

BGIA-Report 2/2009

Elektromagnetische Felder an
handgeführten Punktschweißzangen

Verfasser: Fritz Börner,
BGIA – Institut für Arbeitsschutz der Deutschen Gesetzlichen
Unfallversicherung, Sankt Augustin

Redaktion: Zentralbereich des BGIA

Herausgeber: Deutsche Gesetzliche Unfallversicherung (DGUV)
BGIA – Institut für Arbeitsschutz der Deutschen Gesetzlichen
Unfallversicherung
Alte Heerstr. 111, D-53757 Sankt Augustin
Telefon: +49 / 02241 / 231 – 01
Telefax: +49 / 02241 / 231 – 1333
Internet: www.dguv.de

– Januar 2009 –

ISBN: 978-3-88383-772-7

ISSN: 1869-3491

Elektromagnetische Felder an handgeführten Punktschweißzangen

Kurzfassung

Beim Schweißen mit handgeführten Punktschweißzangen kann eine Überschreitung der Expositionsgrenzwerte (zulässige Werte nach BGV B11) für die magnetischen Felder nicht ausgeschlossen werden. Ob eine Überschreitung der zulässigen Werte jedoch die Gesundheit der Schweißer gefährdet, hängt von den Wirkungen der Felder im exponierten Körper ab. Im hier beschriebenen Projekt wurde die Exposition von Schweißern bei Tätigkeiten mit handgeführten Punktschweißzangen mit separaten 50-Hz-Wechselstromquellen erstmals nicht nur anhand von Ergebnissen aus Arbeitsplatzmessungen, sondern auch mit berechneten Körperstromdichten beurteilt. Für häufige Arbeitssituationen wurden in einer dreidimensionalen Feldsimulation Körperstromdichten in mehreren Körperschichten (Genitalien, Rumpf, Hals und Kopf) berechnet und visualisiert. Die Ergebnisse wurden mit den derzeit für das Zentralnervensystem (Rückenmark und Gehirn) geltenden Basisgrenzwerten verglichen und bewertet. Dabei zeigte sich, dass die Grenzwerte in verschiedenen Fett- und Muskelgeweben und in der Rückenmarksflüssigkeit (Liquor) je nach Abstand, Position und Lage der Punktschweißzange zum Körpermodell überschritten werden können, im Zentralnervensystem (Gehirn und Rückenmark) aber eingehalten werden. Bei allen Arbeitssituationen wurden im Zentralnervensystem maximal 10 bis 20 % (1 mA/m^2) des Basisgrenzwertes ausgeschöpft, wobei die magnetischen Flussdichten über den abgeleiteten Grenzwerten lagen.

Electromagnetic fields on hand-held spot-welding guns

Abstract

During welding with hand-held spot-welding guns, violation of the exposure limit values (permissible values to BGV B11) for the magnetic fields cannot be excluded. Whether violation of the permissible values presents a hazard to the welder's health, however, depends upon the effects of the fields within the exposed body. In the project described here, the exposure of welders during tasks involving hand-held spot-welding guns with separate 50 Hz AC power supplies was assessed for the first time with reference not only to results from workplace measurements, but also to calculated body current densities. For frequent work situations, body current densities were calculated and visualized in a three-dimensional field simulation in multiple layers of the body (genitals, torso, neck and head). The results were compared with the basic limit values currently applicable for the central nervous system (spinal cord and brain), and evaluated. Violations of the limit values in various fat and muscle tissues and in the spinal fluid (liquor) were found here to be possible, depending upon the interval, position and orientation of the spot-welding gun with respect to the body model; the limit values were however found to be observed within the central nervous system (brain and spinal cord). In all work situations, a maximum of 10 to 20% (1 mA/m^2) of the basic limit value was exploited in the central nervous system; the magnetic flux densities lay above the derived limit values.

Champs électromagnétiques créés par des pincés à souder par points manuelles

Résumé

Lors du soudage avec des pincés à souder par points manuelles, un dépassement des valeurs limites d'exposition (valeurs admissibles selon règlement de prévention BGV B11) aux champs magnétiques ne peut être exclu. La dangerosité d'un dépassement des valeurs admissibles pour la santé des soudeurs dépend cependant des effets des champs sur l'organisme. Dans le cadre du projet décrit, l'exposition de soudeurs travaillant avec des pincés à souder par points manuelles alimentées par des sources de courant alternatif 50 Hz externes a été évaluée, pour la première fois, non seulement à l'aide de résultats de mesures effectuées sur le poste de travail, mais aussi au moyen de densités de courant induit dans le corps humain calculées. Les densités de courant induit dans différentes parties du corps humain (parties génitales, tronc, cou et tête) ont été calculées et visualisées à l'aide d'une simulation tridimensionnelle de champ, pour des situations de travail rencontrées fréquemment. Les résultats ont été comparés aux valeurs limites de base valables actuellement pour le système nerveux central (cerveau et moelle épinière) et évalués. Il s'est avéré que les valeurs limites peuvent être dépassées dans divers tissus adipeux et musculaires ainsi que dans le liquide céphalo-rachidien en fonction de la distance et de la position de la pince à souder par points par rapport au modèle corporel, mais qu'elles sont respectées dans le système nerveux central (cerveau et moelle épinière). Dans toutes les situations de travail, les valeurs calculées n'excédaient pas 10 à 20 % (1 mA/m^2) de la valeur limite de base dans le système nerveux central, les densités de flux magnétique étant supérieures aux valeurs limites découlant de la valeur limite de base.

Campos electromagnéticos en pinzas manuales de soldadura por puntos

Resumen

Al soldar con las pinzas manuales de soldadura por puntos no se debe descartar que se excedan los valores límites de exposición (los valores permitidos según BGV B11) para los campos magnéticos. Sobrepassar los valores permitidos pone en peligro la salud del soldador en función de los efectos que ejercen los campos sobre el cuerpo expuesto. En el proyecto que se describe aquí se ha valorado la exposición a la que están sometidos los soldadores mientras trabajan con pinzas manuales de soldadura por puntos con fuentes separadas de alimentación de corriente alterna de 50 Hz, en un principio, no sólo basándose en los resultados extraídos de las mediciones del puesto de trabajo, sino también en las densidades de corriente apreciadas en el cuerpo. Para los entornos laborales más frecuentes se han calculado y visualizado las densidades de corriente en el cuerpo a través de una simulación tridimensional y sobre diversos niveles corporales (genitales, torso, cuello y cabeza). Los resultados se compararon y se valoraron con los valores límites básicos válidos actualmente para el sistema nervioso central (médula espinal y cerebro). Ello demostró que los valores límite se pueden sobrepassar en diferentes tejidos musculares y adiposos, así como en el líquido cefalorraquídeo (liquor) dependiendo de la distancia, posición y estado de las pinzas de soldadura por puntos respecto al modelo corporal, aunque los valores límite se deben mantener en el sistema nervioso central (cerebro y médula espinal). En todos los entornos laborales se aprovechó como máximo del 10 al 20% (1 mA/m^2) del valor límite básico, quedando las densidades magnéticas de flujo por encima de los valores límite deducidos.

Inhaltsverzeichnis

1	Ziel des Projekts	9
2	Problem	11
3	Untersuchungsobjekte	13
4	Untersuchungen im Rahmen des Projekts	15
5	Projektstufe 1 – Untersuchungen und Messungen beim Anwender	17
5.1	Ziel der Untersuchung	17
5.2	Messungen in Projektstufe 1.....	17
5.3	Verwendete Messeinrichtungen.....	18
5.4	Messergebnisse und zulässige Werte	19
5.5	Bewertung der Messergebnisse	22
5.6	Analyse der Arbeitspositionen der Schweißer an den untersuchten PSZ beim Anwender	23
5.6.1	Durchführung der Analyse	23
5.6.2	Ergebnisse.....	28
5.7	Schlussfolgerungen für das weitere Vorgehen	29
6	Projektstufe 2 – Untersuchungen im Labor	31
6.1	Ziel der Untersuchungen im Labor.....	31
6.2	Untersuchungen im Labor.....	31
6.3	Ergebnisse der Labormessungen	36
6.4	Zulässige Werte.....	47
6.5	Beurteilung und Bewertung der Ergebnisse.....	48
7	Projektstufe 3 – Feldsimulation	49
7.1	Allgemeines	49
7.2	Nachbildungen.....	49
7.3	Ziel der Feldsimulation.....	50
7.4	Berechnung der Feldverteilung.....	50
7.5	Ergebnisse der Feldsimulation.....	51
7.6	Schlussfolgerungen	55

8	Projektstufe 4 – Berechnung der Körperstromdichten	57
8.1	Allgemeines	57
8.2	Expositionsnachbildung	58
8.3	Simulationsebenen	61
8.4	Leitungseinflüsse	61
8.5	Ergebnisse.....	63
8.5.1	PSZ mit kleinem Zangenfenster.....	63
8.5.2	PSZ mit kleinem Zangenfenster, horizontal angeordnet	70
8.5.3	PSZ mit kleinem Zangenfenster, vertikal angeordnet	70
8.5.4	PSZ mit kleinem Zangenfenster, vertikal um 90 Grad gedreht angeordnet	71
8.5.5	PSZ mit großem Zangenfenster.....	71
8.5.6	Ergebnisse zur Kabelführung.....	74
8.5.6.1	Doppelleitung	74
8.5.6.2	Kabelführung nach prEN 50444.....	75
8.5.6.3	Kabelführung nach BGI 5011 Bild 22.....	75
8.5.7	Ergebnisse Genitalbereich.....	76
9	Projektstufe 5 – Bewertung und Beurteilung der Ergebnisse	79
9.1	Grenzwerte	79
9.2	Das Zentralnervensystem	80
9.2.1	Aufbau	80
9.2.2	Das Gehirn.....	81
9.2.3	Das Rückenmark	82
9.2.4	Das ZNS im Körpermodell	82
9.3	Elektrische Gewebeeigenschaften.....	84
9.4	Beurteilung.....	85
10	Zusammenfassung und Diskussion	91
11	Literatur	93



1 Ziel des Projekts

Auf Initiative der Norddeutschen Metall-Berufsgenossenschaft (jetzt Berufsgenossenschaft Metall Nord Süd) untersucht das BGIA – Institut für Arbeitsschutz der Deutschen Gesetzlichen Unfallversicherung seit Februar 2005 bis heute die Exposition von Personen gegenüber magnetischen Feldern an Punktschweißzangen (Kabelzangen). Ziel der Untersuchung ist die Ermittlung des Spielraums, der sich bei der Expositionsbeurteilung gegenüber magnetischen Feldern an Punktschweißzangen ergibt, wenn anstelle der Grenzwerte für die abgeleiteten Werte (magnetische Flussdichte) die Basiswerte (Körperstromdichte) der Unfallverhütungsvorschrift BGV B11 [1] zugrunde gelegt werden. Ferner soll in verschiedenen menschlichen Körperteilen die Exposition gegenüber magnetischen Feldern durch Feldberechnungen und Feldsimulationen ermittelt und bewertet werden.



2 Problem

Beim Schweißen mit Punktschweißzangen (PSZ) treten in der unmittelbaren Umgebung der Schweißzange hohe impulsförmige magnetische Felder auf. Diese Felder sind die Folge von kurzzeitig fließenden Strömen mit Stromstärken von einigen Kilampere. Da Schweißer bei ihrer Tätigkeit die PSZ üblicherweise vor ihrem Körper mit den Händen positionieren und halten, muss mit einer hohen Exposition gegenüber magnetischen Feldern gerechnet werden. Dabei können je nach Schweißstromstärke und Stellung des Schweißers zur PSZ die nach Abschnitt 3 der Unfallverhütungsvorschrift BGV B11 [1] zulässigen Werte für die magnetische Flussdichte sowie die zulässige zeitliche Änderung der magnetischen Flussdichte überschritten werden. Eine Gesundheitsgefährdung für den Schweißer aufgrund starker magnetischer Felder kann nicht ausgeschlossen werden, da bei einer hohen Exposition im menschlichen Körper Nerven und Muskelzellen angeregt werden können und dies im schlimmsten Fall zum Herzkammerflimmern führen kann.

Um beurteilen zu können, ob eine Gefährdung für die Gesundheit vorliegt, muss die Exposition bewertet werden. Hierzu sind in der BGV B11 unterschiedliche Grenzwerte festgelegt: Unterschieden wird zwischen den Basiswerten, die die Wirkungen eines äußeren elektromagnetischen Feldes im menschlichen Körper beschreiben, und den abgeleiteten Werten, den messbaren Feldgrößen. Beispiele für die Basiswerte sind die elektrische Stromdichte oder die spezifische Absorptionsrate, Beispiele für die abgeleiteten Werte sind die elektrische und die magnetische Feldstärke.

Da die elektrische Stromdichte im menschlichen Körper bisher nicht bzw. nur mit hohem Aufwand gemessen werden konnte, basiert die Beurteilung der Exposition gegenüber magnetischen Feldern zurzeit auf dem Ergebnis des Vergleichs der gemessenen magnetischen Flussdichte mit den zulässigen abgeleiteten Werten der BGV B11. Bei Einhaltung dieser Werte ist sichergestellt, dass die Basiswerte nach BGV B11, in diesem Fall die elektrische Stromdichte, eingehalten werden.

Daraus kann jedoch nicht geschlossen werden, dass bei einer Überschreitung des zulässigen abgeleiteten Wertes auch der Basiswert überschritten wird. Das hat zur



Folge, dass bei einer Überschreitung der zulässigen abgeleiteten Werte die Einhaltung der Basiswerte durch zusätzliche Untersuchung/Berechnung/Simulation festgestellt werden muss. Aufgrund der schwierigen messtechnischen Erfassung der Basiswerte verwendete man bisher bei der Beurteilung der Exposition unter Bezugnahme von Basiswerten nur sehr einfache Rechenmodelle. Das führte stets zu einer konservativen Abschätzung der Exposition. Aufgrund der verbesserten Körpermodelle und Möglichkeiten einer Feldberechnung und Visualisierung der Ergebnisse können die Basisgrößen im menschlichen Körper inzwischen genauer ermittelt und dargestellt werden.



3 Untersuchungsobjekte

Bei den untersuchten Schweißeinrichtungen handelt es sich um handgeführte 50-Hz-Wechselstrom-Punktschweißeinrichtungen. Sie bestehen im Wesentlichen aus drei voneinander getrennt angeordneten Komponenten: der Schweißstromquelle (Schweißtransformator), der Schweißzange und einer Steuereinheit. Die Schweißstromquelle und die Schweißzange sind über Schweißkabel mit Hin- und Rückleitung verbunden. Der Schweißstrom wird über eine Phasenanschnittsteuerung, die sich auf der Netzseite im Primärkreis der Schweißstromquelle befindet, eingestellt. Die untersuchten Schweißzangen waren von unterschiedlicher Form und Größe: Unterschieden wurde zwischen kleinen und großen Schweißzangen. Beim Schweißen können Schweißströme ($f = 50 \text{ Hz}$) mit Stromstärken bis zu 20 kA fließen. Die Dauer eines Schweißvorgangs beträgt ca. 300 bis 1 200 ms. Diese Zeit setzt sich je nach Werkstück aus ein bis drei nahezu gleichen Stromzeiten zusammen.



4 Untersuchungen im Rahmen des Projekts

Das Projekt wurde in fünf Stufen bearbeitet:

- In **Stufe 1** fanden bei einem Anwender aus der Automobilindustrie an acht PSZ (Kabelzangen) orientierende Messungen zur Feldverteilung statt. Ferner wurden die unterschiedlichen Arbeitspositionen der Beschäftigten beim Schweißen auf die Abstände zwischen Körper und Zange analysiert. Die PSZ sind vergleichbar mit den in Stufe 2 untersuchten Zangen.
- In **Stufe 2** wurde im Labor an zwei PSZ (Kabelzangen) mit unterschiedlichen Zangenfenstern in Abhängigkeit vom Schweißstrom die Verteilung der magnetischen Flussdichte in der Umgebung der Schweißzangen in mehreren Ebenen bei unterschiedlichen Abständen zur Schweißzange durch Messung ermittelt,
- In **Stufe 3** wurde das magnetische Feld in der Nähe der PSZ mit dem Feldberechnungsprogramm EMPIRE berechnet. Dabei galten die gleichen Rahmenbedingungen, z. B. Geometrie der PSZ, Höhe der Schweißströme, Messwerte usw., wie in den Stufen 1 und 2.
- In **Stufe 4** erfolgte die Ermittlung der Basisgrößen (Körperstromdichten) für die in Stufe 3 berechneten äußeren magnetischen Feldverteilungen in der Nähe der PSZ mit dem Körpermodell der Simulationssoftware EMPIRE.
- In **Stufe 5** wurden die Mess- und Simulationsergebnisse bewertet.



5 Projektstufe 1 – Untersuchungen und Messungen beim Anwender

5.1 Ziel der Untersuchung

Bei einem Anwender aus der Automobilindustrie sollte anhand orientierender Messungen festgestellt werden, welche Expositionen gegenüber magnetischen Feldern bei der Arbeit mit PSZ zu erwarten sind. Hierzu wurden an acht Arbeitsplätzen die Spitzenwerte der magnetischen Flussdichten im Aufenthaltsbereich der Schweißer ermittelt und die unterschiedlichen Arbeitspositionen der Schweißer beim Schweißen auf die Abstände zwischen Körper und PSZ analysiert.

5.2 Messungen in Projektstufe 1

An acht unterschiedlichen Kabel-PSZ wurde während der Produktion die magnetische Flussdichte in der Nähe der Zangenfenster und an den Schweißkabeln gemessen. Die Messungen am Zangenfenster erfolgten jeweils im Abstand von 20 cm zur

- Mitte des Zangenfensters,
- Mitte der Elektroden (Frontseite),
- Mitte der Elektroden (seitlich); siehe Abbildung 1.

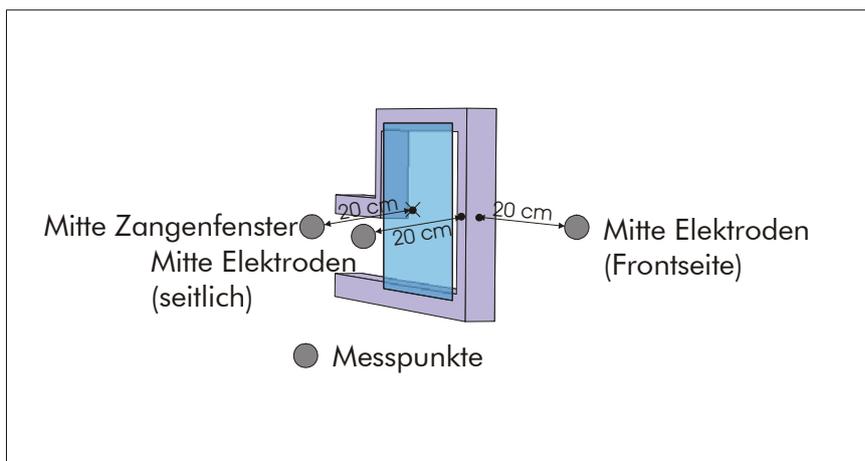


Abbildung 1:
Messpositionen
an den Schweiß-
einrichtungen beim
Anwender

Bei der Messung an den Schweißkabeln berührte die Messsonde die Kabeloberfläche.



Gemessen und aufgezeichnet wurden der zeitliche Verlauf des Schweißstroms und der magnetischen Flussdichte. Zur Worst-case-Abschätzung wurden die Kabelzangen während der Messungen im Kurzschluss betrieben, d. h. die Elektroden wurden ohne Werkstück unter Druck zusammengefahren. Damit wurde sichergestellt, dass die maximale eingestellte Schweißstromstärke auftrat. Anschließend wurden aus den aufgezeichneten zeitlichen Feld- und Stromverläufen für jeden Messpunkt der maximale Spitzenwert der magnetischen Flussdichte bestimmt und die zulässigen Werte nach BGV B11, Abschnitt 3 „Gepulste Felder“, berechnet.

Während der Messungen herrschten an den Messorten die folgenden klimatischen Bedingungen:

- Temperatur: 20,5 bis 27,4 °C,
- Relative Feuchte: 35,0 bis 65,5 %

5.3 Verwendete Messeinrichtungen

Bei den Messungen wurden folgende Geräte eingesetzt:

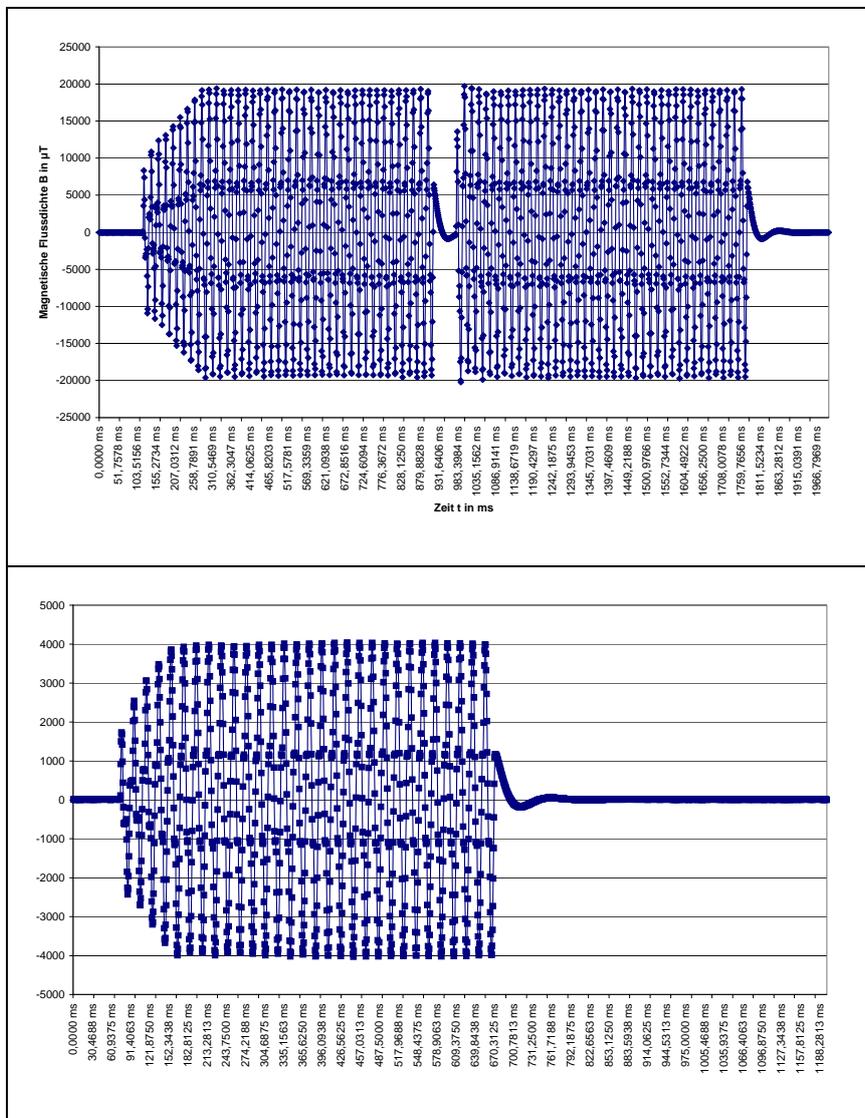
- EM-Feldmesssystem
Hersteller: Chauvin Arnoux
Typ: CA 42
H-Feldsonde
Hersteller: Chauvin Arnoux
Typ: M 400
Bandbreite: 10 Hz bis 400 kHz
Richtcharakteristik: X, Y, Z
Messbereich: 10 nT bis 25 mT
Messunsicherheit: ± 3 % der Anzeige
- Oszilloskop
Hersteller: Tektronix
Typ: TDS2012
Serien-Nr.: C046119
- Rogowski Current Wave Transducer
Hersteller: Power Electronic Measurements LTD
Typ: IRF 150 D12
Serien-Nr.: 6394-1546
Peak current rating: 30 kA/5 kHz



5.4 Messergebnisse und zulässige Werte

Die Messergebnisse sind in Abbildung 2 und Tabelle 1 (siehe Seite 22) dargestellt. Abbildung 2 zeigt die typischen zeitlichen Verläufe der magnetischen Flussdichte an den untersuchten PSZ, gemessen in der Nähe des Zangenfensters. Zur besseren Übersicht ist der zeitliche Verlauf der Flussdichte B nur für eine Messachse dargestellt. In Tabelle 1 sind für die verschiedenen Messorte die aus den zeitlichen Verläufen der Messachsen X, Y und Z berechneten Spitzenwerte der magnetischen Flussdichte B_{max} aufgeführt.

Abbildung 2:
Gemessene zeitliche Verläufe der magnetischen Flussdichte an verschiedenen PSZ

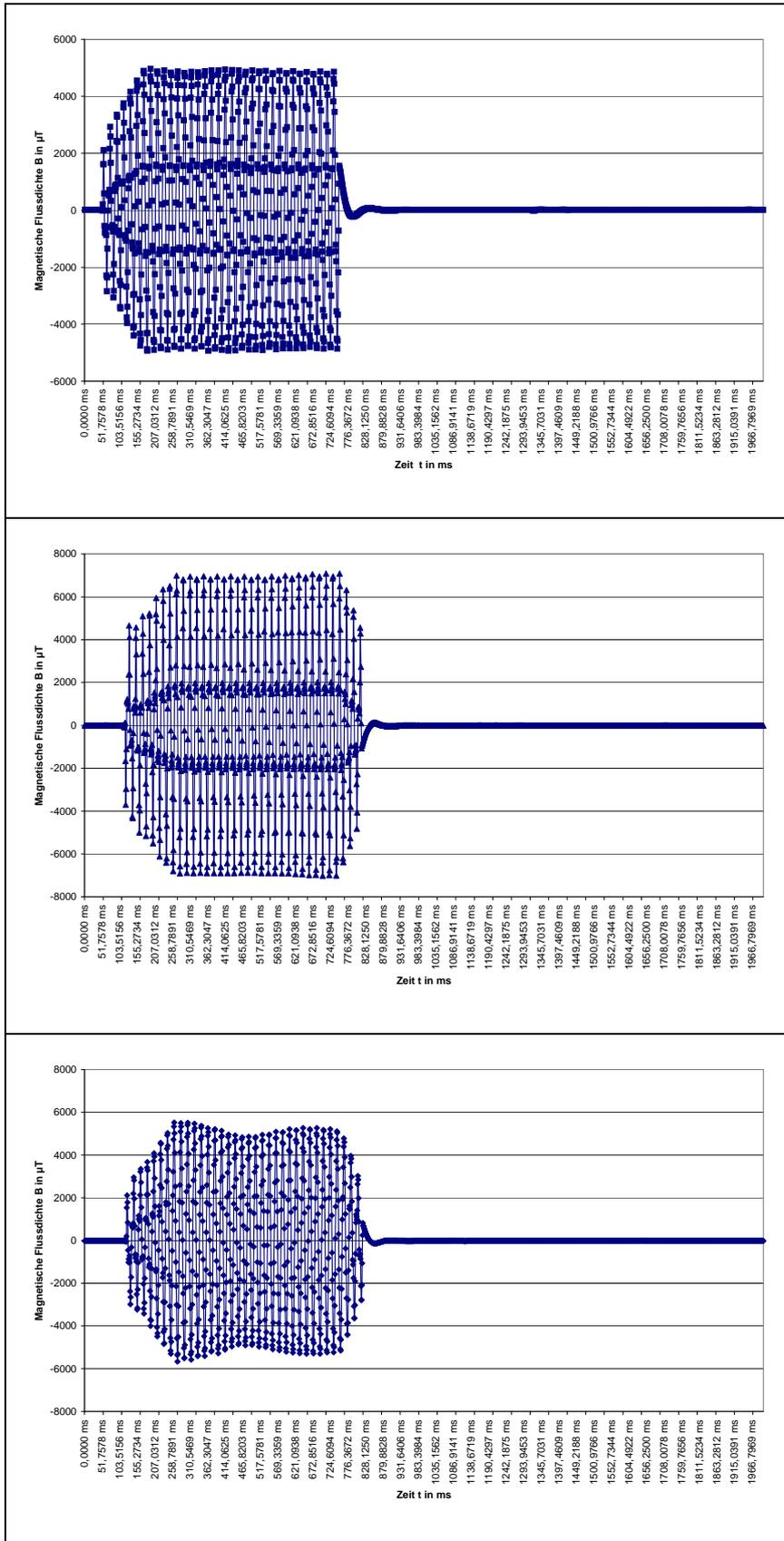


a)
PSZ Nr. 1 in der Elektrodenmitte, gemessen in der Sensorachse X im Abstand von 20 cm

b)
PSZ Nr. 2 in der Elektrodenmitte, gemessen in der Sensorachse Y im Abstand von 20 cm



Abbildung 2: Fortsetzung



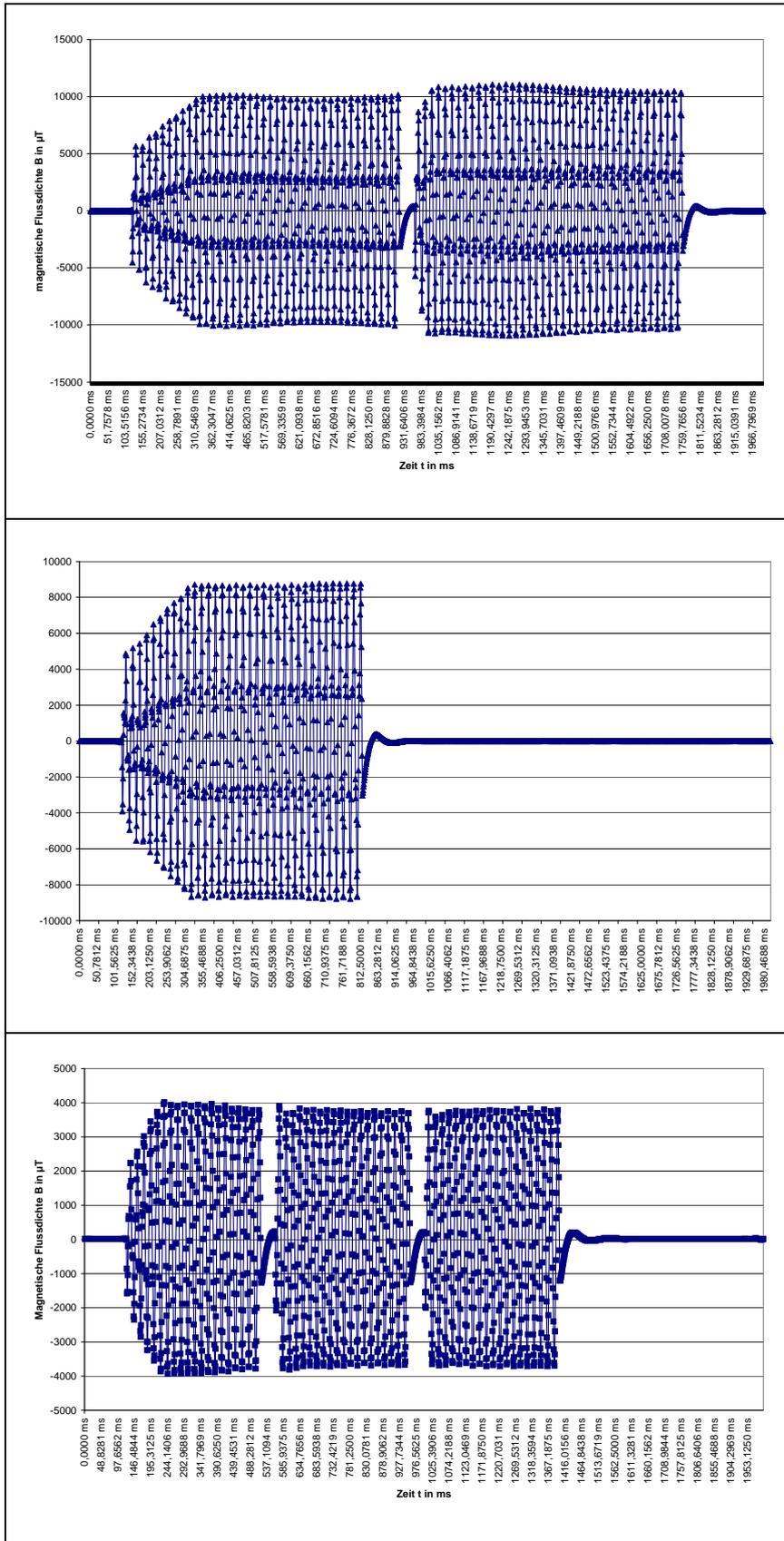
c) PSZ Nr. 3 in der Elektrodenmitte, gemessen in der Sensorachse Y im Abstand von 20 cm

d) PSZ Nr. 4, in der Elektrodenmitte, gemessen in der Sensorachse Z im Abstand von 20 cm

e) PSZ Nr. 5, in der Zangenfenstermitte, gemessen in der Sensorachse X im Abstand von 20 cm



Abbildung 2: Fortsetzung



f)
PSZ Nr. 6, in der Zangenfenstermitte, gemessen in der Sensorachse X im Abstand von 20 cm

g)
PSZ Nr. 7, in der Zangenfenstermitte, gemessen in der Sensorachse Z im Abstand von 20 cm

h)
PSZ Nr. 8, in der Zangenfenstermitte, gemessen in der Sensorachse Y im Abstand von 20 cm



Tabelle 1:
An acht PSZ ermittelte Spitzenwerte der magnetischen Flussdichte (B_{\max})
in Abhängigkeit von den Messorten

Messort	B_{\max} in mT bei der Schweißanlage Nr.							
	1	2	3	4	5	6	7	8
Zangenfenster Mitte	21,0	5,1	5,5	7,9	6,0	11,7	10,0	5,5
Elektrodenmitte an der Frontseite	7,8	2,8	2,9	2,65	1,8	2,4	3,15	1,75
Elektrodenmitte an der Seite	19,0	3,7	3,5	3,3	1,95	4,5	4,2	3,3
Kabel	53,0	34	37,5	20,5	43	32,5	28,0	32,6

5.5 Bewertung der Messergebnisse

Für jede PSZ wurden anhand des gemessenen zeitlichen Verlaufs des Schweißstroms bzw. der magnetischen Flussdichte die zulässigen Werte nach BGV B11, Anlage 1, Abschnitt 3, und der BGI 5011 [2], Anhang 1, Abschnitt 1.1 berechnet. Die entsprechend dem Schweißvorgang für jede untersuchte PSZ zugrunde zu legenden Parameter sowie die zulässigen Spitzenwerte der magnetischen Flussdichte sind in Tabelle 2 aufgeführt.

Der Vergleich der aus den Messwerten ermittelten Spitzenwerte für die magnetische Flussdichte (Tabelle 1) mit den zulässigen Werten in Tabelle 2 zeigt, dass diese für den Expositionsbereich 1 und den Bereich erhöhter Exposition bei verschiedenen Arbeitspositionen an allen untersuchten PSZ überschritten werden.

In der Nähe der Schweißkabel und der Zangenfenstermitte trat die höchste Exposition für die Schweißer auf. Die größte magnetische Flussdichte wurde bei der PSZ Nr. 1 gemessen. Aufgrund der Überschreitung der abgeleiteten zulässigen Werte nach BGV B11 ist eine Überprüfung der Einhaltung der Basiswerte nach BGV B11, Anlage 1, Tabelle 1 erforderlich.

Tabelle 2:
Charakteristische Parameter und zulässige Werte von acht PSZ beim Anwender

Parameter	Schweißanlage beim Anwender								
	Nr. 1	Nr. 2	Nr. 3	Nr. 4	Nr. 5	Nr. 6	Nr. 7	Nr. 8	
Anzahl der Perioden des Schweißstroms ($f = 50$ Hz)	2 x 40	30	35	35	35	2 x 40	35	3 x 20	
Zeitdauer des Phasenanschnitts pro Halbwelle in ms	1,0	2,04	1,96	3,6	0,72	3,24	3,2	0,6	
Schweißdauer in ms	1 440	477,6	563	434	649,6	1 082	476	1 128	
Gewichtungsfaktor [V]	1	1,44	1,21	1,51	1,24	1	1,45	1	
Zeitdauer der Feldänderung τ_{pmin} in ms	4,5	3,98	4,02	3,1	4,64	3,38	3,4	4,7	
Frequenz der Feldänderung f_p in Hz	55	63	62	80	54	74	74	53	
Zulässiger Spitzenwert der magnetischen Flussdichte in mT	Ex 1 ¹⁾	1,74	2,21	1,8	1,8	2,2	1,29	1,84	1,81
	B-eh-Ex ²⁾	3,27	4,14	3,5	3,38	4,13	2,43	3,44	3,39

¹⁾ Expositionsbereich 1; ²⁾ Bereich erhöhter Exposition

5.6 Analyse der Arbeitspositionen der Schweißer an den untersuchten PSZ beim Anwender

5.6.1 Durchführung der Analyse

Das Verhalten der Schweißer wurde während der Produktion in den Fertigungsstätten des Anwenders beim Schweißen untersucht. Hierzu wurden die verschiedenen Arbeitsgänge an allen Punktschweißeinrichtungen beobachtet und mittels Filmaufzeichnung und Fotografie dokumentiert. Das Datenmaterial wurde nach folgenden Gesichtspunkten untersucht:

- Wie hält der Schweißer die PSZ?
- Wie steht der Schweißer an der PSZ?



- Welche Abstände treten zwischen verschiedenen Körperteilen des Schweißers, der PSZ und den Schweißkabeln auf?
- Welche Körperteile des Schweißers berühren die PSZ?
- Wie werden die Schweißkabel am Körper des Schweißers geführt?
- Welche Unterschiede bestehen beim Halten einer PSZ mit großem bzw. mit kleinem Zangenfenster?

Die Abbildungen 3 bis 10 zeigen typische Arbeitspositionen an den untersuchten PSZ.

Abbildung 3:
Beim Anwender untersuchte PSZ Nr. 1





Abbildung 4:
Beim Anwender untersuchte PSZ Nr. 2

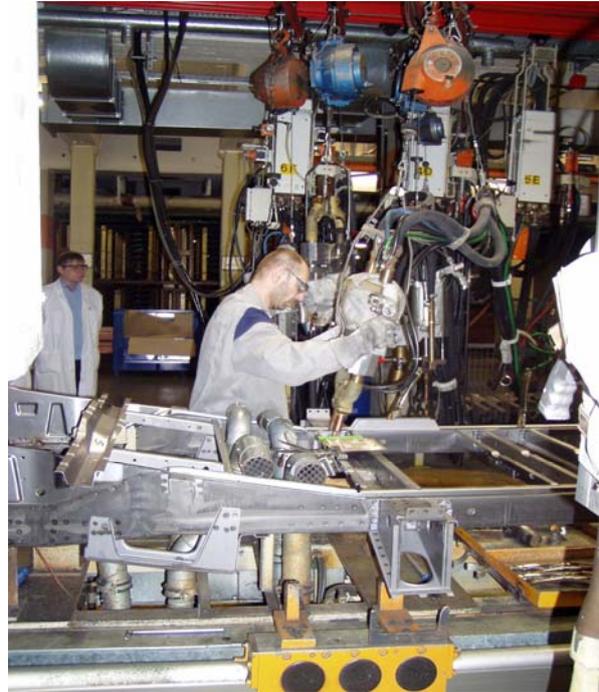


Abbildung 5:
Beim Anwender untersuchte PSZ Nr. 3

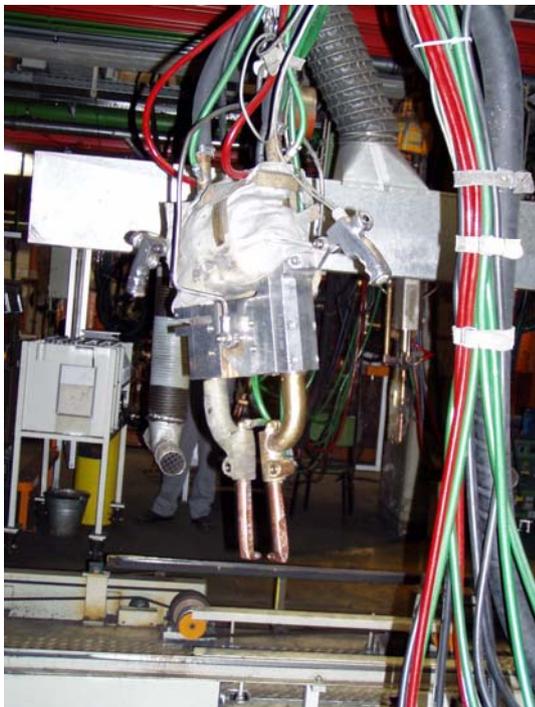




Abbildung 6:
Beim Anwender untersuchte PSZ Nr. 4

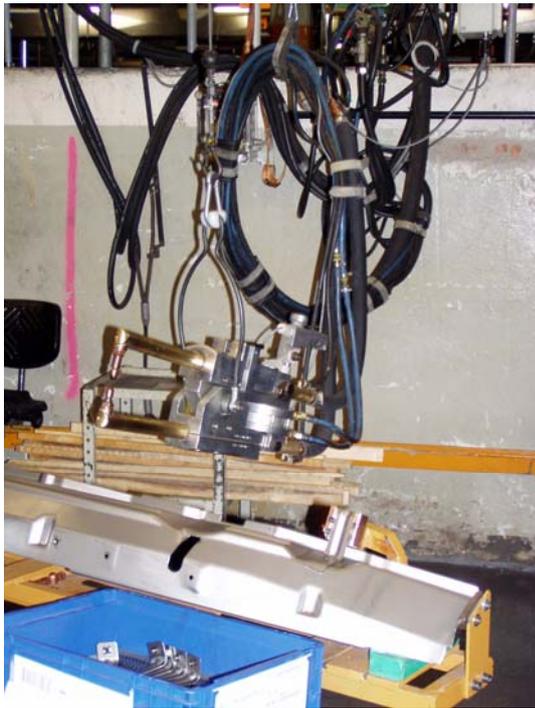


Abbildung 7:
Beim Anwender untersuchte PSZ Nr. 5





Abbildung 8:
Beim Anwender untersuchte PSZ Nr. 6



Abbildung 9:
Beim Anwender untersuchte PSZ Nr. 7

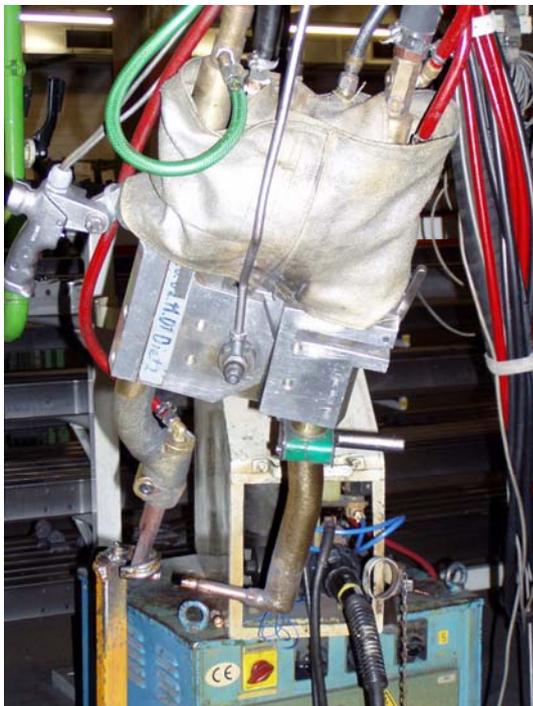
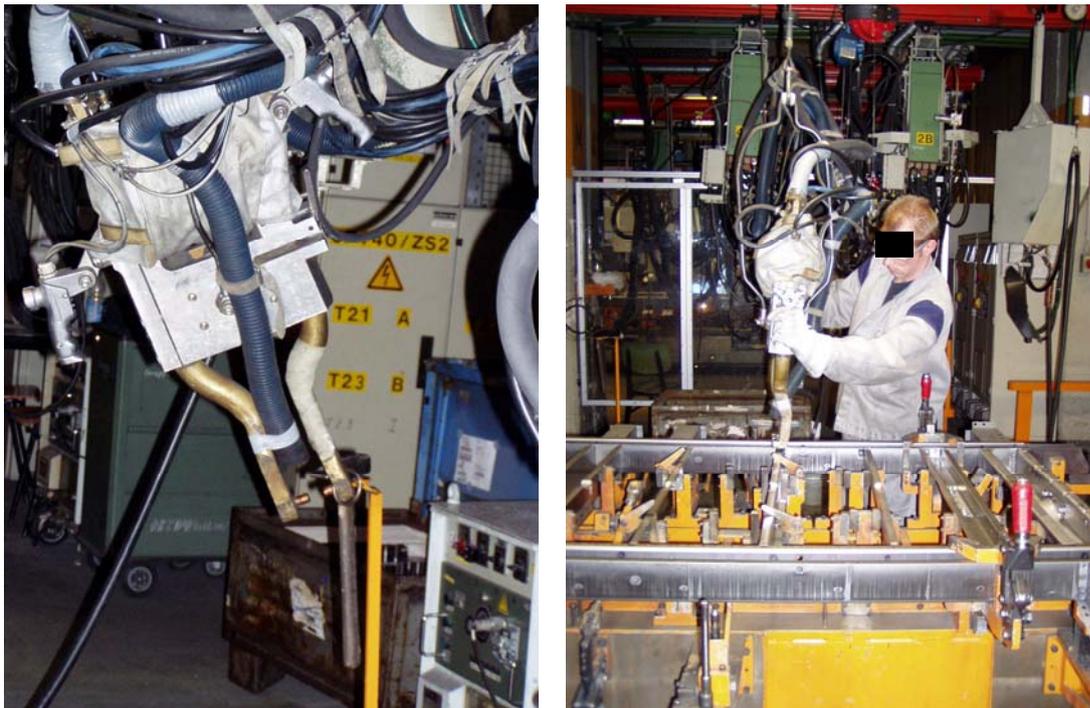


Abbildung 10: Beim Anwender untersuchte PSZ Nr. 8



5.6.2 Ergebnisse

An den untersuchten Schweißanlagen wurde keine einheitliche Handhabung der PSZ durch die Schweißer beobachtet. Dies hängt im Wesentlichen von den unterschiedlichen Ausführungen der Schweißeinrichtungen ab. Unterscheiden lassen sich vorwiegend senkrecht (PSZ Nr. 2, 3, 6, 7 und 8) und waagrecht (PSZ Nr. 4 und 5) gehaltene Schweißzangen sowie Schweißzangen großer und kleiner Bauform.

Bei den vorwiegend senkrecht gehaltenen Schweißzangen stehen die Schweißer in der Regel mit dem Oberkörper parallel zum Zangenfenster. Bei den Schweißzangen, die sie oberhalb der Elektrodenarme mit beiden Händen führen (Nr. 2, 3 und 8), beträgt der Abstand zwischen Oberkörper und Zangenfenster meist mehr als 20 cm. Hier können jedoch die Schweißkabel in geringem Abstand am Kopf der Schweißer entlang geführt sein.

An den PSZ Nr. 6 und 7 ist zum Positionieren der Schweißzange ein Handgriff an einem der beiden Elektrodenarme und ein weiterer oberhalb der Elektrodenarme befestigt. Die Schweißkabel werden nach oben geführt. Hier kann nicht ausgeschlossen werden, dass der Schweißer bei seinen Tätigkeiten mit seinem Ober-



körper die Elektrodenarme berührt und die Schweißkabel im geringen Abstand zum Kopf entlang laufen.

Vorwiegend waagrecht gehaltene Schweißzangen halten die Beschäftigten etwa in Bauchhöhe. Die Schweißer stehen dabei seitlich zum Zangenfenster in der Nähe der Schweißkabelanschlüsse. Während des Schweißens wird die Schweißzange an einem Handgriff und einem Elektrodenarm gehalten. Die Hand umschließt dabei den Elektrodenarm. Die Schweißkabel werden seitlich von der Schweißzange weg zur Decke geführt. Der Abstand zwischen dem Oberkörper des Schweißers und der Schweißzange beträgt etwa 0 bis 20 cm.

Schweißzangen großer Bauform (Nr. 1) werden fast immer parallel zur Körpervorderseite geführt. Der Mittelpunkt des Zangenfensters befindet sich etwa auf Bauchhöhe. Beim Schweißen kann nicht ausgeschlossen werden, dass der Schweißer den Rahmen der Schweißzange berührt.

5.7 Schlussfolgerungen für das weitere Vorgehen

Bei der Beurteilung der Exposition anhand der Basiswerte ist zu unterscheiden zwischen

- der Ausführung der PSZ (kleines und großes Zangenfenster),
- der Stellung der PSZ und des Zangenfensters (horizontal, vertikal),
- der Position eines Schweißers an der PSZ (seitlich oder mittige Position am Zangenfenster),
- dem Abstand zwischen dem Schweißer und der PSZ und
- der Verlegung der Schweißkabel.



6 Projektstufe 2 – Untersuchungen im Labor

6.1 Ziel der Untersuchungen im Labor

An zwei PSZ mit unterschiedlichen Zangenfenstern sollte in Abhängigkeit vom Schweißstrom die Verteilung der magnetischen Flussdichte in der Umgebung der Schweißzangen in mehreren Ebenen bei unterschiedlichen Abständen zur Schweißzange ermittelt werden.

6.2 Untersuchungen im Labor

Für die Untersuchung wurden je eine PSZ mit kleinem und mit großem Zangenfenster ausgewählt. In den Abbildungen 11 und 12 sind diese PSZ und deren Abmessungen dargestellt.

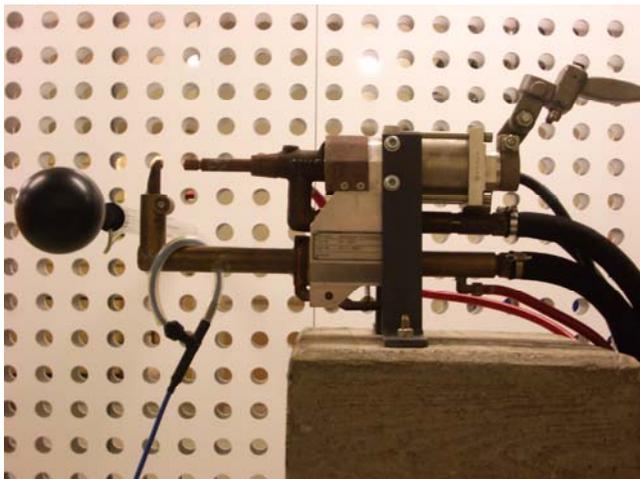


Abbildung 11:
Ausgewählte Punktschweißzangen;
oben mit kleinem und unten mit
großem Zangenfenster

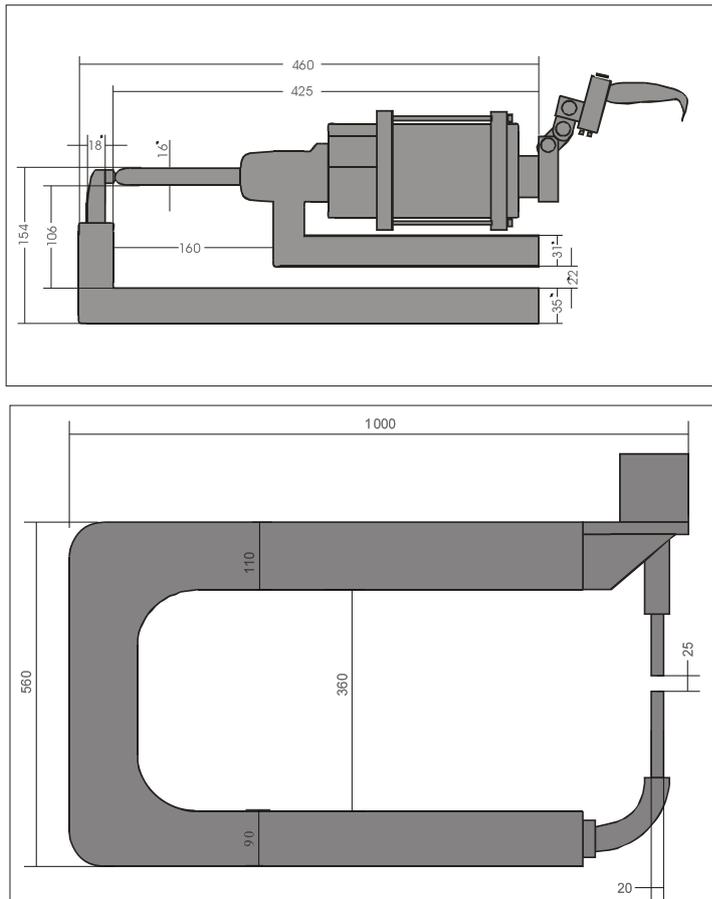


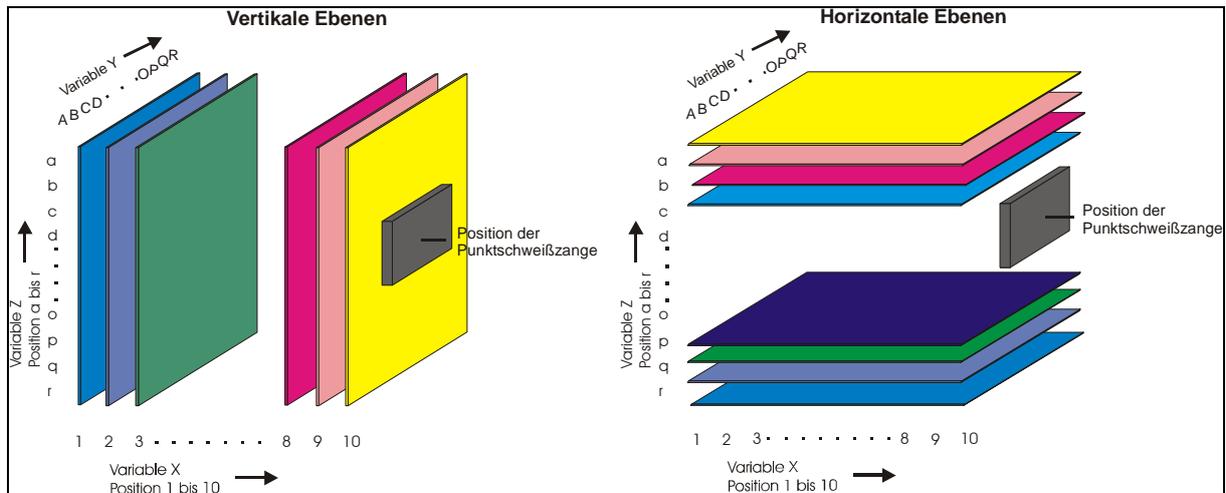
Abbildung 12:
Schematische Darstellung der
ausgewählten Punktschweiß-
zangen; oben PSZ mit kleinem
und unten mit großem Zangen-
fenster, Maße in mm

In einem Raum von 2 m Höhe, 2 m Breite und 1 m Tiefe wurde in einem räumlichen Raster von jeweils 10 cm der zeitliche Verlauf der magnetischen Flussdichte während eines Schweißvorgangs vor der PSZ gemessen und aufgezeichnet. Die Messungen erfolgten in den drei senkrecht zueinander stehenden Achsen und bei gleichen Schweißparametern, wie z. B. Schweißstrom, Schweißdauer, Frequenz oder Phasenanschnitt. Damit die höchstmöglichen magnetischen Flussdichten gemessen werden konnten, wurden die PSZ ohne Werkstück, d. h. im Kurzschluss, betrieben.

Aus den aufgezeichneten zeitlichen Feldverläufen der magnetischen Flussdichte wurde für jeden Messpunkt der Spitzenwert der magnetischen Flussdichte bestimmt. Anschließend wurde die horizontale und vertikale Verteilung dieser Spitzenwerte in mehreren Ebenen berechnet (Abbildung 13). Die Ebenen wurden anhand des Messrasters festgelegt.



Abbildung 13:
Ebenen, in denen die magnetische Flussdichte gemessen wurde



Zur Messung der magnetischen Flussdichte wurde das Feldmesssystem der Firma Chauvin Arnoux Typ CA 42 mit der Feldmesssonde M 400 eingesetzt. Zusätzlich wurde der zeitliche Verlauf des Schweißstroms mit einer Rogowski-Spule und einem digitalen Speicheroszilloskop gemessen und aufgezeichnet.

Den Mess- und Untersuchungsaufbau hierzu zeigen die Abbildungen 14 bis 16. In Abbildung 14 ist der Mess- und Untersuchungsaufbau zur Ermittlung der Verteilung der magnetischen Flussdichte an der PSZ mit dem kleinen und großen Zangenfenster dargestellt.

Abbildung 14:
Mess- und Untersuchungsaufbau



a) PSZ mit kleinem Zangenfenster



b) PSZ mit großem Zangenfenster



Die PSZ mit dem kleinen Zangenfenster ist auf vier metallfreien Betonblöcken (Abbildung 14 a) und die PSZ mit dem großen Zangenfenster ist an einer Holzstrebe (Abbildung 14 b) befestigt. Links in den Abbildungen sind die Lochwand mit dem Lochraster von 10 cm und der Feldsensor mit Messstab zu erkennen. In den Abbildungen 15 und 16 sind der Messaufbau schematisch und die Messpositionen als Seitenansicht und Draufsicht dargestellt.

Abbildung 15:
Messposition „Seitenansicht“ (siehe auch Abbildung 13 „horizontale Ebene“);
oben PSZ mit kleinem und unten PSZ mit großem Zangenfenster

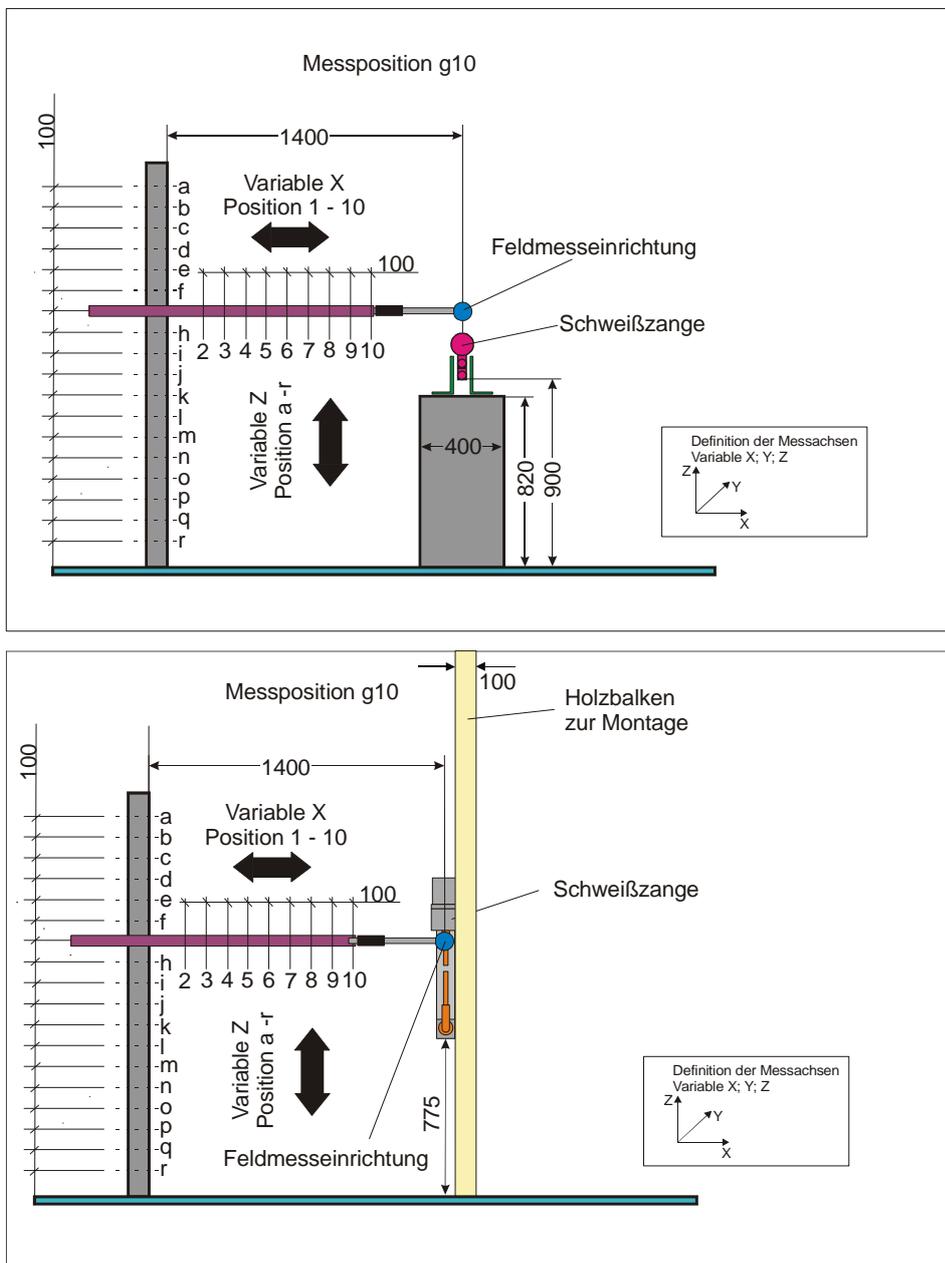
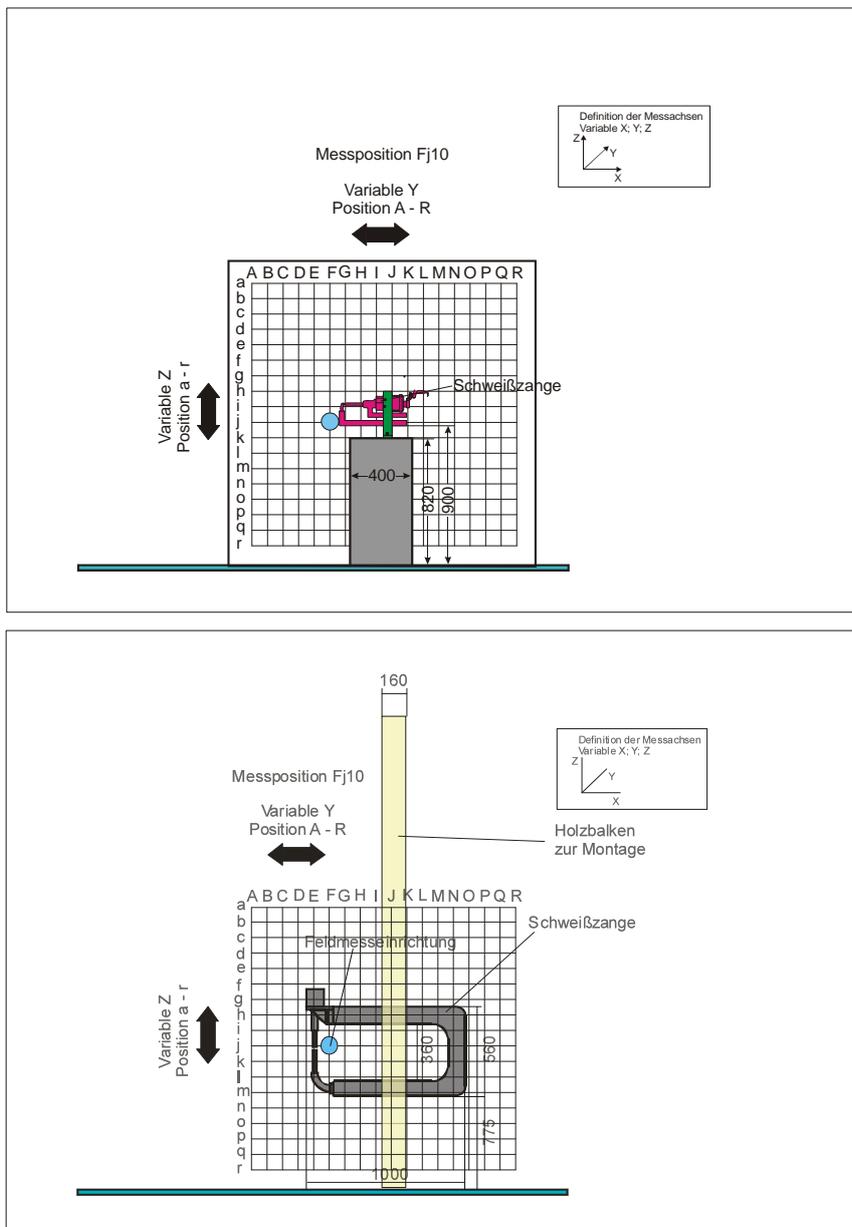




Abbildung 16:
Messposition „Draufsicht“ (siehe auch Abbildung 13 „vertikale Ebene“);
oben PSZ mit kleinem und unten PSZ mit großem Zangenfenster



Die Verteilung der magnetischen Flussdichte wurde in folgenden Schritten untersucht:

1. Ermittlung der räumlichen Verteilung und Bewertung der magnetischen Flussdichte an der PSZ mit dem kleinen Zangenfenster,
2. Messung der magnetischen Flussdichte an der PSZ mit dem großen Zangenfenster an ausgewählten Messorten,
3. Vergleich der Messergebnisse mit den Ergebnissen aus der Projektstufe 3.



Bei den Untersuchungen herrschten folgende klimatischen Bedingungen:

- Temperatur: 22,5 bis 24,4 °C
- Relative Luftfeuchte: 45,0 bis 55,5 %

Folgende Messeinrichtungen wurden eingesetzt

- EM-Feldmesssystem
Hersteller: Chauvin Arnoux
Typ: CA 42
H-Feldsonde
Hersteller: Chauvin Arnoux
Typ: M 400
Bandbreite: 10 Hz bis 400 kHz
Richtcharakteristik: X, Y, Z
Messbereich: 10 nT bis 25 mT
Messunsicherheit: ± 3 % der Anzeige
- Oszilloskop
Hersteller: Tektronix
Typ: TDS2012
Serien-Nr.: C046119
- Rogowski Current Wave Transducer
Hersteller: Power Electronic Measurements LTD
Typ: IRF 150 D12
Serien-Nr.: 6394-1546
Peak current rating: 30 kA/5 kHz

6.3 Ergebnisse der Labormessungen

Der den Messungen an beiden PSZ zugrunde liegende zeitliche Verlauf des Schweißstroms und ein Ausschnitt davon sind in den Abbildungen 17 und 18 dargestellt. Aus dem zeitlichen Verlauf des Schweißstroms in Abbildung 17 sind die Schweißdauer und die Höhe des Schweißstroms zu entnehmen. Die Schweißdauer umfasst 15 Perioden von je 20 ms und der Schweißstrom hat eine maximale Stromstärke von 9,5 kA. Aus Abbildung 18 ist der tatsächliche Verlauf des Schweißstroms ersichtlich. Aufgrund der in der Schweißstromquelle eingesetzten Phasenanschnittsteuerung weicht der Schweißstrom von der reinen Sinusform ab und hat einen lückenden Verlauf. Die Zeitdauer der Lücke im Schweißstrom beträgt pro Halbwelle etwa 1 ms.



Abbildung 17:
Zeitlicher Verlauf des Schweißstroms bei der Labormessung

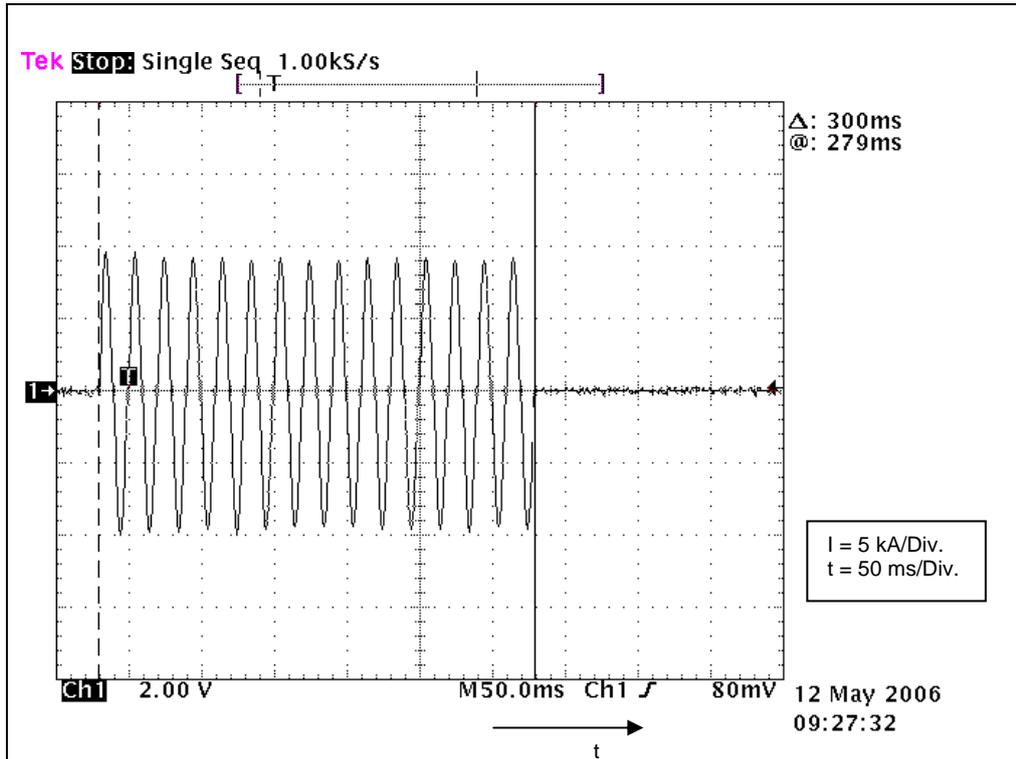
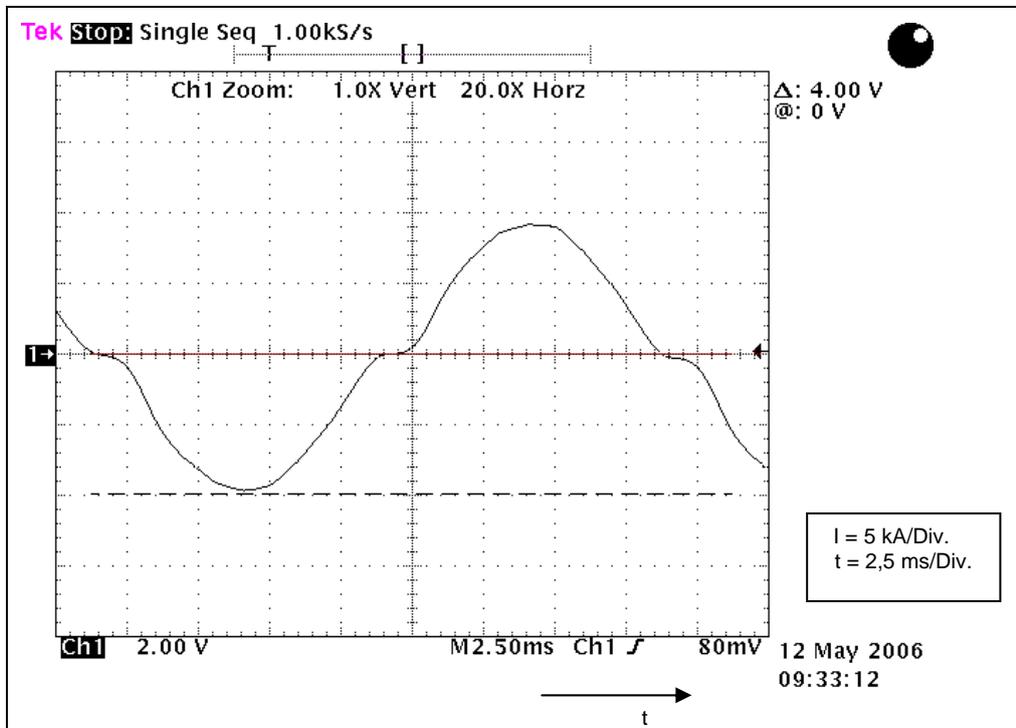


Abbildung 18:
Ausschnitt aus dem zeitlichen Verlauf des Schweißstroms bei der Labormessung





Die Abbildungen 19 und 20 geben einen Überblick über die Verteilungen der magnetischen Flussdichte an der PSZ mit dem kleinen Zangenfenster in den horizontalen und vertikalen Ebenen. Abbildung 19 zeigt horizontale Verteilungen im Abstand von 10 cm für Abstände zwischen 50 und 160 cm über dem Boden. Für die in Abbildung 15 aufgeführten Positionen 5 bis 10 sind in Abbildung 20 (siehe Seite 42) die vertikalen Verteilungen dargestellt.

Abbildung 19:

Verlauf der magnetischen Flussdichte an der PSZ mit dem kleinen Zangenfenster in horizontaler Ebene in Abhängigkeit vom Abstand h über dem Boden; Werte in den Legenden geben die magnetische Flussdichte in μT an

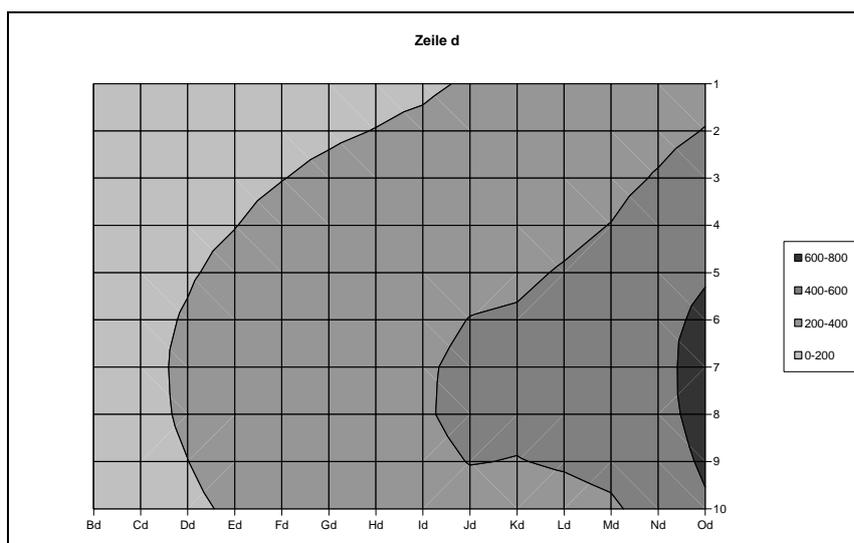
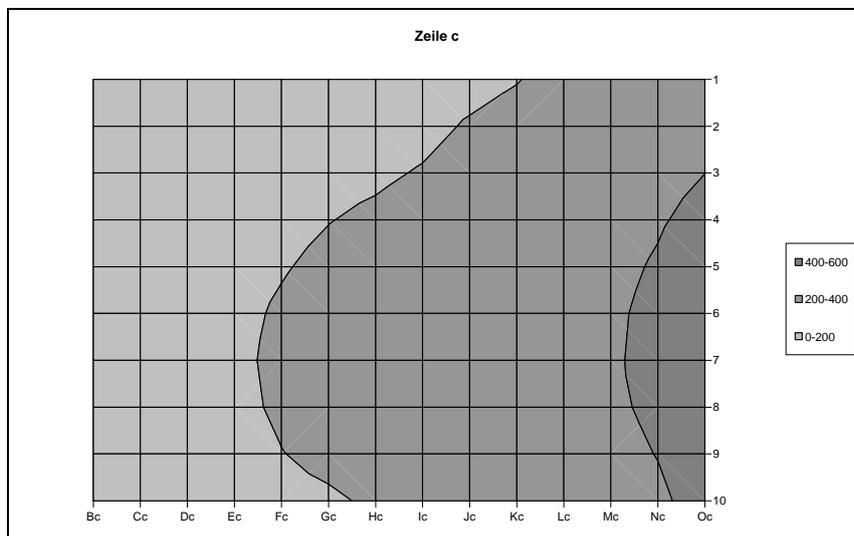
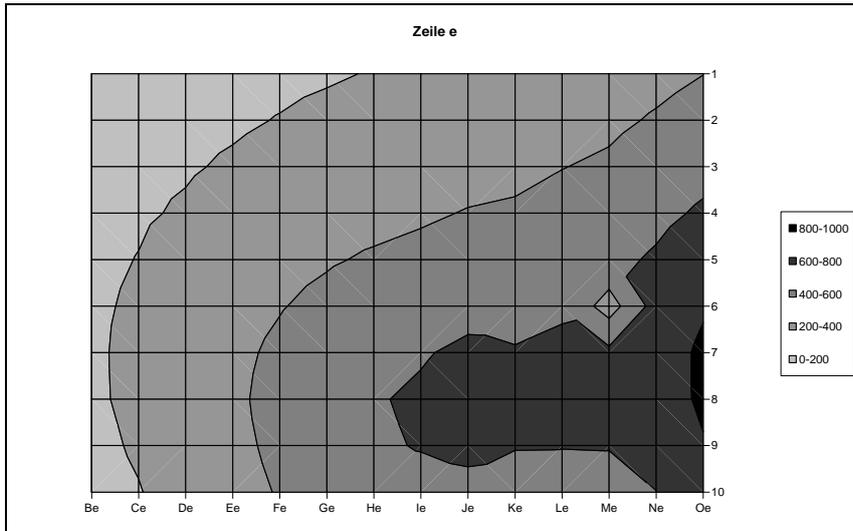
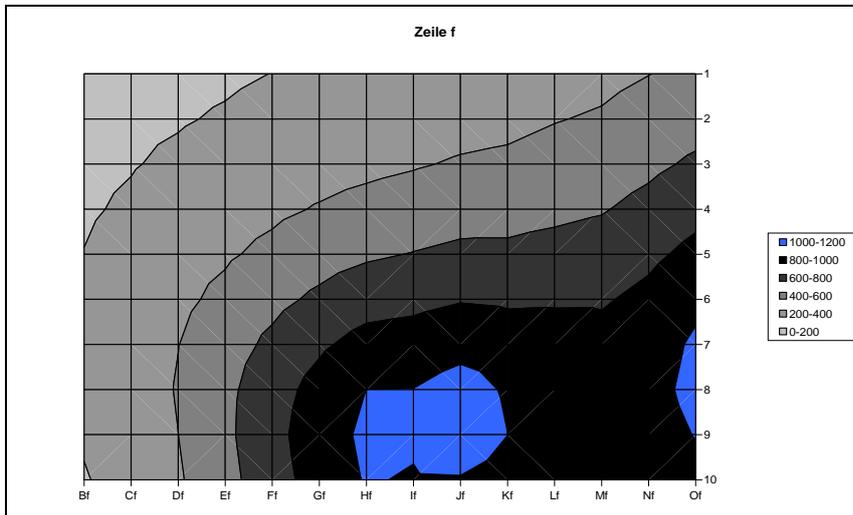




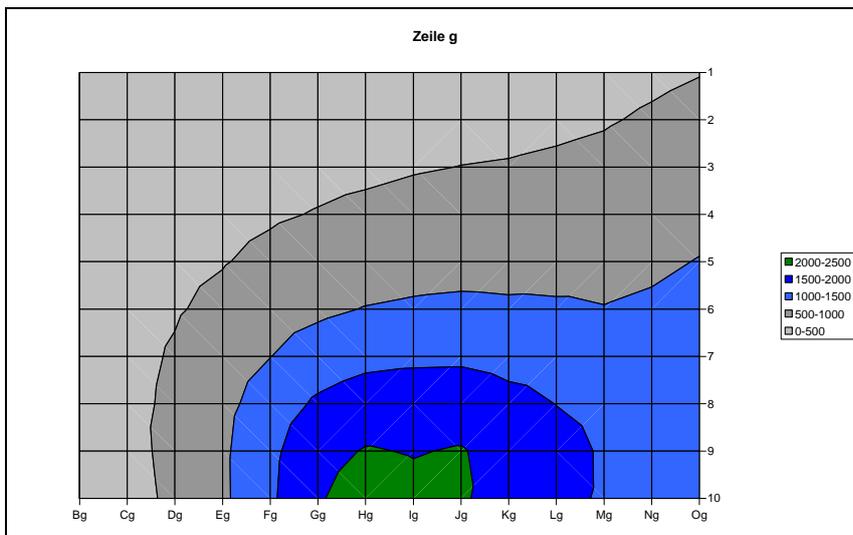
Abbildung 19: Fortsetzung



c) $h = 140$ cm



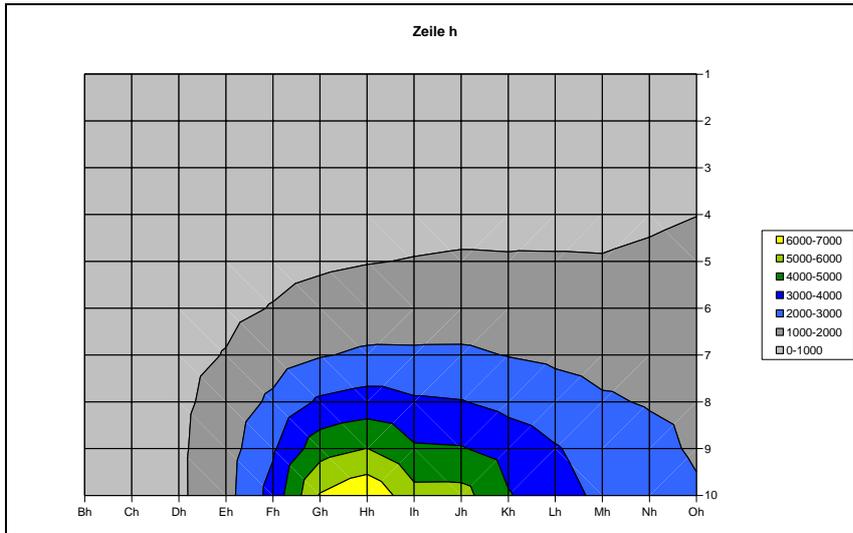
d) $h = 130$ cm



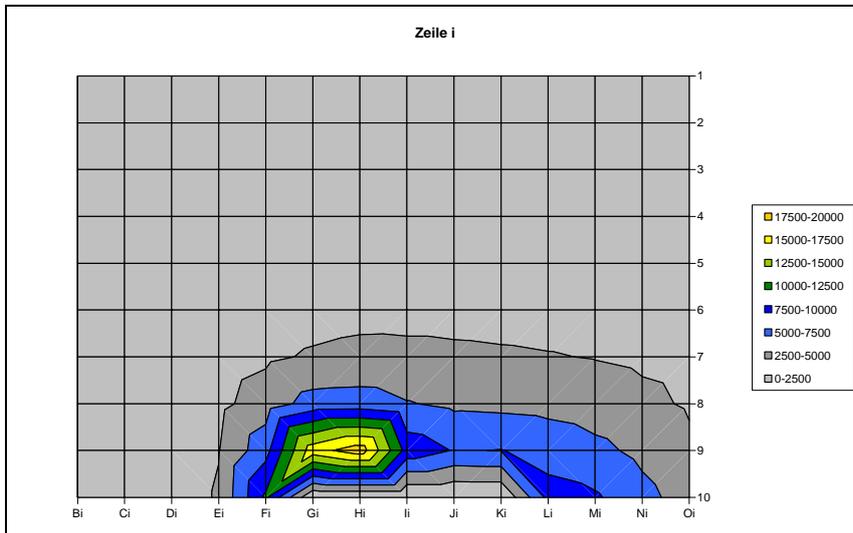
e) $h = 120$ cm



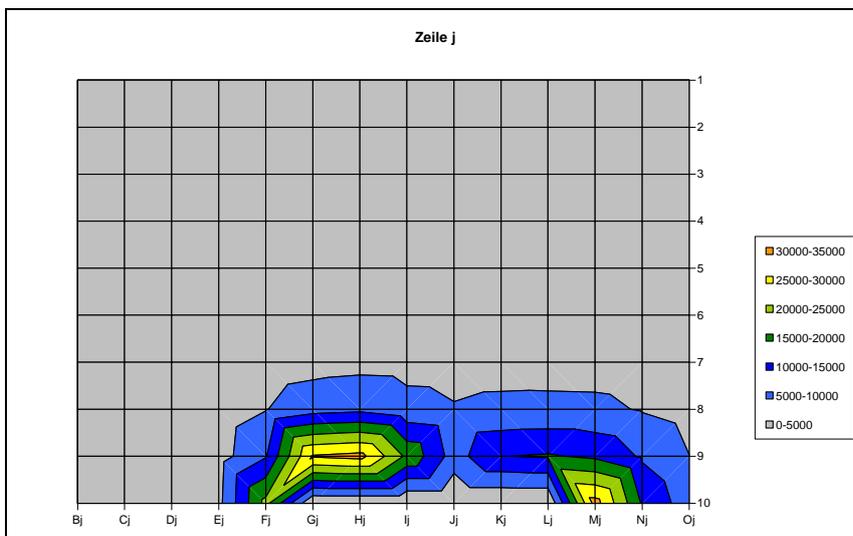
Abbildung 19: Fortsetzung



f) $h = 110 \text{ cm}$



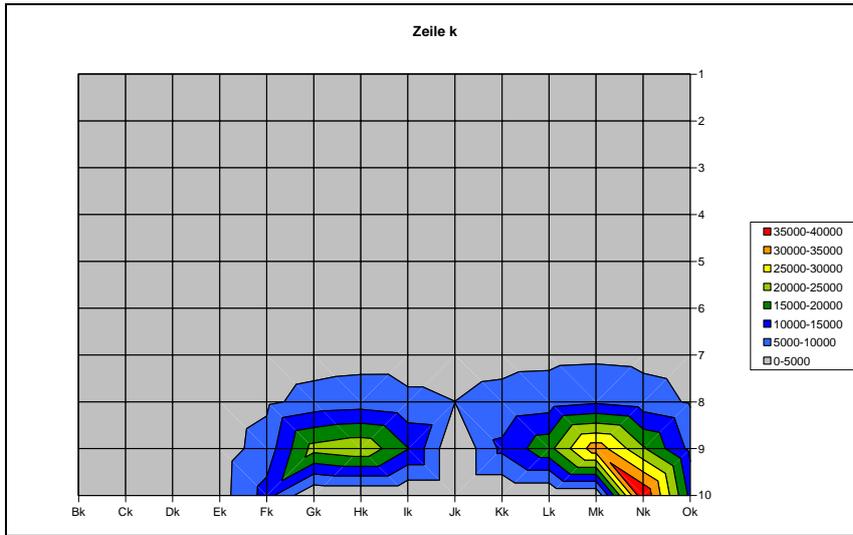
g) $h = 100 \text{ cm}$



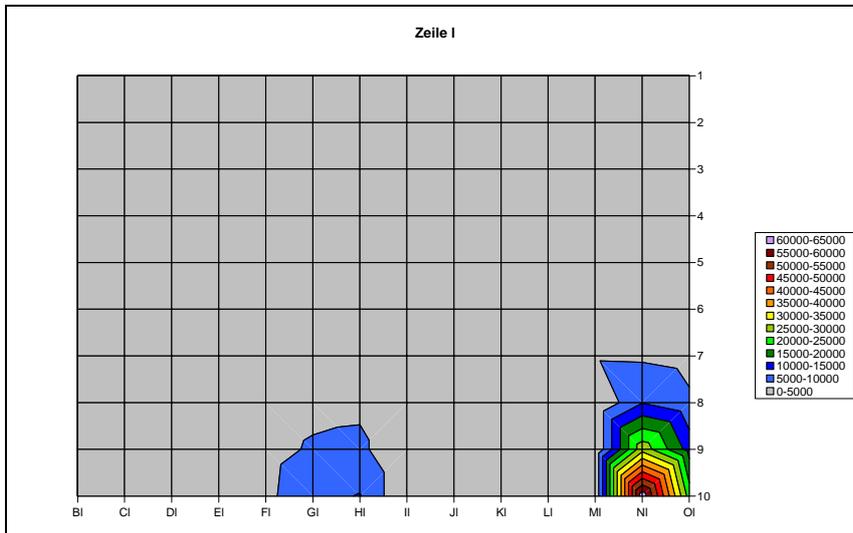
h) $h = 90 \text{ cm}$



Abbildung 19: Fortsetzung



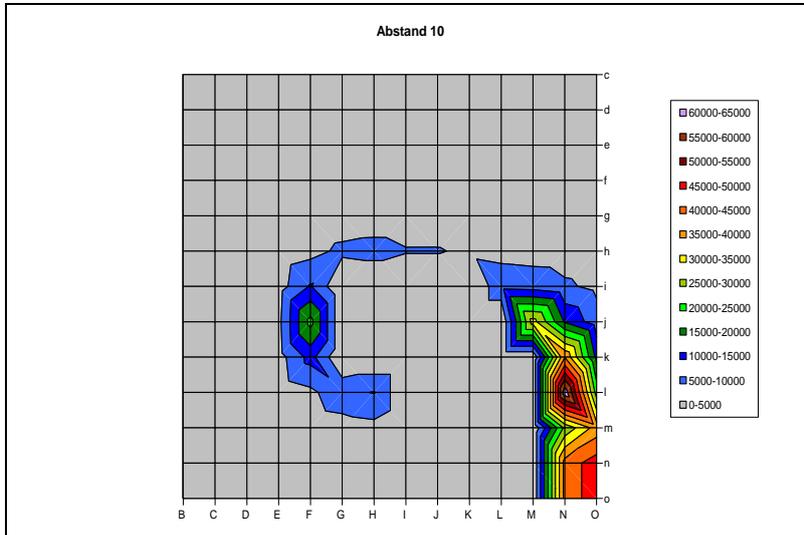
i) $h = 80$ cm



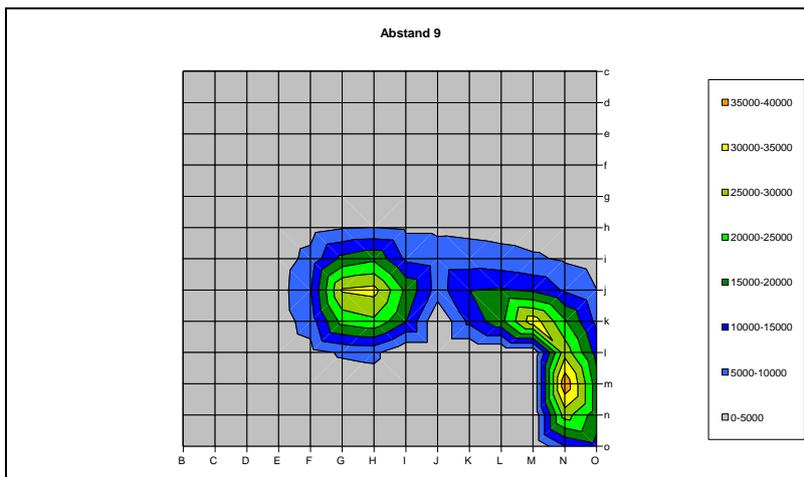
j) $h = 70$ cm



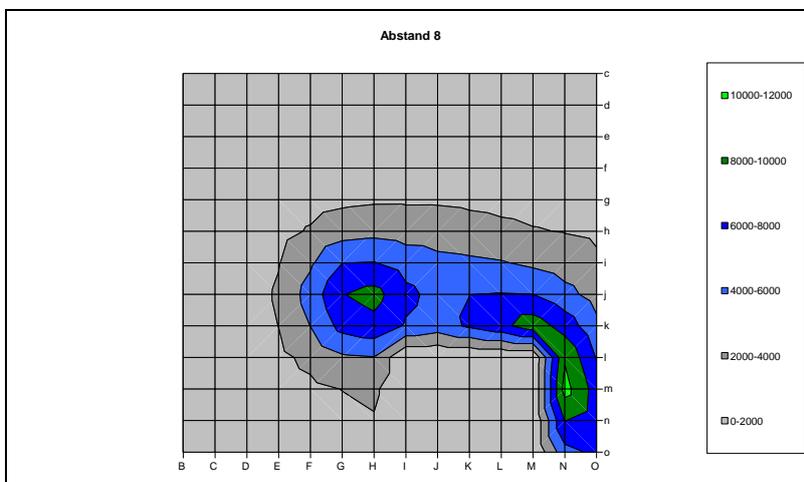
Abbildung 20:
 Verlauf der magnetischen Flussdichte an der PSZ mit dem kleinen Zangenfenster
 in vertikaler Ebene in Abhängigkeit vom Abstand d zur PSZ; Werte in den Legendens
 geben die magnetische Flussdichte in μT an



a) $d = 0$



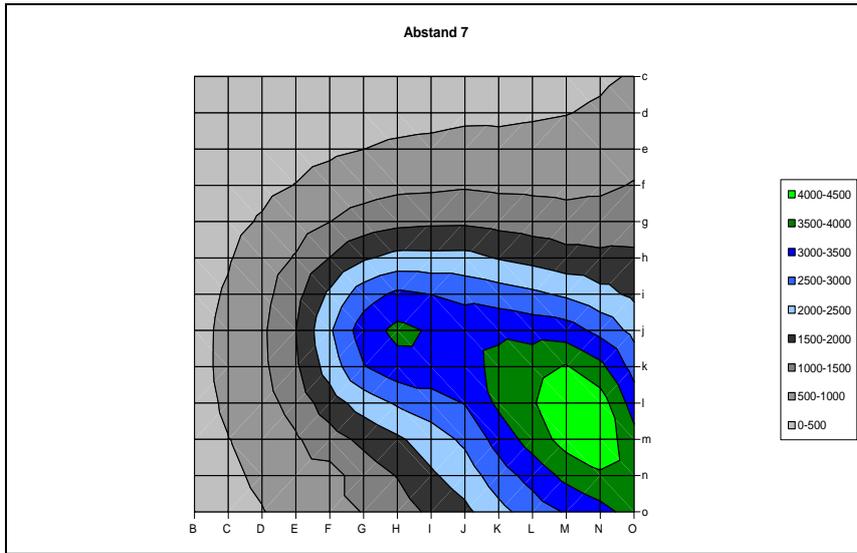
b) $d = 10 \text{ cm}$



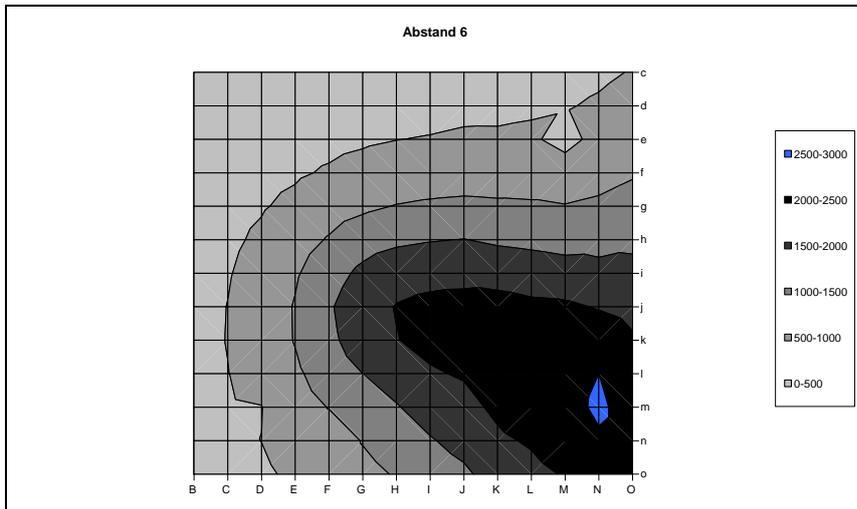
c) $d = 20 \text{ cm}$



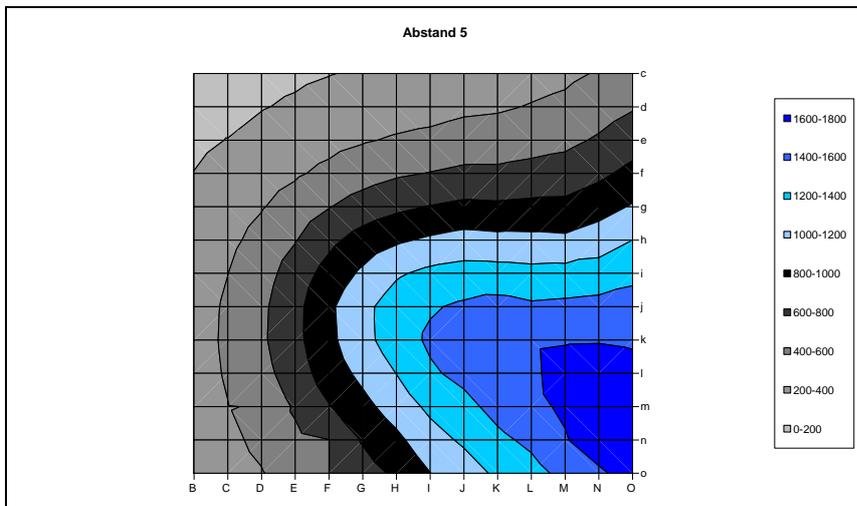
Abbildung 20: Fortsetzung



d) $d = 30$ cm



e) $d = 40$ cm



f) $d = 50$ cm



An der PSZ mit dem großen Zangenfenster wurden magnetische Flussdichten an ausgewählten Messpositionen, in den Messachsen X, Y und Z, gemessen. Folgende Messpositionen wurden für die Messung ausgewählt:

- Messachse X: Messposition „1J“ bis „10J“,
- Messachse Y: Messposition „8Aj“ bis „8Qj“,
- Messachse Z: Messposition „8Jc“ bis „8Jq“.

Die Lage der Messpositionen an der PSZ kann den Abbildungen 15 b und 16 b entnommen werden. In Abbildung 21 sind die Messergebnisse in den drei Messachsen dargestellt.

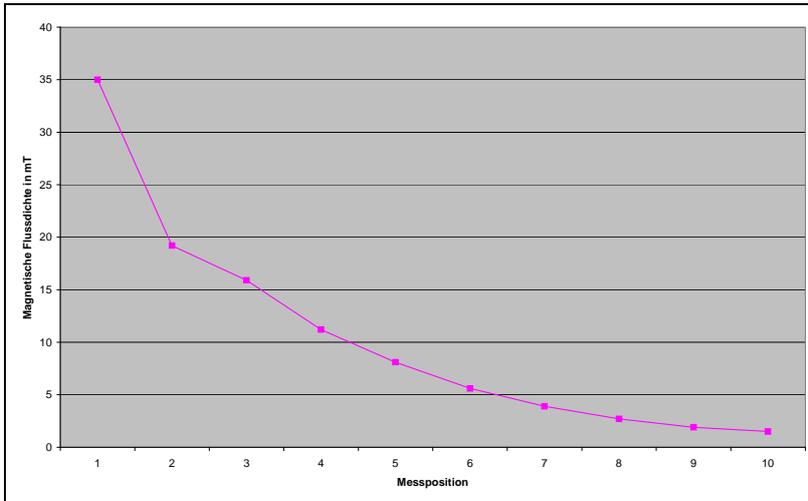
Der höchste Wert der magnetischen Flussdichte wurde mit 63,5 mT an der PSZ mit dem kleinen Zangenfenster an den Schweißkabeln am Messpunkt Ni gemessen (siehe Abbildung 16 oben).

In den Abbildungen 22 und 23 (siehe Seite 46) sind für die Ebenen mit den höchsten Flussdichtewerten die Verteilungen der magnetischen Flussdichte an der kleinen Schweißzange dargestellt. Abbildung 22 zeigt die Feldverteilung in vertikaler Ebene mit einem Abstand von 10 cm von der Schweißelektrode und Abbildung 23 die für die horizontale Ebene (Abstand 90 cm von der Schweißebene). In beiden Ebenen wurden die höchsten Werte der magnetischen Flussdichte mit 30 bis 35 mT an den Schweißelektroden und -kabeln gemessen.

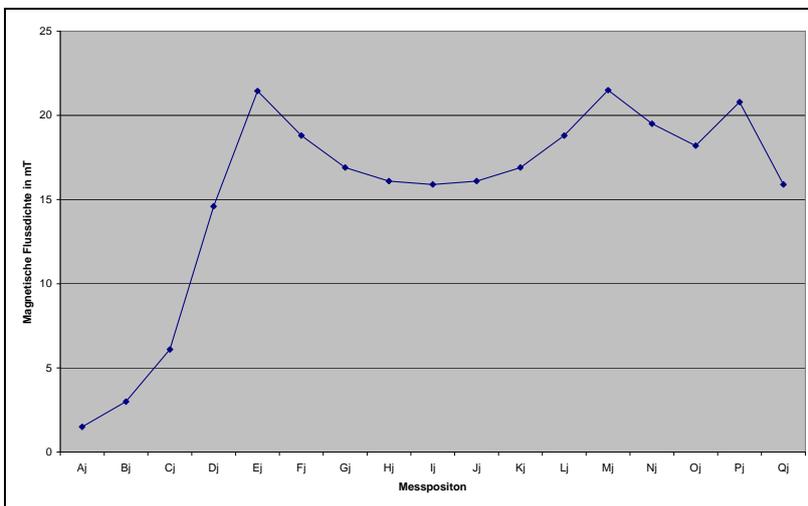
Beide Verteilungen zeigen, dass hohe magnetische Flussdichten nur in unmittelbarer Nähe der Schweißzange und -kabel auftreten. In einem Abstand von 20 bis 30 cm beträgt der Spitzenwert der magnetischen Flussdichte bereits weniger als 2 mT.



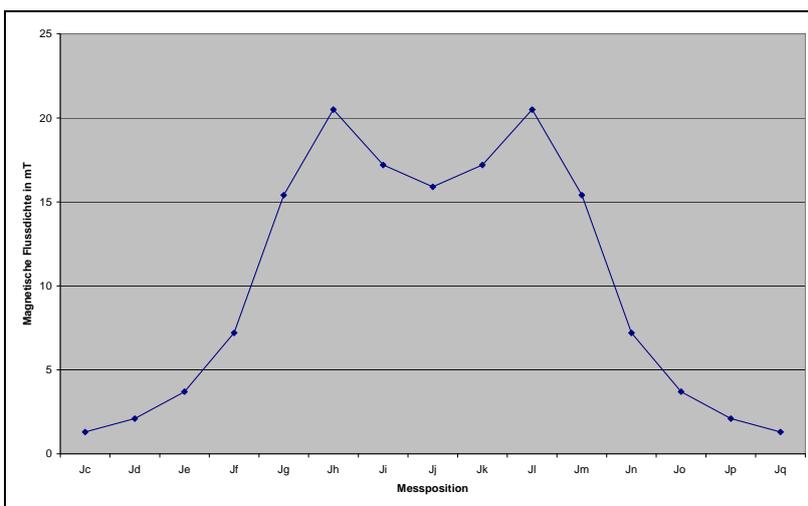
Abbildung 21:
Gemessene magnetische Flussdichten an der PSZ mit dem großen Zangenfenster



a) Messachse X:
Messposition 1Jj bis 10Jj,
Längsrichtung



b) Messachse Y:
Messposition 8Aj bis 8Qj,
horizontale Richtung



c) Messachse Z:
Messposition 8Jc bis 8Jo,
vertikale Richtung



Abbildung 22:
 Beispiel für eine Feldverteilung in vertikaler Ebene (Abstand $d = 10$ cm von der Schweißelektrode), gemessenen an der PSZ mit dem kleinen Zangenfenster; Werte in der Legende geben die magnetische Flussdichte in μT an

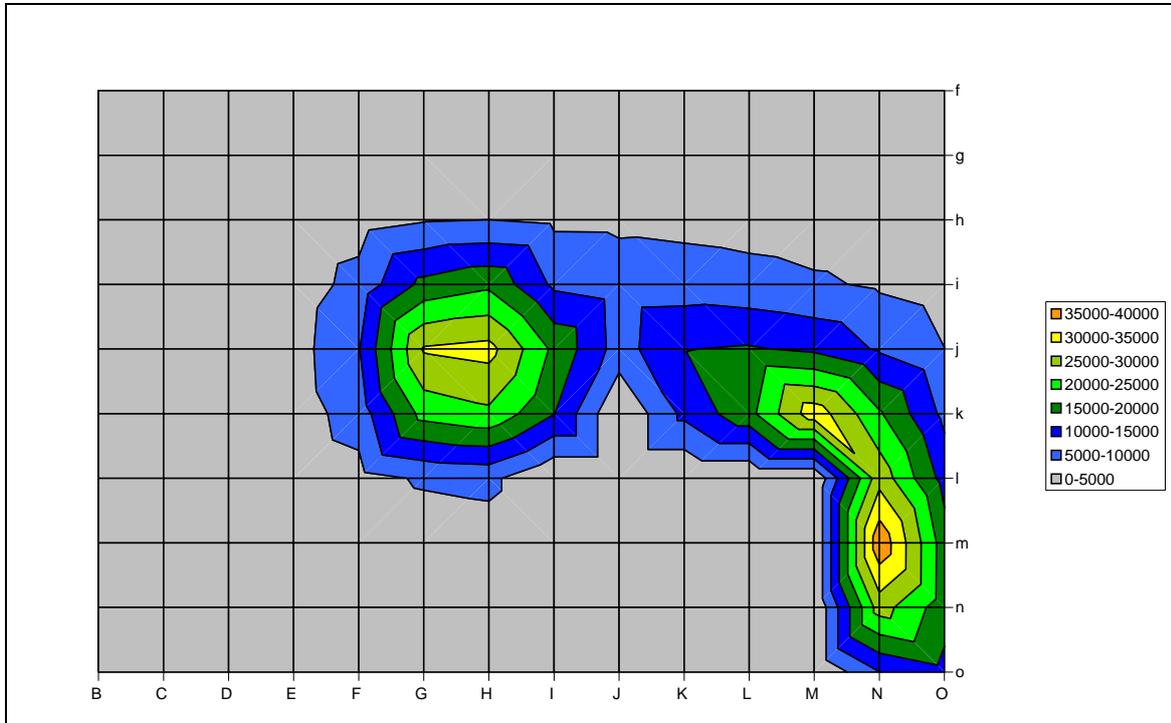
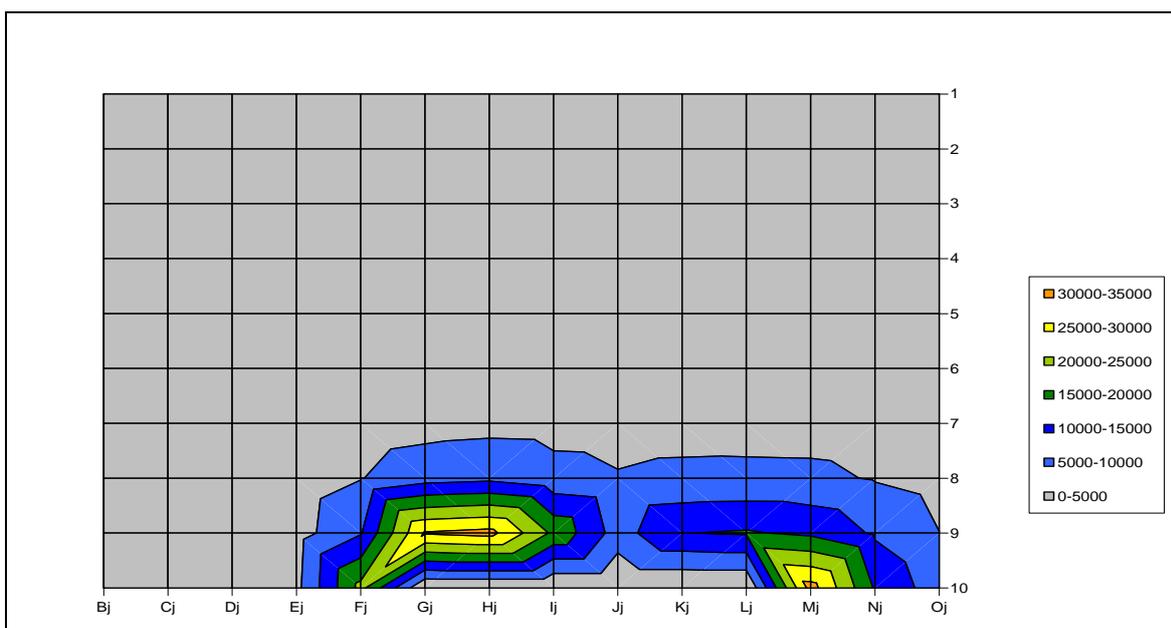


Abbildung 23:
 Beispiel für eine Feldverteilung in horizontaler Ebene (Abstand $h = 90$ cm vom Boden), gemessenen an der PSZ mit dem kleinen Zangenfenster; Werte in der Legende geben die magnetische Flussdichte in μT an





6.4 Zulässige Werte

Der zulässige Spitzenwert der magnetischen Flussdichte wird nach BGV B11, Anlage 1, Abschnitt 3, entsprechend der Vorgehensweise nach BGI 5011, Anhang A 1.1, ermittelt. Aus dem zeitlichen Verlauf des Schweißstroms in den Abbildungen 17 und 18 werden die verschiedenen Parameter (Tabelle 3) zur Berechnung des Spitzenwertes ermittelt. Sie gelten für beide untersuchten PSZ.

Tabelle 3:
Parameter zur Bestimmung der zulässigen Werte für die bei den Labormessungen verwendeten PSZ

Parameter	Wert
Anzahl der Schweißperioden	15
Phasenanschnitt pro Halbwelle	1 ms
Zeit aller Feldänderungen (Stromflusszeit) τ_D	270 ms
Gewichtungsfaktor [V]	1,92
Kleinster Wert der Dauer der Feldänderung τ_{pmin}	4,5 ms
Frequenz der Feldänderung f_P	55,5 Hz

Unter Berücksichtigung der maximalen Frequenz der Feldänderung ($f = 55,5$ Hz) und des Gewichtungsfaktors $V = 1,92$ ergeben sich für die magnetischen Flussdichten in verschiedenen Expositionsbereichen die zulässigen Spitzenwerte nach Tabelle 4.

Tabelle 4:
Zulässige Werte der magnetischen Flussdichte für die verschiedenen Expositionsbereiche

Bereich/Körperteil	Zulässige Werte
	Spitzenwert der magnetischen Flussdichte in mT
Expositionsbereich 1	3,28
Bereich erhöhter Exposition	6,22
Exposition der Extremitäten	8,2 ¹⁾ /15,5 ²⁾
Exposition der Hand/Finger	65,6 ¹⁾ /124,4 ²⁾

1) Zulässiger Spitzenwert der magnetischen Flussdichte bei einer Exposition der Extremitäten im Expositionsbereich 1

2) Zulässiger Spitzenwert der magnetischen Flussdichte bei einer Exposition der Extremitäten im Bereich erhöhter Exposition



6.5 Beurteilung und Bewertung der Ergebnisse

Die Messergebnisse für die PSZ mit dem kleinen und die mit dem großen Zangenfenster zeigen hohe magnetische Flussdichten in der Nähe der Elektroden, Elektrodenarme und Schweißkabel (Abbildungen 19 bis 23): Hier werden je nach Abstand und Ort der Exposition entweder einzelne oder alle zulässigen Werte nach Tabelle 4 überschritten. Um die zulässigen Werte für den Bereich erhöhter Exposition einhalten zu können, muss zu den verschiedenen Komponenten der PSZ ein Mindestabstand von etwa 30 cm bestehen. Die zulässigen Werte für den Expositionsbereich 1 werden jedoch erst bei einem Abstand von etwa 40 cm eingehalten. Wie im Abschnitt 5.2 erläutert, beträgt der Abstand zwischen Schweißer und PSZ meist weniger als 20 cm. Im Aufenthaltsbereich der Schweißer werden die zulässigen Werte der BGV B11 also fast immer überschritten. Somit muss die Einhaltung der Körperstromdichte (Basiswerte der BGV B11, Anlage 1, Tabelle 1) überprüft werden.

7 Projektstufe 3 – Feldsimulation

7.1 Allgemeines

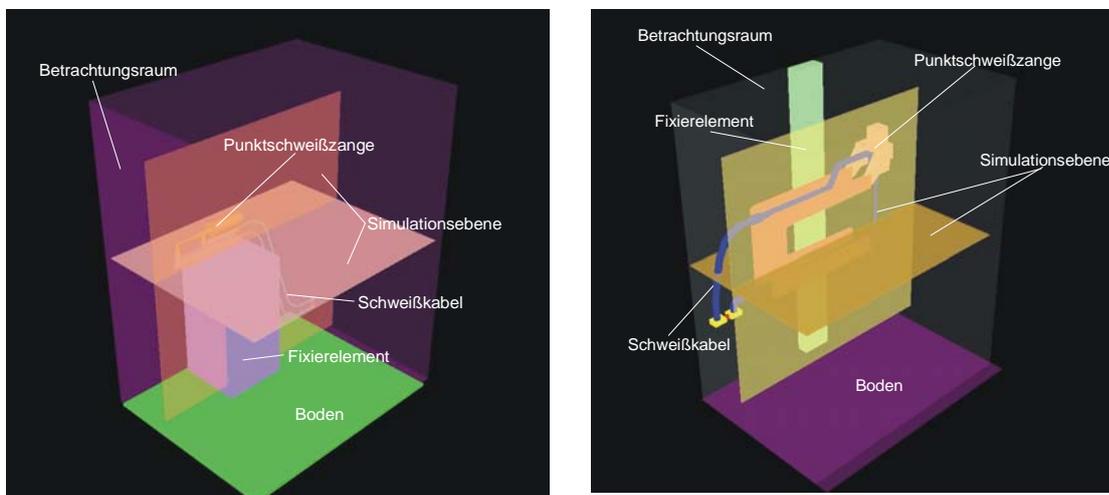
Die magnetischen Felder an den PSZ wurden mit dem Feldberechnungsprogramm EMPIRE™ des Instituts für Mobil- und Satellitenfunktechnik (IMST) berechnet. Mit dem Programm können die Felder von vorgegebenen Strukturen durch Berechnung simuliert und visualisiert werden. Das Programm enthält mehrere Module, deren Funktionalitäten auf die Oberfläche eines CAD-Programms aufsetzen, das als Benutzerschnittstelle fungiert. Über diese Schnittstelle werden die geometrische Struktur, Abmessungen, Materialeigenschaften, der konstruktive Aufbau, die Anordnung der Feldquelle (PSZ) und der Betrachtungsraum programmiert. Zur Berechnung der magnetischen Felder wird die Methode der finiten Differenzen im Zeitbereich (FDTD) angewendet.

7.2 Nachbildungen

Den Berechnungen der Feldverteilung wurden die in Abbildung 24 dargestellten Nachbildungen und Aufbauten für die PSZ mit dem kleinen und dem großen Zangenfenster zugrunde gelegt.

Abbildung 24:

Nachbildung des Mess- und Untersuchungsaufbaus zur Berechnung der magnetischen Felder für PSZ mit kleinem (links) und großem Zangenfenster (rechts)





Die Abbildung entspricht dem Mess- und Untersuchungsaufbau im Labor in Stufe 2 des Projekts (siehe hierzu Abbildung 14). Sie zeigt den Betrachtungsraum, zwei Simulationsebenen (horizontal und vertikal), den Boden und die Anordnung der PSZ mit Schweißkabel. Vergleichbar den Umgebungsbedingungen im Laboraufbau waren die PSZ in den Nachbildungen über einen elektrisch nicht leitenden Boden angeordnet.

7.3 Ziel der Feldsimulation

Ziel der Feldsimulation ist es, anhand eines Vergleichs von gemessenen und berechneten Feldverteilungen die Eignung der Nachbildungen des Mess- und Untersuchungsaufbau für einen Einsatz zur Berechnung der Körperstromdichten in einem anerkannten Körpermodell festzustellen. Hierzu wurden die berechneten Feldverteilungen mit den im Labor gemessenen verglichen. Dabei sollte festgestellt werden, ob beide Feldermittlungsverfahren – das auf Berechnung bzw. das auf Messung beruhende – zu ähnlichen Ergebnissen führen, d. h. ob die ermittelten Verteilungen der magnetischen Flussdichten gleich oder ähnlich sind. Dazu wurden aus den horizontalen und vertikalen Feldverteilungen für vergleichbare Orte die Werte der magnetischen Flussdichte ermittelt und miteinander verglichen.

7.4 Berechnung der Feldverteilung

Für beide Nachbildungen wurde die Verteilung der magnetischen Flussdichte in einer horizontalen Ebene etwa 1 000 mm über dem Boden, in einer vertikalen Ebene direkt an der Oberfläche und in einem Abstand von 200 mm zur Symmetrieachse der PSZ berechnet. Nach den Abbildungen 15 und 16 entspricht dies der horizontalen Ebene (A-R)_i und den vertikalen Ebenen (A-R)_(a-r) in den Positionen 8 und 10¹.

Für alle Feldberechnungen galten als Parameter ein Schweißstrom mit einer Frequenz von 50 Hz (ohne Phasenanschnitt) und eine Stromstärke von $I = 10$ kA.

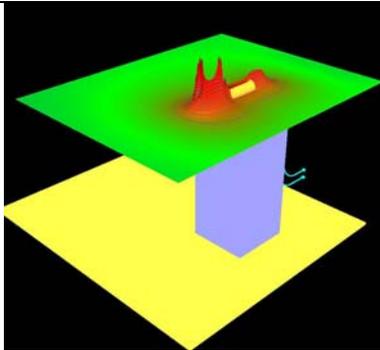
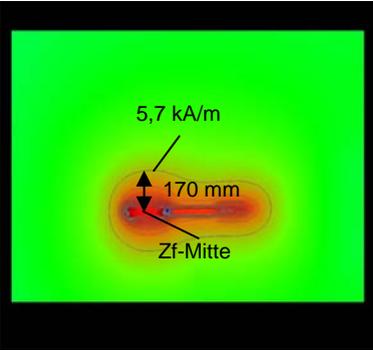
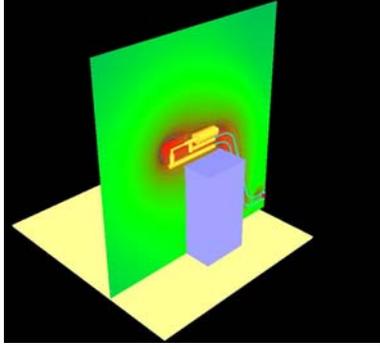
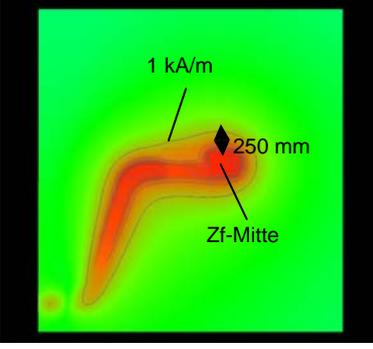
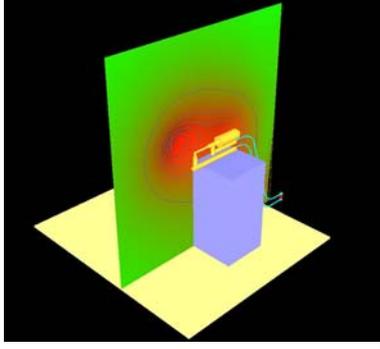
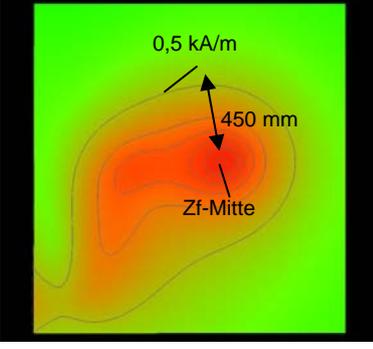
¹ Messort Position 10 = (Position 10 nach Abbildung 15 bzw. 16) - (Radius der Feldsonde + Radius der Elektroden an der PSZ)



7.5 Ergebnisse der Feldsimulation

Die Ergebnisse der Feldberechnungen sind in den Abbildungen 25 und 26 zu sehen. Abgebildet ist das magnetische Feld in der Umgebung der PSZ in einer horizontalen und in zwei vertikalen Simulationsebenen, jeweils in dreidimensionaler Ansicht als Draufsicht.

Abbildung 25:
Ergebnisse der Feldberechnung an der PSZ mit dem kleinen Zangenfenster (Zf)

		Nachbildung und Modell	Feldverteilung Draufsicht	Legende/ Spitzenwert H_{max}^*)
Simulationsebene	Horizontal 1 000 mm über dem Boden			<ul style="list-style-type: none"> 120.000 kA/m 37.940 kA/m 12.000 kA/m 3.794 kA/m 1200.000 A/m 379.400 A/m 100.000 A/m 37.940 A/m 12.000 A/m 3.794 A/m 1.200 A/m <p>$H_{max} = 127 \text{ kA/m}$</p>
	Vertikal an „PSZ“			<ul style="list-style-type: none"> 50.000 kA/m 15.820 kA/m 5.000 kA/m 1.582 kA/m 500.000 A/m 158.200 A/m 50.000 A/m 15.820 A/m 5.000 A/m 1.582 A/m 500.000 mA/m <p>$H_{max} = 49 \text{ kA/m}$</p>
	Vertikal 200 mm von „PSZ“			<ul style="list-style-type: none"> 10.000 kA/m 3.162 kA/m 1.000 kA/m 316.282 A/m 100.000 A/m 31.620 A/m 10.000 A/m 3.162 A/m 1.000 A/m 316.200 mA/m 100.000 mA/m <p>$H_{max} = 5,7 \text{ kA/m}$</p>

*) Feldstärken jeder Farbstufe; H_{max} = berechneter Spitzenwert der magnetischen Feldstärke



Abbildung 26:
Ergebnisse der Feldberechnung an der PSZ mit dem großen Zangenfenster (Zf)

	Simulationsebene und Modell	Feldverteilung Draufsicht	Legende/ Spitzenwert H_{max} *)
Simulationsebene	Horizontal 1 000 mm über dem Boden		 <ul style="list-style-type: none"> ■ 50.000 kA/m ■ 15.820 kA/m ■ 5.000 kA/m ■ 1.582 kA/m ■ 500.000 A/m ■ 158.200 A/m ■ 50.000 A/m ■ 15.820 A/m ■ 5.000 A/m ■ 1.582 A/m ■ 500.000 mA/m $H_{max} = 48,92 \text{ kA/m}$
	Vertikal an „PSZ“		 <ul style="list-style-type: none"> ■ 50.000 kA/m ■ 15.820 kA/m ■ 5.000 kA/m ■ 1.582 kA/m ■ 500.000 A/m ■ 158.200 A/m ■ 50.000 A/m ■ 15.820 A/m ■ 5.000 A/m ■ 1.582 A/m ■ 500.000 mA/m $H_{max} = 50,04 \text{ kA/m}$
	Vertikal 200 mm von „PSZ“		 <ul style="list-style-type: none"> ■ 50.000 kA/m ■ 15.820 kA/m ■ 5.000 kA/m ■ 1.582 kA/m ■ 500.000 A/m ■ 158.200 A/m ■ 50.000 A/m ■ 15.820 A/m ■ 5.000 A/m ■ 1.582 A/m ■ 500.000 mA/m $H_{max} = 10,64 \text{ kA/m}$

*) Feldstärken jeder Farbstufe; H_{max} = berechneter Spitzenwert der magnetischen Feldstärke

Der Verlauf der magnetischen Feldstärke ist in den einzelnen Abbildungen farblich abgestuft. Die Skalierung verläuft von der Farbe Rot über Gelb und Grün nach Blau. Rot steht für hohe und Blau für niedrige magnetische Feldstärken. Zur Bestimmung der magnetischen Flussdichte B müssen alle Feldstärkewerte mit der Magnetischen Feldkonstante $\mu_0 = 1,256 \cdot 10^{-6} \text{ Vs/Am}$ multipliziert werden.



Wie in den Labormessungen treten hohe magnetische Feldstärken lokal begrenzt nur in der Nähe der Strom führenden Kabel (Schweißkabel) und an den Elektrodenarmen bzw. Schweißelektroden der PSZ auf. An der PSZ mit dem kleinen Zangenfenster wurde in der horizontalen Simulationsebene ein Höchstwert von 127 kA/m (Abbildung 25) für die magnetische Feldstärke in den Berechnungen ausgewiesen; das entspricht einer magnetischen Flussdichte von ca. 160 mT. Die Feldverteilung zeigt, dass dieser Wert an den Schweißelektroden in der Nähe der Schweißstelle auftritt. Aufgrund der Abmessungen der Schweißelektrode ist hier der Elektrodendurchmesser und damit die wirksame Länge der magnetischen Feldlinien am kleinsten, sodass die magnetische Feldstärke H entsprechend

$$H = \frac{I}{\ell}$$

mit

H magnetische Feldstärke

I Strom durch die Elektroden

ℓ Länge der Feldlinien an der Schweißelektrode

den höchsten Wert annimmt. Der Feldverlauf weist in der unmittelbaren Umgebung der PSZ starke Feldänderungen auf. Insbesondere in der Nähe der Schweißelektroden, Elektrodenarme und Schweißkabel ist der Abstand zwischen zwei Feldlinien sehr klein. Ab einem Abstand von 200 mm zur Symmetrieachse der PSZ (Modellmitte) ist der Verlauf der Feldabnahme stark abgeflacht.

In Abbildung 25 sind für die vertikalen Simulationsebenen „an PSZ“ und „200 mm von PSZ“ die Feldverläufe des magnetischen Feldes in der Umgebung der PSZ und der Schweißkabel zu sehen, die auch in diesen Ebenen eine lokale Begrenzung des magnetischen Feldes zeigen. Auf der Simulationsebene „Vertikal an PSZ“ – der tatsächliche Abstand zur Zangenfenstermitte beträgt 45 mm – ist am Verlauf des magnetischen Feldes zu erkennen, dass der Höchstwert der magnetischen Feldstärke in der Mitte der PSZ und zwischen den Schweißkabeln liegt. Der Höchstwert der Feldstärke in der Mitte des Zangenfensters beträgt 49 kA/m (61 mT). Er ist damit etwa um den Faktor 2,5 kleiner als an den Elektroden der PSZ. Vom Höchstwert aus



nimmt die magnetische Feldstärke mit zunehmendem Abstand in alle Richtungen ab; Ausnahme ist der Feldstärkeverlauf zwischen den Schweißkabeln.

In Abbildung 25 zeigen die Feldverläufe in der Simulationsebene Vertikal „200 mm von PSZ“ die berechnete magnetische Feldstärke für eine vertikale Ebene im Abstand von 200 mm zur Symmetrieachse der PSZ. Das Maximum der magnetischen Feldstärke von 5,7 kA/m befindet sich wieder in der Mitte des Zangenfensters. Gegenüber dem Höchstwert an den Elektroden (127 kA/m) hat die magnetische Feldstärke um mehr als das 20-fache abgenommen.

Die Feldverteilungen in Abbildung 25 zeigen ebenfalls, dass die Feldstärke mit zunehmendem Abstand vom Höchstwert sehr schnell abnimmt. Zur Verdeutlichung dieser Abhängigkeit ist in den Feldverteilungen der Abbildung 25 für die im Übergangsbereich von gelb nach grün liegende Feldlinie die Feldstärke und der von der Zangenfenstermitte gemessene maximale Abstand in Millimeter angegeben.

Tabelle 5 stellt den am Messort „Hj“ (Abbildung 16 oben), in den Positionen 4 bis 10 gemessenen magnetischen Flussdichten die bei der Feldsimulation berechneten Werte gegenüber.

Tabelle 5:
Berechnete und gemessene magnetische Flussdichten an der PSZ mit kleinem Zangenfenster für die Position „Hj“

Position in den Labormessungen	Abstand zur Symmetrieachse der PSZ in mm	Magnetische Flussdichte in mT ermittelt durch	
		Feldsimulation	Messung
10	0	61,5	-
9	100	27,3	31,6
8	200	7,2	8,7
7	300	1,9	3,6
6	400	1,1	2,0
5	500	0,6	2,4
4	600	0,6	1,0



Die Feldverteilungen für die PSZ mit dem großen Zangenfenster sind in Abbildung 26 dargestellt. Sie zeigen hohe magnetische Feldstärken an den Elektroden, Elektrodenarmen und am PSZ-Chassis. Das Maximum der magnetischen Feldstärke befindet sich an den Schweißkabeln (siehe Abbildung 26, Simulationsebene „Horizontal 1 000 mm über Boden“). Der höchste Wert beträgt etwa 50 kA/m (ca. 63 mT). Im Bereich des Zangenfensters sind die Feldstärken mit Werten zwischen 5 und 15 kA/m wesentlich niedriger.

Weiterhin ist der Einfluss des Aluminiumrahmens auf den Feldverlauf zu erkennen. Hier treten an den Kanten hohe Feldänderungen auf, die den Feldverlauf an der PSZ verzerren. Die Feldstärken sind annähernd so hoch wie die am Schweißkabel und an den Schweißelektroden.

Tabelle 6 stellt die am Messort „Jj“ (Abbildung 16, unten) in den Positionen 4 bis 10 gemessenen magnetischen Flussdichten (Spalte Messung) sowie die entsprechenden Werte der Feldsimulation gegenüber.

Tabelle 6:
Berechnete und gemessene magnetische Flussdichten an der PSZ mit großem Zangenfenster für die Position „Jj“

Position in den Labormessungen	Abstand zur Symmetrieachse der PSZ in mm	Magnetische Flussdichte in mT ermittelt durch	
		Feldsimulation	Messung
10	0	36	35
9	100	22,7	19,2
8	200	13,4	15,9
7	300	8,3	11,2
6	400	5,1	8,1
5	500	3,6	5,6
4	600	3,0	3,9

7.6 Schlussfolgerungen

Der Vergleich der in den Tabellen 5 und 6 aufgeführten magnetischen Flussdichten sowie der Vergleich der aus den Messungen und den aus den Feldsimulationen



berechneten Feldverteilungen (Abbildungen 22 und 23, 25 und 26) zeigt eine weitgehende Übereinstimmung zwischen Feldverläufen und magnetischen Flussdichten. Die Nachbildungen und Aufbauten für die PSZ sind für Expositionsrechnungen geeignet. Mit dem Programm EMPIRE kann man nahezu die tatsächliche Exposition der Schweißer ermitteln. Den Berechnungen der Körperstromdichten können somit reale Feldbedingungen zugrunde gelegt werden.



8 Projektstufe 4 – Berechnung der Körperstromdichten

8.1 Allgemeines

Um induzierte Körperstromdichten im menschlichen Gewebe zu berechnen, wurde ein dreidimensionales Anatomiemodell des menschlichen Körpers in ein Feldsimulationsmodell integriert. Als Körpermodell diente das im Visible-Human-Projekt des Air Force Research Laboratories entwickelte Modell. Es enthält mehr als 40 unterschiedliche, nach anatomischen Gesichtspunkten angeordnete Gewebearten, wie Muskeln, Lunge, Hirn, Haut, Knochen, Fett, Augen sowie Blut mit einer Auflösung pro Voxel von $(3 \times 3 \times 3) \text{ mm}^3$. Die Voxelgröße des Modells beträgt $x = 196$, $y = 114$ und $z = 626$ Voxel. Das entspricht den folgenden Körpermodellabmessungen: Schulterbreite = 588 mm, Körperbreite = 342 mm und Körpergröße = 1 878 mm.

Um typische Arbeitspositionen eines Schweißers nachzubilden, wurde das Körpermodell in den Nachbildungen des Laboraufbaus (Abbildung 24) entsprechend der Arbeitspositionen eines Schweißers positioniert. Da diese von seinem Standort, der Stellung der Schweißeinrichtung bzw. des Zangenfensters, den Abmessungen der Schweißeinrichtung und von der Verlegung der Schweißkabel abhängt, wurde der Einfluss dieser Variablen in den Expositionsmodellen berücksichtigt.

In den Expositionsmodellen wurde daher unterschieden zwischen

- den Ausführungen der PSZ (kleines und großes Zangenfenster),
- der Stellung der PSZ und des Zangenfensters (horizontal, vertikal),
- der Stellung eines Schweißers an der PSZ
(Körpermodell seitliche oder mittige Position am Zangenfenster),
- dem Abstand zwischen dem Körpermodell und der PSZ und
- der Verlegung der Schweißkabel.

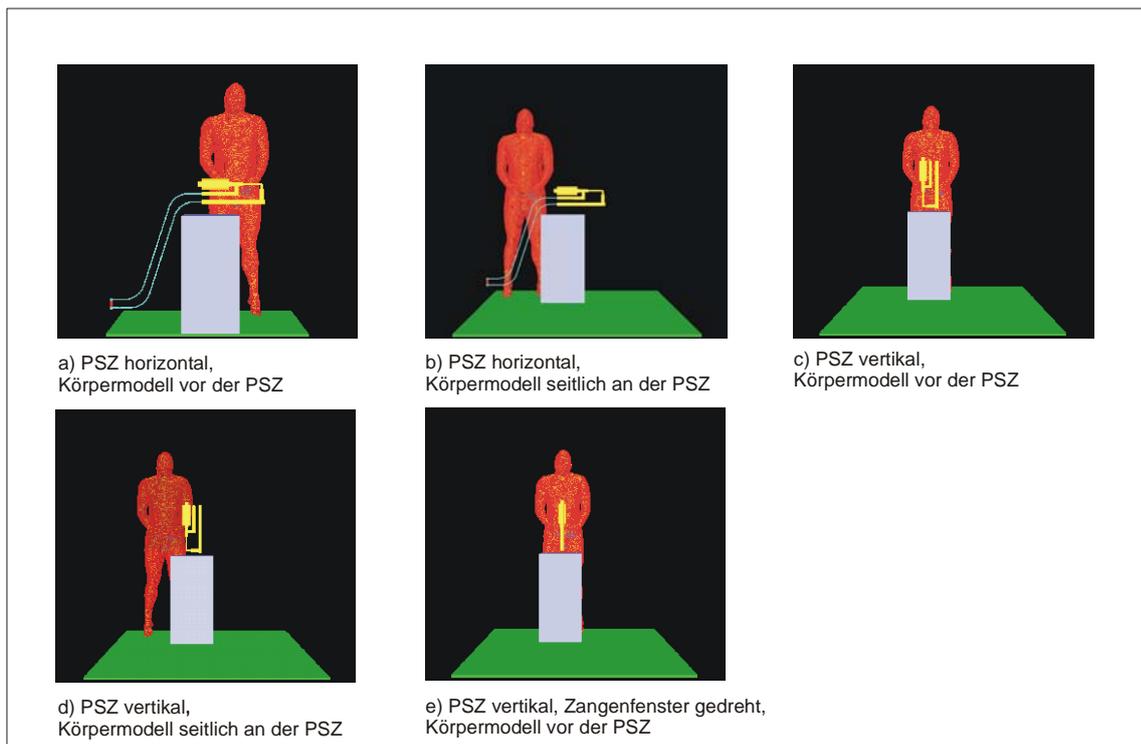
Für alle Körperstromdichteberechnungen galten die Parameter, die in der Praxis ermittelt wurden. Den Berechnungen wurde ein 50-Hz-Wechselstrom ohne Phasen-

anschnitt mit einem Spitzenwert von $I = 10 \text{ kA}$ zugrunde gelegt. Die Werte entsprechen damit denen aus den Feldmessungen in Projektstufe 2.

8.2 Expositionsnachbildung

In den Abbildungen 27 und 28 sind die Expositionsnachbildungen für unterschiedliche Arbeitssituationen an den PSZ mit dem kleinen und dem großen Zangenfenster zu sehen. Sie stellen verschiedene Arbeitssituationen an der Schweißzange nach. An der PSZ mit dem kleinen Zangenfenster wurden die Körperstromdichten für fünf unterschiedliche Arbeitspositionen eines Schweißers ermittelt (siehe Abbildung 27).

Abbildung 27:
Expositionsnachbildungen für Arbeitssituationen an der PSZ mit kleinem Zangenfenster



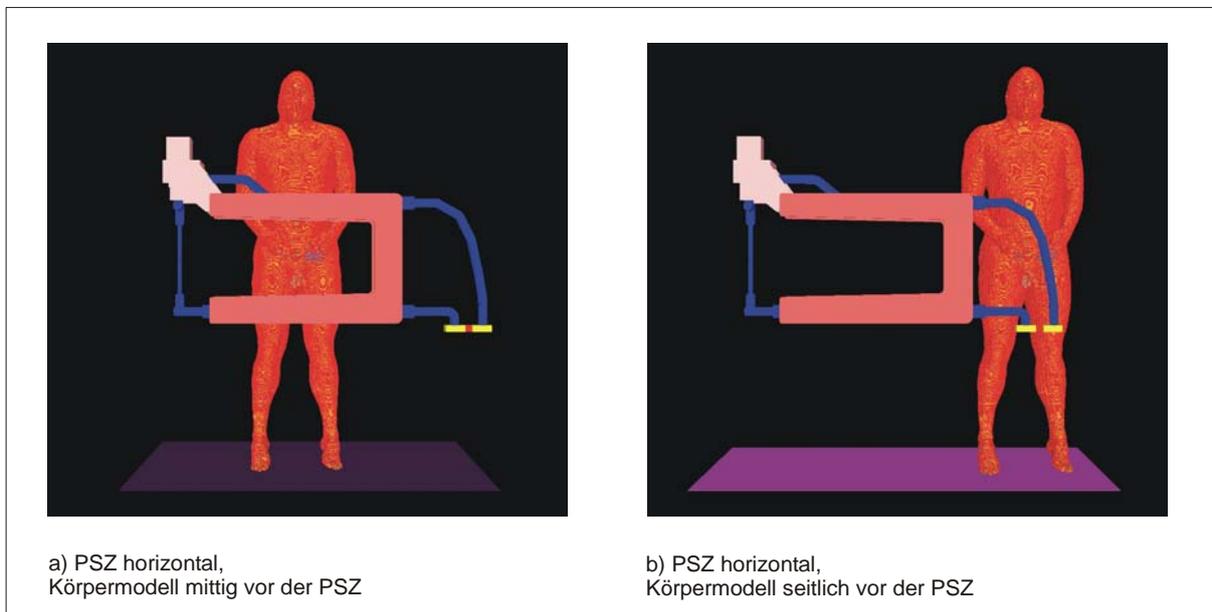
Wie Abbildung 27 a) bis d) zeigt, ist das Zangenfenster der PSZ vor dem Körpermodell so angeordnet, dass die Hauptrichtung des magnetischen Flusses auf die Vorderseite des Körpermodells trifft. Bei dem Simulationsmodell in Abbildung 27 e) ist das Zangenfenster um 90° gedreht, sodass die Hauptrichtung des magnetischen Flusses parallel zur Vorderseite des Körpermodells verläuft. Der Einfluss der Schweißkabel auf die Exposition wurde nur in den Expositionsnachbildungen mit



der horizontal angeordneten PSZ berücksichtigt; siehe Abbildung 27 a) und 27 b). Beide Nachbildungen stellen den Laboraufbau bei den Untersuchungen in Projektstufe 2 nach.

An der PSZ mit dem großen Zangenfenster wurde die Exposition nur für eine Arbeitsposition in der Mitte des Zangenfensters und eine Position in der Nähe der Schweißkabelzuführung berechnet (Abbildung 28).

Abbildung 28:
Expositionsnachbildungen für zwei typische Arbeitssituationen an der PSZ mit großem Zangenfenster



Für die Arbeitssituationen in den Abbildungen 27 und 28 wurden die Körperstromdichten im Körpermodell bei unterschiedlichen Abständen zwischen Körpermodell und Zangenfenster berechnet: Für die Expositionsmodelle mit der PSZ mit kleinem Zangenfenster für die Abstände 0, 200 und 400 mm; für die PSZ mit großem Zangenfenster bei 0, 200, 400 und 600 mm. Die Abbildungen 29 und 30 zeigen für jede simulierte Arbeitssituation eine Draufsicht der Expositionsnachbildungen, für die Körperstromdichten berechnet wurden. Auf den Abbildungen sind der Simulationsraum, die Nachbildung des Mess- und Untersuchungsaufbaus, die PSZ, der Verlauf des Schweißkabels und die verschiedenen Standorte des Körpermodells zu sehen.



Abbildung 29:
Schematische Darstellung der fünf unterschiedlichen Arbeitssituationen für die PSZ mit kleinem Zangenfenster

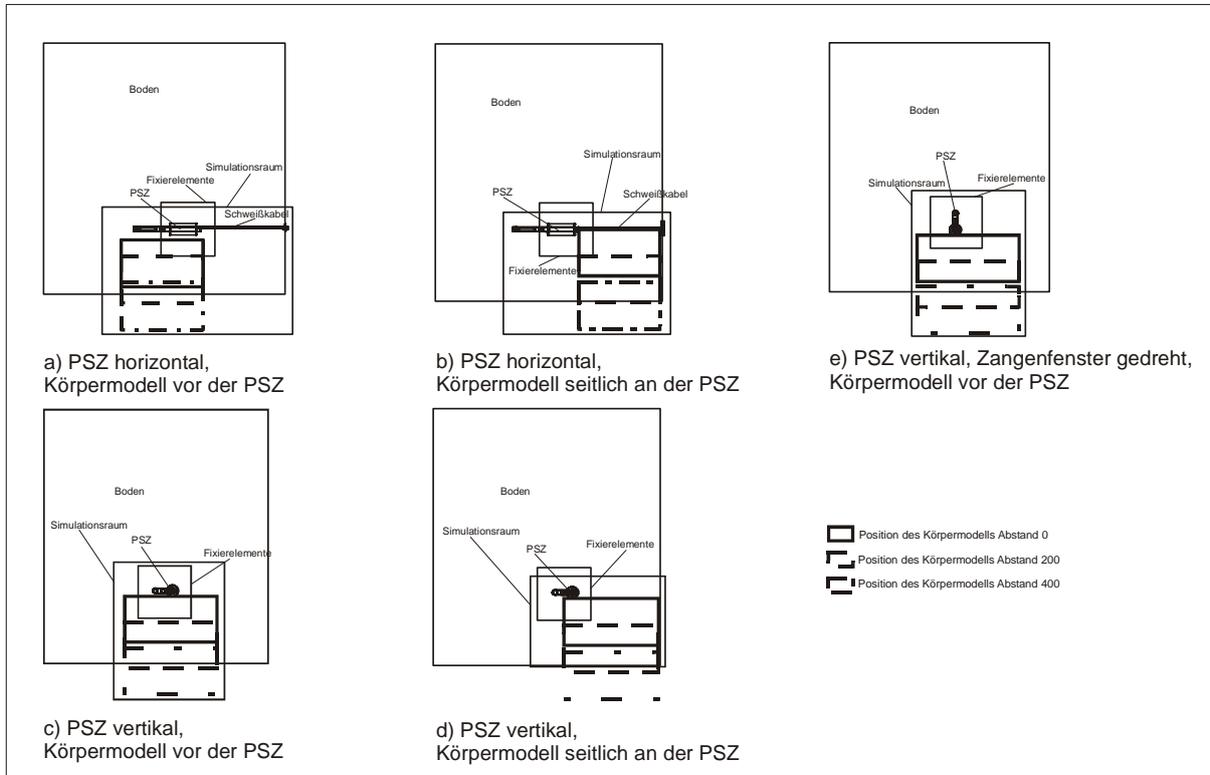
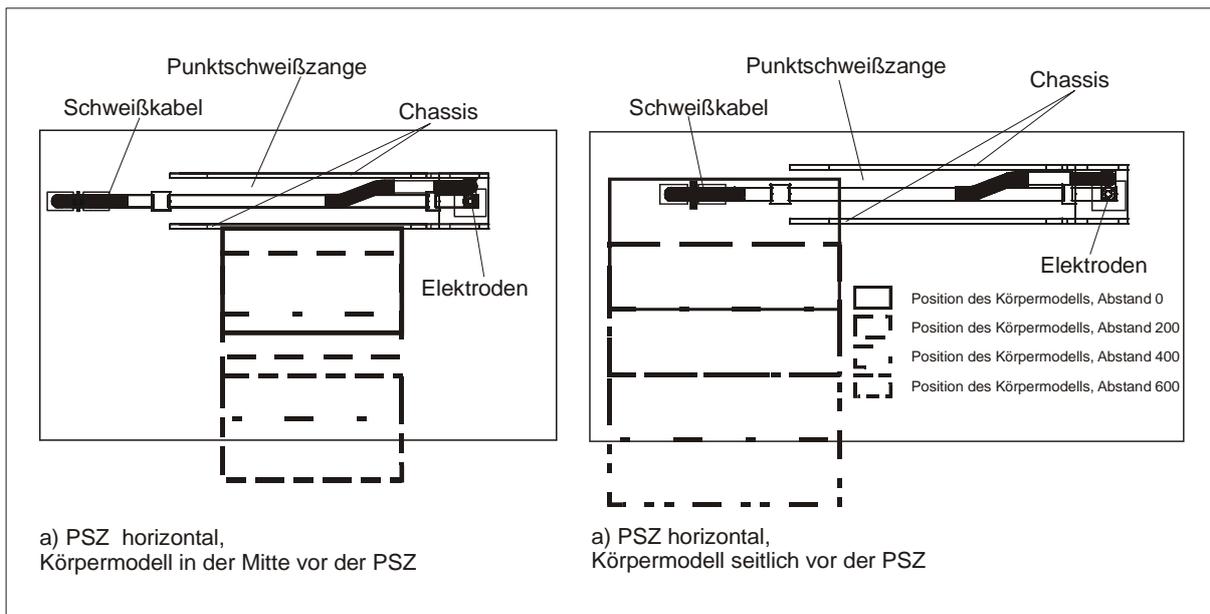


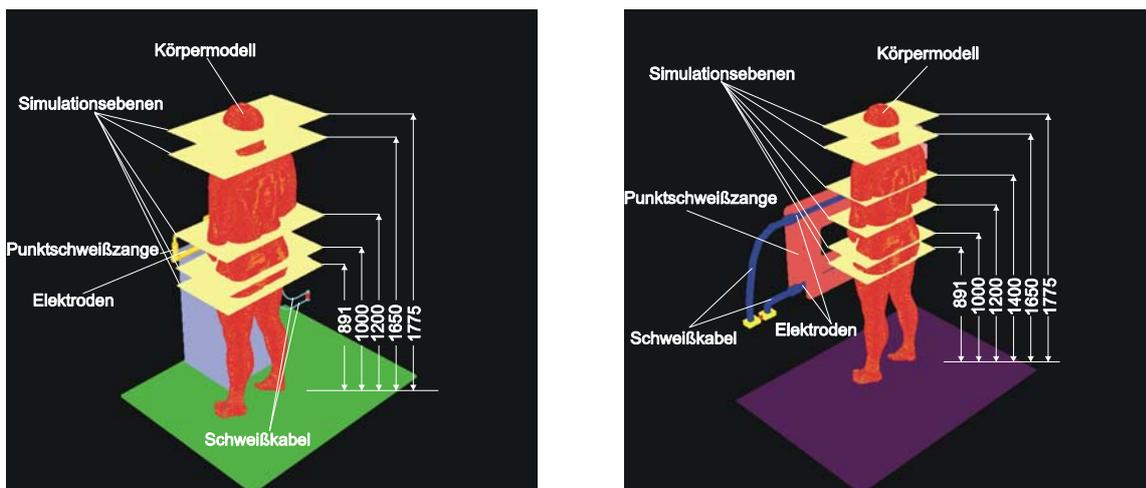
Abbildung 30:
Schematische Darstellung für zwei typische Arbeitssituationen an der PSZ mit großem Zangenfenster



8.3 Simulationsebenen

Aufgrund des hohen Rechenaufwandes wurde die Verteilung der Körperstromdichten über die Körpergröße nicht immer mit der gleichen Auflösung berechnet. Berechnungen mit hoher Auflösung, entsprechend der Voxelgröße des Körpermodells, wurden entsprechend Abbildung 31 in fünf bzw. sechs Simulationsebenen durchgeführt: vom Boden aus gemessen in einer Höhe von 891, 1 000, 1 200, 1 400, 1 650 und 1 775 mm. Diese Ebenen wurden so gewählt, dass die Verteilungen der Körperstromdichten im Genitalbereich (891 mm), im Rumpf (1 000, 1 200 und 1 400 mm), im Hals/Nacken (1 650 mm) und im Kopf/Gehirn (1 775 mm) ermittelt werden konnten. Abbildung 31 gibt die Zuordnung und Lage diese Ebenen im Körpermodell wieder.

Abbildung 31:
Simulationsebenen im Körpermodell zur Bestimmung der Körperstromdichten



a) PSZ mit kleinem Zangenfenster

b) PSZ mit großem Zangenfenster

8.4 Leitungseinflüsse

Der Einfluss der Schweißkabel wurde an verschiedenen einfachen Expositionsnachbildungen untersucht (Abbildung 32, Seite 62). Eine Doppelleitung mit Hin- und Rückleiter mit einem Durchmesser von 10 mm und einem Leiterabstand von 10 mm wurde hierzu in der Längsachse des Körpermodells vor der Brust und am Rücken direkt über den Spinalkanal in einem Abstand von 10 mm zur Oberfläche des



Körpermodells angeordnet. Abbildung 32 zeigt die Anordnung des Körpermodells und der Doppelleitung sowie die Simulationsebenen.

Zusätzlich wurde für zwei besondere Kabelführungen die durch Schweißkabel verursachte Exposition in einem Körpermodell ermittelt (Abbildung 33).

Abbildung 32:
Expositions nachbildung zur Untersuchung der durch Schweißkabel verursachten Exposition; links: Schweißkabel mit Hin- und Rückleiter vor der Brust des Körpermodells, rechts: Schweißkabel mit Hin- und Rückleiter am Rücken des Modells

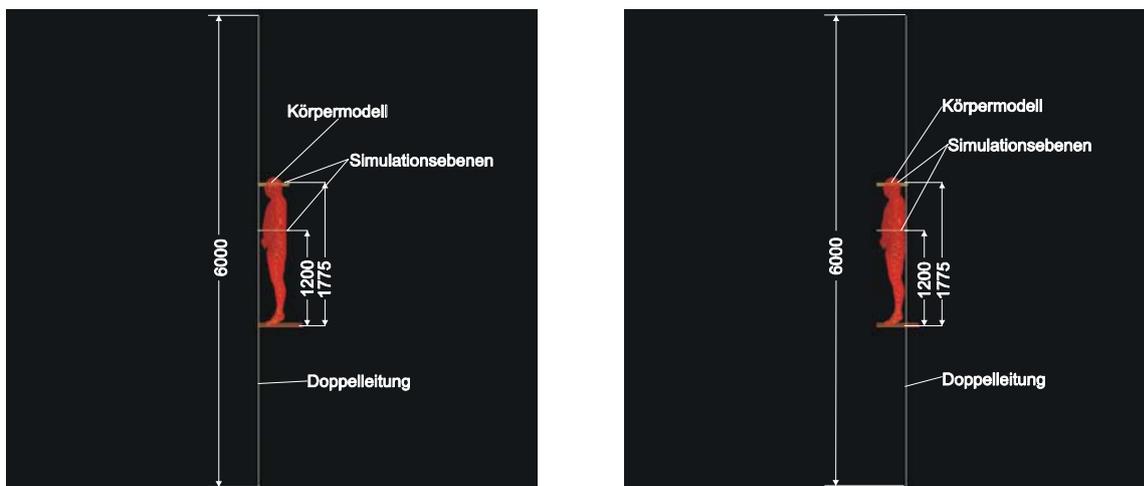
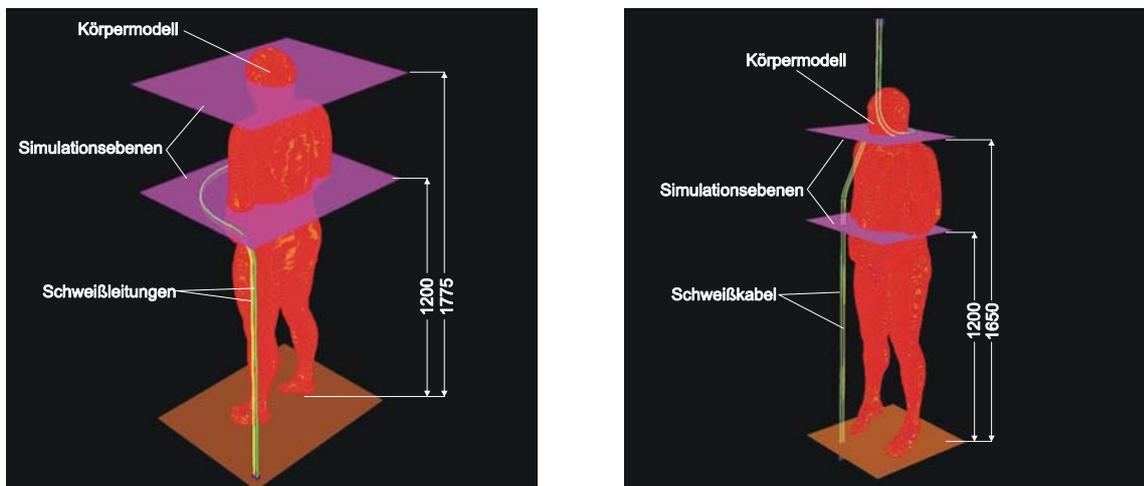


Abbildung 33:
Expositions nachbildung zur Untersuchung der durch Schweißkabel verursachten Exposition bei einer besonderen Kabelführung; links: Schweißkabel nach prEN 50444, rechts: Schweißkabel nach BGI 5011, Bild 22





In Abbildung 33 ist links die Nachbildung mit einer Kabelführung nach prEN 50444 dargestellt, rechts die mit einer Kabelführung nach BGI 5011 Bild 22. Für alle Kabelführungen in den Abbildungen 32 und 33 wurde die Körperstromdichte im Körpermodell in zwei Simulationsebenen – 1 200 und 1 775 mm – ermittelt.

8.5 Ergebnisse

Die berechneten Körperstromdichten sind für die verschiedenen Expositionsnachbildungen der beiden PSZ und Kabelführungen in den Abbildungen 34 bis 43 (siehe Seite 65 ff.) dargestellt. Die Abbildungen enthalten Bildreihen mit Schnittbildern. Jedem Schnittbild sind ein dem Standort des Körpermodells entsprechender Abstand und eine Simulationsebene zugeordnet. Die Abbildungen zeigen die Verteilungen der Körperstromdichten in einem Körpermodell bei einem transversalen Schnitt für eine bestimmte Schnitthöhe, die dem Abstand zwischen Simulationsebene und Boden (siehe Abbildungen 31 bis 33) entspricht.

Die Verläufe der Körperstromdichten in den Schnittbildern sind von der Farbe Rot über Grün nach Blau skaliert. Dabei steht Rot für hohe und Blau für niedrige Körperstromdichten (siehe auch Legende zu den Abbildungen 34 bis 43). Neben jedem Schnittbild ist auf der rechten Bildseite der berechnete Spitzenwert der Körperstromdichte aufgeführt.

8.5.1 PSZ mit kleinem Zangenfenster

Alle Schnittbilder in den Abbildungen 34 bis 38 weisen einen inhomogenen Verlauf der Gewebestromdichte mit „Höhen und Tiefen“, ähnlich einem Gebirgsverlauf, auf. In jedem untersuchten Expositionsmodell und in jeder Simulationsebene treten unterschiedliche Verläufe und Werte der Stromdichte auf – selbst innerhalb des Körpermodells (Genitalbereich, Rumpf, Hals/Nacken und Kopf/Gehirn). So haben hohe Stromdichten z. B. in der Simulationsebene 1 000 mm nicht auch solche in der nächsten – beispielsweise in der Simulationsebene 1 200 mm – zur Folge. Dies ist beispielsweise den Abbildungen 34 und 35 zu entnehmen.

Ebenfalls ist zu erkennen, dass die höchsten Stromdichten im Körpermodell nicht generell in den Gewebeschichten auftreten, die der PSZ gegenüberliegen. Je nach

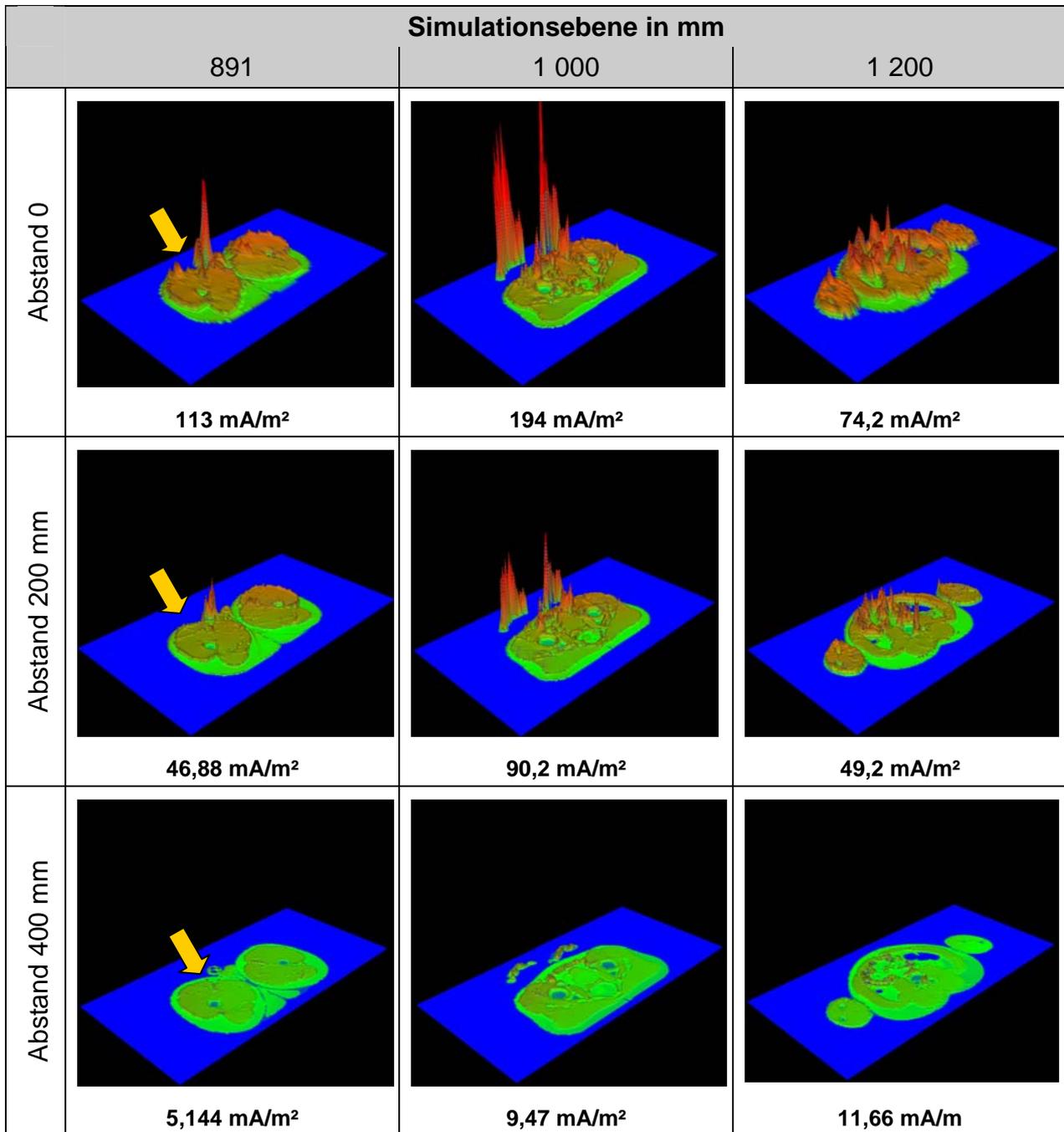


Abstand des Körpermodells sind die Stromdichten im Hals und Kopf höher als im Bereich des Rumpfes, der sich vor der Schweißeinrichtung befindet. Unterschiede im Verlauf und in der Höhe der Gewebestromdichte treten auch in Abhängigkeit von der Größe und Stellung der PSZ sowie von der Position des Körpermodells auf.

Gemeinsamkeiten bestehen bei den untersuchten Expositionsmodellen nur hinsichtlich des Verlaufs der Werte für die Stromdichte in Abhängigkeit vom Abstand des Körpermodells zur PSZ: Den Schnittbildern der verschiedenen Simulationsebenen ist zu entnehmen, dass die Stromdichten (inklusive Spitzenwerte) mit zunehmendem Abstand abnehmen. Für den Abstand 400 mm zeigen die Abbildungen 34 bis 38 nahezu gleiche Stromdichteverläufe und – mit Ausnahme der Abbildung 35 – auch gleiche Stromdichtewerte.



Abbildung 34:
Berechnete Körperstromdichten für die PSZ mit kleinem Zangenfenster,
PSZ horizontal, Körpermodell vor der PSZ

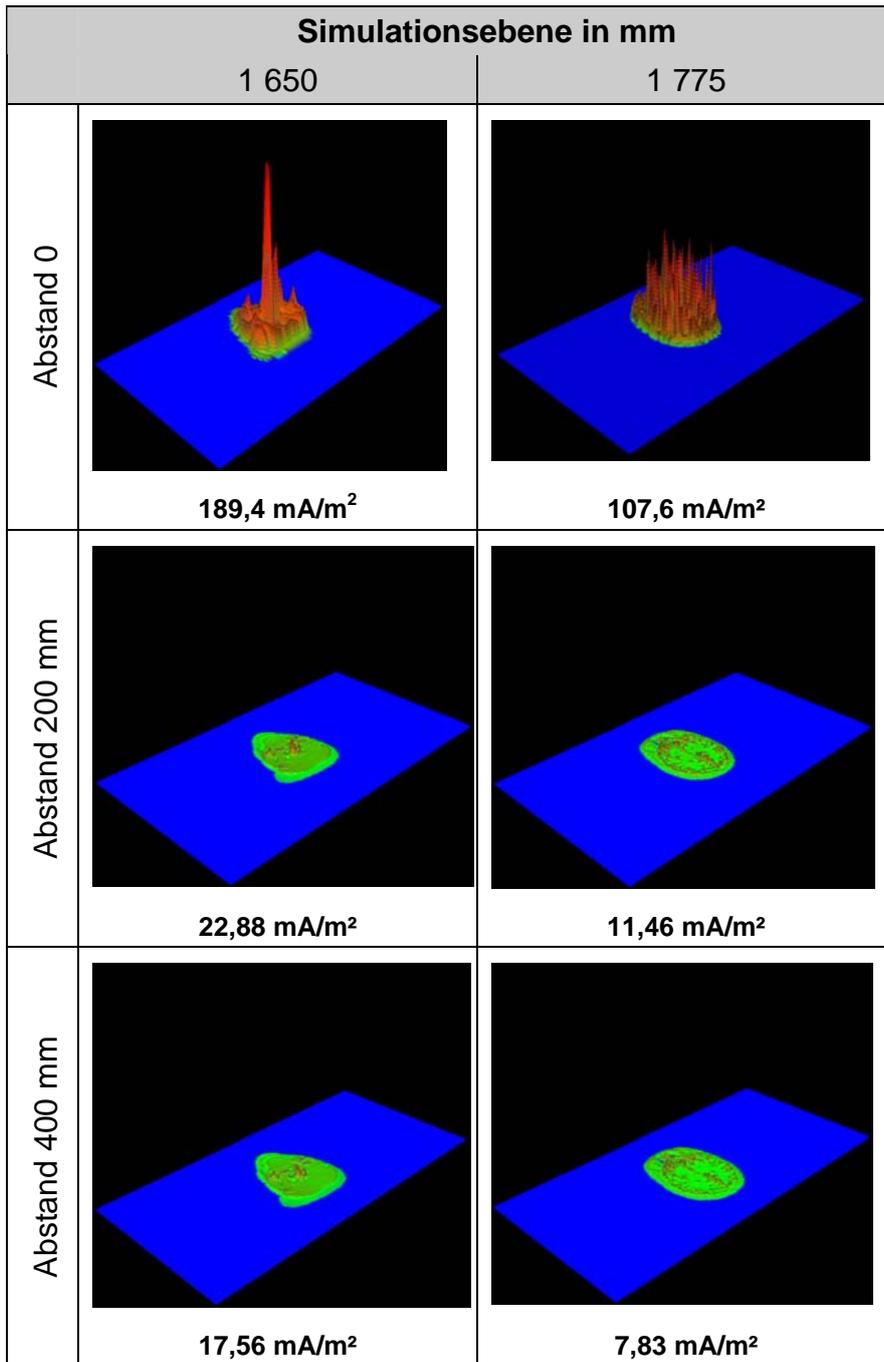


Legende:

	100,000 mA/m ²		3,162 mA/m ²		100,000 µA/m ²		3,162 µA/m ²
	36,620 mA/m ²		1,000 mA/m ²		31,620 µA/m ²		1,000 µA/m ²
	10,000 mA/m ²		316,200 µA/m ²		10,000 µA/m ²		



Abbildung 34: Fortsetzung

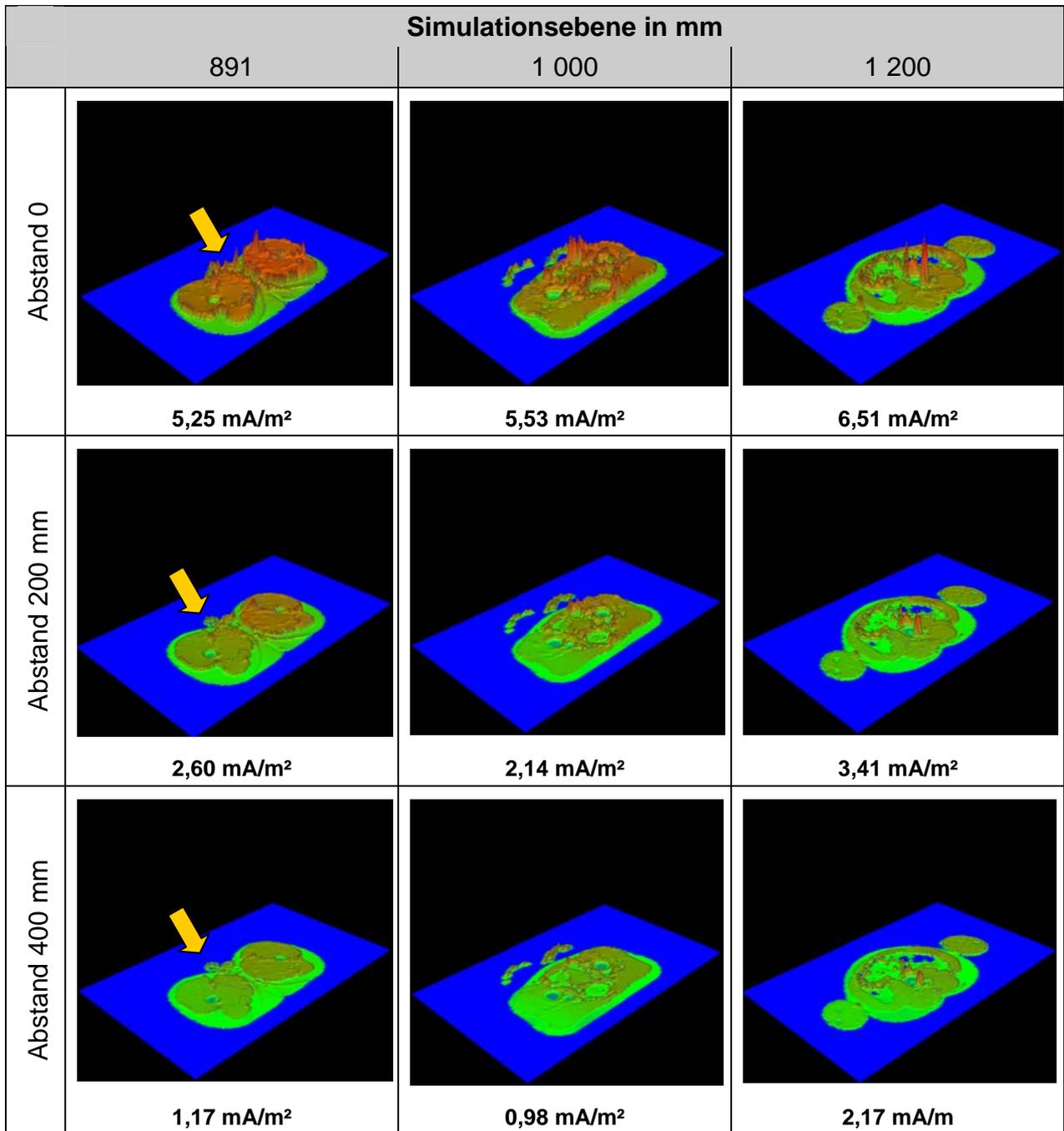


Legende:

	100,000 mA/m ²		3,162 mA/m ²		100,000 µA/m ²		3,162 µA/m ²
	36,620 mA/m ²		1,000 mA/m ²		31,620 µA/m ²		1,000 µA/m ²
	10,000 mA/m ²		316,200 µA/m ²		10,000 µA/m ²		



Abbildung 35:
 Berechnete Körperstromdichten für die PSZ mit kleinem Zangenfenster,
 PSZ horizontal, Körpermodell seitlich an der PSZ

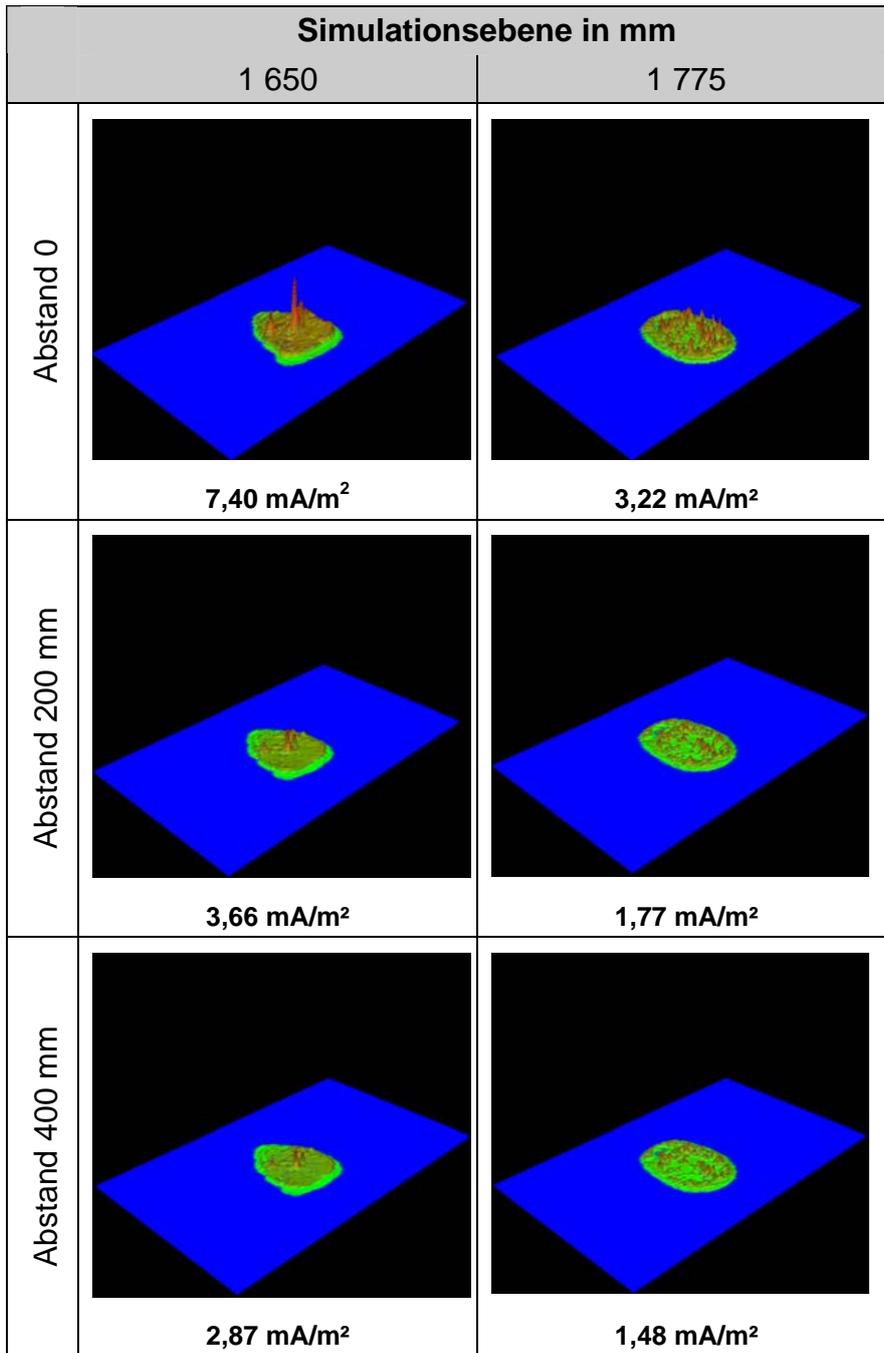


Legende:

	10,000 mA/m ²		316,200 µA/m ²		10,000 µA/m ²		316,200 nA/m ²
	3,162 mA/m ²		100,000 µA/m ²		3,162 µA/m ²		100,000 µA/m ²
	1,000 mA/m ²		31,620 µA/m ²		1,000 µA/m ²		



Abbildung 35: Fortsetzung

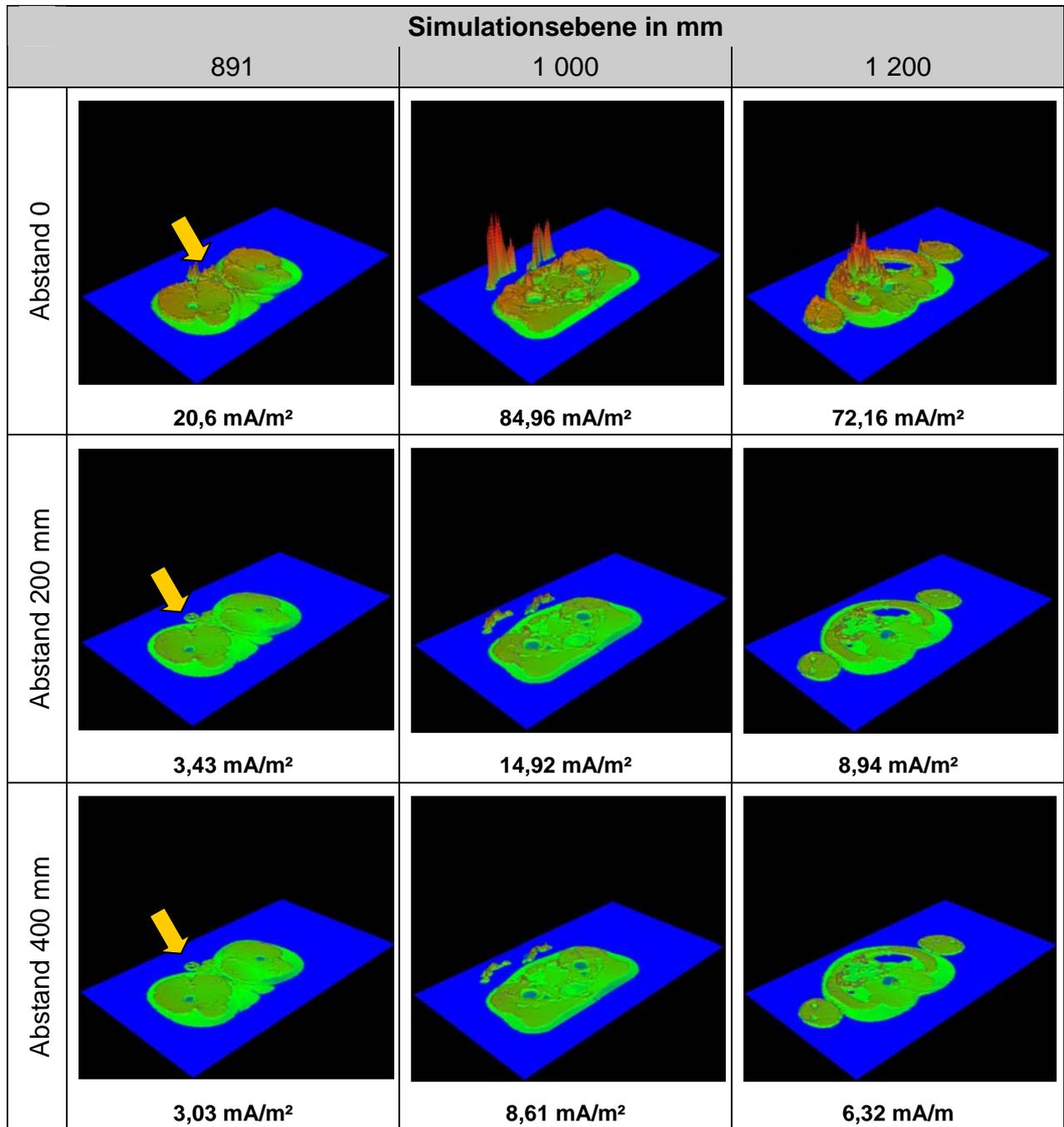


Legende:

	10,000 mA/m ²		316,200 µA/m ²		10,000 µA/m ²		316,200 nA/m ²
	3,162 mA/m ²		100,000 µA/m ²		3,162 µA/m ²		100,000 µA/m ²
	1,000 mA/m ²		31,620 µA/m ²		1,000 µA/m ²		



Abbildung 36:
 Berechnete Körperstromdichten für die PSZ mit kleinem Zangenfenster,
 PSZ vertikal, Körpermodell vor der PSZ

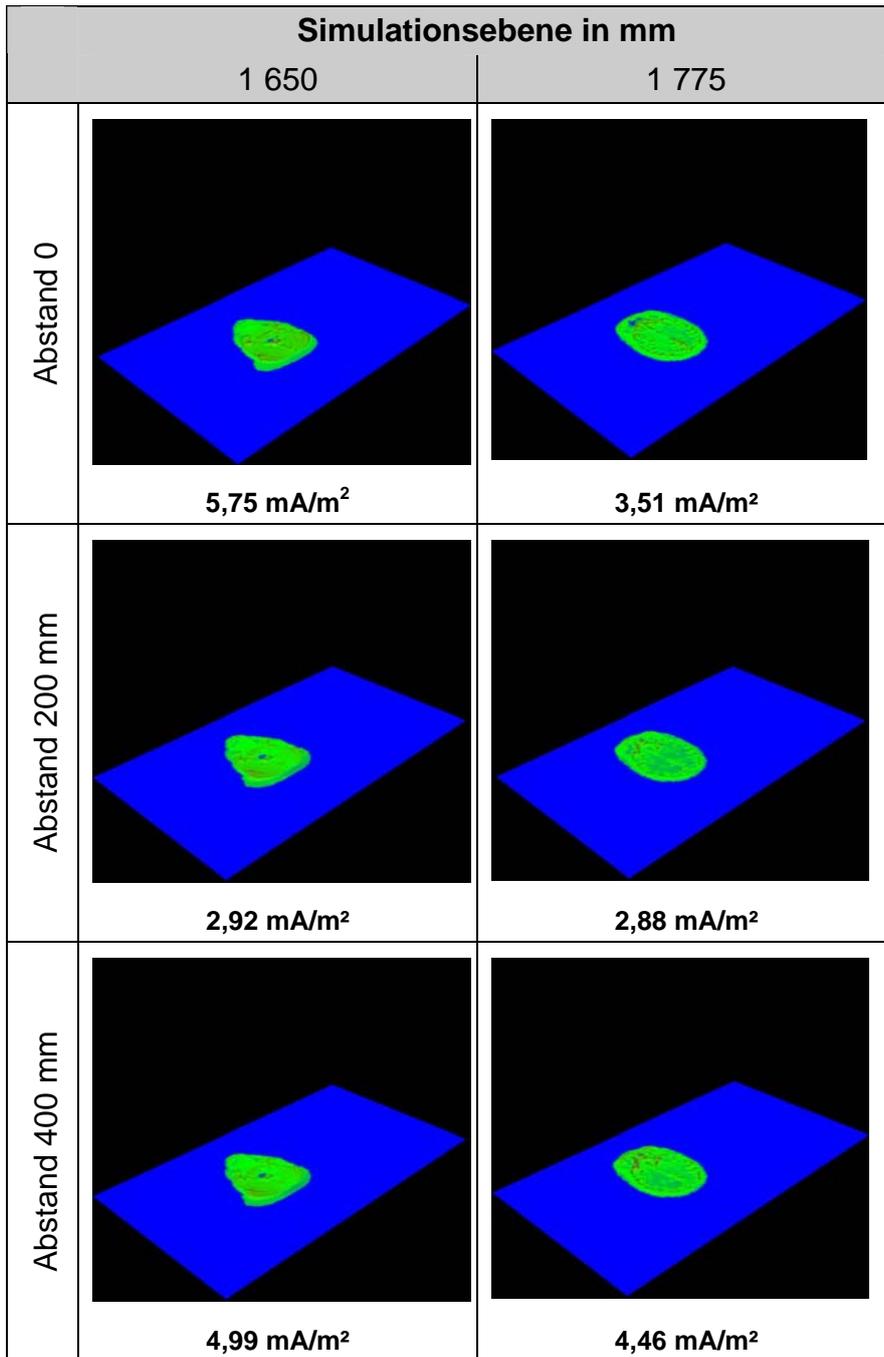


Legende:

	100,000 mA/m ²		3,162 mA/m ²		100,000 µA/m ²		3,162 µA/m ²
	36,620 mA/m ²		1,000 mA/m ²		31,620 µA/m ²		1,000 µA/m ²
	10,000 mA/m ²		316,200 µA/m ²		10,000 µA/m ²		



Abbildung 36: Fortsetzung

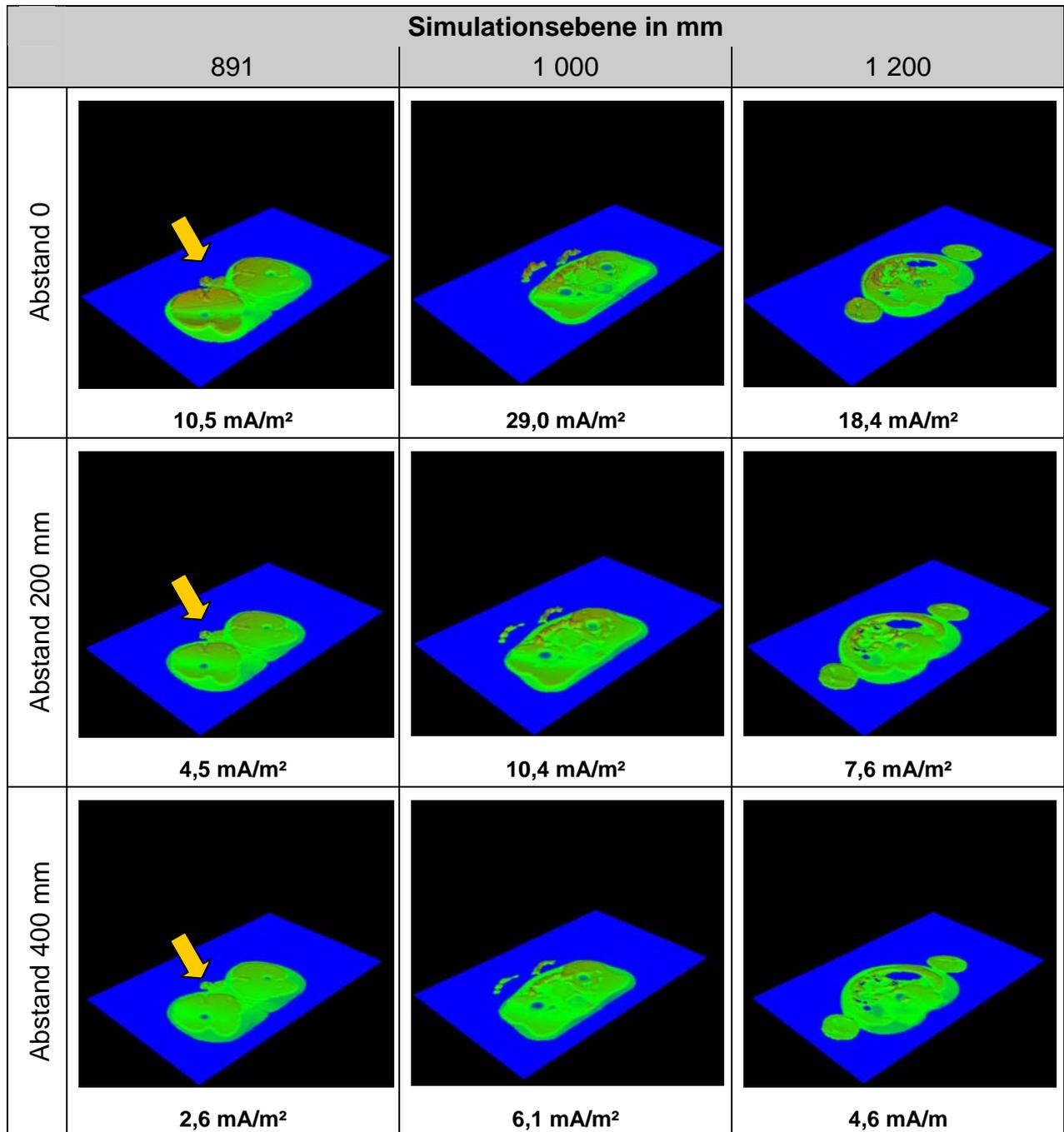


Legende:

	100,000 mA/m ²		3,162 mA/m ²		100,000 µA/m ²		3,162 µA/m ²
	36,620 mA/m ²		1,000 mA/m ²		31,620 µA/m ²		1,000 µA/m ²
	10,000 mA/m ²		316,200 µA/m ²		10,000 µA/m ²		



Abbildung 37:
 Berechnete Körperstromdichten für die PSZ mit kleinem Zangenfenster,
 PSZ vertikal, Körpermodell seitlich an der PSZ

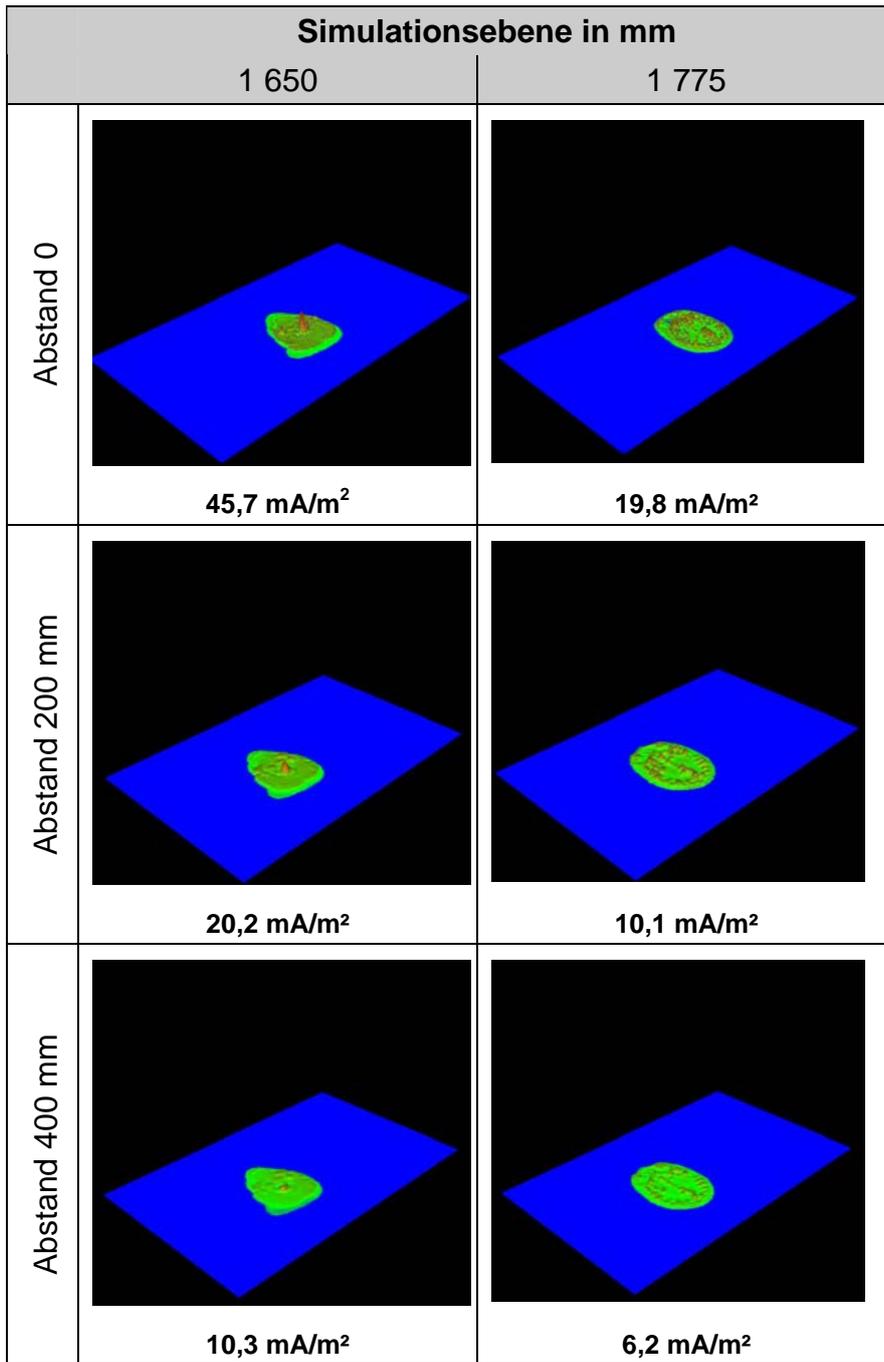


Legende:

	100,000 mA/m ²		3,162 mA/m ²		100,000 µA/m ²		3,162 µA/m ²
	36,620 mA/m ²		1,000 mA/m ²		31,620 µA/m ²		1,000 µA/m ²
	10,000 mA/m ²		316,200 µA/m ²		10,000 µA/m ²		



Abbildung 37: Fortsetzung

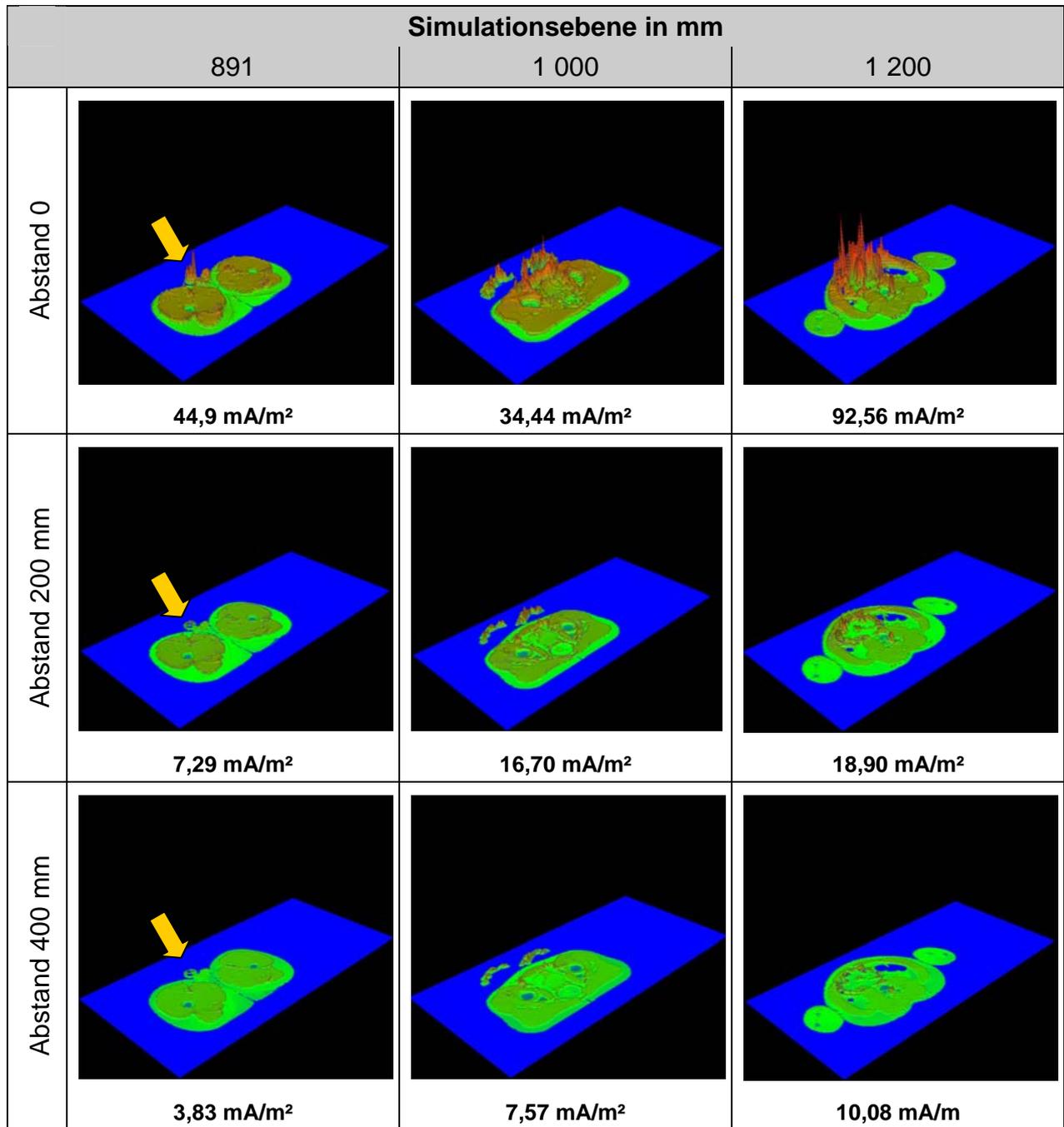


Legende:

	100,000 mA/m ²		3,162 mA/m ²		100,000 µA/m ²		3,162 µA/m ²
	36,620 mA/m ²		1,000 mA/m ²		31,620 µA/m ²		1,000 µA/m ²
	10,000 mA/m ²		316,200 µA/m ²		10,000 µA/m ²		



Abbildung 38:
 Berechnete Körperstromdichten für die PSZ mit kleinem Zangenfenster,
 PSZ vertikal, Zangenfenster gedreht, Körpermodell vor der PSZ

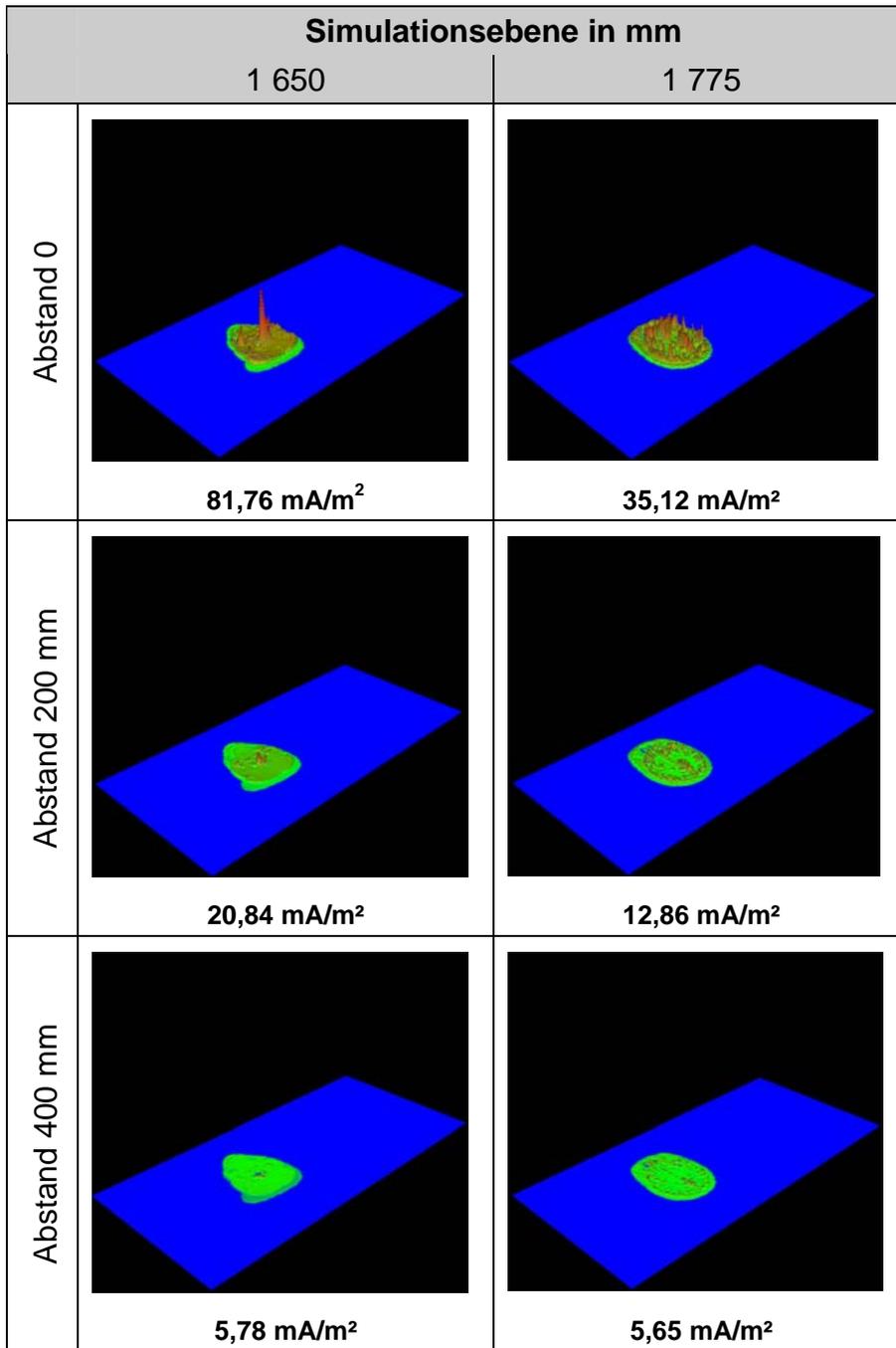


Legende:

	100,000 mA/m ²		3,162 mA/m ²		100,000 µA/m ²		3,162 µA/m ²
	36,620 mA/m ²		1,000 mA/m ²		31,620 µA/m ²		1,000 µA/m ²
	10,000 mA/m ²		316,200 µA/m ²		10,000 µA/m ²		



Abbildung 38: Fortsetzung



Legende:

	100,000 mA/m ²		3,162 mA/m ²		100,000 µA/m ²		3,162 µA/m ²
	36,620 mA/m ²		1,000 mA/m ²		31,620 µA/m ²		1,000 µA/m ²
	10,000 mA/m ²		316,200 µA/m ²		10,000 µA/m ²		



8.5.2 PSZ mit kleinem Zangenfenster, horizontal angeordnet

Bei diesem Expositionsmodell unterscheiden sich die Gewebestromdichten im seitlich und frontal positionierten Körpermodell (Abbildung 34 und 35) grundsätzlich voneinander. Bei dem seitlich zum Zangenfenster positionierten Körpermodell (Abbildung 35) ist eine nahezu gleichmäßige Verteilung der Stromdichte mit niedrigen Werten und einem ausgeprägten Spitzenwert im Bereich der Wirbelsäule zu erkennen. Im „frontal“ positionierten Körpermodell (Abbildung 34) treten gegenüber dem seitlich positionierten Körpermodell wesentlich höhere Stromdichten auf. Die Verteilung der Stromdichte ändert sich in Abhängigkeit vom Abstand zwischen Körpermodell und Zangenfenster. Bei geringen Abständen zum Zangenfenster (0 und 200 mm) treten im Körpermodell an der dem Zangenfenster zugewandten Seite bis zur Mitte des Modells hohe Stromdichtespitzen auf. Erst bei größeren Abständen des Körpermodells zum Zangenfenster (ca. 400 mm) ist die Stromdichteverteilung vergleichbar mit der Stromdichteverteilung des seitlich positionierten Körpermodells. Die maximale Gewebestromdichte im frontal positioniertem Körpermodell beträgt 194 mA/m^2 und im seitlich positioniertem Modell $7,40 \text{ mA/m}^2$.

8.5.3 PSZ mit kleinem Zangenfenster, vertikal angeordnet

Auch bei diesem Expositionsmodell unterscheiden sich die Körperstromdichten im seitlich und frontal positionierten Körpermodell (Abbildung 36 und 37) grundsätzlich voneinander. Wie bei der horizontal angeordneten PSZ sind die Körperstromdichten im frontal positionierten Körpermodell in den der PSZ gegenüberliegenden Simulationsebenen höher als bei der seitlichen Position des Modells. In den Simulationsebenen für den Hals/Nacken und Kopf ist dies jedoch genau umgekehrt. Hohe Stromdichten treten in diesen Körperteilen nur im seitlich positionierten Körpermodell auf. Im Abstand von 400 mm sind die Stromdichteverläufe im Gewebe des seitlich und frontal positionierten Körpermodells wieder nahezu gleich. Der berechnete Höchstwert der Körperstromdichte beträgt im frontal positionierten Körpermodell $84,96 \text{ mA/m}^2$ und im seitlich positionierten Modell $45,7 \text{ mA/m}^2$.



8.5.4 PSZ mit kleinem Zangenfenster, vertikal um 90° gedreht angeordnet

Bei dem Expositionsmodell mit einer vertikal um 90° gedreht angeordneten PSZ (Abbildung 38) sind die Stromdichteverläufe in den Schnittbildern nahezu vergleichbar mit den Stromdichteverläufen in Abbildung 34. Die Stromdichtewerte sind jedoch wesentlich niedriger. Dies gilt nicht für die im Abstand 0 mm berechneten Stromdichten der Simulationsebene 1 200 mm. Der für dieses Expositionsmodell berechnete Höchstwert der Stromdichte beträgt $92,56 \text{ mA/m}^2$.

8.5.5 PSZ mit großem Zangenfenster

Für die Expositionsmodelle mit der PSZ mit großem Zangenfenster sind die Verläufe der Gewebestromdichte in den Abbildungen 39 und 40 dargestellt.

Auf allen Schnittbildern weist die nahezu einheitliche Einfärbung der Gewebestruktur auf hohe Stromdichtewerte hin. Oberhalb der Simulationsebene 1 000 mm befinden sich in der Mitte des Körperschnittes ausgeprägte Stromdichtespitzen. In den Simulationsebenen 891, 1 000 und 1 200 mm sind die Werte der Stromdichte auf der der PSZ zugewandten Seite des Körpermodells im Abstand 0 höher als auf der abgewandten Seite. Mit zunehmendem Abstand zur PSZ nehmen diese Stromdichtespitzen gegenüber den Stromdichtewerten in anderen Gewebebereichen schneller ab. Ab einem Abstand von etwa 400 mm ist dieses Verhalten im Stromdichteverlauf nicht mehr erkennbar. Ferner zeigen die Abbildungen, dass die Körperstromdichten des in der Mitte des Zangenfensters positionierten Körpermodells (Abbildung 40) in den Simulationsebenen unterhalb von 1 400 mm höhere Werte aufweisen als im seitlich angeordneten Körpermodell (Abbildung 39): Hier sind die Spitzenwerte der Körperstromdichte in den beiden Simulationsebenen für den Hals/Nacken und Kopf höher als bei dem in der Mitte des Zangenfensters angeordneten Körpermodells. Auf den Schnittbildern der anderen Simulationsebenen ist im Verlauf der Körperstromdichten der Einfluss des PSZ-Chassis erkennbar. Unabhängig vom Abstand liegen die Stromdichten höher als auf der linken Bildseite. Der Höchstwert der berechneten Körperstromdichte beträgt bei beiden Körpermodellpositionen 222 mA/m^2 .



Abbildung 39:
 Berechnete Körperstromdichten für die PSZ mit großem Zangenfenster,
 PSZ horizontal, Körpermodell in der Mitte der PSZ

		Simulationsebene in mm	
		891	1 000
Abstand	0	<p>106,4 mA/m²</p>	<p>149,8 mA/m²</p>
	200 mm	<p>61,22 mA/m²</p>	<p>110,6 mA/m²</p>
	400 mm	<p>43,36 mA/m²</p>	<p>84,46 mA/m²</p>
	600 mm	<p>42,72 mA/m²</p>	<p>81,62 mA/m²</p>

Legende:

	100,000 mA/m ²		3,162 mA/m ²		100,000 µA/m ²		3,162 µA/m ²
	36,620 mA/m ²		1,000 mA/m ²		31,620 µA/m ²		1,000 µA/m ²
	10,000 mA/m ²		316,200 µA/m ²		10,000 µA/m ²		



Abbildung 39: Fortsetzung

Simulationsebene in mm		
	1 200	1 400
Abstand 0	<p style="text-align: center;">222,00 mA/m²</p>	<p style="text-align: center;">58,72 mA/m²</p>
Abstand 200 mm	<p style="text-align: center;">138,40 mA/m²</p>	<p style="text-align: center;">54,64 mA/m²</p>
Abstand 400 mm	<p style="text-align: center;">168,40 mA/m²</p>	<p style="text-align: center;">87,84 mA/m²</p>
Abstand 600 mm	<p style="text-align: center;">69,32 mA/m²</p>	<p style="text-align: center;">56,06 mA/m²</p>

Legende:

	100,000 mA/m ²		3,162 mA/m ²		100,000 µA/m ²		3,162 µA/m ²
	36,620 mA/m ²		1,000 mA/m ²		31,620 µA/m ²		1,000 µA/m ²
	10,000 mA/m ²		316,200 µA/m ²		10,000 µA/m ²		



Abbildung 39: Fortsetzung

		Simulationsebene in mm	
		1 650	1 775
Abstand	0	 31,34 mA/m ²	 21,48 mA/m ²
	200 mm	 58,42 mA/m ²	 32,08 mA/m ²
	400 mm	 67,46 mA/m ²	 47,66 mA/m ²
	600 mm	 63,26 mA/m ²	 41,96 mA/m ²

Legende:

	100,000 mA/m ²		3,162 mA/m ²		100,000 μA/m ²		3,162 μA/m ²
	36,620 mA/m ²		1,000 mA/m ²		31,620 μA/m ²		1,000 μA/m ²
	10,000 mA/m ²		316,200 μA/m ²		10,000 μA/m ²		



Abbildung 40:
 Berechnete Körperstromdichten für die PSZ mit großem Zangenfenster,
 PSZ horizontal, Körpermodell an der Seite der PSZ

		Simulationsebene in mm	
		891	1 000
Abstand	0	<p>185,6 mA/m²</p>	<p>222,40 mA/m²</p>
	200 mm	<p>44,18 mA/m²</p>	<p>46,26 mA/m²</p>
	400 mm	<p>25,00 mA/m²</p>	<p>42,90 mA/m²</p>
	600 mm	<p>13,20 mA/m²</p>	<p>28,03 mA/m²</p>

Legende:

	100,000 mA/m ²		3,162 mA/m ²		100,000 µA/m ²		3,162 µA/m ²
	36,620 mA/m ²		1,000 mA/m ²		31,620 µA/m ²		1,000 µA/m ²
	10,000 mA/m ²		316,200 µA/m ²		10,000 µA/m ²		



Abbildung 40: Fortsetzung

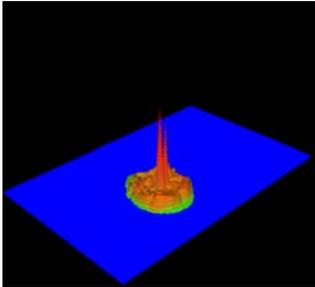
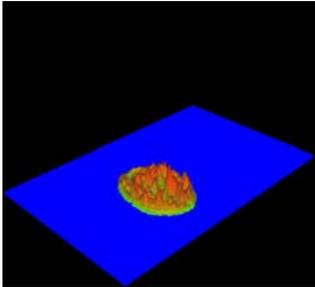
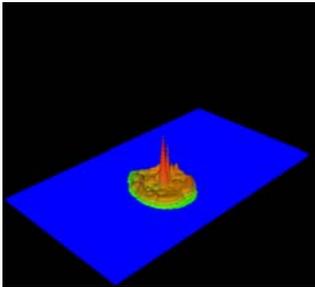
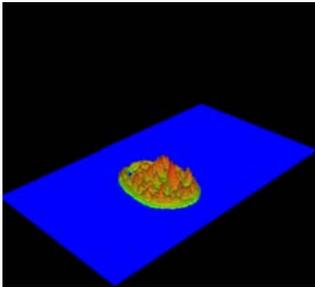
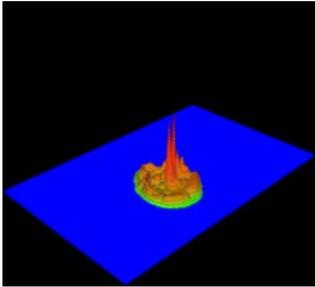
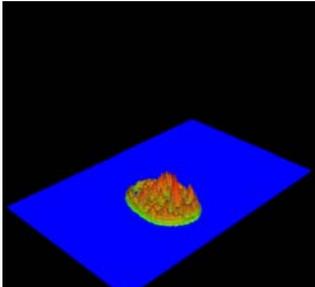
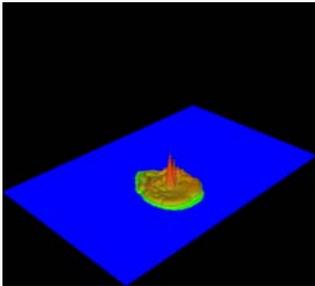
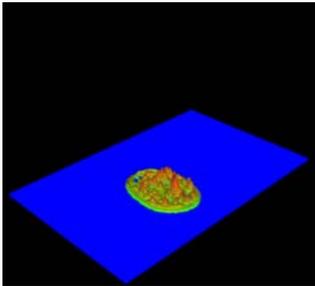
Simulationsebene in mm		
	1 200	1 400
Abstand 0	<p style="text-align: center;">113,6 mA/m²</p>	<p style="text-align: center;">51,76 mA/m²</p>
Abstand 200 mm	<p style="text-align: center;">59,74 mA/m²</p>	<p style="text-align: center;">47,26 mA/m²</p>
Abstand 400 mm	<p style="text-align: center;">68,70 mA/m²</p>	<p style="text-align: center;">54,62 mA/m²</p>
Abstand 600 mm	<p style="text-align: center;">45,08 mA/m²</p>	<p style="text-align: center;">33,46 mA/m²</p>

Legende:

	100,000 mA/m ²		3,162 mA/m ²		100,000 µA/m ²		3,162 µA/m ²
	36,620 mA/m ²		1,000 mA/m ²		31,620 µA/m ²		1,000 µA/m ²
	10,000 mA/m ²		316,200 µA/m ²		10,000 µA/m ²		

Abbildung 40: Fortsetzung



Simulationsebene in mm		
	1 650	1 775
Abstand 0	 <p style="text-align: center;">125,00 mA/m²</p>	 <p style="text-align: center;">55,54 mA/m²</p>
Abstand 200 mm	 <p style="text-align: center;">82,46 mA/m²</p>	 <p style="text-align: center;">46,26 mA/m²</p>
Abstand 400 mm	 <p style="text-align: center;">113,4 mA/m²</p>	 <p style="text-align: center;">57,02 mA/m²</p>
Abstand 600 mm	 <p style="text-align: center;">59,22 mA/m²</p>	 <p style="text-align: center;">37,40 mA/m²</p>

Legende:

	100,000 mA/m ²		3,162 mA/m ²		100,000 μA/m ²		3,162 μA/m ²
	36,620 mA/m ²		1,000 mA/m ²		31,620 μA/m ²		1,000 μA/m ²
	10,000 mA/m ²		316,200 μA/m ²		10,000 μA/m ²		



8.5.6 Ergebnisse zur Kabelführung

8.5.6.1 Doppelleitung

Die berechneten Verläufe der Körperstromdichte für die Expositionsnachbildungen mit der Doppelleitung vor der Brust und vor dem Rücken sind in Abbildung 41 dargestellt. Die Schnittbilder der drei Simulationsebenen zeigen hohe Körperstromdichten jeweils nur auf der Gewebeseite, die der Leitung am nächsten liegt, d. h. entweder am Rücken oder an der Brustseite. Der Spitzenwert der Stromdichten liegt in der Ebene 1 775 mm, d. h. im Kopf. Der berechnete Höchstwert beträgt 117 mA/m^2 . In den beiden anderen Simulationsebenen liegt der Spitzenwert der Stromdichte zwischen 30 und 54 mA/m^2 .

Abbildung 41:
 Berechnete Körperstromdichten bei körpernaher Führung einer Doppelleitung
 oben: Doppelleitung vor der Brust (Abstand 10 mm), unten: Doppelleitung vor dem Rücken (Abstand 10 mm)

		Simulationsebene		
		1 200 mm	1 650 mm	1 775 mm
	32,62 mA/m ²	30,22 mA/m ²	85,52 mA/m ²	
	54,20 mA/m ²	40,64 mA/m ²	117,40 mA/m ²	

Legende:

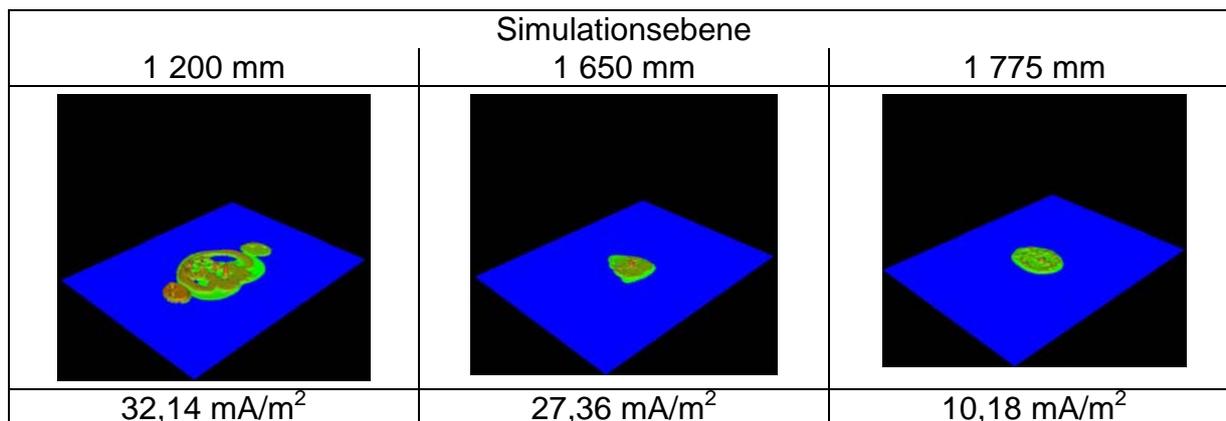
	100,000 mA/m ²		3,162 mA/m ²		100,000 μA/m ²		3,162 μA/m ²
	36,620 mA/m ²		1,000 mA/m ²		31,620 μA/m ²		1,000 μA/m ²
	10,000 mA/m ²		316,200 μA/m ²		10,000 μA/m ²		



8.5.6.2 Kabelführung nach prEN 50444

Abbildung 42 zeigt die berechneten Körperstromdichten bei der Kabelführung nach prEN 50444. Aufgrund der Kabelführung sind die Stromdichten in der Simulationsebene 1 200 mm in Blickrichtung des Körpermodells auf der linken Seite etwas höher als auf der rechten. Der Spitzenwert liegt etwa in der Mitte dieser Ebene mit einem Wert von ca. 32 mA/m². In den anderen beiden Simulationsebenen ist der Einfluss der Kabelführung nicht mehr erkennbar. In der Simulationsebene 1 650 mm, am Hals/Nacken, befindet sich in der Mitte der Gewebestruktur eine Stromdichtespitze. Ihr Wert liegt mit etwa 27 mA/m² in der gleichen Größenordnung wie im Rumpf. Die Simulationsebene 1 775 mm zeigt keine ausgeprägten Stromdichtespitzen. Die Stromdichten sind hier gegenüber den beiden anderen Simulationsebenen wesentlich geringer.

Abbildung 42:
Berechnete Körperstromdichten bei einer Kabelführung nach prEN 50444



Legende:

	100,000 mA/m ²		3,162 mA/m ²		100,000 µA/m ²		3,162 µA/m ²
	36,620 mA/m ²		1,000 mA/m ²		31,620 µA/m ²		1,000 µA/m ²
	10,000 mA/m ²		316,200 µA/m ²		10,000 µA/m ²		

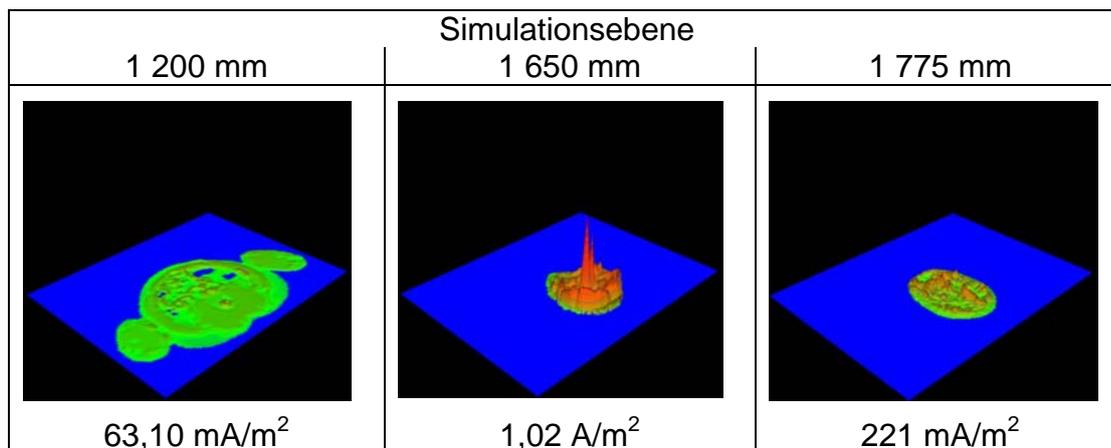
8.5.6.3 Kabelführung nach BGI 5011 Bild 22

In Abbildung 43 sind die berechneten Körperstromdichten für die im Bild 22 der BGI 5011 gezeigte Kabelführung zu erkennen. Bei dieser Kabelführung (halbe Leiterschleife um den Hals) weist die Stromdichte im Hals/Nacken die höchsten Werte auf mit einem Spitzenwert von etwa 1 A/m² in der Mitte der Gewebestruktur. Die Stromdichteverläufe in den beiden anderen Simulationsebenen weisen wesentlich



geringere Stromdichten auf. In der Simulationsebene 1 200 mm (Rumpf) ist in der Mitte der Gewebestruktur eine Stromdichtespitze zu sehen. Die Stromdichte liegt hier bei etwa 63 mA/m². Im umliegenden Gewebe sind die Stromdichten wesentlich geringer: Gemäß der Skalierung liegen sie zwischen 1 und 30 mA/m². Im Kopf sind die Stromdichten wesentlich höher mit einem Spitzenwert von etwa 220 mA/m².

Abbildung 43:
Berechnete Körperstromdichten bei einer Kabelführung in Anlehnung an BGI 5011, Bild 22



Legende:

	1,000 A/m ²		31,620 mA/m ²		1,000 mA/m ²		31,620 µA/m ²
	316,200 mA/m ²		10,000 mA/m ²		316,200 µA/m ²		10,000 µA/m ²
	100,000 mA/m ²		3,162 mA/m ²		100,000 µA/m ²		

8.5.7 Ergebnisse Genitalbereich

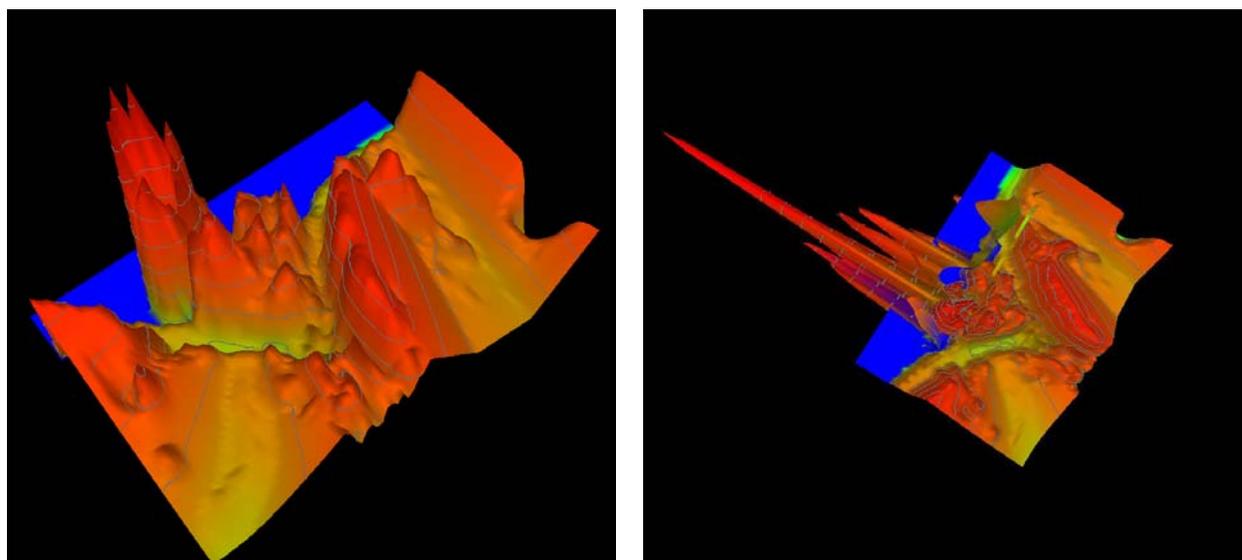
Die Körperstromdichten im Genitalbereich (Hoden und Penis) sind in den Abbildungen 34 bis 40 auf den Schnittbildern der Simulationsebene 891 mm dargestellt – etwa in Bildmitte, in der Mitte der oberen äußeren Gewebestruktur. Mit einem Pfeil wird auf diesen Bereich hingewiesen. Die höchsten Stromdichten treten in diesem Bereich im Abstand von 0 mm zum Zangenfenster auf, d. h. das Zangenfenster liegt am Körpermodell an; der Spitzenwert der Gewebestromdichte beträgt ca. 185 mA/m². Dieser Wert wurde für das an der PSZ mit dem großen Zangenfenster seitlich positionierte Körpermodell berechnet (siehe Abbildung 40). In Abbildung 44 sind zwei Ausschnitte aus den Stromdichteverläufen im Genitalbereich der Abbildung 40 aufgeführt: links die Draufsicht der Stromdichten im Genitalbereich in horizontaler Richtung, rechts zusätzlich die Stromdichten im Hoden in vertikaler Richtung. Die



Bilder weisen etwa gleich hohe Stromdichten auf. Eine Übersicht über die berechneten Spitzenwerte der Stromdichte im Genitalbereich, in Abhängigkeit von der untersuchten Arbeitssituation, gibt Tabelle 6.

Abbildung 44

Verteilung der Stromdichte im Genitalbereich an der PSZ mit großem Zangenfenster bei seitlicher Position des Körpermodells; links: Draufsicht auf den Verlauf der Gewebestromdichte in horizontale Richtung, rechts: Draufsicht auf den Verlauf der Gewebestromdichte in horizontaler und vertikaler Richtung



Legende:

	100,000 mA/m ²		3,162 mA/m ²		100,000 µA/m ²		3,162 µA/m ²
	36,620 mA/m ²		1,000 mA/m ²		31,620 µA/m ²		1,000 µA/m ²
	10,000 mA/m ²		316,200 µA/m ²		10,000 µA/m ²		

Tabelle 6:

Spitzenwerte der Stromdichte J im Genitalbereich in Abhängigkeit von der Arbeitssituation und dem Abstand zwischen Zangenfenster (ZF) und Körpermodell (KM)

Arbeitssituation		Stromdichte im Genitalbereich in mA/m ²	
		Abstand 0 mm	Abstand 200 mm
PSZ mit kleinem „ZF“, horizontal	KM vor PSZ	113,00	46,88
	KM seitlich an der PSZ	5,25	2,60
PSZ mit kleinem „ZF“ vertikal, ZF parallel zu KM	KM vor PSZ	20,60	3,43
	KM seitlich an der PSZ	10,50	4,50
PSZ mit kleinem „ZF“ vertikal, ZF um 90 grd. zu KM gedreht	KM vor PSZ	44,90	7,29
PSZ mit großem „ZF“ horizontal	KM vor PSZ	106,40	61,22
	KM seitlich an der PSZ	185,60	44,18



9 Projektstufe 5 – Bewertung und Beurteilung der Ergebnisse

9.1 Grenzwerte

Die Wirkungen eines äußeren niederfrequenten magnetischen Feldes im menschlichen Körper werden anhand von induzierten Körperströmen beschrieben. Aufgrund der elektrisch inhomogenen Gewebestruktur des menschlichen Körpers treten im Gewebe unterschiedliche, zeitlich veränderliche Stromdichten auf. Diese können in erregbaren Gewebe Nervenreizungen hervorrufen. Um derartige Reizungen zu verhindern, hat die International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection (ICNIRP) in Zusammenarbeit mit der Weltgesundheitsorganisation (WHO) in den sogenannten ICNIRP-Guidelines Expositionsgrenzwerte festgelegt [3]. Diese sind u. a. die Grundlage für die Expositionsgrenzwerte in der EU-Richtlinie 2004/40/EG [4] und die Basiswerte in der Unfallverhütungsvorschrift BGV B11 [1]. Zur Bewertung der für die verschiedenen Arbeitssituationen berechneten Körperstromdichten werden im Folgenden die Basiswerte der Unfallverhütungsvorschrift BGV B11, Anlage 1, Tabelle 1 zugrunde gelegt. In Abhängigkeit von der Frequenz sind hier für niederfrequente äußere elektrische und magnetische Felder Stromdichten für den Kopf und Rumpf festgelegt.

Zur Bestimmung der zulässigen Körperstromdichte werden die Frequenzen der an den beiden PSZ untersuchten Magnetfelder herangezogen. Da diese von Schweißströmen herrühren und an beiden PSZ die Frequenz des Schweißstroms $f = 50$ Hz beträgt, ist diese Frequenz zur Grenzwertbestimmung heranzuziehen. Nach der BGV B11 hat die zulässige Körperstromdichte für die Frequenz $f = 50$ Hz einen Wert von 10 mA/m^2 .

Die Grenzwerte sollen ausschließlich vor akuten Einwirkungen auf das Gewebe des Zentralnervensystems in Kopf und Rumpf schützen, d. h. sie gelten zum Schutz vor schädlichen Wirkungen auf das Zentralnervensystem. In anderen Körpergeweben als dem Zentralnervensystem sind unter gleichen Expositionsbedingungen höhere Stromdichten erlaubt, siehe hierzu ICNIRP-Response to questions and comments on the guidelines for limiting exposure to time-varying electric, magnetic, and electromagnetic fields (up to 300 GHz) [3].



“Question: Is the basic restriction of 10 mA/m² based only on the threshold for acute effects in the central nervous system, or does it apply to other tissues in the trunk or body?”

Answer: The basic restriction of 10 mA/m² is intended to protect against acute exposure effects on central nervous system tissues in the head and trunk of the body with a safety factor of 10. ICNIRP recognizes that this basic restriction may permit higher current densities in body tissues other than the central nervous system under the same exposure conditions.”

9.2 Das Zentralnervensystem

9.2.1 Aufbau

Das Zentralnervensystem (ZNS) des Menschen umfasst das Rückenmark und das Gehirn; hierzu zählen alle Bereiche innerhalb des Körpers, die von den Hirnhäuten umschlossen werden (Abbildung 45).

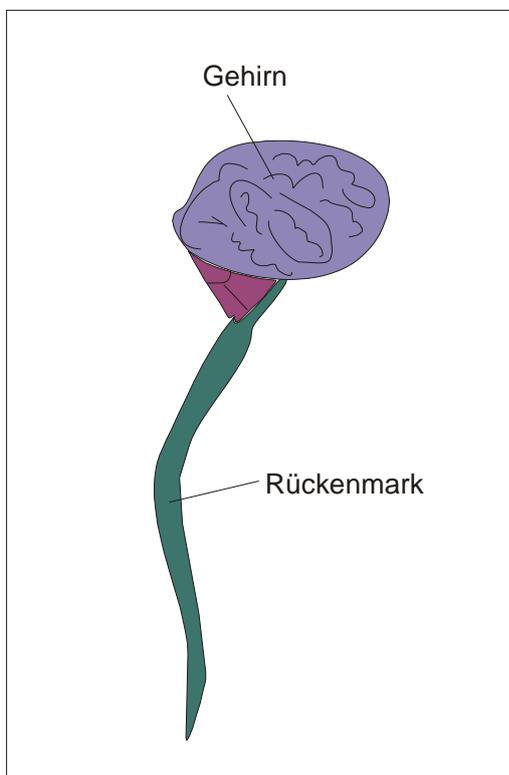


Abbildung 45:
Schematischer Aufbau des menschlichen
Zentralnervensystems



Das ZNS-Gewebe wird in die graue Substanz (*Substantia grisea*) und die weiße Substanz (*Substantia alba*) untergliedert. Die graue Substanz liegt im Gehirn außen, im Rückenmark innen. Beide Anteile lassen sich an einem Gewebeschnitt mit bloßem Auge anhand der namensgebenden Farbe erkennen. Die graue Substanz besteht vorwiegend aus Nervenzellkörpern, die weiße aus deren Fortsätzen (Axone), den Leitungsbahnen.

9.2.2 Das Gehirn

Als Gehirn bezeichnet man den im Kopf gelegenen Teil des Zentralnervensystems. Es liegt geschützt in der Schädelhöhle und wird von drei Hirnhäuten umgeben (Abbildung 46):

- der harten Hirnhaut *Dura mater*,
- der Spinnwebhaut oder *Arachnoidea*
- und der weichen Hirnhaut (*Pia mater*).

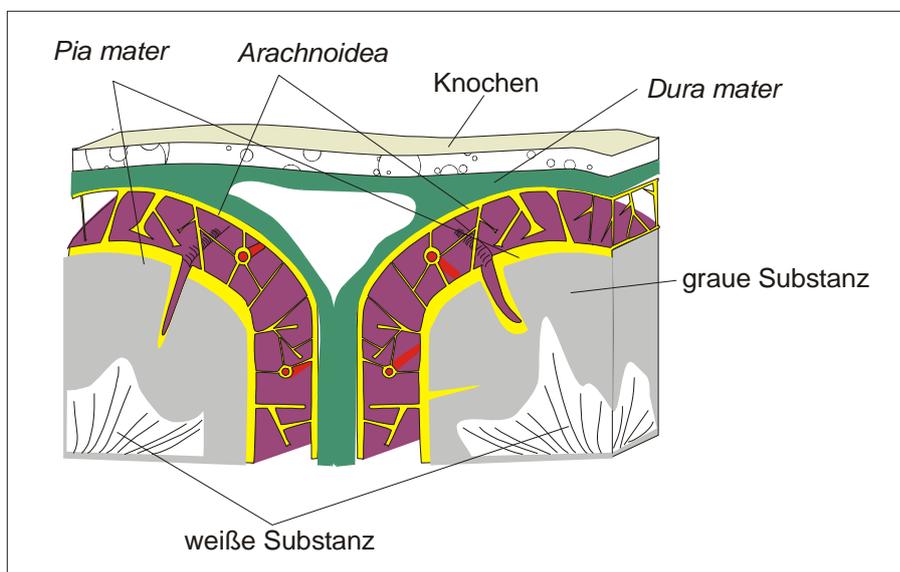


Abbildung 46:
Schematischer
Querschnitt des
Gehirns
im Gehirn

Die Spinnwebhaut enthält die Blutgefäße und der Zwischenraum ist mit Hirnflüssigkeit (Liquor) gefüllt. Das Gehirn ist damit sozusagen „flüssigkeitsgelagert“.



9.2.3 Das Rückenmark

Das Rückenmark ist das zentrale Nervenbündel, über das Informationen zwischen Gehirn und Körper geleitet werden. Es ist beim erwachsenen Menschen mittlerer Größe ca. 45 cm lang und verläuft im Wirbelkanal der Wirbelsäule, d. h. durch das Wirbelloch der einzelnen Wirbelkörper. Aus dem Rückenmark treten Nervenfasern aus, die sich zum Spinalnerv vereinigen. Es gibt insgesamt 31 Paare von Spinalnerven. Durch sogenannte Zwischenwirbellöcher treten sie aus dem Wirbelkanal und verteilen sich in die Peripherie des menschlichen Körpers.

Wie das Gehirn wird auch das Rückenmark durch Knochen, der cerebrospinalen Flüssigkeit (Liquor) und drei Hirnhäute geschützt. Die cerebrospinale Flüssigkeit füllt auch hier den Raum zwischen der *Arachnoidea* und der *Pia mater* und dämpft Bewegungen, Schläge oder Stöße (siehe Abbildung 47).

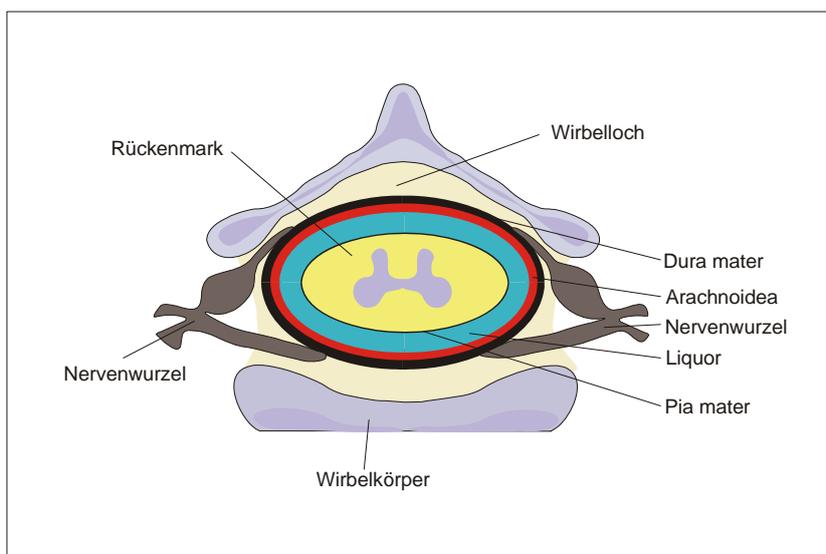


Abbildung 47:
Schematischer
Querschnitt des
Rückenmarks

9.2.4 Das ZNS im Körpermodell

Der Verlauf des ZNS im Körpermodell sowie in den einzelnen Simulationsebenen zeigen die Gewebeschnittbilder in den Abbildungen 48 und 49. Abbildung 48 zeigt einen Längsschnitt durch die Mitte des Körpermodells mit den verschiedenen Gewebearten. Das Nervengewebe im Rücken befindet sich in der Nähe der Wirbelsäule (blaue Einfärbung). Die graue Substanz (Nervenzellkörper) im Gehirn ist rosa eingefärbt. In beiden Bereichen gelb eingefärbt ist die Hirn- bzw. Zerebrospinalflüssigkeit (Liquor).



Abbildung 48:
Verlauf des ZNS im Körpermodell

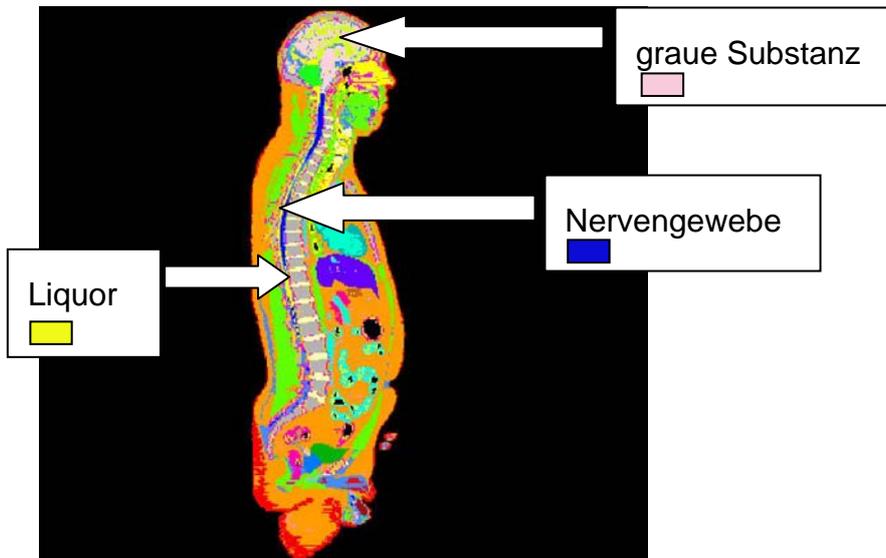
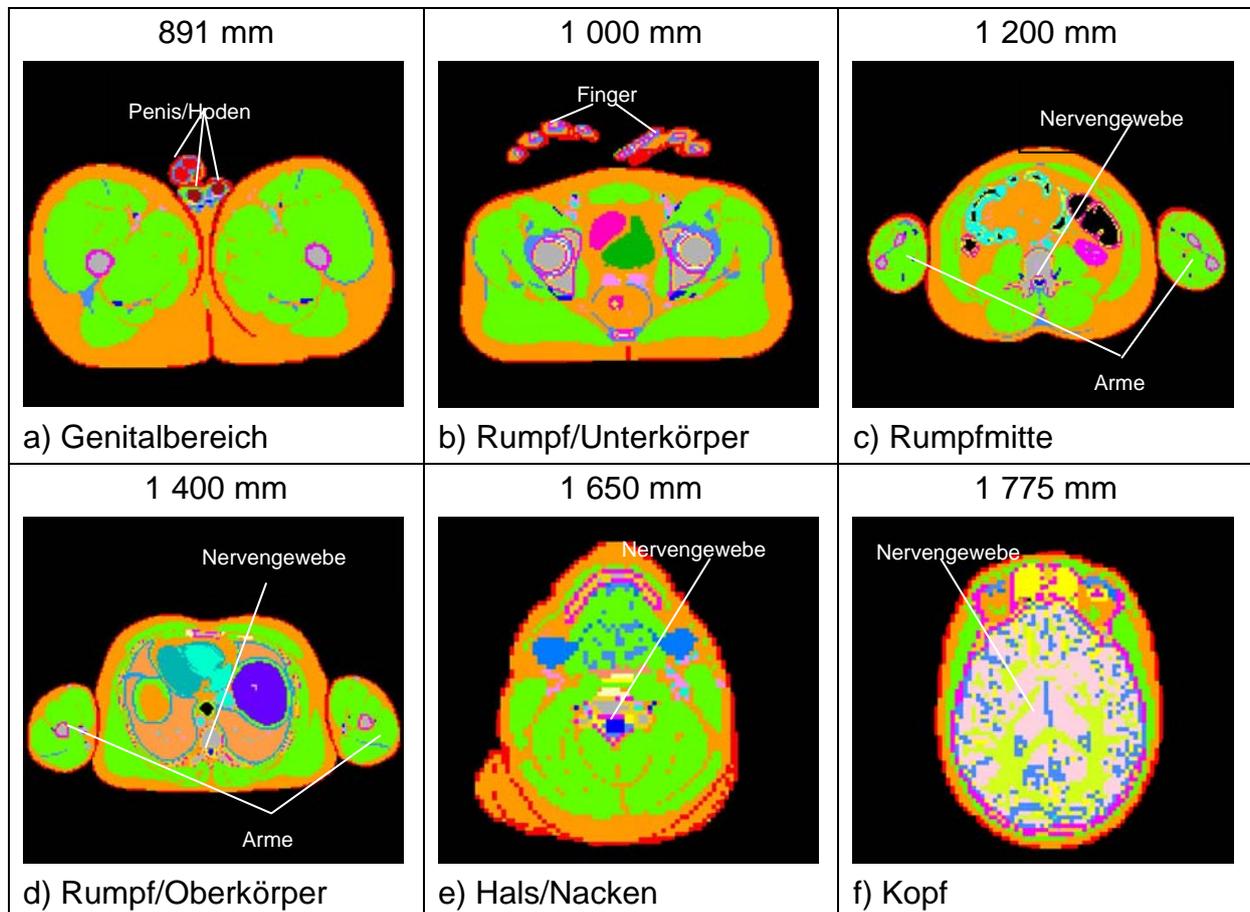


Abbildung 49:
Gewebeschnittbilder bei einem transversalen horizontalen Schnitt durch das Körpermodell in den Simulationsebenen 891, 1 000, 1 200, 1 400, 1 650 und 1 775 mm; Nervengewebe = blau, Liquor = gelb; a) und b): ohne Nervengewebe





Die Schnittbilder in Abbildung 49 zeigen die Gewebestruktur des Körpermodells in den untersuchten Simulationsebenen. Die Lage des Nervengewebes und der Liquor sind gekennzeichnet. Der Hauptanteil des Gewebes besteht aus Muskel- (grün) und Fettgewebe (orange) besteht. Aus den Verläufen der Körperstromdichte (siehe Abbildung 34 bis 43) ist zur Beurteilung der Stromdichte mit Ausnahme des Kopfes der entsprechende maximale Wert der Stromdichte zu ermitteln.

9.3 Elektrische Gewebeeigenschaften

Die elektrischen Eigenschaften, d. h. die elektrische Leitfähigkeit, Permittivität und Permeabilität von menschlichem Gewebe, variieren in Abhängigkeit von der Frequenz und der Gewebearart. Das bedeutet, dass der menschliche Körper ein stark inhomogener Leiter ist. Die Verteilung induzierter Ströme in diesem Leiter hängt damit stark von der Leitfähigkeit des exponierten Gewebes ab. In Bereichen mit hoher Leitfähigkeit fließen – aufgrund der damit verbundenen geringen elektrischen Widerstände – elektrische Ströme mit wesentlichen höherer Stromstärke als in solchen mit geringer Leitfähigkeit. Bei gleichen Gewebequerschnitten ist die elektrische Stromdichte im Gewebe mit hoher Leitfähigkeit ebenfalls höher. Für die unterschiedlichen Gewebearten im Kopf des verwendeten Körpermodells sind in Abbildung 50 die Werte der elektrischen Leitfähigkeiten aufgeführt.

Abbildung 50:
Elektrische Leitfähigkeiten der verschiedenen Gewebearten im Kopf des Körpermodells

Lfd. Nr./Farbe	Gewebearart	Gewebeleitfähigkeit in S/m ²
1	Fett	0,01
2	Muskel	0,02
3	Haut	0,0002
4	Auge (Lederhaut)	0,5
5	Auge (Kammerwasser)	1,5
6	Schleimhaut	0,0004
7	Knochen cortical	0,02
8	Knochen (cancellous)	0,07
9	Bänder	0,025
10	Graue Zellen	0,02
11	Weiße Zellen	0,02
12	Liquor	2
13	Luft	0,0



Für die Gewebearten des ZNS gelten die Werte der elektrischen Leitfähigkeit für die graue Substanz ($0,02 \text{ S/m}^2$) und den Liquor (2 S/m^2). Beide Leitfähigkeiten unterscheiden sich um den Faktor 100, wobei die Leitfähigkeit des Liquors am höchsten ist. Aufgrund dieser Eigenschaft und des geringen Querschnitts ist bei Vorhandensein eines äußeren Magnetfelds davon auszugehen, dass die elektrische Stromdichte im Liquor höher ist als im Nervengewebe von Rückenmark und Gehirn.

9.4 Beurteilung

Die Bewertung der Ergebnisse erfolgt durch Vergleich der berechneten Körperstromdichten mit den zulässigen Werten. Hierzu wurden aus den einzelnen Stromdichteverteilungen in den verschiedenen Simulationsebenen die Stromdichten für das ZNS bestimmt und mit den zulässigen Werten für die Körperstromdichte nach BGV B11 [1] verglichen.

Um die Körperstromdichte im ZNS zu bestimmen, wurden die folgenden Arbeitsschritte ausgeführt:

- entsprechend der Simulationsebene wurden Gewebeschnittbilder mittels transversaler Schnitte durch das Körpermodell erstellt,
- in den Gewebeschnitten wurden das Nervengewebe und dessen Position ermittelt,
- die Schnittbilder wurden über die Stromdichteverläufe der einzelnen Simulationsebenen gelegt,
- aus den Stromdichteverläufen wurde die Stromdichte im Nervengewebe bestimmt.

Danach wurden die Höchstwerte der Körperstromdichten in den verschiedenen Simulationsebenen ermittelt. Die Ergebnisse sind in Tabelle 7 (Seite 94) aufgeführt.

Da man die Körperstromdichte aus dem Produkt aus elektrischer Leitfähigkeit und elektrischer Feldstärke bestimmt, sind die bereits vorliegenden Ergebnisse über den Verlauf der Körperstromdichte und Kenntnisse über die Gewebeleitfähigkeiten alleine nicht ausreichend, um auf die Stromdichte im Rückenmark schließen zu können. Hierfür sind Berechnungen der Körperstromdichte mit wesentlich höheren

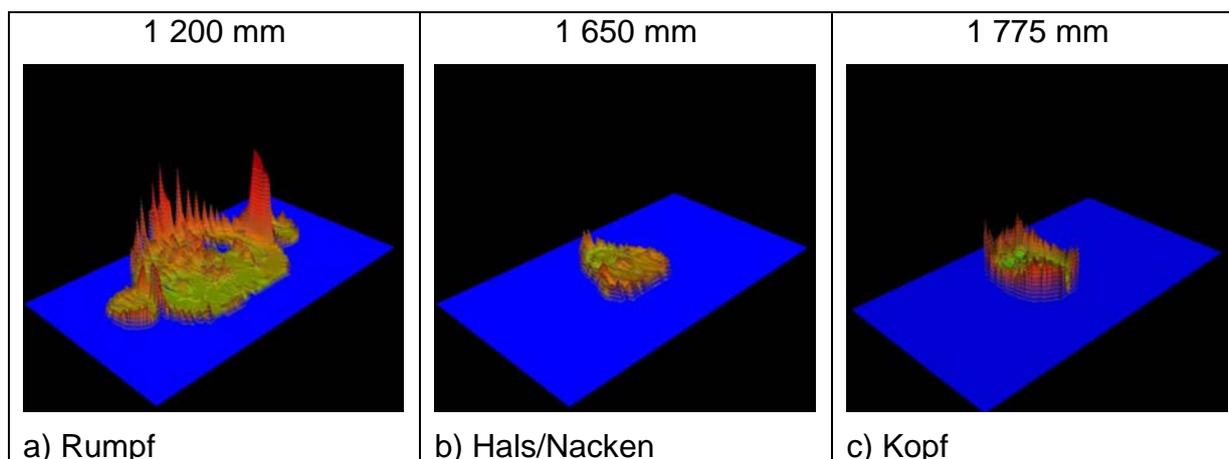


Auflösungen und/oder Kenntnisse über die Verteilung des elektrischen Feldes im Gewebe erforderlich. Letzteres wurde im Rahmen der Bewertung der Ergebnisse beispielhaft für das im Abstand „0 mm“ an der PSZ mit dem kleinen Zangenfenster frontal positionierte Körpermodell durchgeführt. Berechnet wurde die Verteilung des elektrischen Feldes in den Simulationsebenen 1 200, 1 650 und 1 775 mm (Abbildung 51).

Tabelle 7:
Höchstwerte der Körperstromdichte im Liquor in den verschiedenen Simulationsebenen

Simulationsebene in mm	Körperstromdichte in mA/m ²		
	PSZ mit kleinem ZF	PSZ mit großem ZF	Kabelführung
891	-	-	-
1 000	-	-	-
1 200	74,2	222,0	63,1
1 400	-	87,8	-
1 650	189,4	113,3	1 020
1 775	74,2	57,0	221

Abbildung 51:
Verteilung der elektrischen Feldstärke in verschiedenen Simulationsebenen für ein an der PSZ mit dem kleinen Zangenfenster im Abstand „0“ frontal positionierten Körpermodell



Legende:

	1,000 V/m		31,620 mV/m		1,000 mV/m		31,620 µV/m
	316,200 mV/m		10,000 mV/m		316,200 µV/m		10,000 µV/m
	100,000 mV/m		3,162 mV/m		100,000 µV/m		



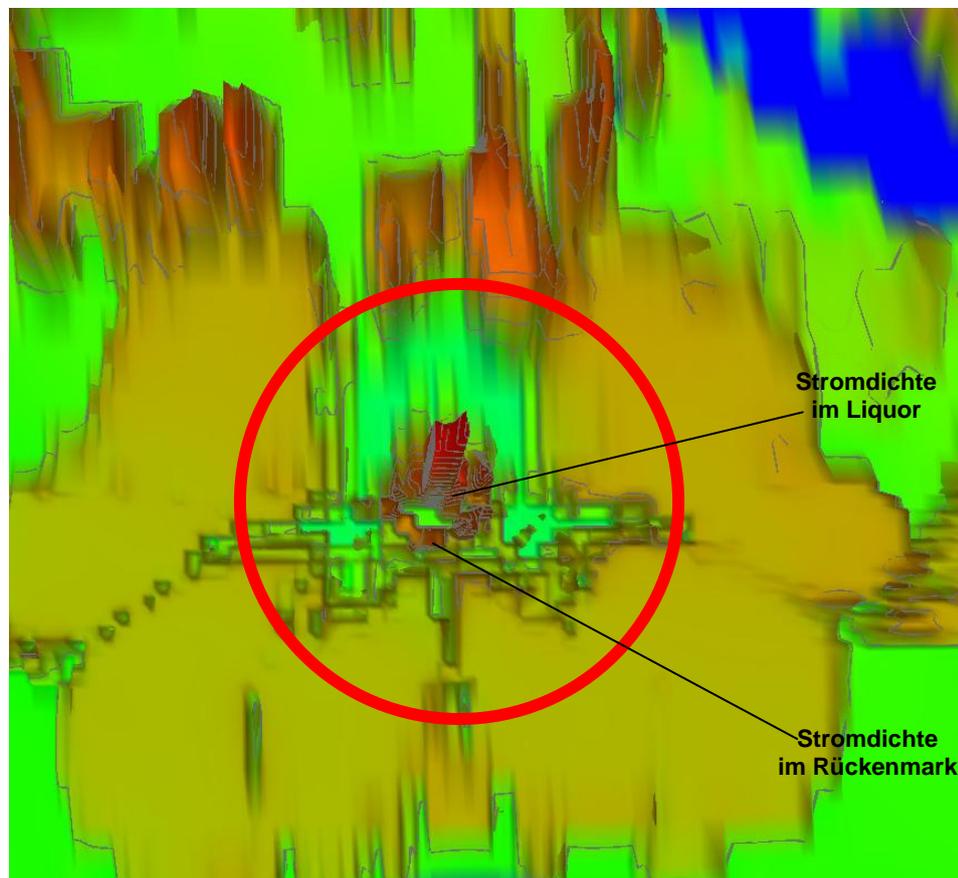
Hohe elektrische Feldstärken treten nur an der Körperoberfläche auf. Im Körper sind die Feldstärkeänderungen relativ gering; sie liegen im Bereich des Rückenmarks in einer Größenordnung von 100 bis 300 mV/m. Bei einer logarithmischen Skalierung des elektrischen Feldes entspricht diese Änderung etwa 10 dB. Gegenüber dem Verhältnis der Gewebeleitfähigkeit zwischen Liquor und der grauen Substanz (Faktor 100 oder 40 dB) hat die Änderung der Gewebefeldstärke in diesem Bereich des Gewebes nur einen geringen Einfluss auf die Stromdichte im Nervengewebe. Man geht daher davon aus, dass die elektrische Stromdichte im Nervengewebe des ZNS um den Faktor „K“, der aus dem Verhältnis der Gewebeleitfähigkeit des Liquors zur Gewebeleitfähigkeit der grauen Substanz berechnet wird, geringer ist als die Stromdichte im Liquor. Diese Annahme bestätigen die Ergebnisse von exemplarisch durchgeführten Berechnungen der Körperstromdichte in einem Körpermodell mit einer Auflösung von 1 mm x 1mm x 1mm im Bereich des ZNS im Rücken für die Simulationsebene 1 200 mm (Abbildung 52, Seite 96).

Im eingekreisten Bildbereich ist der Stromdichteverlauf im Bereich der Wirbelsäule einschließlich des Rückenmarks zu sehen. In der Mitte der Markierung umschließt nahezu ringförmig ein Bereich hoher Stromdichte (Rot dargestellt) einen Bereich niedriger Stromdichte (Grün dargestellt). Entsprechend der Skalierung befinden sich die Bereiche hoher Stromdichte im Liquor, niedrige Stromdichten treten im Nervengewebe auf. Dies wird deutlich, wenn der Stromdichteausschnitt über den zugehörigen Gewebeausschnitt aus dem Körpermodell gelegt wird (Abbildung 53, Seite 97).

Die Darstellung der Abbildung 53 b bestätigt die Vermutung: „Die Stromdichte im Nervengewebe ist wesentlich niedriger als im Liquor“.



Abbildung 52:
 Ausschnitt aus der Verteilung der Körperstromdichte in einem Körpermodell mit einer Auflösung von 1 mm x 1mm x 1mm im Bereich des ZNS im Rücken für die Simulationsebene 1 200 mm; Abstand 0 mm, PSZ mit kleinem Zangenfenster, frontal positioniertes Körpermodell



Legende

	100,000 mA/m ²		3,162 mA/m ²		100,000 µA/m ²		3,162 µA/m ²
	36,620 mA/m ²		1,000 mA/m ²		31,620 µA/m ²		1,000 µA/m ²
	10,000 mA/m ²		316,200 µA/m ²		10,000 µA/m ²		

Darüber hinaus zeigt der Vergleich der Stromdichten (Abbildung 52), dass sich die Stromdichten in den beiden Gewebearten entsprechend dem Verhältnis ihrer Leitfähigkeiten mindestens um den Faktor 100 unterscheiden. Für die untersuchten Arbeitspositionen gilt damit auch für den „Worst case“ wie Kabelführung und Ausführungen der PSZ gemäß Tabelle 7, dass die Exposition für das ZNS unterhalb der Basiswerte der BGV B11 [1] und der Expositionsgrenzwerte der EU-Richtlinie 2004/40/EG [4] liegt. Damit kann angenommen werden, dass die Exposition für Schweißer und andere Beschäftigte an Arbeitsplätzen mit vergleichbaren oder

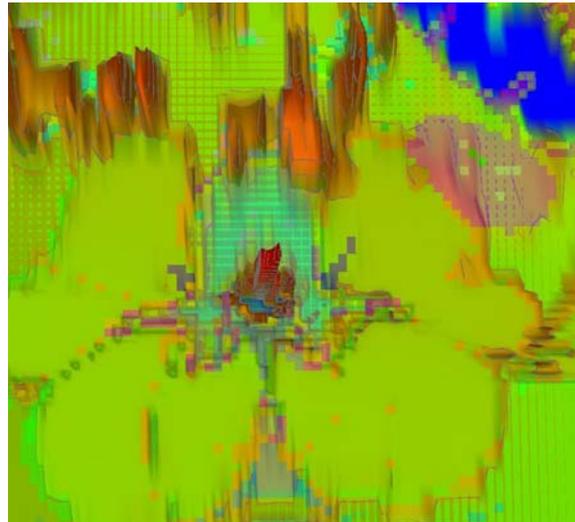


ähnlichen PSZ und Arbeitsbedingungen unterhalb der Basiswerte der BGV B11 (Körperstromdichten) liegt. Maßnahmen zum Schutz dieser Personen sind daher nicht notwendig.

Abbildung 53:
Gewebeausschnitt des ZNS aus Abbildung 49 c und Stromdichteausschnitt für die Simulationsebene 1 200 mm überlagert



a) Gewebeausschnitt aus der Simulationsebene 1 200 mm in der Abbildung 49 c



b) Gewebeausschnitt aus Abbildung 53 a mit Stromdichteverlauf aus Abbildung 52



10 Zusammenfassung und Diskussion

An handgeführten Punktschweißzangen (PSZ) mit separater 50-Hz-Wechselstromquelle untersuchte das BGIA die Exposition der Schweißer gegenüber magnetischen Feldern beim Schweißen. Hierzu wurde bei einem Anwender an mehreren mit PSZ ausgestatteten Arbeitsplätzen der zeitliche Verlauf der magnetischen Flussdichte gemessen und die typische Arbeitsposition der Schweißer ermittelt. Diese Daten zeigen: An den untersuchten Arbeitsplätzen kann die Exposition der Schweißer gegenüber magnetischen Feldern die zulässigen abgeleiteten Werte nach der Unfallverhütungsvorschrift BGV B11 überschreiten, wenn der Abstand zwischen dem Schweißer und der PSZ zu gering ist. Um die horizontale und vertikale Verteilung der magnetischen Flussdichte zu bestimmen, fanden weitere Messungen an einer PSZ mit einem kleinen und mit einem großen Zangenfenster im Labor des BGIA statt. Auch diese Messungen zeigten, dass Schweißer aufgrund ihrer Tätigkeit Sicherheitsabstände zur PSZ praktisch nicht einhalten können, und eine Überschreitung der zulässigen Werte für die magnetische Flussdichte immer in Betracht gezogen werden muss. Daher wurde die Exposition der Schweißer gegenüber magnetischen Feldern anhand der Körperstromdichten (Basiswerte der BGV B11) beurteilt. Die Körperstromdichten wurden in einem international anerkannten Körpermodell des Air Force Research Laboratories (AFRL) mit dem Feldsimulationsprogramm EMPIRE berechnet. Zur Berechnung wurden die an der PSZ mit kleinem und großem Zangenfenster im Labor ermittelten Feldverteilungen nachgebildet. Die Stromdichte wurde im Körpermodell in fünf verschiedenen Ebenen (Kopf, Hals, Rumpf und Genitalien) für typische Arbeitspositionen (fünf unterschiedliche Positionen der PSZ und des Körpermodells und vier unterschiedliche Kabelführungen) berechnet. Dabei konnte gezeigt werden, dass im Körpermodell aufgrund unterschiedlicher Gewebeeigenschaften und -strukturen inhomogene Stromdichteverteilungen auftreten. Je nach Abstand zur PSZ können die Werte der Stromdichte in den verschiedenen Geweben über den Werten der Basiswerte in der BGV B11 liegen. Im Zentralnervensystem (Gehirn und Rückenmark) werden bei üblichen Arbeitssituationen und Kabelführungen jedoch nur ca. 10 bis 20 % des international anerkannten Grenzwertes von 10 mA/m^2 ausgeschöpft.



Der geringe Grad der Grenzwertausschöpfung lässt den Schluss zu, dass auch bei ähnlichen realen Arbeitssituationen an vergleichbaren PSZ die Exposition der Schweißer unter den Basiswerten der BGV B11 liegt. Besondere Maßnahmen zum Schutz der Schweißer sind für das Arbeiten an den untersuchten oder vergleichbaren PSZ nicht erforderlich.



11 Literatur

- [1] Berufsgenossenschaftliche Vorschrift für Sicherheit und Gesundheit bei der Arbeit: Elektromagnetische Felder (Unfallverhütungsvorschrift BGV B11).
Ausg.: 6/2001. Hrsg.: Hauptverband der gewerblichen Berufsgenossenschaften (HVBG), Sankt Augustin. Carl Heymanns, Köln 2001
- [2] Berufsgenossenschaftliche Informationen: Beurteilung magnetischer Felder von Widerstandsschweißeinrichtungen (BGI 5011). Ausg. 9/2006. Hrsg.: Hauptverband der gewerblichen Berufsgenossenschaften (HVBG), Sankt Augustin. Carl Heymanns, Köln 2006
- [3] Guidelines for limiting exposure to time-varying electric, magnetic, and electromagnetic fields (up to 300 GHz). Health Phys. 74 (1998), Nr. 4, S. 494-522.
<http://www.icnirp.de/documents/emfgdl.pdf>
- [4] Richtlinie 2004/40/EG des Europäischen Parlaments und des Rates vom 29. April 2004 über Mindestvorschriften zum Schutz von Sicherheit und Gesundheit der Arbeitnehmer vor der Gefährdung durch physikalische Einwirkungen (elektromagnetische Felder) (18. Einzelrichtlinie im Sinne des Artikels 16 Absatz 1 der Richtlinie 89/391/EWG). ABl. EG Nr. L 159 vom 30. April 2004, S. 1-26;
zul. geänd. ABl. EG Nr. L 184 vom 24. Mai 2004, S. 1-9

Weiterführende Literatur

- [5] Berufsgenossenschaftliche Regel für Sicherheit und Gesundheit bei der Arbeit: Elektromagnetische Felder (BGR B11). Ausg. 1/2006. Hrsg.: Hauptverband der gewerblichen Berufsgenossenschaften (HVBG), Sankt Augustin. Carl Heymanns, Köln 2006
- [6] DIN VDE 0848: Sicherheit in elektrischen, magnetischen und elektromagnetischen Feldern, Teil 3-1: Schutz von Personen mit aktiven Körperhilfsmitteln im Frequenzbereich 0 Hz bis 300 GHz (5/2002). Beuth, Berlin 2002



-
- [7] Empfehlung des Rates vom 12. Juli 1999 zur Begrenzung der Exposition der Bevölkerung gegenüber elektromagnetischen Feldern (0 Hz – 300 GHz). ABl. EG Nr. L 199 vom 30. Juli 1999, S. 59-70
- [8] Grenzwerte und Vorsorgemaßnahmen zum Schutz der Bevölkerung vor elektromagnetischen Feldern. Empfehlungen der Strahlenschutzkommission. Hrsg.: Strahlenschutzkommission, Bonn 2001.
<http://www.berlin.de/sen/umwelt/umweltratgeber/de/emf/pdf/ssk174.pdf>
- [9] *Eggert, S.; Siekmann, H.*: Normung im Bereich der nichtionisierenden Strahlung. KAN-Bericht 9. 2. Aufl. Hrsg.: Verein zur Förderung der Arbeitssicherheit in Europa e. V., Sankt Augustin 2000