<p>Legend v-opt-00001-Menschxvar=0/sub-1/f_dump.dbx, f</p> <p>ACD Maxima in Animation Bounding Box, Average = 0.0 f= 50.000 Hz MAX ACD = 106.200 uV/m MAX POS -0.348 -0.538 0.199, ORIGINAL</p> <ul style="list-style-type: none"> 100.000 uV/m (+0.00 dB) 10.000 uV/m (-20.00 dB) 1000.000 nV/m (-40.00 dB) 100.000 nV/m (-60.00 dB) 10.000 nV/m (-80.00 dB) 1000.000 pV/m (-100.00 dB)
100			<p>Legend v-opt-00001-Menschxvar=0/sub-1/f_dump.dbx, f</p> <p>ACD Maxima in Animation Bounding Box, Average = 0.0 f=100.000 Hz MAX ACD = 214.600 uV/m MAX POS -0.348 -0.538 0.199, ORIGINAL</p> <ul style="list-style-type: none"> 200.000 uV/m (+0.00 dB) 20.000 uV/m (-20.00 dB) 2.0000 uV/m (-40.00 dB) 200.000 nV/m (-60.00 dB) 20.000 nV/m (-80.00 dB) 2.0000 nV/m (-100.00 dB)
150			<p>Legend v-opt-00001-Menschxvar=0/sub-1/f_dump.dbx, f</p> <p>ACD Maxima in Animation Bounding Box, Average = 0.0 f=150.000 Hz MAX ACD = 323.600 uV/m MAX POS -0.348 -0.538 0.199, ORIGINAL</p> <ul style="list-style-type: none"> 300.000 uV/m (+0.00 dB) 30.000 uV/m (-20.00 dB) 3.0000 uV/m (-40.00 dB) 300.000 nV/m (-60.00 dB) 30.000 nV/m (-80.00 dB) 3.0000 nV/m (-100.00 dB)
300			<p>Legend v-opt-00001-Menschxvar=0/sub-1/f_dump.dbx, f</p> <p>ACD Maxima in Animation Bounding Box, Average = 0.0 f=300.000 Hz MAX ACD = 650.400 uV/m MAX POS -0.348 -0.538 0.199, ORIGINAL</p> <ul style="list-style-type: none"> 1.0000 mV/m (+0.00 dB) 100.000 uV/m (-20.00 dB) 10.0000 uV/m (-40.00 dB) 1000.000 nV/m (-60.00 dB) 100.000 nV/m (-80.00 dB) 10.0000 nV/m (-100.00 dB)
1000			<p>Legend v-opt-00001-Menschxvar=0/sub-1/f_dump.dbx, f</p> <p>ACD Maxima in Animation Bounding Box, Average = 0.0 f= 1.000 kHz MAX ACD = 2.178 mV/m MAX POS -0.348 -0.538 0.199, ORIGINAL</p> <ul style="list-style-type: none"> 2.0000 mV/m (+0.00 dB) 200.000 uV/m (-20.00 dB) 20.0000 uV/m (-40.00 dB) 2.0000 nV/m (-60.00 dB) 200.000 nV/m (-80.00 dB) 20.0000 nV/m (-100.00 dB)
2 000			<p>Legend v-opt-00001-Menschxvar=0/sub-1/f_dump.dbx, f</p> <p>ACD Maxima in Animation Bounding Box, Average = 0.0 f= 2.000 kHz MAX ACD = 4.362 mV/m MAX POS -0.348 -0.538 0.199, ORIGINAL</p> <ul style="list-style-type: none"> 5.0000 mV/m (+0.00 dB) 500.000 uV/m (-20.00 dB) 50.0000 uV/m (-40.00 dB) 5.0000 uV/m (-60.00 dB) 500.000 nV/m (-80.00 dB) 50.0000 nV/m (-100.00 dB)
10 000			<p>Legend v-opt-00001-Menschxvar=0/sub-1/f_dump.dbx, f</p> <p>ACD Maxima in Animation Bounding Box, Average = 0.0 f= 10.000 kHz MAX ACD = 21.840 mV/m MAX POS -0.348 -0.538 0.199, ORIGINAL</p> <ul style="list-style-type: none"> 50.0000 mV/m (+0.00 dB) 5.0000 mV/m (-20.00 dB) 500.000 uV/m (-40.00 dB) 50.0000 uV/m (-60.00 dB) 5.0000 uV/m (-80.00 dB) 500.000 nV/m (-100.00 dB)

Frequenz in Hz	Schnitthöhe		Legende
	1 200 mm	1 775 mm	
20 000			Legend v-opt-00001-Menschxvar=0/sub-1/f_dump.dbx, f ACD Maxima in Animation Bounding Box, Average = 0.0 f= 20.000 kHz MAX ACD = 43.700 mV/m MAX POS -0.348 -0.538 0.199, ORIGINAL 100.000 mV/m (+0.00 dB) 10.000 mV/m (-20.00 dB) 1.000 mV/m (-40.00 dB) 100.000 uV/m (-60.00 dB) 10.000 uV/m (-80.00 dB) 1000.000 pV/m (-100.00 dB)
45 000			Legend v-opt-00001-Menschxvar=0/sub-1/f_dump.dbx, f ACD Maxima in Animation Bounding Box, Average = 0.0 f= 45.000 kHz MAX ACD = 97.980 mV/m MAX POS -0.348 -0.538 0.199, ORIGINAL 500.000 mV/m (+0.00 dB) 50.000 mV/m (-20.00 dB) 5.000 mV/m (-40.00 dB) 500.000 uV/m (-60.00 dB) 50.000 uV/m (-80.00 dB) 5.000 uV/m (-100.00 dB)
90 000			Legend v-opt-00001-Menschxvar=0/sub-1/f_dump.dbx, f ACD Maxima in Animation Bounding Box, Average = 0.0 f= 90.000 kHz MAX ACD = 192.400 mV/m MAX POS -0.348 -0.538 0.199, ORIGINAL 500.000 mV/m (+0.00 dB) 50.000 mV/m (-20.00 dB) 5.000 mV/m (-40.00 dB) 500.000 uV/m (-60.00 dB) 50.000 uV/m (-80.00 dB) 5.000 uV/m (-100.00 dB)

Die in den Abbildungen der Tabelle 5 aufgeführten Verläufe der elektrischen Feldstärke sind den Verläufen in den Abbildungen der Tabelle 4 ähnlich. Die höchsten induzierten Feldstärken treten auch hier im Körpermodell auf der dem Zangenfenster zugewandten Seite in den äußeren Gewebeschichten sowie zwischen sich gegenüberliegenden Körperteilen auf, beispielsweise zwischen Rumpf und Armen. Im Gewebe unter der Haut sind die maximalen Werte der elektrischen Feldstärke niedriger

als in der Haut. Abbildung 17 zeigt hierzu den Verlauf der induzierten elektrischen Feldstärke bei einem transversalen Schnitt in 1000 mm Höhe über Boden durch das Körpermodell. Der Vergleich der Abbildungen 17 (links + rechts) bestätigt dies. Einen Überblick über die Höhe der elektrischen Feldstärke im Gewebe bei unterschiedlichen seitlichen Abständen des Körpermodells zur Mitte des Zangenfensters in Richtung Netzanschluss gibt Abbildung 18.

Abbildung 17:

Verlauf der elektrischen Feldstärke in der Grundstellung des Körpermodells an der MPZ mit dem 700-mm-Zangenfenster bei einem transversalen Schnitt durch das Körpermodell in 1000 mm über dem Boden bei einem 50-Hz-Schweißstrom mit der Stromstärke von 1 A;

a) links: Simulationsebene 1000 mm, Körpermodell mit Haut, rechts: Simulationsebene 1000 mm, Körpermodell ohne Haut

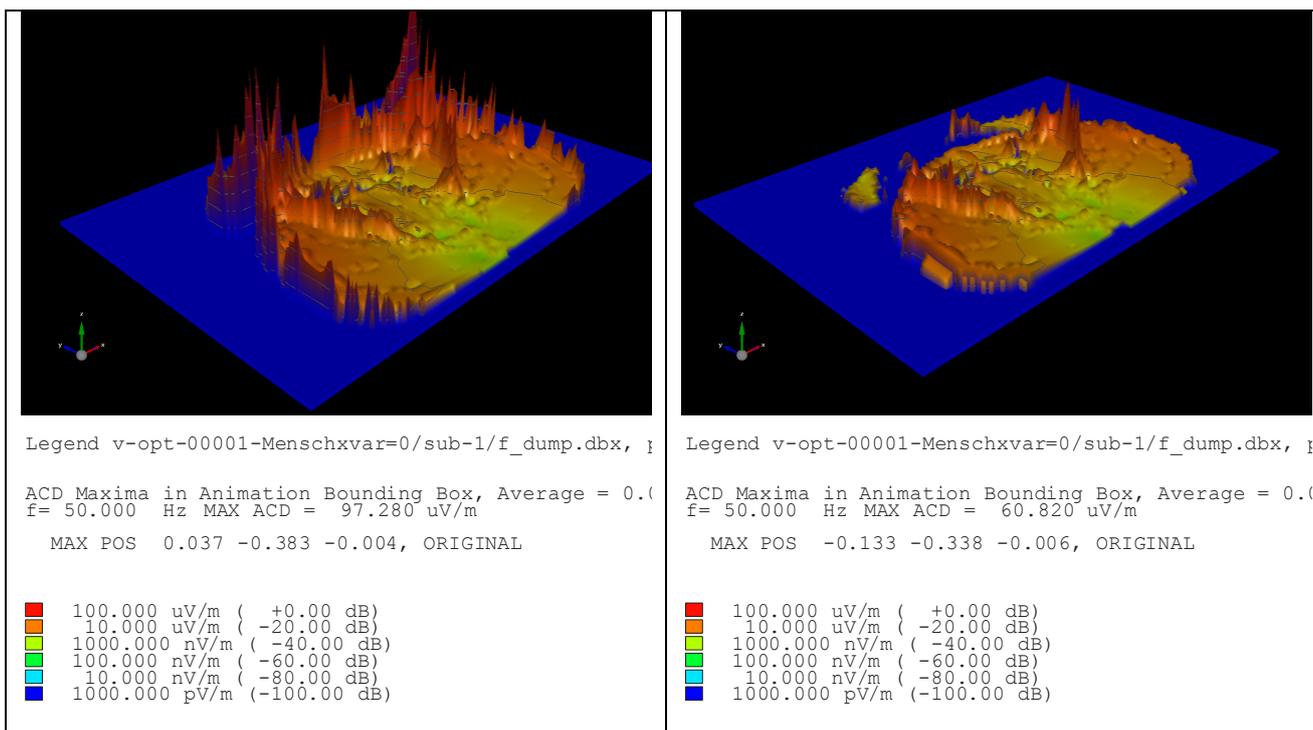
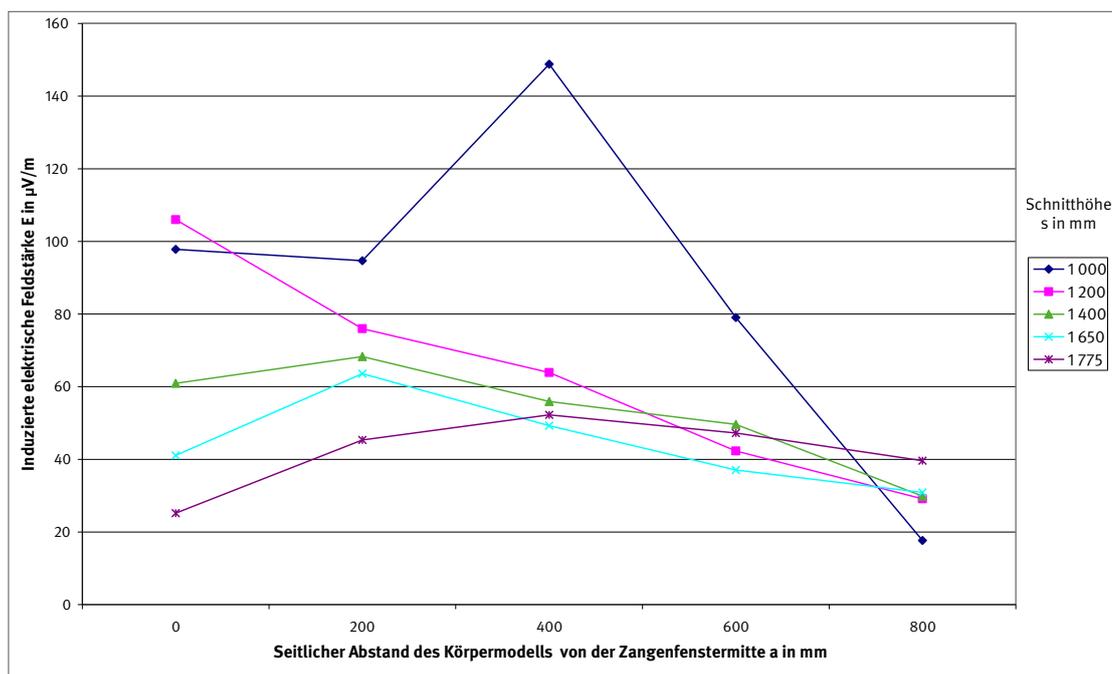


Abbildung 18:

Verlauf des Spitzenwertes der induzierten elektrischen Feldstärke in Abhängigkeit vom seitlichen Abstand des Körpermodells zur Mitte des Zangenfensters bei der Frequenz 50 Hz und einer Schweißstromstärke von 1 A für die Simulationsebenen mit den Schnitthöhen 1000, 1200, 1400, 1650 und 1775 mm.



In der Simulationsebene mit den Schnitthöhen 1000 und 1775 mm wird der maximale Spitzenwert der elektrischen Feldstärke bei 400 mm seitlichem Abstand des Körpermodells zur Mitte des Zangenfensters induziert. Die in den Simulationsebenen ermittelten Spitzenwerte der elektrischen Feldstärke weisen jedoch keinen übereinstimmenden Verlauf auf. In den verschiedenen Simulationsebenen nimmt die elektrische Feldstärke zwar tendenziell mit zunehmendem Abstand ab; generell gilt dies jedoch nur für Abstände $s > 400$ mm. Bezogen auf die Grundstellung der MPZ haben die induzierten elektrischen Felder im Abstand von 800 mm (seitlich, in Richtung Netzanschluss, parallel zur Mitte des Zangenfensters) in den Simulationsebenen mit den Schnitthöhen 1000, 1200, 1400 und 1650 mm die kleinsten Feldstärkewerte. Gegenüber den Werten in der Grundstellung des Körpermodells reduzieren sich die

ermittelten Höchstwerte der induzierten elektrischen Feldstärke je nach betrachteter Schnitthöhe auf 66 bis 20 % des Ausgangswertes. In der Grundstellung des Körpermodells wird in der Simulationsebene mit der Schnitthöhe 1200 mm die höchste elektrische Feldstärke induziert.

Die unterschiedlichen Expositionen in den Simulationsebenen sind auf die konstruktiven Gegebenheiten an der MPZ zurückzuführen. Wie die Abbildungen 19 und 20 zeigen, treten bei einer seitlichen Änderung des Körpermodells in den verschiedenen Simulationsebenen unterschiedliche Abstände zwischen der MPZ und dem Körpermodell auf. Das hat zur Folge, dass die Exposition in den verschiedenen Simulationsebenen des Körpermodells je nach Position des Modells an der MPZ unterschiedlich ist.

Abbildung 19:

Körpermodell an der MPZ bei einem seitlichen Abstand von 400 mm zur Mitte des Zangenfensters in Draufsicht

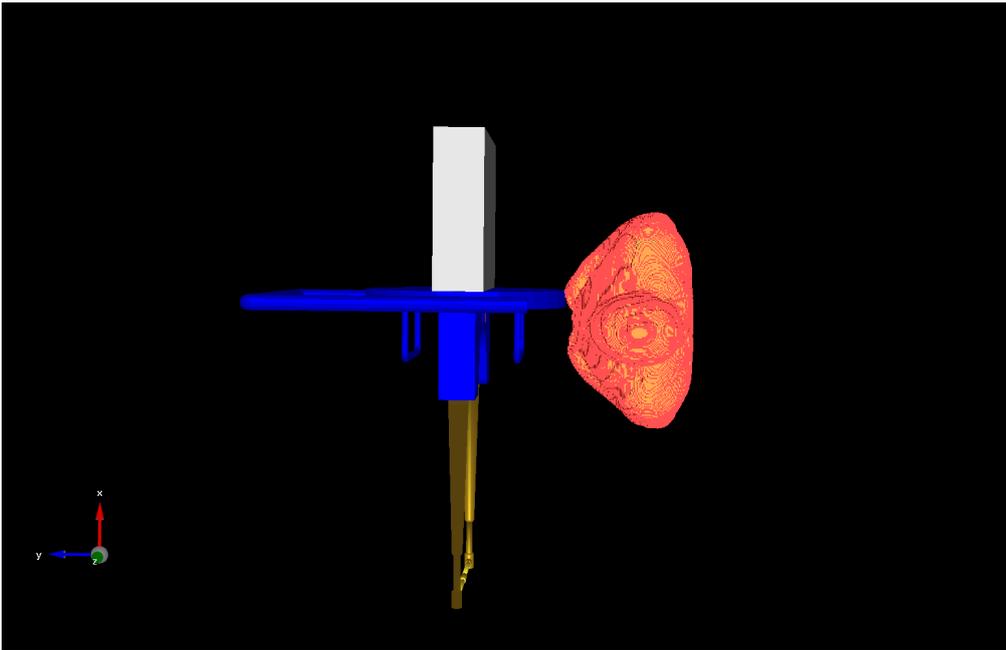
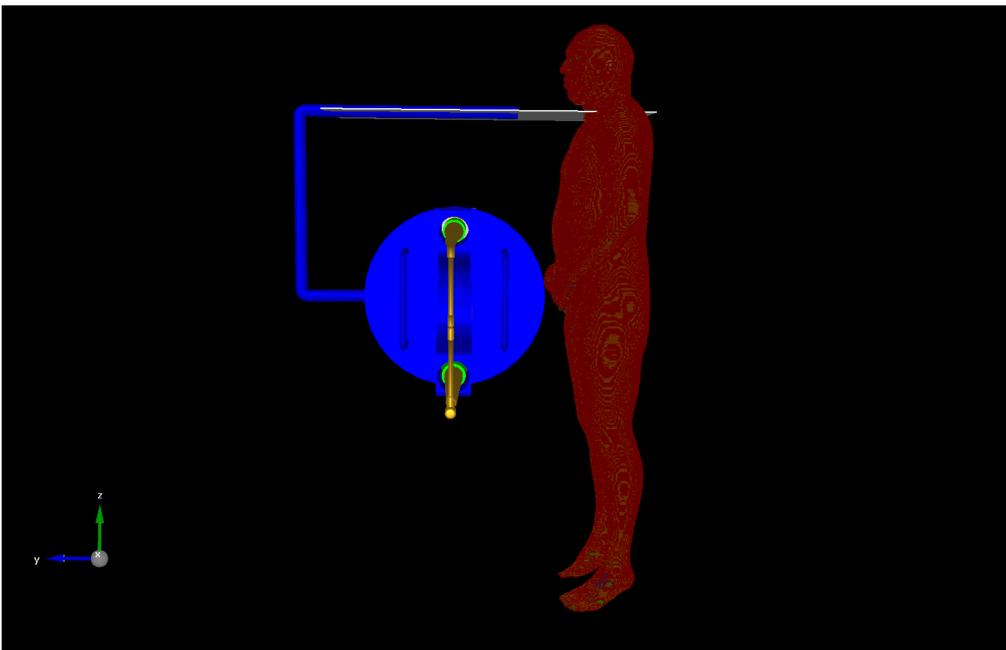


Abbildung 20:

Körpermodell an der MPZ bei einem seitlichen Abstand von 400 mm zur Mitte des Zangenfensters in Seitenansicht



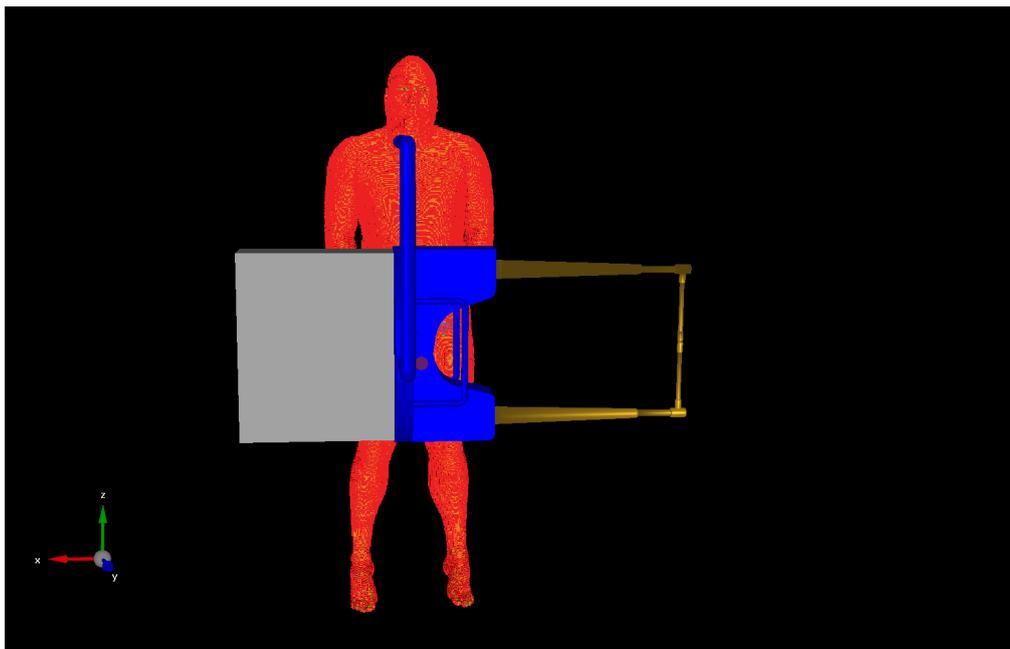
6.6.3 Zusammenfassung

Die Ergebnisse zeigen, dass die höchsten Spitzenwerte der induzierten elektrischen Feldstärke im Gewebe bei unterschiedlichen seitlichen Positionen des Körpermodells an der Mittelfrequenz-Punktschweißzange auftreten. Die höchsten Werte des

induzierten elektrischen Feldes im Körpermodell wurden bei einem seitlichen Abstand von 400 mm zur Zangenfenstermitte in der Simulationsebene mit der Schnitthöhe 1000 mm ermittelt. Abbildung 21 zeigt das Körpermodell vor der Punktschweißzange, bei der die höchste Exposition ermittelt wurde.

Abbildung 21:

Position der Punktschweißzange vor dem Körpermodell, bei der die höchste Exposition ermittelt wurde

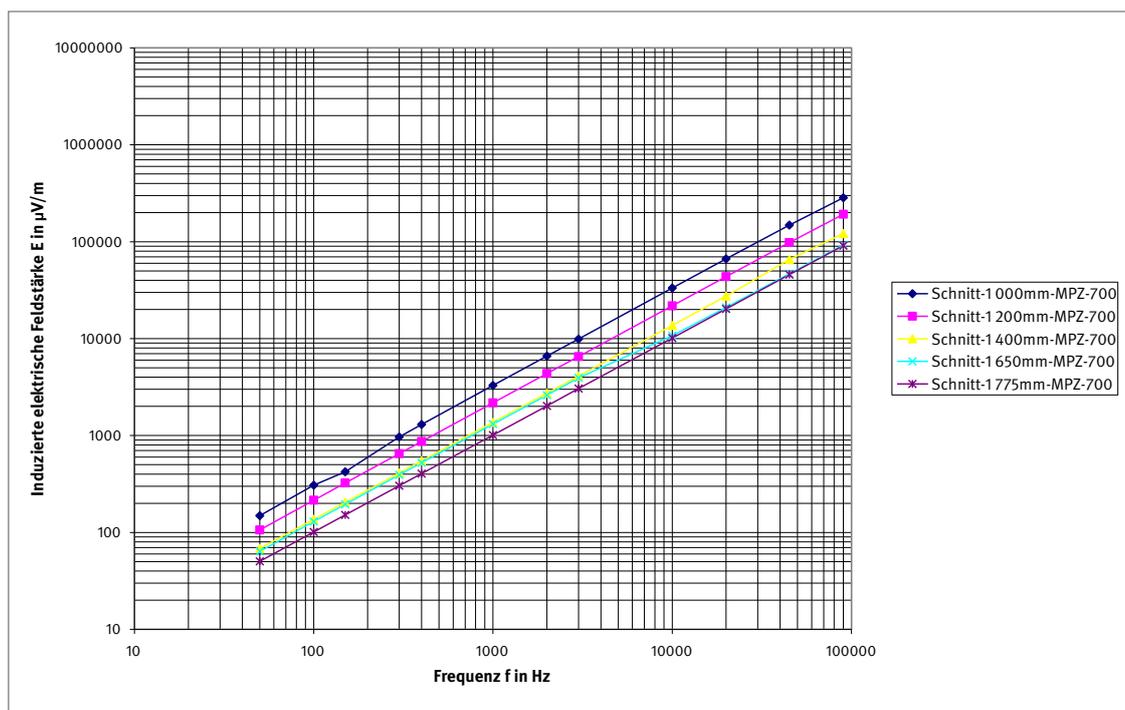


Die Ergebnisse für die maximalen Spitzenwerte in den Simulationsebenen sind in Abbildung 22 dargestellt. Diese zeigt den Verlauf der Spitzenwerte des induzierten elektrischen Feldes für die verschiedenen Schnitthöhen in Abhängigkeit von der Frequenz bezogen auf einen Schweißstrom mit einer Stromstärke von 1 A. Die höchsten induzierten elektrischen Feldstärken treten im Gewebe des stehenden Körpermodells in der transver-

salen Schnittebene bei einer Schnitthöhe von 1000 mm über dem Boden auf. Bei den anderen untersuchten Schnitthöhen (1200, 1400, 1650 und 1775 mm) sind die ermittelten Spitzenwerte etwa um den Faktor 2 (Schnitthöhe 1200 mm), 2,5 bzw. 3 niedriger.

Abbildung 22:

Maximale Spitzenwerte des induzierten elektrischen Feldes in den untersuchten Schnittebenen des Körpermodells in Abhängigkeit von der Frequenz für eine Schweißstromstärke von 1 A



7 Hinweise zum Schutz der Beschäftigten beim Arbeiten an handgeführten Mittelfrequenz-Punktschweißzangen

7.1 Grenzwerte

Die Wirkungen des äußeren niederfrequenten magnetischen Feldes im menschlichen Körper werden anhand von induzierten elektrischen Stromdichten und Feldstärken beschrieben.

Im Bereich statischer und niederfrequenter elektromagnetischer Felder induziert jede zeitliche Änderung der magnetischen Feldstärke im Gewebe eines Menschen eine elektrische Spannung. Damit verbunden sind stets ein elektrisches Feld und eine elektrische Feldstärke im Gewebe. Dabei ist es gleichgültig, ob die Ursache für Feldänderungen niederfrequente Wechselfelder (bis 100 kHz) oder Körperbewegungen in Gleichfeldern sind. Im menschlichen Körper können induzierte elektrische Felder Effekte wie Magnetophosphene (Lichtblitze) oder einen Verlust der Muskelkontrolle bewirken. Ob derartige Effekte tatsächlich auftreten, hängt von der Höhe der induzierten Feldstärke sowie von der Frequenz und der Einwirkungsdauer des magnetischen Feldes ab. Ausgelöst werden diese Effekte bei Erregung bzw. Stimulation von Nervenzellen des peripheren und/oder zentralen Nervensystems. Beobachtbar sind die Effekte, wenn die Feldstärke im Gewebe eine bestimmte Schwelle überschreitet. Da sich die Erregungs- bzw. Stimulationsschwellen der Nervenzellen des Zentralnervensystems (ZNS) von den Schwellen des peripheren Nervensystems (PNS) unterscheiden, müssen beide Systeme getrennt voneinander betrachtet werden.

Zur Vermeidung der Erregung bzw. Stimulation von Nervenzellen hat die ICNIRP in Zusammenarbeit mit der Weltgesundheitsorganisation (WHO) in den sogenannten ICNIRP-Guidelines „basic restrictions“ (Grenzwerte) vorgeschlagen [5]. Diese aus dem Jahr 1998 stammenden Guidelines sind u. a. die Grundlage für die Basiswerte in der Unfallverhütungsvorschrift BGV B11 [1]. Für eine Ganzkörperexposition werden für den Frequenzbereich $0 \text{ Hz} < f < 10 \text{ MHz}$, bezogen auf ein Flächenelement von 1 cm^2 , Werte für Stromdichten im Gewebe in Abhängigkeit von der Frequenz angegeben.

Neuere Empfehlungen zur Begrenzung der Exposition von zeitlich veränderlichen elektrischen und magnetischen Feldern im Frequenzbereich von 1 Hz bis 150 kHz enthalten die Guidelines der ICNIRP aus dem Jahr 2010 [2]. Die wesentliche Änderung gegenüber den Guidelines aus dem Jahr 1998 [5] ist der Wechsel bei den Grenzwerten von induzierten elektrischen Stromdichten hin zu induzierten elektrischen Feldstärken. Darüber hinaus werden nicht nur Grenzwerte für das ZNS, sondern auch für das PNS genannt. In Tabelle 6 sind die „basic restrictions“ der ICNIRP (Guidelines for limiting exposure to time-varying electric and magnetic fields U (1 Hz TO 100 kHz)) unter Guidelines „LF“ aufgeführt.

Tabelle 6:
Basiswerte der ICNIRP-Guidelines [2]

Frequenz	ICNIRP Guidelines „LF“	
	ZNS	PNS
> 0 bis 1 Hz	-	-
1 bis 4 Hz	$0,5 / f$	0,8
4 bis 10 Hz	$0,5 / f$	0,8
10 bis 25 Hz	0,05	0,8
25 bis 400 Hz	$2 \cdot 10^{-3}f$	0,8
400 bis 1 000 Hz	0,8	0,8
1 bis 3 kHz	0,8	0,8
3 bis 100 kHz	$2,7 \cdot 10^{-4}f$	$2,7 \cdot 10^{-4}f$
0,1 bis 10 MHz	$2,7 \cdot 10^{-4}f$	$2,7 \cdot 10^{-4}f$

f ist die Frequenz in Hz

7.2 Bewertung

Zur Bewertung der in Kapitel 6 ermittelten Ergebnisse werden im Folgenden die „basic restrictions“ der ICNIRP-Guidelines [2] herangezogen. Die in Tabelle 6 in Abhängigkeit von der Frequenz aufgeführten Werte für elektrische und magnetische Felder sind jedoch nur zeitliche Effektivwerte. Da die Erregung bzw. Stimulation der Nervenzellen von der Höhe der induzierten Feldstärke abhängt, müssen zur Beurteilung der Ergebnisse die Spitzenwerte zugrunde gelegt werden. Die Werte in Tabelle 6 sind daher zunächst in Spitzenwerte umzurechnen. Da sich die Werte in Tabelle 6 auf sinusförmige Größen beziehen, sind sie zur Bestimmung der Spitzenwerte mit dem Faktor 1,414 ($\sqrt{2}$) zu multiplizieren.

Bei der Bewertung der Exposition gegenüber Schweißströmen an Mittelfrequenz-Punktschweißzangen sind zur Beurteilung der Reiz- und Stimulationswirkungen auf Nervenzellen als relevante Größen die Spitzenwerte der elektrischen Feldstärke im Gewebe in Abhängigkeit von der Frequenz zu betrachten. Hierzu sind die in den Abschnitten 6.6.2, Abbildung 16, und 7.6.3, Abbildung 22, aufgeführten Höchstwerte der induzierten elektrischen Feldstärke zugrunde zu legen. Da diese Werte für einen Schweißstrom von 1 A berechnet wurden, wurde aufgrund der Proportionalität der Schweißstromstärke, der magnetischen Feldstärke und der induzierten elektrischen Feldstärke, die zulässige Schweißstromstärke in Abhängigkeit von der Frequenz aus dem Verhältnis

$$\frac{\text{Grenzwert}_{\text{ICNIRP 2010}}}{\text{im Gewebe bei einer Schweißstromstärke von 1 A}} = \text{Schweißstromstärke}_{\text{zulässig}}$$

bestimmt.

In den Abbildungen 23 und 24 sind den berechneten Höchstwerten der induzierten elektrischen Feldstärke der Abbildungen 16 und 22 die Spitzenwerte der „basic restrictions“ für das ZNS und PNS hinzugefügt.

Abbildung 23:
C-Bauform-Zangenfenster, 150 mm

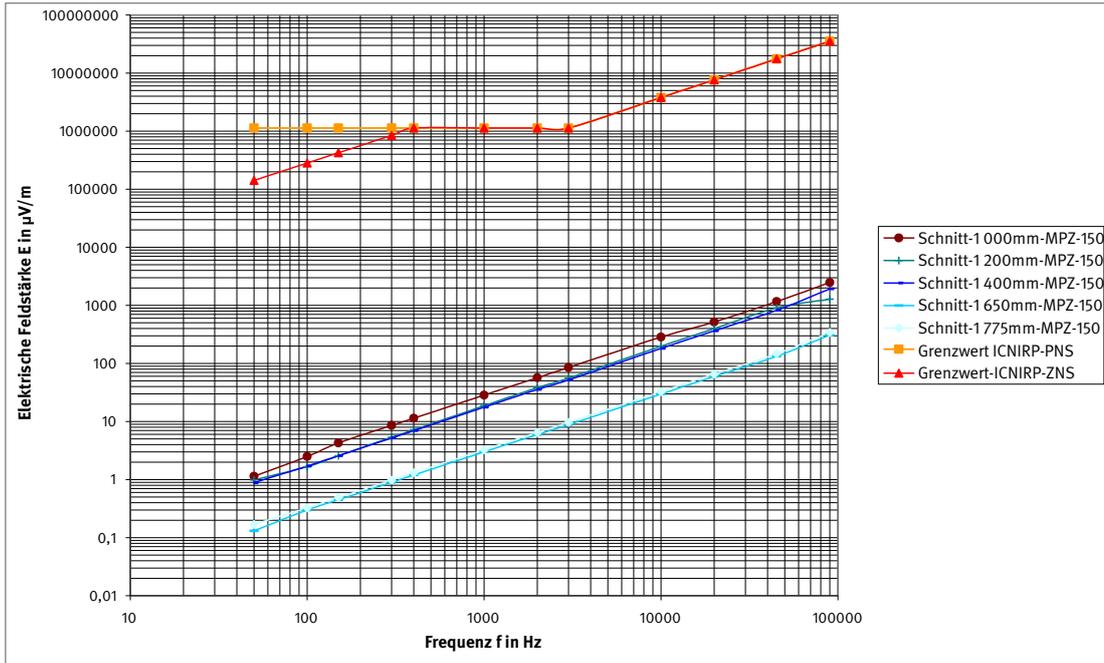
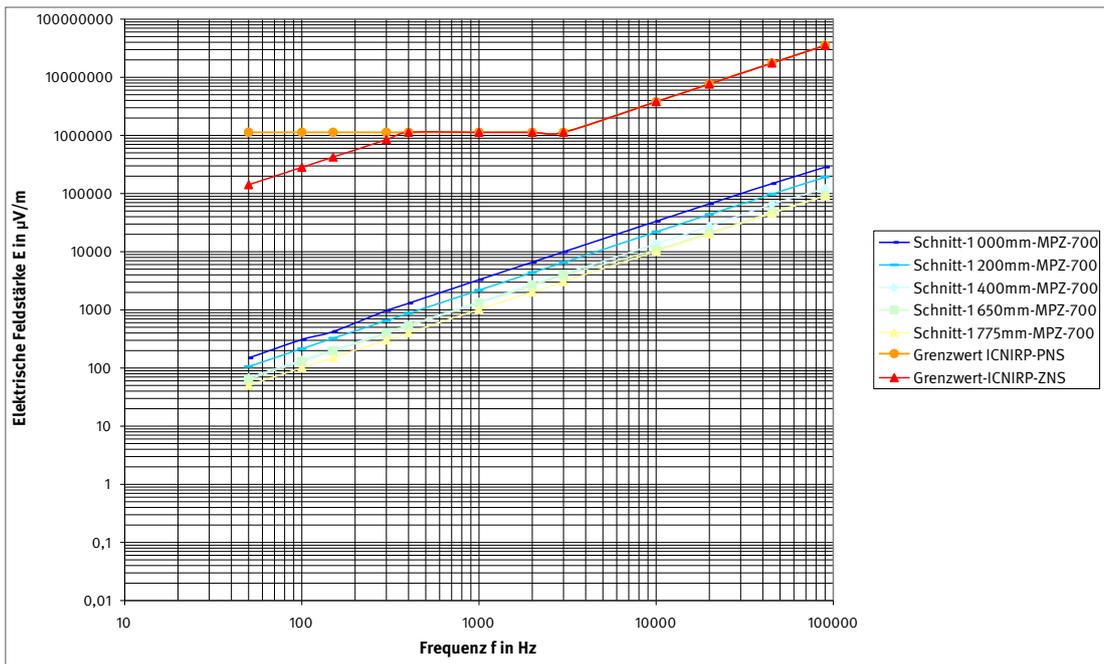


Abbildung 24:
L-Bauform-Zangenfenster, 700 mm



Aufgrund der unterschiedlichen Basiswerte (Tabelle 6) für das ZNS und PNS wurden aus den in den Abbildungen 23 und 24 aufgeführten induzierten elektrischen Feldstärken im Gewebe die Schweißstromstärken berechnet, die in beiden Nervensystemen nicht überschritten werden dürfen. Die Ergebnisse hierzu sind für die beiden untersuchten MPZ in Abbildung 25 aufgeführt.

Abbildung 25 zeigt den Verlauf der zulässigen Stromstärke des Schweißstroms für das ZNS und PNS in Abhängigkeit von der Frequenz für die an der MPZ mit dem kleinen und großen Zangenfenster ermittelten höchsten Expositionen. Zur Bestimmung

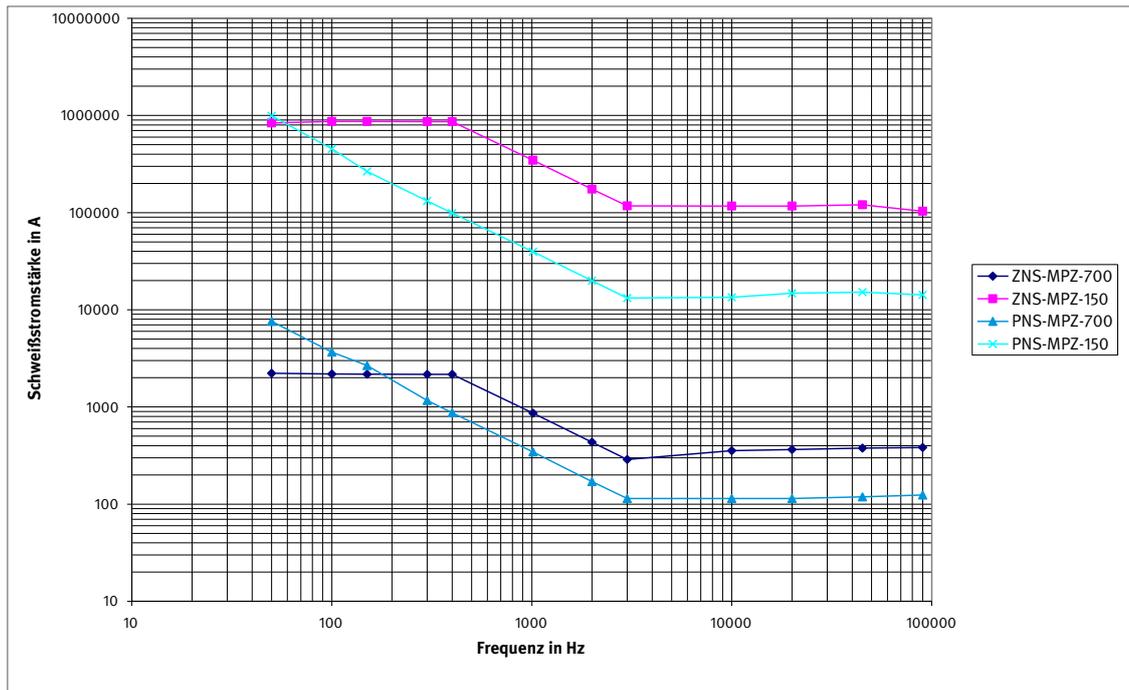
der Stromstärken für das ZNS wurden die in den Schnitthöhen 1650 oder 1775 mm induzierten maximalen elektrischen Feldstärken, und für das PNS die in den Schnitthöhen 1000, 1200 oder 1400 mm ermittelten maximalen Werte aus den Abbildungen 23 und 24 zugrunde gelegt. Der Vergleich der Verläufe des zulässigen Schweißstroms in Abbildung 25 zeigt, dass sich die zulässigen Stromstärken der Punktschweißzange mit dem 150-mm-Zangenfenster um nahezu zwei Zehnerpotenzen von denen der Punktschweißzange mit dem 700-mm-Zangenfenster unterscheiden. An der MPZ mit den 150-mm-Zangenfenster sind im Frequenzbereich $f \geq 3$ kHz Stromstärken von etwa 10 kA

zulässig. Unterhalb dieser Frequenz sind höhere Stromstärken zulässig. Bei der Frequenz $f = 50 \text{ Hz}$ darf die Schweißstromstärke einen Wert von etwa 800 kA nicht überschreiten. An der MPZ mit den 700 mm -Zangenfenster sind die zulässigen Stromstärken wesentlich niedriger. Im Frequenzbereich $f \geq 3 \text{ kHz}$ dürfen Stromstärken von etwa 100 A nicht überschritten werden. Im Frequenzbereich $f < 3 \text{ kHz}$ tritt eine Überschreitung der Grenzwerte erst bei höheren Stromstärken auf. Bei der Frequenz $f = 50 \text{ Hz}$ ist dies beispielsweise bei Stromstärken über $2,2 \text{ kA}$ möglich.

Unter der Annahme, dass die beiden ausgewählten Punktschweißzangen hinsichtlich der Baugröße ihrer Zangenfenster Grenzfälle darstellen, geben die Kurvenverläufe in Abbildung 25 die obere und die untere Grenzen der Stromstärke für Schweißströme an MPZ an, die zur Einhaltung der „basic restrictions“ der ICNIRP nicht überschritten werden dürfen.

Abbildung 25:

Schweißstromstärken, die an der MPZ mit dem 150-mm - und 700-mm -Zangenfenster nicht überschritten werden dürfen, damit die „basic restriction“ der ICNIRP-Guidelines [4] nicht überschritten werden



8 Zusammenfassung und Diskussion

Das IFA untersuchte an handgeführten Mittelfrequenz-Punktschweißzangen den Einfluss der Größe der Zangenfenster und der Frequenz auf die Exposition der Beschäftigten gegenüber magnetischen Feldern während des Schweißens. Hierzu wurden in Betrieben an Punktschweißzangen gemessene Verläufe des magnetischen Feldes hinsichtlich der Stärke des magnetischen Flusses und der zeitlichen Änderung des magnetischen Feldes analysiert. Dabei zeigte sich, dass die zeitlichen Änderungen des magnetischen Feldes im Wesentlichen von der Ausführung und der Frequenz der Schweißinverter sowie der Gleichrichtung auf der Netz- und Sekundärseite des Schweißumrichters bestimmt werden. Um die Exposition anhand der induzierten Feldgrößen im menschlichen Körper zu beurteilen, wurden in einem international anerkannten Körpermodell die induzierten Feldstärken im Gewebe mit dem Feldberechnungsprogramm EMPIRE Xcel berechnet. Dabei wurden die bei der Analyse der an verschiedenen Mittelfrequenz-Punktschweißzangen gemessenen Verläufe der zeitlichen Änderung des magnetischen Feldes ermittelten Frequenzen berücksichtigt. Für diese Frequenzen und weitere, aufgrund der zukünftigen Entwicklung von Mittelfrequenz-Punktschweißzangen noch zu erwartende Frequenzen wurde die Verteilung der induzierten elektrischen Feldstärke für verschiedene, auf die Mitte des Zangenfensters bezogene Positionen des Körpermodells für eine Stromstärke von 1 A berechnet. Anschließend wurden in Abhängigkeit von der Frequenz des Schweißstroms die Spitzenwerte der induzierten elektrischen Feldstärke für die verschiedenen Positionen des Körpermodells ermittelt. Dabei wurden am „großen“ Zangenfester gegenüber dem „kleinen“ Zangenfenster um den Faktor 100 höhere elektrische Feldstärken im Gewebe des Körpermodells ermittelt.

Aufgrund der zwischen der Stromstärke des Schweißstroms und der induzierten elektrischen Feldstärke im Gewebe bestehenden Proportionalität wurden die in den einzelnen Ebenen des Körpermodells ermittelten Spitzenwerte der elektrischen Feldstärke und die „basic restrictions“ der ICNIRP-Guidelines zueinander ins Verhältnis gesetzt und die Stromstärke des Schweißstroms ermittelt, die zur Einhaltung der Grenzwerte nicht überschritten werden darf. Unter der Annahme, dass die beiden ausgewählten Punktschweißzangen hinsichtlich der Baugröße ihrer Zangenfenster Grenzfälle darstellen, zeigen die Ergebnisse die obere und die untere Grenzen der Stromstärke für Schweißströme an Punktschweißzangen, die zur Einhaltung der „basic restrictions“ der ICNIRP nicht überschritten werden sollten. Damit konnte gezeigt werden, dass auf der Basis einer Analyse des zeitlichen Verlaufs des Schweißstroms und der Größe der Zangenfenster eine Beurteilung der Exposition der Beschäftigten gegenüber magnetischen Feldern möglich ist. Auf der Grundlage der vorliegenden Datenbasis ist eine ausreichende Expositionsbeurteilung von Punktschweißzangen mit Zangenfenstern anderer Abmessungen noch unzureichend. Hierzu müsste der Bereich innerhalb der beiden ermittelten Grenzkurven für Zangenfenster anderer Baugrößen mit weiteren Grenzkurven aufgefüllt werden.

Literatur

- [1] Berufsgenossenschaftliche Vorschrift: Unfallverhütungsvorschrift Elektromagnetische Felder (BGV B11). Hrsg.: Hauptverband der gewerblichen Berufsgenossenschaften (HVBG), Sankt Augustin 2001
- [2] Guidelines for limiting exposure to time-varying electric, magnetic, and electro-magnetic fields (1 Hz to 100 Hz). Health Phys. 99 (2010) Nr. 6, S. 818-836
- [3] *Börner, F.; Brüggemeyer, H.; Eggert, S.; Fischer, M.; Heinrich, H.; Hentschel, K.; Neuschulz, H.*: Elektromagnetische Felder am Arbeitsplatz (Forschungsbericht F 400). Hrsg.: Bundesministerium für Arbeit und Soziales, Bonn 2010
- [4] Berufsgenossenschaftliche Regel: Elektromagnetische Felder (BGR B11). Hrsg.: Hauptverband der gewerblichen Berufsgenossenschaften (HVBG), Sankt Augustin 2001
- [5] Guidelines for limiting exposure to time-varying electric and electromagnetic fields (up to 300 GHz). Health Phys. 74 (1998) Nr. 4, S.494-522
- [6] Berufsgenossenschaftliche Information: Beurteilung magnetischer Felder von Widerstandsschweißeinrichtungen (BGI 5011). Hrsg.: Berufsgenossenschaft der Feinmechanik und Elektrotechnik, Köln 2006
- [7] *Börner, F.*: Elektromagnetische Felder an handgeführten Punktschweißzangen. BGIA-Report 2/2009. Hrsg.: Deutsche Gesetzliche Unfallversicherung, BGIA – Institut für Arbeitsschutz, Sankt Augustin 2009