

**Abschlussbericht
StSch4526**

**Bestimmung von SAR-Werten bei der Verwendung
von Headsets für Mobilfunktelefone**

**Sven Kühn, Eugenia Cabot, Andreas Christ, Myles Capstick, Claudio
Leubler, Niels Kuster, Michael Slamezka, Quirino Balzano, Philip Balzano**

Zürich, Juli 2008

Der Bericht gibt die Auffassung und Meinung des Auftragnehmers wieder und muss nicht mit der Meinung des Auftraggebers (Bundesminister für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit) übereinstimmen.

Kurzzusammenfassung

In dieser Studie wurde die Spezifische Absorptionsrate (SAR) bei der Verwendung von Mobiltelefonen mit Headsets in Bezug auf die Einhaltung von Grenzwerten sowie vorsorgliche Expositionsverringeringung untersucht.

Experimentelle Untersuchungen wurden an homogenen Kopf- und Flachphantomen durchgeführt. Die SAR im Kopf bei Verwendung von kabellosen Headsets wurde experimentell ermittelt. Kabelgebundene Headsets wurden zusammen mit Telefonen (GSM900, GSM1800, UMTS1950) unter maximierter Stromkopplung auf das Headsetkabel für verschiedene Kabelführungen experimentell dosimetrisch bewertet. Ein kabelgebundenes Headset sowie ein Telefon wurden zusätzlich an anatomischen Ganzkörpermodellen simuliert.

Die maximale SAR im Kopf bei Verwendung von kabelgebundenen Headsets war um einen Faktor >5 kleiner als der ICNIRP Grenzwert. Die SAR im Kopf hängt von der Sendeleistung des Mobiltelefons, von der Kopplung von der Antenne auf das Kabel, der äusseren Dämpfung und evtl. der kabelspezifischen Dämpfung ab. Die Verwendung von Headsets führt zu einer markanten Reduzierung der Exposition des ganzen Kopfbereiches verglichen mit dem Telefon am Kopf. Es kann dabei jedoch bei kabelgebundenen Headsets unter worst-case Bedingungen zu einer stark lokalisierten Überhöhung im Innenohr kommen. Bei der Verwendung von kabellosen Headsets ist mit einer geringen aber konstanten Exposition zu rechnen.

Abstract

This study aimed at investigating the specific absorption rate (SAR) of mobile phones used with hands-free kits (HFK). Results of worst-case scenarios were compared to exposure limits. The pre-cautionary reduction of the exposure when using HFK was evaluated.

The experimental evaluation was conducted using homogeneous Head- and Flat Phantoms. The SAR from wireless HFK were determined experimentally. Wired HFK were evaluated dosimetrically while connected to mobile phones (GSM900, GSM1800, UMTS1950) under maximized current coupling onto the HFK cable and various wire routing configurations. Additionally, simulations were performed of a wired HFK and a mobile phone being operated on anatomical whole-body models.

Using wired headsets the maximum SAR in the head was lower by a factor of >5 when compared to the ICNIRP limit. The SAR in the head depends on output power of the mobile phone, the coupling between antenna and cable, external attenuation and potential cable specific attenuation. Using wired HFK reduces the exposure of the head region considerably compared to the phone operated at the head. However, wired HFK may cause a localized increase in the exposure in the inner ear under worst-case conditions. Wireless HFK showed a low but constant exposure.

Zusammenfassung

Der vorliegende Bericht untersucht die Spezifische Absorptionsrate (SAR) bei der Verwendung von Mobiltelefonen mit Headsets. In einer Literaturanalyse wurden verfügbare Publikationen zu diesem Thema gesichtet und Schlüsse für das weitere experimentelle Vorgehen gezogen. In einer Marktanalyse wurden Headsets bzgl. ihres Aufbaus bewertet, und es wurden Prüflinge für die weiteren Analysen ausgewählt. Die sich anschließenden experimentellen sowie numerischen Untersuchungen befassen sich mit der Exposition des Kopfes und des Rumpfes bei der Verwendung von Mobiltelefonen in den Bändern GSM900, GSM1800 und UMTS1950 mit und ohne kabelgebundene Headsets. Die experimentelle Studie schließt zusätzlich noch kabellose Headsets ein.

Die wesentlichen Fragestellungen der Studie sind die nach der Notwendigkeit einer zusätzlichen Typenprüfung für Headsets sowie die nach der vorsorglichen Reduzierung der Exposition bei Verwendung von kabelgebundenen bzw. kabellosen Headsets.

Im experimentellen Teil der Studie wurde eine Grenzfallbetrachtung bzgl. der maximalen Exposition des Menschen bei der Verwendung kabelgebundener Headsets im Ohr durchgeführt. Der Schwerpunkt lag hierbei auf etwaigen Überschreitungen der Grenzwerte der ICNIRP Richtlinien. Hierzu wurde 1) eine Methode zur Maximierung der Stromkopplung auf das Headsetkabel verwendet und 2) die Verluste entlang den Headsetkabeln vernachlässigt. In keinem der getesteten Fälle wurden die Grenzwerte der ICNIRP Richtlinien erreicht. Vielmehr war selbst die maximale am Headset gemessene SAR um einen Faktor 5 kleiner als der Grenzwert der ICNIRP Richtlinien. Betrachtet man die relative Erhöhung bzw. Abschwächung der SAR bei der Verwendung von Headsets gegenüber dem Telefon direkt am Kopf, kann es zwar für den betrachteten Grenzfall zu einer relativen Erhöhung der Exposition kommen. Jedoch ist dieser Unterschied hauptsächlich der geringen SAR moderner SAR-optimierter Mobiltelefone geschuldet, wenn diese am Kopf betrieben werden. Die Studie hat trotz des deutlich unterschiedlichen Aufbaus der Telefone und der Headsets keine signifikanten Unterschiede der SAR am Ohrknopf gezeigt. Die SAR am Ohrknopf des Headsets hängt somit also in erster Linie von der Ausgangsleistung und der Frequenz des Telefons ab. Bezüglich der Typenprüfung kann man somit schlussfolgern, dass man keine separate Prüfung der Headsets benötigt.

Zusätzlich zur Grenzfalluntersuchung wurden auch verschiedene Experimente zum Dämpfungsverhalten mit maximierter Stromkopplung bei Kabelführung in verschiedenen Distanzen zum Körper durchgeführt. Hierbei zeigte sich, dass bei einer Distanz des Kabels von 15 mm zum Körper bereits eine Verringerung der SAR von 4 dB-15 dB zu erwarten ist. Bei direktem Kontakt zum Körper ist mit Dämpfungswerten von 13 dB-26 dB zu rechnen.

Die dosimetrische Bewertung der kabellosen Headsets hat gezeigt, dass man von diesen eine sehr geringe SAR erwarten kann, welche sich in der Größenordnung der SAR durch kabelgebundene Headsets bei starker Dämpfung entlang des Körpers bewegt.

Eine Ausführliche Betrachtung der SAR durch Mobiltelefone mit und ohne Headset am Rumpf hat ebenfalls gezeigt, dass es bei der Verwendung von Headsets zu keiner Erhöhung der SAR im Vergleich zu den Maximalwerten bei Verwendung des Telefons ohne Headset direkt am Rumpf kommt.

In der numerischen Studie wurden ein Telefon sowie ein zugehöriges Headset modelliert. Beide Modelle wurden ebenfalls experimentell validiert. Diese Modelle kommen dann an zwei realistischen menschlichen Ganzkörpermodellen zum Einsatz. Dort wurden Simulationen mit dem Telefon an den der Brust und in der Hosentasche durchgeführt, bei denen sowohl die Vorderseite als auch die Rückseite des Telefons dem Körper zugewandt waren. Dabei wurde auf realitätsnahe Modellierung der Kabelführung zum Ohr geachtet. Die Auswertung dieser realitätsnahen Expositionsszenarien bestätigte die Ergebnisse der experimentellen Studie. So lagen die SAR-Werte im Kopf bei Verwendung eines kabelgebundenen Headsets am Telefon in der Hosentaschenposition im Bereich der SAR-Werte bei Kabelführung in 0-5 mm Abstand zum Flachphantom. In der Hemdtaschenposition zeigte sich insbesondere die Auswirkung der geringeren Dämpfung entlang des Kabels am Körper. Auch die Variationen der SAR im

Rumpf lagen innerhalb des auf Grund der experimentellen Studie zu erwarteten Bereichs.

Zusätzlich wurde ein generisches Expositionsszenario mit einem Headset im Ohr des anatomischen Modells definiert und mit Hilfe von Simulationen mit der messtechnisch ermittelbaren SAR im Flachphantom verglichen. Diese Untersuchungen haben gezeigt, dass das Flachphantom den über 10 g gemittelten SAR-Spitzenwert für dieses Beispiel in guter Weise wiedergibt (Unterschätzung <1.4 dB). Demgegenüber gibt es Unterschätzungen durch das Flachphantom von 5 dB bezogen auf die über 1 g gemittelte SAR. Dies deutet auf eine sehr lokale Exposition des Innenohrs hin, welche durch das Flachphantom nicht exakt wiedergegeben wird.

Im Extremfall kann es zu einer stark lokalisierten Überhöhung der Exposition im Innenohr bei der Verwendung kabelgebundener Headsets kommen. Im Alltag führen Headsets zu einer markanten Reduzierung der Exposition des Kopfbereiches verglichen mit dem Telefon direkt am Kopf. Bei Verwendung von kabelgebundenen Headsets hängt die SAR im Kopf von der Sendeleistung des Mobiltelefons, von der Kopplung von der Antenne auf das Kabel, der äusseren Dämpfung und evtl. der kabelspezifischen Dämpfung ab. Bei der Verwendung kabelloser Headsets ist mit einer geringen aber im Betrieb konstanten Exposition zu rechnen, dahingegen hängt die Exposition durch kabelgebundene Headsets von den oben genannten Faktoren insbesondere auch von der Leistungsregelung des Telefons ab.

In zukünftigen Forschungsarbeiten sollten insbesondere die Exposition bei der Verwendung von Headsets unter realistischen Kopplungsbedingungen betrachtet werden. Weitere Untersuchungen sind notwendig, um festzustellen, ob funktionale Regionen im Innenohr bzw. Gehirn durch die starke lokale Belastung am Headsetknopf exponiert werden.

Summary

This study aimed at the evaluating of the specific absorption rate (SAR) when using mobile phones with hands-free kits. In a literature analysis, the available publications in this field were reviewed and based on this requirements for further experimental evaluations were determined. In a market survey, hand-free kits were analyzed regarding their constructional details, based on this, devices under test (DUT) were selected. In the following experimental and numerical studies the human exposure when using mobile phones in the GSM900, GSM1800 and UMTS1950 bands were assessed with and without hands-free kits. The experimental study also included wireless hands-free kits.

The most important questions discussed in this study have been whether there is a separate compliance testing required for hands-free kits and to what extent the use of wired and wireless hands-free kits can reduce the human exposure. In the experimental part of the study, a worst-case analysis regarding the maximum human exposure when using wired headsets in the ear has been performed. This analysis especially focused on the compliance with the limits of the ICNIRP guideline. Therefore the evaluation procedure was based on 1) a method of maximizing the current coupling on the hand-free kit cable and 2) disregarding losses along the cable. In none of the evaluated cases was the SAR higher than the ICNIRP limit. Even the maximum determined SAR was lower than the limit by a factor of 5. Investigating the relative increase or decrease of the SAR when using a hands-free kit compared to the phone at the ear at times showed that there was an increase when using a hands-free kit under worst-case conditions. However, this increase is basically only due to the low absolute SAR of modern, SAR-optimized phones. The study also revealed that despite significant differences between the phones and the individual hands-free kits no significant difference in the SAR on the earbud have been found. Therefore, the SAR on the earbud mainly depends on the output power and frequency of the mobile phone. In conclusion, there is no need for an additional compliance testing of wired hands-free kits.

In addition to the worst-case scenario we also investigated various realistic scenarios concerning distance of the cable from the body. These investigation were all performed using the worst-case current coupling setup. It has been found that bringing the cable to a distance of 15 mm already decreases the SAR by 4 dB-15 dB. With direct contact of the cable to the body, the attenuation may be as high as 13 dB-26 dB

The dosimetric assessment of wireless hands-free kits has shown that a very low SAR can be expected from those devices, i.e., a SAR in the range of that from wired headset with strong attenuation along the body.

An extensive evaluation of the SAR with and without a hands-free kit at the trunk has also shown that the hands-free kit does not increase the SAR compared to the worst-case compliance test value without the hands-free kit.

In the numerical part of the study, a mobile phone and a compatible hands-free kit have been modeled. Both models were experimentally validated and used on two anatomical human models. The simulations were performed at the chest and pant pocket positions with both front and back sides of the phones facing the human phantom. A realistic routing of the hands-free kit towards the ear was simulated. The evaluation of the numerical results confirmed the results of the experimental study. In the pant pocket configuration the SAR in the head corresponded to the SAR values determined in the experimental study at 0-15 mm distance between the cable and the flat phantom. The shirt position caused higher SAR in the head due to lower attenuation on the cable running along the body. The variations of the SAR with and without headset in the trunk were also in agreement with variations determined in the experimental study.

Additionally, a generic exposure scenario with the earbud in the ear compared to the ear-bud on the flat phantom was simulated. These investigations revealed the 10 g averaged SAR was reliably reproduced for this limited test case (underestimation of the flat phantom <1.4 dB). In contrast to this, the comparison of the 1 g averaged SAR shows an underestimation by 5 dB. This suggests a very localized exposure in the ear which is not reliably

reproduced in the flat phantom.

In the worst-case there can be a very localized increase of the exposure in the inner ear when using wired hands-free kits. In general hand-free kits lead to a considerable reduction of the exposure of the head. This reduction depends on transmit power of the mobile phone, the coupling from the phone to the cable, the external attenuation and possibly additional cable specific attenuation. Wireless headsets cause a low but also constant level of exposure, whereas the exposure from wired headsets depends on the aforementioned factors and specifically the power control of the mobile phone.

Future research should look into the estimation of real-life coupling scenarios. Further investigations are necessary in order to evaluate to what extent functional regions of the brain or the ear are affected by the very localized exposure in the anatomical ear.

Inhaltsverzeichnis

1	Einführung und Zielsetzung	3
2	Bestandsaufnahme	3
2.1	Literaturstudie	3
2.1.1	Schlußfolgerungen	5
2.2	Marktstudie	5
2.2.1	Kabelgebundene Headsets	6
2.2.2	Kabellose Headsets	6
2.3	Zusammenfassung	7
3	SAR Meßmethoden	10
3.1	DASY5 NEO SAR-Meßsystem	10
3.2	iSAR1 Schnelles Planares SAR-Meßsystem	12
3.3	Dosimetrische Erfassung der Mobiltelefone ohne Headset am Kopf	13
3.4	Dosimetrische Erfassung der Mobiltelefone ohne Headset am Rumpf	13
3.5	SAR-Messprozedur nach IEC62209 Teil 1 und IEC62209 Teil 2	13
3.6	Testprozedur für Telefone mit kabelgebundenen Headsets	14
3.6.1	Maximierung der Kopplung vom Telefon zum Headset am iSAR	14
3.6.2	Beurteilung der Dämpfung entlang des absorbierenden iSAR Phantoms	15
3.6.3	Dosimetrische Erfassung des Headsets am elliptischen Phantom mit DASY5	17
3.6.4	Dosimetrische Erfassung des Mobiltelefons mit Headset am Rumpf mit iSAR	19
3.6.5	Dosimetrische Erfassung des Mobiltelefons mit Headset am Rumpf mit DASY5	20
3.7	Testprozedur für kabellose Headsets	24
3.8	Messunsicherheit	25
3.8.1	DASY5 mit Torso und SAM-Phantomen	25
3.8.2	DASY5 mit Unterdruckphantom	26
3.8.3	iSAR	27
4	Prüflinge	28
4.1	Mobiltelefone	28
4.2	Kabelgebundene Headsets	28
4.3	Kabellose Headsets	31
5	Resultate der experimentellen SAR-Bestimmung	31
5.1	Telefone mit kabelgebundenen Headsets	31
5.1.1	SAR durch Telefone am SAM-Kopf	32
5.1.2	SAR im Kopf bei Verwendung eines Headsets	35
5.1.3	SAR im Rumpf	43
5.2	Kabellose Headsets	49
6	Numerische Bestimmung der SAR	51
6.1	Numerische Methode	51
6.2	Anatomische Ganzkörpermodelle	52
6.3	Experimentelle Validierung der Numerischen Modelle	52
6.3.1	Validierung des Telefonmodells	52
6.3.2	Validierung des Headsetmodells	62
6.4	Auswertung der Belastung des Innenohres	64
6.5	Bestimmung der lokalen SAR in Kopf und Rumpf	67
7	Zusammenfassung	74
A	Übersicht kabelgebundener Headsets	78

B Übersicht kabelloser Headsets

1 Einführung und Zielsetzung

In der Vergangenheit gab es zahlreiche Diskussionen um die spezifische Absorptionsrate (SAR) bei der Verwendung von Mobiltelefonen in Verbindung mit kabelgebundenen Headsets. So wurde im britischen Magazin *Which?* eine Studie publiziert, nach der es durch die Verwendung kabelgebundener Headsets zu einer deutlichen Erhöhung der SAR verglichen mit dem Telefon am Kopf kommen kann. Trotz einiger methodischer Mängel der *Which?* Studie zeigen mittlerweile verfügbare Veröffentlichungen in Fachzeitschriften, dass eine leichte Erhöhung der SAR im Kopf möglich ist, dass aber die dazu notwendigen Konfigurationen kaum alltagsnahen Szenarien entsprechen.

Ziel dieser Studie ist es, die SAR bei Verwendung von Headsets zu untersuchen. Dazu soll die SAR bei der Verwendung kabelgebundener Headsets messtechnisch und numerisch erfasst werden. Zusätzlich zu den in den bisherigen Studien untersuchten GSM-Bändern soll auch das UMTS-Band eingeschlossen werden. Ein weiteres Ziel ist es, den Einfluss des Headsets auf die SAR am Rumpf getragener Telefone zu untersuchen. Darüber hinaus sollen auch kabellose Headsets dosimetrisch bewertet werden.

Anhand der gewonnenen SAR-Daten soll dann ein Vergleich mit internationalen Grenzwerten sowie ein Vergleich der verschiedenen Konfigurationen wie zum Beispiel der Betrieb des Telefons mit und ohne Headset durchgeführt werden.

2 Bestandsaufnahme

2.1 Literaturstudie

Die derzeit verfügbare Menge an wissenschaftlichen Publikationen zur spezifischen Absorptionsrate (SAR) bei der Verwendung von Headsets ist sehr beschränkt.

Derzeit finden sich lediglich drei Veröffentlichungen in wissenschaftlichen Fachzeitschriften, welche die SAR bei Verwendung kabelgebundener Headsets mit Mobiltelefonen untersuchen [Porter et al., 2004, Troulis et al., 2004, Bit-Babik et al., 2003]. Eine weitere, nicht in einer Fachzeitschrift veröffentlichter Bericht, welcher sich messtechnisch mit selbigem Thema befasst, ist [Manning and Gabriel, 2000]. Zwei dieser Veröffentlichungen [Bit-Babik et al., 2003, Manning and Gabriel, 2000] nehmen auf die *Which?*-Studie Bezug. In dieser Studie wurde eine Erhöhung der SAR bei Verwendung kabelgebundener Headsets gegenüber dem Telefon am Kopf festgestellt.

Die Publikation [Bit-Babik et al., 2003] stellt zuerst die Messmethodik dar, die dem Bericht des britischen Magazins *Which?* zugrundeliegt. Dabei wird auf methodische Fehler bei der Erfassung der SAR des Mobiltelefons selbst sowie bei der Erfassung der SAR am Headset unter Nichtbeachtung der Dämpfung des hochfrequenten Feldes entlang der Kabelführung am menschlichen Rumpf hingewiesen. Die in [Bit-Babik et al., 2003] vorgestellte Studie untersucht die SAR im Zusammenhang mit der Verwendung kabelgebundener Headsets numerisch und experimentell bei 900 MHz. Hierzu kommen ein generisches Modell des Headsets (Draht) sowie ein generisches Modell der Quelle (Dipol) zur Anwendung. Desweiteren werden erste Untersuchungen an einem generischen Kopfmodell (Kugel) und einem generischen Rumpfmodell (Zylinder) durchgeführt. Anhand dieses generischen Menschenmodells wird die Grenzfall-Kombination bzgl. einer Maximierung der SAR im Kopf (Resonanz des Drahtes) bestimmt. Dazu werden die Länge des Drahtes sowie die Lage des Dipols zum Draht optimiert. An Hand dieser Konfigurationen werden die über 1 g gemittelten SAR-Werte für folgende Szenarien verglichen: 1) Dipol in 1 cm Abstand direkt am Kopf, 2) Drahtende in 5 mm Entfernung am Kopf, Dipol am anderen Ende im Freiraum und 3) wie 2), jedoch Draht in 5 mm Entfernung am Zylinder verlaufend. In Szenario 1 wird die höchste SAR im Kopf ermittelt, in Szenario 2 ist die ermittelte SAR im Kopf um einen Faktor von nahezu zwei kleiner und in Szenario 3 um einen Faktor > 20 kleiner.

Die Szenarien 1, 2 und 3 wurden ebenfalls am anatomisch korrekten Modell des Visible Human ausgewertet. Auch hier findet sich ein Faktor > 20 für die SAR im Kopf zwischen Szenario 1 und 3. Zwischen Szenario 1 und 2 wird ein Faktor von acht ermittelt. Des weiteren

wird die Studie durch die messtechnische Erfassung eines realistischen Headsets in Verbindung mit einem handelsüblichen Mobiltelefon unter Verwendung der Szenarien 1-3 ergänzt. Auch hier wird zwischen Szenario 1 und 2 ein Faktor von acht sowie zwischen Szenario 1 und 3 ein Faktor von 20 ermittelt.

Die Studie in [Bit-Babik et al., 2003] zeigt erwartungsgemäß, dass das Signal auf dem Headsetkabel bei Führung entlang des Rumpfes stark gedämpft wird und somit die SAR im Kopf auch stark sinkt (Szenario 3). In Szenario 2 wird gezeigt, dass selbst beim Verlauf des Kabels im Freifeld mit einer Verringerung der SAR im Kopf zu rechnen ist. Hier gilt es jedoch anzumerken, dass der Dipol besser koppelt als reale Mobilantennen und daher den Effekt eher überschätzt. Auch die Distanz des Drahtes zum Kopf von 5 mm kann in der Realität unterschritten werden, wenn sich das Headset in Form eines Lautsprecherknopfes im Ohr befindet. Es ist somit nicht auszuschließen, dass unter gewissen Umständen mit einem realen Telefon in Szenario 2 eine höhere SAR ermittelt wird. Darüber hinaus lässt die Studie eine Untersuchung der Beeinflussung der SAR durch die Headsets am Rumpf vermissen.

Die Publikation [Troulis et al., 2004] basiert auf einer numerischen Untersuchung der SAR bei der Verwendung von Headsets. Es kommen ein generisches bei 1800 MHz betriebenes Mobiltelefonmodell, ein generisches Headsetmodell sowie ein auf sechs Gewebearten reduziertes anatomisches Menschmodell zum Einsatz. (Es wird ein "REMCOM adult male body model" referenziert, das vom Visible Human Model abgeleitet wurde [Ackerman, 1998].) Die Studie untersucht verschiedene Kopplungsmechanismen der HF-Energie vom Telefon ins Headsetkabel. Im Detail werden galvanische Kopplung, induktive Kopplung und die Kombination beider untersucht. Es wird die Stromdichteverteilung entlang des am Körper geführten Kabels für die verschiedenen Kopplungsarten untersucht. Das Maximum gekoppelter Energie wird erwartungsgemäß für induktive bzw. kombinierte Kopplung gefunden. Außerdem wird der Einfluss des Kabels auf die Fußpunktimpedanz untersucht. Eine Untersuchung der durch das Kabel in den Kopf gelangenden Energie liegt in der Publikation von [Troulis et al., 2004] nicht vor. Auf Grund der Reduzierung der Stromdichte entlang des am Körper geführten Kabels ist jedoch mit einer mit [Bit-Babik et al., 2003] vergleichbaren SAR-Reduzierung zu rechnen.

Die Publikation von [Porter et al., 2004] behandelt die messtechnische Erfassung der SAR von kabelgebundenen Headsets bei Verwendung von Mobiltelefonen in den GSM900 (888 MHz) und GSM1800 (1750 MHz) Bändern. Besondere Beachtung wird der Untersuchung des induzierten Stromes auf das Headsetkabel geschenkt. Dafür wurde eigens eine Stromsonde entworfen und kalibriert. Bestimmt werden die Spitzenströme auf dem Kabel für die Konfigurationen 1) Freiraum (kein absorbierender Körper), 2) Headset im Ohr und Telefon auf dem Tisch, 3) Headset im Ohr und Telefon am Rumpf und 4) Headset im Ohr und Telefon am Rumpf und Kabel dicht am Rumpf. Erwartungsgemäß wird von Konfiguration 1 zu 4 eine Abnahme des Spitzenstromes gemessen. Es wird eine Tendenz zu erhöhter Kopplung sowie eine stärkere Dämpfung entlang des Körpers im oberen Frequenzband festgestellt. Als Konfiguration mit maximaler Stromkopplung wird das Headsetkabel in der Nähe der Antenne angeklebt und mit dem Headset-Anschluss des Telefons verbunden. Die sich ausbildende Schleife wird dann in ihrer Länge bzgl. maximaler Kopplung optimiert. Die SAR des Telefons am Kopf sowie mit dem Headset in frei hängender und an die Wange geklebter Konfiguration wurde nach [CEN, 2001] bestimmt. Bei einem Vergleich der worst-case SAR-Werte vom am Kopf benutzten Telefon allein gegenüber der Benutzung des Telefons mit Headset wird für alle Fälle eine Verringerung der SAR im Kopf bei Benutzung eines Headsets festgestellt. Die Studie identifiziert folgende bestimmende Faktoren bzgl. SAR im Kopf: Position des Kabels relativ zum Telefon und Nähe des Kabels zum Rumpf. Als Faktor mittleren Einflusses wird die Nähe des Headsets zum Kopf genannt. Als schwache Faktoren werden der Aufbau des Headsets sowie die Frequenz (unter Beachtung der unterschiedlichen Spitzenleistungen) genannt.

Auch die Publikation von [Manning and Gabriel, 2000] befasst sich als Antwort auf die Publikation im *Which?* Magazin messtechnisch mit der Erfassung der SAR bei Verwendung von Mobiltelefonen mit Headsets im GSM900- und GSM1800-Band. Zuerst wird in dieser Studie die E-Feldverteilung im Freifeld entlang des am Telefon angeschlossenen Kabels mit und ohne Ferrit-Unterdrücker bestimmt. Im folgenden werden E-Feldmessungen im Freiraum

am Ohrknopfende mit dem Telefon im Freiraum und dem Telefon am absorbierenden Medium vorgenommen. Für die Experimente am absorbierenden Medium kommen würfelförmige Flachphantome mit 200 mm Kantenlänge und 100 mm Flüssigkeitsfüllung zum Einsatz. Für diesen Fall wird eine Dämpfung des E-Feldes um ca. 6 dB festgestellt. Eine ähnliche Tendenz zwischen dem Telefon im Freiraum und an absorbierendem Medium (ca. 5 dB Reduktion) wird bzgl. der SAR festgestellt, wenn sich das Ohrknopfende am absorbierenden Medium befindet. Für die SAR-Messungen am Kopf nach [CEN, 2001] werden folgende Konfigurationen untersucht: 1) Telefon in der Hand ohne Optimierung der Kopplung zwischen Telefon und Kabel, 2) Maximierung der Kopplung mittels um die externe Antenne geschlungenen Kabels bzw. auf die interne Antenne gelegten Kabels und 3) wie 2), aber zusätzlich mit gegen die Wange des SAM-Kopfes geklebtem Kabel. Für Fälle 1) und 2) wird eine deutliche Reduzierung der SAR gegenüber dem am Kopf benutzten Telefon erzielt. Für diese Messungen kommt ein SAM-Phantom ohne Torso zum Einsatz. In Konfiguration 3 wird für drei von elf getesteten Telefonkombinationen eine Erhöhung von bis zu 3 dB festgestellt, in einem weiteren Fall bleibt die SAR in Konfiguration 3 konstant, sonst wird sie reduziert. Dazu gibt es jedoch anzumerken, dass im Gegensatz zu den Forderungen von [CEN, 2001] nur eine Kopfposition getestet wurde. Nichtsdestotrotz ist dieser Befund überraschend und wird in dieser Studie speziell beleuchtet.

Bezüglich SAR bei der Verwendung kabelloser Headsets ist bislang nur eine Fachveröffentlichung [Kühn et al., 2007] verfügbar. In dieser werden Messresultate zweier Bluetooth-Headsets am Flachphantom sowie Methoden und Prozeduren zur SAR-Prüfung von Geräten mit neuen Kommunikationstechnologien vorgestellt. Bei beiden Bluetooth Headsets handelt es sich um Geräte der Leistungsklasse 3 (mit 1 mW Ausgangsleistung). Die dort aufgeführten über 10 g gemittelten SAR-Werte sind $<10 \mu W/g$ und damit nahe der Empfindlichkeitsgrenze der dosimetrischen E-Feldsonden. Weiterhin sind mehrere Publikationen über Antennendesign für Bluetooth Headsets verfügbar [Jidhage and Stjernman, 2004, Subramaniam et al., 2005, Wong et al., 2006]. Jedoch wird in [Jidhage and Stjernman, 2004, Subramaniam et al., 2005] der Einfluss des menschlichen Kopfes nicht betrachtet. In [Wong et al., 2006] wurden numerische und experimentelle Untersuchungen bzgl. des Einflusses des menschlichen Kopfes auf die Antennencharakteristik vorgenommen. Jedoch auch in [Wong et al., 2006] wurden keine Untersuchungen bzgl. der SAR vorgenommen. Es wird aber eine Abnahme der Strahlungseffizienz der Antenne im 2,45 GHz-Band von 90% im Freiraum gegenüber 70% am Kopf berichtet.

2.1.1 Schlußfolgerungen

Generell führen kabelgebundene Headsets zu einer Verringerung der SAR im Kopfbereich. Wie zu erwarten ist, hat die Führung des Kabels einen großen Einfluss auf die HF-Kopplung bzw. die SAR im Kopfbereich. Nur eine Studie hat unter besonderen, aber nicht unrealistischen Bedingungen eine deutliche Erhöhung gemessen. In dieser Studie sollen realistische und worst-case Szenarien untersucht werden. Des weiteren sollen Headsets mit Mikrofonausleger einbezogen sowie die Untersuchungen auf UMTS-Telefone ausgeweitet werden.

In Hinblick auf die SAR durch kabellose Headsets können aus der gegebenen Literatur auf Grund der geringen Zahl untersuchter Geräte keine Schlußfolgerungen gezogen werden. Es kann jedoch davon ausgegangen werden, dass Bluetooth Headsets auf Grund ihrer geringen Ausgangsleistung eher geringe SAR-Werte erreichen werden.

2.2 Marktstudie

Derzeit gibt es eine große Anzahl (33) Mobiltelefonhersteller, welche den weltweiten Markt mit einer Vielzahl von Mobiltelefonmodellen (1227 unserer Zählung nach) beliefern. Dies bedeutet, dass es derzeit mehr Mobiltelefonmodelle als Automodelle gibt. Mit dem Markterfolg der persönlichen drahtlosen Kommunikation ging eine Vervielfachung der Mobiltelefonmodelle einher, da die Hersteller auch versuchen, Nischenmärkte abzudecken.

Trotz der großen Anzahl an Herstellern zeigen neueste Statistiken (2006), dass der Markt durch wenige Hersteller (Nokia (39%), Motorola (20%), Samsung (18%) und LG (6-7%)) dominiert wird. In den letzten Monaten hat Samsung Motorola erstmals vom zweiten Platz

verdrängt. Praktisch alle Hersteller liefern ihre Telefone mit einem kabelgebundenen Headset aus. Darüber hinaus verfügen viele Telefone über eine Bluetooth-Schnittstelle zur Anbindung kabelloser Headsets. Zusätzlich wird eine Vielzahl verschiedener Headsetmodelle als Zubehör angeboten, um alle Marktnischen zu befriedigen. Eine Liste der kabelgebundenen Headsets der größten Telefonhersteller findet sich in Anhang A. Es ist ersichtlich, dass diese Liste deutlich kürzer ist als die Anzahl verfügbarer Telefonmodelle, d.h. die vier größten Hersteller bieten derzeit 36 kabelgebundene Headsets als Zubehör an.

Eine Liste der kabellosen Headsets der größten Telefonhersteller findet sich in Anhang B. Die Liste enthält die als Zubehör angebotenen kabellosen Headsets der 4 größten Mobilfunkhersteller sowie diejenigen der zwei größten Zubehöranbieter (Jabra und Logitech). Sie umfasst insgesamt 69 mechanisch verschiedene Geräte. Trotz der relativ großen Vielfalt kabelloser Headsets kann jedoch davon ausgegangen werden, dass die meisten dieser Geräte ein ähnliches HF-Design aufweisen.

2.2.1 Kabelgebundene Headsets

Die meisten kabelgebundenen Headsets unterscheiden sich in ihrem Aufbau nicht wesentlich. Die größten Unterschiede zwischen den einzelnen Modellen sind zwischen ihrem Köpfförerteil auszumachen. Grundsätzlich bestehen die Headsets aus einem evtl. herstellerspezifischen Telefonanschluss; 2,5 mm- oder 3,5 mm-Klinkenanschlüsse sind jedoch häufig anzutreffen. Vom Telefonanschluss aus laufen in der Regel mehrere parallel geführte Drähte. Diese verlaufen dann über Längen von üblicherweise 90-150 cm bis zu einem im Kabel eingelassenen Mikrofon. Viele Headsets verfügen darüber hinaus über eine im Kabel eingebaute Fernbedienung, welche z. B. genutzt wird, um Anrufe entgegenzunehmen oder die Lautstärke zu regeln. Solche Fernbedienungen befinden sich an verschiedenen Positionen unterhalb des Mikrofones oder sind in dieses integriert. Nach dem Mikrofonteil verlaufen nur noch die für die Kopfhörer notwendigen Drähte über ca. 20-35 cm. Hier gilt es, Stereokopfhörer und Monokopfhörer zu unterscheiden. Letztere verfügen über nur einen Lautsprecher, erstere über Lautsprecher für beide Ohren. Einige Headsets verfügen über einen am Kopfhörer angeschlossenen Mikrofonausleger. In diesem Fall ist kein Mikrofon im Kabel eingelassen.

Wie schon erwähnt, ist der Aufbau des Köpfförerteils meist das Herausstellungsmerkmal der verschiedenen Headsets, jedoch lassen sich die Headsets in wenige Kategorien einteilen:

- Stereo/Mono: Stereoheadsets verfügen über zwei Lautsprecher, Monoheadsets über nur einen Lautsprecher (siehe Abbildung 1).
- Typ des Kopfhörers (siehe Abbildung 2):
 - Intraaural: Kopfhörer in Form von im Ohr steckenden Lautsprecherstöpseln
 - Supraaural: Kopfhörer in Form von auf dem Ohr aufliegenden Lautsprechertellern
 - Zirkumaural: Kopfhörer deren Lautsprecher die Ohrmuschel komplett umfassen.
- Mikrofonausleger: Diese Headsets besitzen einen Ausleger, um das Mikrofon näher am Mund zu positionieren (siehe Abbildung 3).

Wie aus Anhang A ersichtlich, entspricht die Mehrheit aller kabelgebundenen Headsets der Aufbauform intraaural ohne Mikrofonausleger.

2.2.2 Kabellose Headsets

In ihrem mechanischen Aufbau bzgl. der Einbettung in die Ohrmuschel können auch kabellose Headsets in die Kategorien intraaural, supraaural und zirkumaural unterteilt werden. Auch bei den kabellosen Headsets ist die Mehrheit intraaural. Mit Ausnahme des Motorola H9, welches nur eine Art Ohrknopf darstellt überdecken diese Geräte jedoch eine größere Fläche des Ohres als kabelgebundene Headsets. Es werden zusätzlich folgende Aufbauten unterschieden:

- Mikrofonausleger: Ein deutlicher Ausleger (>5 cm) in Richtung Mund ist vorhanden (siehe Abbildung 4).



1.1: Nokia HS-40 Monoheadset

1.2: Nokia HS-47 Stereoheadset

Abbildung 1: Beispiele von Stereo- und Monoheadsets (Quelle: www.nokia.de)

- kurzer Mikrofonausleger: Ein wenige Zentimeter langer Ausleger ist vorhanden (siehe Abbildung 5). Die Mehrheit aller Headsets entspricht dieser Aufbauform.
- Kompakt: Headset bedeckt nur eine kleine Fläche oberhalb des Ohrkanals (siehe Abbildung 6).
- Spezielle Aufbauten:
 - Stereo: kabellose Stereoheadsets sind eher unüblich. Eine elektrische bzw. auch mechanische Verbindung wird über einen Bügel auf bzw. hinter dem Kopf sowie über Kabel ähnlich einem kabelgebundenen Headset mit einer Bluetooth-Einheit hergestellt.
 - Hinter-dem-Ohr: Bei dieser Art Headset befindet sich der größte Teil des Gerätes ähnlich einem Hörgerät hinter dem Ohr.

Praktisch alle am Markt verfügbaren kabellosen Headsets nutzen die Bluetooth-Technologie. Der Bluetooth Standard 1.x definiert ein Headsetprofil für monophone Übertragung, der Bluetooth-Standard 2.0 definiert ebenfalls Stereo für Musikwiedergabe. Während des Telefongesprächs steht jedoch nur monophone Übertragung zur Verfügung. Bluetooth-Endverbrauchergeräte verfügen in der Regel nicht über Schnittstellen, mit denen sie in einen Testmodus versetzt oder mittels eines Kommunikationstesters kontrolliert werden können. Es müssen deshalb Methoden gefunden werden, um die Prüflinge in einen worst-case Sendemodus zu versetzen.

Es ist davon auszugehen, dass es sich bei Headsets um Bluetooth-Geräte der Klassen 2 bzw. 3, d.h. mit 2,5 oder 1 mW maximaler Ausgangsleistung handelt. Für Geräte der Klassen 2 bzw. 3 ist eine Regelung der Sendeleistung laut Standard nicht verpflichtend jedoch optional möglich. Eine Maximierung der Sendeleistung ist jedoch einfach zu erreichen, indem das Signal der Bluetooth-Gegenstation ausreichend verringert wird. Des weiteren sendet ein Bluetooth-Headset nur bei anliegendem Sprachsignal. Um eine kontinuierliche Übertragung zu erreichen, wird ein externes Pseudo-Sprachsignal [63.19, 2005] als Sprachquelle angelegt. Dieses Signal wurde dahingehend optimiert, dass es von allen gängigen Sprachprozessoren als Sprachsignal erkannt und somit nicht als Nebengeräusch herausgefiltert wird, also die maximale Datenrate entsteht und demzufolge die Anzahl der gesendeten Bluetooth Datenpakete maximal wird.

2.3 Zusammenfassung

Zusammenfassend gibt es zu sagen, dass sich kabelgebundene Headsets in ihrem mechanischen Aufbau insbesondere durch verschiedene Kabellängen und verschiedene Konstruktionen des Kopfhörerteils auszeichnen. Da es sich bei den meisten Headsets um intraaurale Headsets handelt und diese durch ihre Einbettung in der Ohrmuschel tendenziell auch eine



2.1: Circumaurales Headset - Motorola S805 (kabellos) (Quelle: www.motorola.de)



2.2: Supraaurales Headset - Nokia HS-16 (Quelle: www.nokia.de)



2.3: Intraurales Headset - Nokia HS-40 (Quelle: www.nokia.de)

Abbildung 2: Beispiele von Typen des Kopfhörers



Abbildung 3: Beispiel eines Headsets mit Mikrofonausleger (Plantronics MX250 Quelle: www.plantronics.com)



Abbildung 4: Beispiel eines kabellosen Headsets mit Mikrofonausleger (Logitech Mobile Pro Headset, Quelle: www.logitech.ch)



Abbildung 5: Beispiel eines kabellosen Headsets mit kurzem Mikrofonausleger (Logitech Mobile Express Headset, Quelle: www.logitech.ch)



Abbildung 6: Beispiel eines kabellosen Headsets des Typs Kompakt (Samsung WEP500, Quelle: www.samsung.ch)

höhere SAR im Kopf erzeugen können, wird empfohlen, zwei kabelgebundene intraaurale Headsets zu testen. Zusätzlich wird empfohlen, ein kabelgebundenes Headset mit einem Mikrofonausleger zu testen.

Alle heutigen kabellosen Headsets verwenden die Bluetooth-Technologie. Die Mehrheit der kabellosen Headsets besteht aus intraauralen Headsets mit einem kurzen Mikrofonausleger. Es wird deshalb empfohlen, ein solches Headset zu testen. Des Weiteren wird wie auch

bei den kabelgebundenen Headsets empfohlen, ein Headset mit einem Mikrophonausleger zu testen. Als drittes kabelloses Headset soll ein intraurales Headset in kompakter bzw. Knopfauflaufbauform getestet werden.

3 SAR Meßmethoden

Im folgenden werden die für die messtechnische Erfassung notwendigen Meßsysteme, Methoden und Messaufbauten beschrieben.

3.1 DASY5 NEO SAR-Meßsystem

Ein Teil der SAR-Messungen mit Headset sowie alle Typenprüfungsmessungen der Telefone ohne Headset wurden mit dem automatischen dosimetrischen Meßsystem DASY5 NEO (Dosimetric Assessment SYstem Version 5 NEO) der Schmid & Partner Engineering AG, Zürich, (SPEAG) durchgeführt. Die detaillierten Spezifikationen des Systems sind in den Tabellen 1 und 2 aufgelistet.

System	Typ: Software:	DASY5 NEO 5,0 Build 87,5
Datenerfassungssystem	Typ: Seriennr.: Kalibrierung : Hersteller:	DAE4 355 08/2007 Schmid & Partner Engineering AG (CH)
Positionierungssystem	Roboter: Seriennr.: Reichweite: Wiederholgenauigkeit: Kontrolleinheit: Seriennr.: Hersteller:	TX90L F06/54H7A1/A/01 1,45 m 0,04 mm CS8C F06/54H7A1/C/01 Stäubli (F)
Phantom		
Flachphantom	Name: Typ: Seriennr.: Hersteller:	ELI4 QD OVA 001 BA 1003 Schmid & Partner Engineering AG (CH)
Kopfphantom	Name: Typ: Seriennr.: Hersteller:	SAM v4.0 OP P000 P40CB 1312 Schmid & Partner Engineering AG (CH)
DUT Positionierungsvorrichtung	Seriennr.: Hersteller:	SD 000 H01 CA 1001 Schmid & Partner Engineering AG (CH)

Tabelle 1: Technische Daten des SAR-Messsystems

Sonde	Typ:	EX3DV6
	Seriennr.:	3515
	Hersteller:	Schmid & Partner Engineering AG (CH)
	Kalibrierung :	10/2007
	Durchmesser der Messspitze:	2,5 mm
	Frequenzbereich:	10 MHz bis 6 GHz
	Dynamikbereich:	5 μ W/g to > 100 mW/g
	Axiale Isotropieabweichung:	< \pm 0,30 dB
	Sphärische Isotropieabweichung:	< \pm 0,50 dB
	Kalibrationsunsicherheit:	< \pm 9,7% (k=2)

Tabelle 2: Technische Daten der Sonde



Abbildung 7: DASY5 mit einem elliptischen Phantom für SAR-Messungen nach [IEC, 2007] sowie einem Twin-SAM-Phantom

3.2 iSAR1 Schnelles Planares SAR-Meßsystem

Das iSAR Meßsystem (Schmid & Partner Engineering AG, Zürich, Schweiz) [Kühn et al., 2006] ist ein neuartiges planares SAR-Meßsystem. Die Spezifikationen des Messsystems sind in Tabelle 3 zusammengefasst, Abbildung 8 zeigt das iSAR-Meßsystem mit einem erweiterten absorbierenden Phantom, wie es zum experimentieren während der Headset-Messungen benutzt wird. Der große Vorteil des iSARs ist seine Fähigkeit, sehr schnell (3 s) einen kompletten Ebenenscan von 120×240 mm durchzuführen. Dies wurde in dieser Studie besonders beim Finden der Maximalkonfiguration sowie beim vermessen einer großen Zahl zusätzlicher Konfiguration zur Bewertung der Dämpfung entlang des Headsetkabels genutzt.

Tabelle 3: Spezifikationen des iSAR Messsystems

Messzeit	3 s
Sensorfläche	120×240 mm
Sensorraster	15×15 mm
Abstand Phantomoberfläche - Sensoren	4 mm
Anzahl X,Y-polarisierte SAR-Sensoren	8x16=128 (256 Einzelsensoren)
Fläche absorbierendes Medium	600×600 mm
Frequenzbereich des absorbierendes Medium	30 MHz - 6 GHz
Frequenzbereich des Messsystems	300 MHz-3 GHz
Isotropiefehler	<0,6 dB
Linearitätsfehler	<0,1 dB
Empfindlichkeit	<0,05 W/kg
Temperaturstabilität	umgebungstemperaturstabilisiert



Abbildung 8: Schnelles planares SAR-Meßsystem iSAR (rechts) mit erweiterter Absorptionsfläche (linker Teil des Phantoms).

3.3 Dosimetrische Erfassung der Mobiltelefone ohne Headset am Kopf

Die experimentelle Auswertung der SAR der Mobiltelefone am Kopf folgt international etablierten und harmonisierten Standards [IEC 62209/1, 2001]. Für die Erfassung der SAR der zu testenden Mobiltelefone (Device under Test, DUT) werden diese jeweils an der linken und rechten Kopfhälfte des SAM-Phantoms gemessen. Die Messung erfolgt jeweils bei den Bandmittenfrequenzen sowie bei den Bandober- und -untergrenzen der GSM900-, GSM1800- und UMTS-Bänder in jeweils am Kopf anliegender und bei um 15° abgewinkelter Position. Die SAR-Bestimmung erfolgte nach der in Abschnitt 3.5 beschriebenen Messprozedur.

3.4 Dosimetrische Erfassung der Mobiltelefone ohne Headset am Rumpf

Die dosimetrische Erfassung des Mobiltelefons am Rumpf lehnt sich an die in Kapitel 6 IEC62209 Teil 2 [IEC, 2007] beschriebene Methode an. Die Messung erfolgt jeweils bei den Mittenfrequenzen der GSM900-, GSM1800- und UMTS-Bänder mit maximaler Ausgangsleistung des Telefons. Die Messung erfolgt in folgenden Konfigurationen:

- Vorderseite des Telefons parallel zum Flachphantom in 0 mm, 5 mm und 15 mm Abstand
- Rückseite des Telefons parallel zum Flachphantom in 0 mm, 5 mm und 15 mm Abstand

Die SAR-Bestimmung erfolgte nach der in Abschnitt 3.5 beschriebenen Messprozedur.

3.5 SAR-Messprozedur nach IEC62209 Teil 1 und IEC62209 Teil 2

Die Messprozedur für die Anwendung des DUT als Mobiltelefon am Kopf folgt dem in Absatz 6.3 beschriebenen Protokoll von IEC62209 Teil 1 [IEC 62209/1, 2001].

Die Messprozedur für die Anwendung des DUT am Rumpf folgt dem in Absatz 6.3 beschriebenen Protokoll von IEC62209 Teil 2 [IEC, 2007]. Die wichtigsten Schritte beider Protokolle sind folgend zusammengefasst:

- **Schritt 1:** Eine Messung des SAR-Wertes an einem vordefinierten Ort in 10,0 mm Entfernung von der Innenseite des Phantoms wird als Referenzmessung für die Leistungsvariation über den Messzeitraum genommen. Dieser SAR-Wert wird dann nach einer Wartezeit von drei Minuten überprüft.
- **Schritt 2:** Eine zweidimensionale SAR-Verteilung wird im Abstand von 4,0 mm zur Oberfläche der Phantominnenseite gemessen. Die Messfläche deckt eine Oberfläche ab, die größer als die projizierte Oberfläche des DUT ist und eine Messpunktauflösung von maximal 20 mm × 20 mm besitzt. An Hand der 2-D Daten wird der Ort der maximalen Absorption mit Hilfe der Methode von Shepard [SPEAG, Schweiz, 2005] bestimmt.
- **Schritt 3:** Um diesen Punkt und um alle Nebenmaxima innerhalb von 2 dB wird ein Volumen nach IEC62209 Teil 1 [IEC 62209/1, 2001] vermessen. Die Ermittlung des räumlich gemittelten SAR-Spitzenwertes erfolgt durch numerische Signalverarbeitung [SPEAG, Schweiz, 2005]. Zur Bestimmung des Volumens mit dem höchsten räumlich gemittelten SAR-Wert wird folgender Algorithmus verwendet:
 - Erfassung der Messwerte aus der Volumenmessung (Gitterpunkte und Werte)
 - Berechnung der SAR an jedem Punkt
 - Bestimmung eines hochauflösenden Gitters im gemessenen Volumen
 - Interpolation der im groben Gitter gemessenen Werte auf das hochauflösende Gitter mit Hilfe einer Kombination der Methode der kleinsten Fehlerquadrate und einer gewichteten Mittelungsmethode.
 - Extrapolation der 3-D Feldverteilung an die Phantomoberfläche
 - Berechnung der gemittelten SAR-Spitzenwerte über Volumina von 1 g und 10 g
- **Schritt 4:** Erneute Messung des SAR-Wertes am im Schritt 1 verwendeten Messpunkt zur Bestimmung der Leistungsdifferenz

3.6 Testprozedur für Telefone mit kabelgebundenen Headsets

Im folgenden ist die Messabfolge, nach welcher die Telefone mit und ohne angeschlossenes Headset vermessen wurden, stichpunktartig zusammengefasst. Eine detaillierte Beschreibung der einzelnen Messprozeduren ist in den Unterkapiteln gegeben.

- 1 Maximierung der Kopplung bzw. der gemessenen SAR mit in einen Winkel von 12° vom Phantom weglaufenden Kabel¹ sowie Maximierung der Kopplung bzw. der gemessenen SAR mit derselben Konfiguration wie vorher, aber mit dem Ohrknopfkabel in einem Bereich von bis zu 10 cm am iSAR-Phantom fixiert
- 2 Zur Beurteilung der Dämpfung des Körpers: 1) Erhöhung des Winkels für die Maximalkonfiguration aus 1 und 2 (Kabel nicht anliegend bzw. anliegend) auf 22° und Bestimmung der SAR am iSAR. 2) Parallel zum iSAR mit erweiterter Absorptionsfläche verlaufende Konfiguration mit dem Headsetkabel bis zum ersten Berührungspunkt am iSAR (Maximalkonfiguration aus 1 und 2) in 15 mm, 5 mm und 0 mm Distanz
- 3 Transfer der Maximalkonfiguration aus 1 und 2 auf das Flachphantom des DASY5 Messsystems und erneute Bestimmung des über 10 g gemittelten SAR-Spitzenwertes im Kopfbereich des rechten Headsetkabels sowie Vermessung der Verteilung der SAR in der Ebene entlang der restlichen Kabelführung am Phantom bzw. in seiner Nähe
- 4 Transfer der kopplungsmaximierten Konfiguration zurück auf das iSAR Meßsystem und Vermessung des maximalen über 10 g gemittelten SAR-Spitzenwertes am Telefon (oder am Kabel in der Nähe des Telefons) in 0 mm, 5 mm und 15 mm Abstand des Telefon und des Kabel zum Phantom sowohl mit der Vorder- als auch mit der Rückseite des Telefons dem Phantom zugewandt.
- 5 Transfer der 0 mm-Konfigurationen (Vorder- und Rückseite des Telefons) an das Flachphantom des DASY5 Messsystems und Bestimmung des über 10 g gemittelten SAR-Spitzenwertes sowie der SAR-Verteilung entlang der Kabelführung.

3.6.1 Maximierung der Kopplung vom Telefon zum Headset am iSAR

Die Maximierung der Kopplung vom Telefon zum Headset wurde mit einer Optimierung ähnlich der in [Porter et al., 2004] vorgenommen. Dazu wurde das Headset in die dafür vorgesehene Buchse des Gerätes eingesteckt. Das Kabel wurde dann in Form einer Schleife über die interne Antenne gelegt bzw. in einer Wicklung um eine externe Antenne geschlungen (siehe Abbildung 9). Die Länge der Schleife wird dann nach folgender Prozedur auf maximale Kopplung optimiert:

- 1 Der Ohrknopf des Headsets wird am iSAR Flachphantom befestigt.
- 2 Es werden kontinuierlich die SAR-Werte auf einer Fläche von 12×24 cm gemessen.
- 3 Das Telefon mit dem angeschlossenen Headset wird nun so positioniert, dass das Kabel straff gespannt ist und in einem Winkel $\alpha = 12^\circ$ vom Flachphantom wegläuft (siehe Abbildung 10.1).
- 4 Die Länge der Kabelschleife des Headsetkabels zwischen Headsetbuchse und der Befestigung an der Telefonantenne wird nun auf maximale SAR am Ohrknopf optimiert.

Da auch das Kabel des Headsets in einem gewissen Bereich direkten Kontakt zum Kopf haben kann und häufig ein weiteres Maximum unterhalb des Headsetohrknopfs gefunden wurde, wurde eine weitere Testkonfiguration eingeführt. Dazu wird das Kabel in einem Bereich von bis zu 10 cm am Flachphantom fixiert. (Dies entspricht etwa der Länge, entlang der das Kabel vom Ohr ab noch Kontakt zum Kopf haben kann.) Der Fixierungspunkt zur SAR-Maximierung konnte durch wiederholte Messungen mit dem iSAR gefunden werden. Es wurde dann wieder die Prozedur zur Kopplungsmaximierung angewandt:

¹Für Stereoheadsets wird das zweite Kabel direkt nach der Verzweigung an der kürzesten Distanz am Mesphantom fixiert und verläuft dann am Phantom weiter.

- 1 Der Ohrknopf und das Kabel des Headsets wird am iSAR Flachphantom befestigt (siehe Abbildung 10.2).
- 2 Es werden die SAR-Werte auf einer Fläche von 12×24 cm kontinuierlich gemessen.
- 3 Das Telefon mit dem angeschlossenen Headset wird nun so positioniert, dass das Kabel straff gespannt ist und in einem Winkel $\alpha = 12^\circ$ vom Fixierungspunkt am Flachphantom wegläuft (siehe Abbildung 10.2).
- 4 Die Länge der Kabelschleife zwischen Headsetbuchse und der Befestigung an der Telefonantenne wird nun auf maximale SAR am Fixierungspunkt optimiert.

Diese Prozeduren wurden jeweils mit dem Telefon bei maximaler Ausgangsleistung in allen Testfrequenzen wiederholt. Alle weiteren Untersuchungen wurden dann in der Maximalkonfiguration (anliegendes Kabel bzw. nicht anliegendes Kabel) durchgeführt.

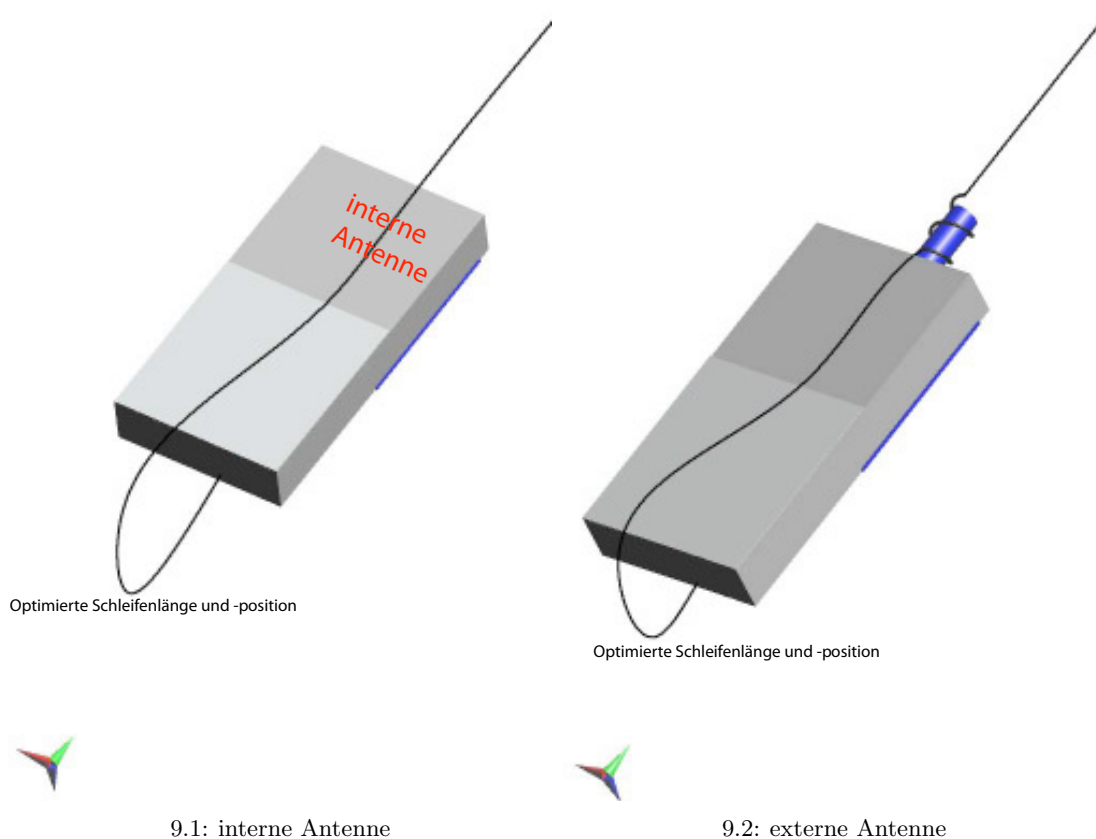


Abbildung 9: Aufbau zur Maximierung der Kopplung in das Headset für interne und externe Antennen.

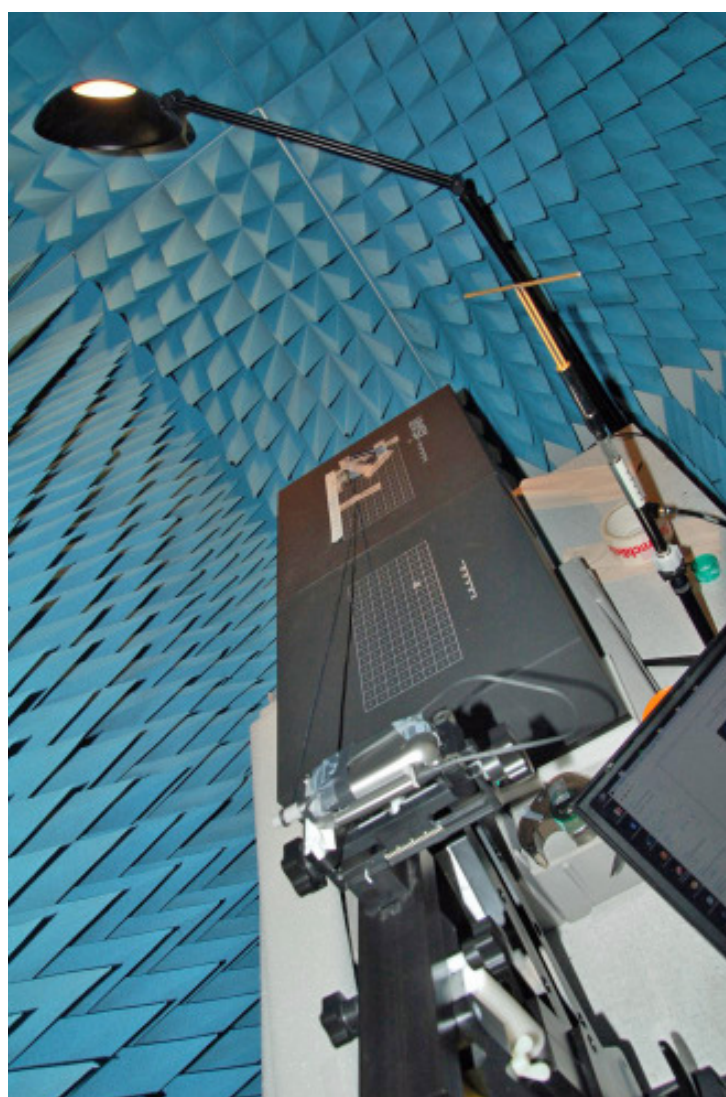
3.6.2 Beurteilung der Dämpfung entlang des absorbierenden iSAR Phantoms

Zur Untersuchung des Einflusses des Körpers auf die SAR bei Verwendung eines kabelgebundenen Headsets wurden weitere im folgenden beschriebene Experimente durchgeführt: Es wurde der Winkel für die Maximalkonfiguration (Kabel nicht anliegend bzw. anliegend) auf 22° erhöht und die SAR mit Hilfe des iSAR-Messsystems bestimmt (siehe Abbildung 11).

Die SAR wurde weiterhin in drei Konfigurationen bestimmt, bei denen das Kabel parallel (über ca. 60 cm bis zum Ohrknopf) zum iSAR mit einem zusätzlichen absorbierenden Phantom verläuft. Dabei wird das Kabel bis zum ersten Kontaktpunkt am iSAR in 0 mm, 5 mm und 15 mm Distanz verlegt. Diese Messaufbauten sind in Abbildungen 12 dargestellt.



10.1: ohne anliegendes Headsetkabel



10.2: mit im Kopfbereich anliegendem Headsetkabel

Abbildung 10: Messaufbau zur Kopplungsmaximierung am iSAR-Phantom.

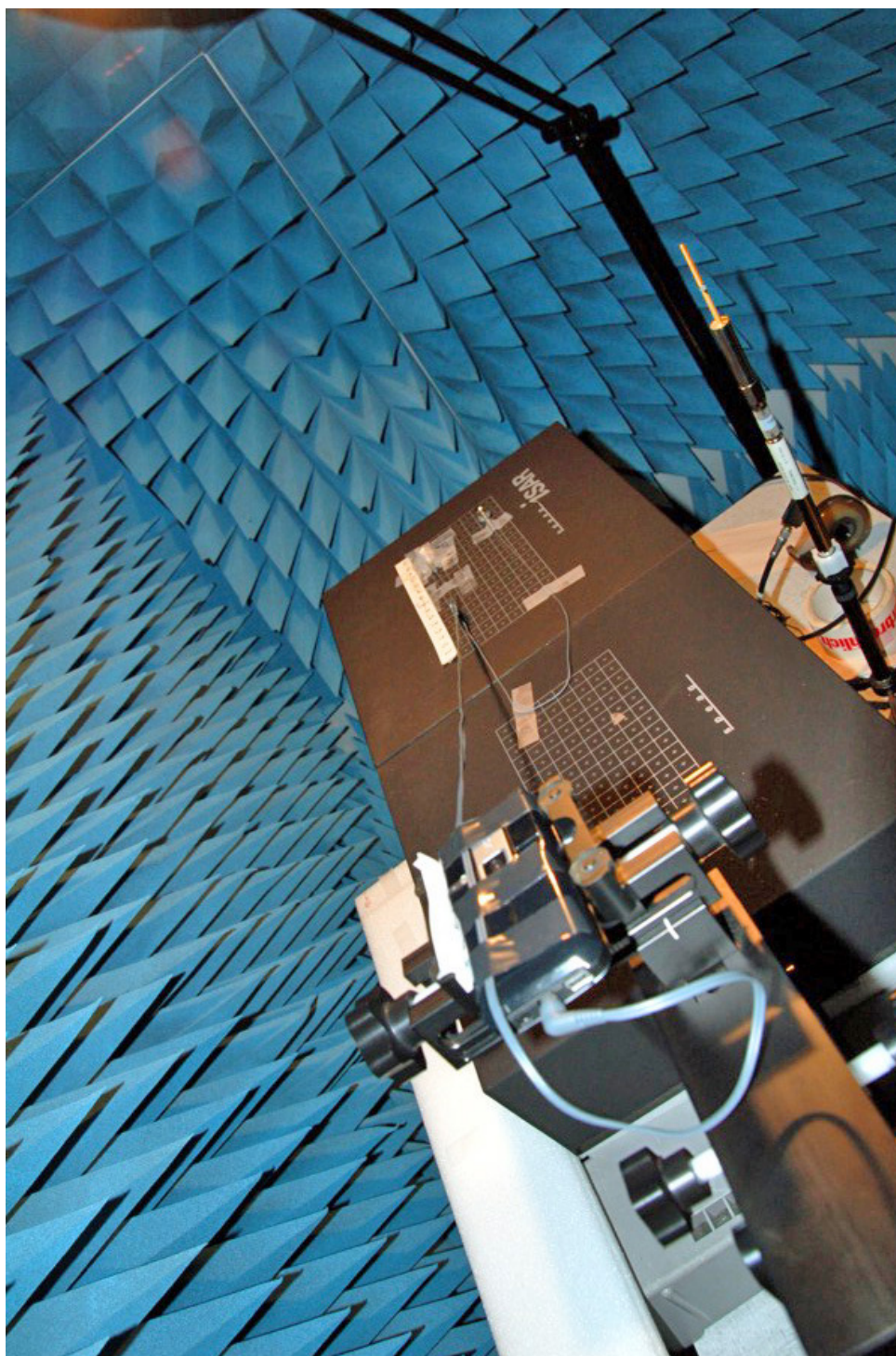
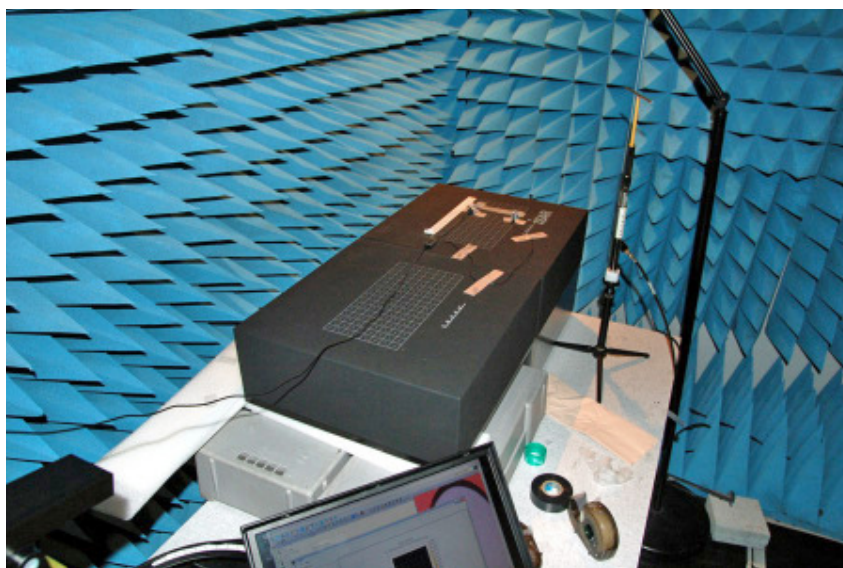


Abbildung 11: Messaufbau mit auf 22° erhöhten Winkel des Headsetkabels zum Flachphantom.

3.6.3 Dosimetrische Erfassung des Headsets am elliptischen Phantom mit DASYS

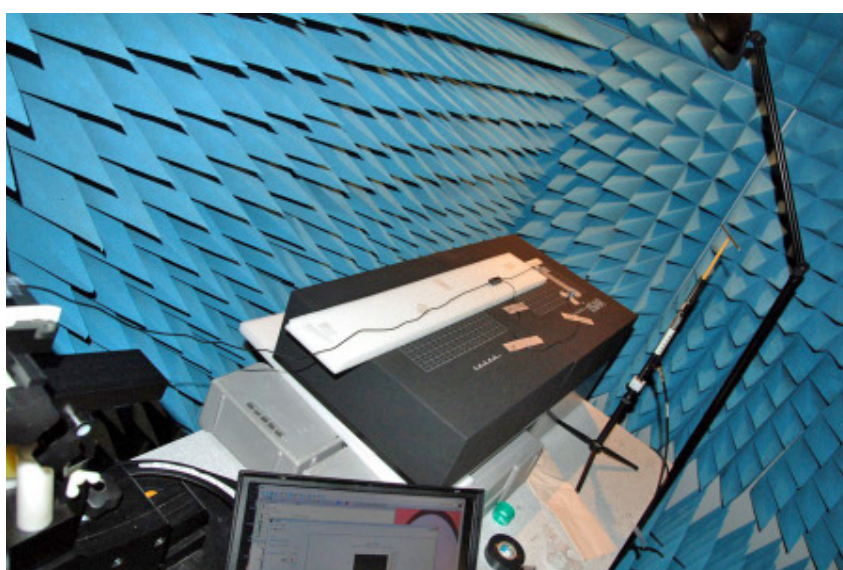
Die nach Abschnitt 3.6.1 ermittelte Maximalkonfiguration wurde ebenfalls am elliptischen Flachphantom mit dem DASYS5 Meßsystem vermessen. Dabei verläuft das Headsetkabel ab dem jeweiligen Berührungspunkt in einem Winkel von 12° vom Phantom weg. Im Gegensatz zum erweiterten iSAR-Phantom verläuft das Kabel hierbei auf Grund der kleineren



12.1: 0 mm Distanz



12.2: 5 mm Distanz



12.3: 15 mm Distanz

Abbildung 12: Messaufbau mit verschiedenen Distanzen des Headsets zum erweiterten Flachphantom des iSAR Messsystems.

Abmessungen des Messphantoms nur 45 cm entlang des Phantoms. Abbildung 13 zeigt den Messaufbau.



Abbildung 13: Messaufbau mit 12° Winkel zwischen Headsetkabel zum Flachphantom des DA-SY5 Messsystems. (Ansicht der Unterseite des elliptischen Flachphantoms mit nach hinten weglaufendem Headsetkabel.)

Es wurde folgender Messablauf angewandt:

- Die SAR am Ohrknopf bzw. am Kabel wird in einem Ebenenscan aufgenommen.
- Am Ort des Maximums wird ein dreidimensionaler Volumenscan zur Bestimmung der über 1 g und 10 g gemittelten SAR-Spitzenwerte vermessen.
- Die SAR entlang des Kabels in Richtung des Telefons wird in einem Ebenenscan aufgenommen.
- Bei Stereoheadsets wird die SAR zusätzlich in einem Ebenenscan entlang des zweiten Headsetkabels aufgenommen. Dabei verläuft das zweite Headsetkabel nach der Verzweigung vom ersten direkt auf dem Flachphantom.

3.6.4 Dosimetrische Erfassung des Mobiltelefons mit Headset am Rumpf mit iSAR

Um zu einer Aussage zur Belastung im menschlichen Rumpf bei der Verwendung von Headsets zu kommen, wurden die Telefone ebenfalls mit angeschlossenem Headset am iSAR Flachphantom vermessen. Dabei wurden folgende Konfigurationen mit dem Headset in kopplungsmaximierter Konfiguration angeschlossen:

- Vorderseite des Telefons parallel zum Flachphantom in 0 mm, 5 mm und 15 mm Distanz

- Rückseite des Telefons parallel zum Flachphantom in 0 mm, 5 mm und 15 mm Distanz

Abbildungen 14 und 15 zeigen die jeweiligen vermessenen Anordnungen. Da es insbesondere in der Konfiguration mit der Vorderseite des Telefons zum Flachphantom zu Maxima im telefonnahen Headsetkabel kommen kann, wurde das Telefon mit angeschlossenem Headset über die Sensorfläche des iSAR-Messsystems verschoben und so das Maximum der Absorption wie auch die notwendige Ausdehnung der zweidimensionalen Messfläche für nachfolgende Messungen mit dem DASY5 Meßsystem bestimmt. Bei den jeweiligen Messaufbauten wurde darauf geachtet, dass sich das Headsetkabel schon möglichst nahe des Telefons in den definierten Abständen von 0 mm, 5 mm und 15 mm zu liegen kommt. Dazu wurde das Headsetkabel in der Regel durch Klebestreifen am iSAR-Phantom bzw. am Schaumstoffdistanzhalter fixiert.

3.6.5 Dosimetrische Erfassung des Mobiltelefons mit Headset am Rumpf mit DASY5

Die Konfigurationen mit 0 mm Abstand zum Phantom aus Abschnitt 3.6.4 wurden auf das Flachphantom des DASY5 Messsystems übertragen und auch dort vermessen (Abbildung 16). Dies hat zum Vorteil, dass es möglich ist, eine größere Fläche zu vermessen. Es wurden dann folgende Messungen der Telefone mit Headset vorgenommen:

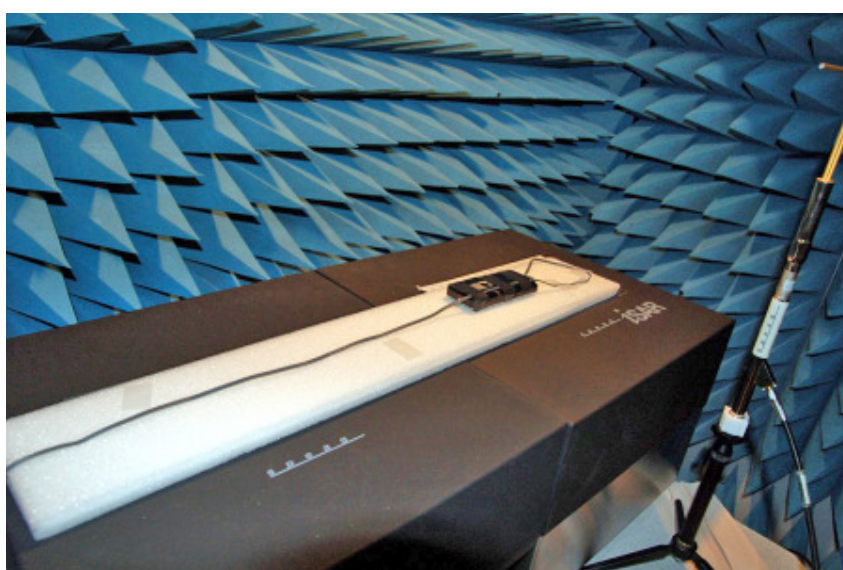
- Aufnahme eines SAR-Ebenenscans über die Fläche des Telefons. Ergab sich beim Experimentieren mit iSAR, dass weitere Maxima im Bereich des Kabels zu erwarten sind, wurde der Ebenenscan auf dieses erweitert. Daraufhin wurde am Ort des Maximums ein Volumenscan durchgeführt und die über 1 g und 10 g gemittelten SAR-Spitzenwerte ermittelt.
- Aufnahme eines SAR-Ebenenscan ausgehend vom Telefon entlang des Headsetkabels in Richtung zum Rand des elliptischen Flachphantoms. Dies dient zur Aufnahme der SAR-Verteilung entlang des Headsetkabels im Rumpf.



14.1: 0 mm Distanz



14.2: 5 mm Distanz



14.3: 15 mm Distanz

Abbildung 14: Messaufbau mit verschiedenen Distanzen der Vorderseite des Telefons mit angeschlossenem Headset am Flachphantoms des iSAR-Messsystems.



15.1: 0 mm Distanz

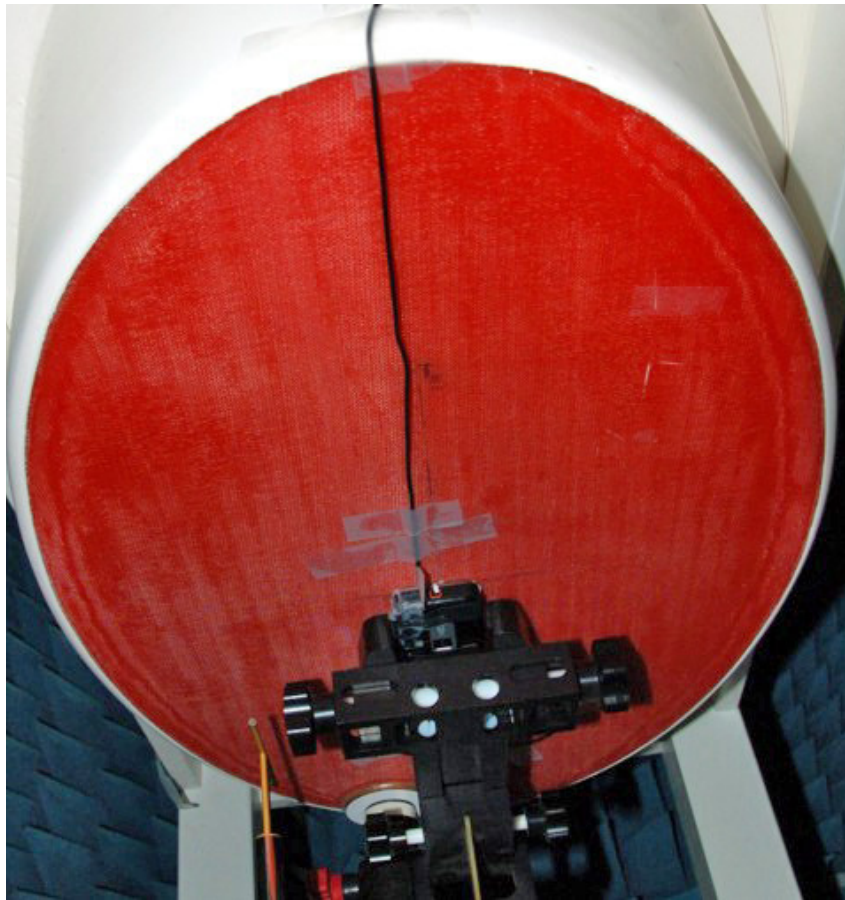


15.2: 5 mm Distanz

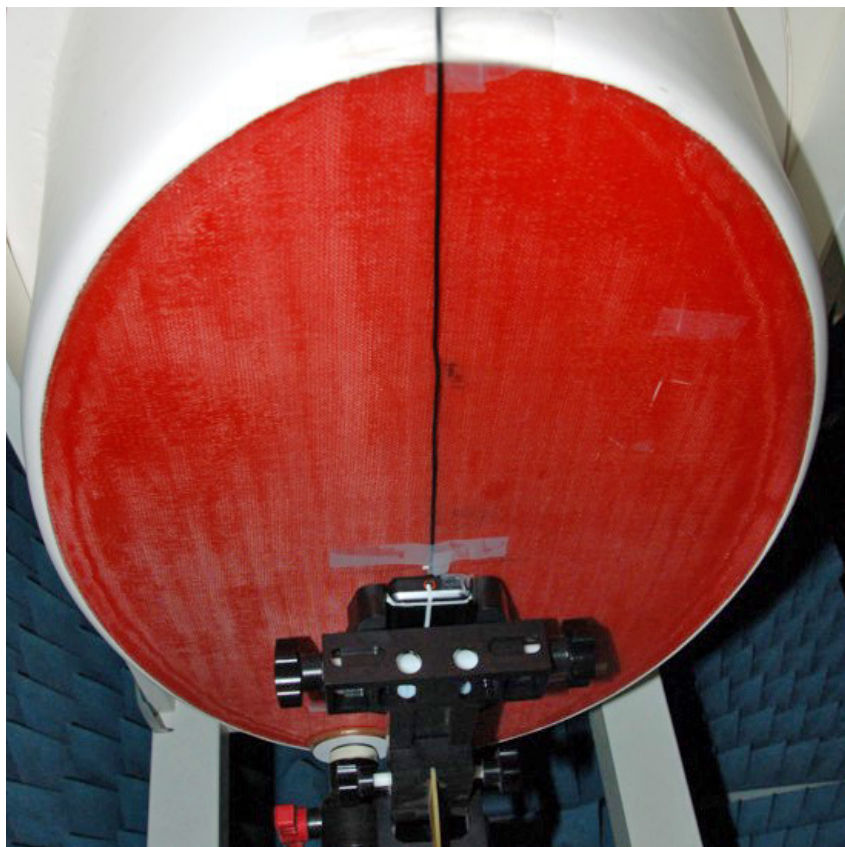


15.3: 15 mm Distanz

Abbildung 15: Messaufbau mit verschiedenen Distanzen der Rückseite des Telefons mit angeschlossenem Headset am Flachphantoms des iSAR Messsystems.



16.1: Vorderseite



16.2: Rückseite

Abbildung 16: Messaufbau mit verschiedenen Distanzen des Headsets zum elliptischen Flachphantoms des DASY5 Messsystems.

3.7 Testprozedur für kabellose Headsets

Bei der Messprozedur für kabellose Headsets wird zwischen supra- und intraauralen Headsets unterschieden. Für supraaurale Headsets wird eine Messprozedur verwendet, die der für Mobiltelefone nach dem Standard [IEC, 2007] entspricht (siehe auch Kapitel 3.3).

Für die Messung intraauraler Headsets kommt ein neuartiges Unterdruckphantom zum Einsatz (siehe Abbildung 17). Dieses Phantom wurde speziell für Geräte entwickelt, die während des Betriebs zum Teil vom Gewebe umschlossen sein können. Dazu gehören im Ohr getragene Geräte (z.B. Hörgeräte). Der Boden des mit gewebesimulierender Flüssigkeit gefüllten Phantoms besteht aus einer dünnen Kunststoffmembran, die sich durch Unterdruck um das zu testende Gerät legt. Damit wird es teilweise und gut kontrolliert mit gewebesimulierender Flüssigkeit umschlossen.

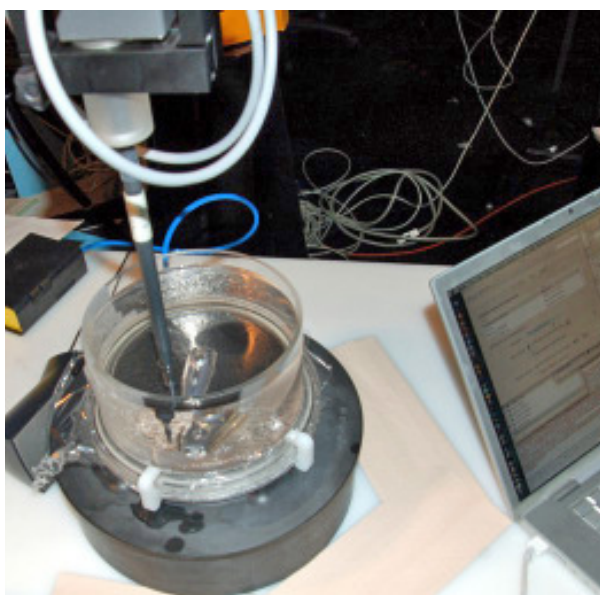


Abbildung 17: Unterdruckphantom mit intraauralem Bluetooth-Headset.

Da sich das Messvolumen innerhalb des Unterdruckphantoms in Abhängigkeit vom zu vermessenden Headset verändert, muss die Positionierung der Sonde basierend auf den CAD-Daten des Headsets durchgeführt werden. Es kommt dafür folgende Prozedur zum Einsatz:

- 1 Modellierung des Prüflings in SEMCAD X und Definition von mindestens drei Referenzpunkten auf dem Prüfling; Platzierung des Prüflings auf der Grundfläche des Unterdruckphantoms in der gewünschten Messposition
- 2 Exportieren des Modells von SEMCAD X und Importieren des Modells als benutzerdefiniertes Phantom in DASY5 NEO
- 3 "Teaching" des Phantoms in DASY5 NEO, d. h. Bekanntmachen der Raumkoordinaten der Prüflingsreferenzpunkte
- 4 Definition und Durchführen eines Volumenscans, welcher den Prüfling genügend umschließt
- 5 Extrapolation der Feldverteilung auf die Oberfläche des Prüflings
- 6 Bestimmung der über 1 g und 10 g gemittelten SAR-Spitzenwerte

3.8 Messunsicherheit

3.8.1 DASY5 mit Torso und SAM-Phantomen

DASY5 Unsicherheitsbudget nach IEC 62209-1 [IEC 62209/1, 2001]								
Error Description	Uncertainty value	Prob. Dist.	Div.	(c_i) 1g	(c_i) 10g	Std. Unc. (1g)	Std. Unc. (10g)	(v_i) v_{eff}
Measurement System								
Probe Calibration	±5.9 %	N	1	1	1	±5.9 %	±5.9 %	∞
Axial Isotropy	±4.7 %	R	$\sqrt{3}$	0.7	0.7	±1.9 %	±1.9 %	∞
Hemispherical Isotropy	±9.6 %	R	$\sqrt{3}$	0.7	0.7	±3.9 %	±3.9 %	∞
Boundary Effects	±1.0 %	R	$\sqrt{3}$	1	1	±0.6 %	±0.6 %	∞
Linearity	±4.7 %	R	$\sqrt{3}$	1	1	±2.7 %	±2.7 %	∞
System Detection Limits	±1.0 %	R	$\sqrt{3}$	1	1	±0.6 %	±0.6 %	∞
Readout Electronics	±0.3 %	N	1	1	1	±0.3 %	±0.3 %	∞
Response Time	±0.8 %	R	$\sqrt{3}$	1	1	±0.5 %	±0.5 %	∞
Integration Time	±2.6 %	R	$\sqrt{3}$	1	1	±1.5 %	±1.5 %	∞
RF Ambient Noise	±3.0 %	R	$\sqrt{3}$	1	1	±1.7 %	±1.7 %	∞
RF Ambient Reflections	±3.0 %	R	$\sqrt{3}$	1	1	±1.7 %	±1.7 %	∞
Probe Positioner	±0.4 %	R	$\sqrt{3}$	1	1	±0.2 %	±0.2 %	∞
Probe Positioning	±2.9 %	R	$\sqrt{3}$	1	1	±1.7 %	±1.7 %	∞
Max. SAR Eval.	±1.0 %	R	$\sqrt{3}$	1	1	±0.6 %	±0.6 %	∞
Test Sample Related								
Device Positioning	±2.9 %	N	1	1	1	±2.9 %	±2.9 %	145
Device Holder	±3.6 %	N	1	1	1	±3.6 %	±3.6 %	5
Power Drift	±5.0 %	R	$\sqrt{3}$	1	1	±2.9 %	±2.9 %	∞
Phantom and Setup								
Phantom Uncertainty	±4.0 %	R	$\sqrt{3}$	1	1	±2.3 %	±2.3 %	∞
Liquid Conductivity (target)	±5.0 %	R	$\sqrt{3}$	0.64	0.43	±1.8 %	±1.2 %	∞
Liquid Conductivity (meas.)	±2.5 %	N	1	0.64	0.43	±1.6 %	±1.1 %	∞
Liquid Permittivity (target)	±5.0 %	R	$\sqrt{3}$	0.6	0.49	±1.7 %	±1.4 %	∞
Liquid Permittivity (meas.)	±2.5 %	N	1	0.6	0.49	±1.5 %	±1.2 %	∞
Combined Std. Uncertainty						±10.9 %	±10.7 %	387
Expanded STD Uncertainty						±21.9 %	±21.4 %	

Tabelle 4: Unsicherheitsbudget für DASY5 nach IEC62209. Die Unsicherheitsanalyse ist für den Frequenzbereich von 300 MHz bis 3 GHz gültig.

3.8.2 DASY5 mit Unterdruckphantom

Unsicherheitsbudget basierend auf IEC 62209-2 [IEC, 2007]								
Error Description	Uncertainty Value	Prob. Dist.	Div.	(c_i) 1g	(c_i) 10g	Std. Unc. (1g)	Std. Unc. (10g)	(v_i) v_{eff}
Measurement System								
Probe Calibration	±5.9%	N	1	1	1	±5.9%	±5.9%	∞
Axial Isotropy	±4.7%	R	$\sqrt{3}$	0.7	0.7	±1.9%	±1.9%	∞
Spherical Isotropy	±9.6%	R	$\sqrt{3}$	0.7	0.7	±3.9%	±3.9%	∞
Boundary Effects	±15.0%	R	$\sqrt{3}$	1	1	±8.7%	±8.7%	∞
Linearity	±4.7%	R	$\sqrt{3}$	1	1	±2.7%	±2.7%	∞
Detection Limits	±1.0%	R	$\sqrt{3}$	1	1	±0.6%	±0.6%	∞
Readout Electronics	±0.3%	N	1	1	1	±0.3%	±0.3%	∞
Response Time	±0.8%	R	$\sqrt{3}$	1	1	±0.5%	±0.5%	∞
Integration Time	±2.6%	R	$\sqrt{3}$	1	1	±1.5%	±1.5%	∞
RF Ambient Conditions	±3.0%	R	$\sqrt{3}$	1	1	±1.7%	±1.7%	∞
Probe Positioner Mech. Restr.	±0.4%	R	$\sqrt{3}$	1	1	±0.2%	±0.2%	∞
Probe Positioning (CAD)	±10.5%	R	$\sqrt{3}$	1	1	±6.1%	±6.1%	∞
Post-Processing	±1.0%	R	$\sqrt{3}$	1	1	±0.6%	±0.6%	∞
Low SNR	±4.2%	R	$\sqrt{3}$	0.4	1	±1.0%	±2.4%	∞
Test Sample Related								
Test Sample Positioning	±10.5%	R	$\sqrt{3}$	1	1	±6.1%	±6.1%	∞
Test Sample CAD Model	±5.1%	R	$\sqrt{3}$	1	1	±2.9%	±2.9%	∞
Drift of Output Power	±5.0%	R	$\sqrt{3}$	1	1	±2.9%	±2.9%	∞
Phantom and Setup								
Phantom Uncertainty	±4.0%	R	$\sqrt{3}$	1	1	±2.3%	±2.3%	∞
Liquid Conductivity (target)	±5.0%	R	$\sqrt{3}$	0.64	0.43	±1.8%	±1.2%	∞
Liquid Conductivity (meas.)	±2.5%	N	1	0.64	0.43	±1.6%	±1.1%	∞
Liquid Permittivity (target)	±5.0%	R	$\sqrt{3}$	0.6	0.49	±1.7%	±1.4%	∞
Liquid Permittivity (meas.)	±2.5%	N	1	0.6	0.49	±1.5%	±1.2%	∞
Combined Std. Uncertainty						±15.9%	±15.8%	∞
Expanded Uncertainty						±31.7%	±31.7%	

Tabelle 5: Unsicherheitsbudget für DASY5 nach IEC62209-2 bei Verwendung des Unterdruckphantoms. Eingeschlossen sind die zusätzlichen Unsicherheiten auf Grund des niedrigen Verhältnisses des Signalpegels zum Rauschpegel und des Positionierens der Messsonde.

3.8.3 iSAR

Unsicherheitsbudget iSAR								
	Uncertainty Value	Prob. Dist.	Div.	(c_i) 1g	(c_i) 10g	Std. Unc. (1g)	Std. Unc. (10g)	(v_i) v_{eff}
Measurement System								
Probe Calibration	±8%	N	1	1	1	±8%	±8%	∞
Axial Isotropy	±15%	R	$\sqrt{3}$	0.7	0.7	±6.0%	±6.0%	∞
Neglecting Z-Component	±10.0%	R	$\sqrt{3}$	1	1	±5.8%	±5.8%	∞
Linearity	±2%	R	$\sqrt{3}$	1	1	±1.3%	±1.3%	∞
Modulation Linearity	±5%	R	$\sqrt{3}$	1	1	±2.7%	±2.7%	∞
SAR Extrapolation	±10.0%	R	$\sqrt{3}$	1	1	±5.8%	±5.8%	∞
Test Sample Related								
DUT Positioning	±15%	R	$\sqrt{3}$	1	1	±8.7%	±8.7%	∞
Power Drift	±5.0%	R	$\sqrt{3}$	1	1	±2.9%	±2.9%	∞
Phantom and Setup								
Phantom	±4.0%	R	$\sqrt{3}$	1	1	±2.3%	±2.3%	∞
Liquid Conductivity (target)	±1.0%	R	$\sqrt{3}$	0.64	0.43	±3.7%	±2.5%	∞
Liquid Permittivity (target)	±2.5%	N	1	0.64	0.43	±1.6%	±1.1%	∞
Flüssigkeit Permittivität (Ziel)	±10.0%	R	$\sqrt{3}$	0.6	0.49	±3.5%	±2.8%	∞
Liquid Permittivity (meas.)	±2.5%	N	1	0.6	0.49	±1.5%	±1.2%	∞
Combined Std. Uncertainty						±15.9%	±15.8%	∞
Expanded Uncertainty						±35.3%	±34.5%	

Tabelle 6: Unsicherheitsbudget für iSAR.

4 Prüflinge

Im folgenden Kapitel werden die in der experimentellen Studie verwendeten Prüflinge beschrieben. Eine Beschreibung der Prüflinge der numerischen Studie erfolgt im Kapitel 6.

4.1 Mobiltelefone

Als Mobiltelefonprüflinge für die experimentelle Erfassung der SAR wurden ein Nokia 6120c und ein Motorola V1050 ausgewählt. Beide Telefone unterstützen das GSM900- und GSM1800-Band sowie das UMTS1950-Band. Beide Mobiltelefone unterscheiden sich prinzipiell im Aufbau. Beim Nokia-Telefon handelt es sich um ein Gerät monolithischen Aufbaus mit integrierter Antenne. Das Motorola-Telefon ist aufklappbar und eines der wenigen verfügbaren UMTS-fähigen Telefone mit externer Stummelantenne. Somit erlauben die Telefone die Validierung der in Kapitel 3.6.1 vorgeschlagenen Maximierungsmethoden sowie die Bewertung möglicher Auswirkungen der Aufbauform bei der Verwendung mit Headsets. Beide Telefone verfügen über einen 2,5 mm Anschluss für kabelgebundene Headsets und erlauben somit den Test von $2 \times 3 = 6$ Testkombinationen mit den den in Abschnitt 4.2 beschriebenen kabelgebundenen Headsets.



18.1: Vorder- und Rückansicht des Nokia 6120c.

18.2: Vorder- und Rückansicht des Motorola V1050.

Abbildung 18: Vorder- und Rückansichten der Mobiltelefonprüflinge

4.2 Kabelgebundene Headsets

Abbildungen 19, 20, 21 zeigen die in der experimentellen Studie verwendeten Headsetprüflinge. Ihre mechanischen Spezifikationen sind in Tabelle 7 zusammengefasst. Die Headsets von Nokia und Motorola gehören zum Lieferumfang der Telefonprüflinge. Beide sind Stereoheadsets, unterscheiden sich jedoch stark in der Länge ihrer Kabel. Das Nokia HS-47 ist gemessen vom Anschlußstecker zum rechten Ohrknopf fast anderthalbmal so lang wie das Motorola HS120 Headsets. Beim Plantronics MX250 handelt es sich um ein Monoheadset mit Mikrofonausleger. Die Kabellänge des Plantronics-Headsets zum rechten Ohrknopf liegt in etwa im Durchschnitt der der beiden anderen Headsets.

Typ	Anschluss- typ	Kabellänge Stecker bis Verzweigung	Kabellänge Stecker bis rechter Ohrknopf	Kabellänge Stecker bis linker Ohrknopf	Kabellänge Stecker bis Mikrophon
Nokia HS-47	2,5 mm	128 cm	140 cm	200 cm	126 cm
Motorola HS120	2,5 mm	90 cm	106 cm	114 cm	92 cm
Plantronics MX250	2,5 mm	-	126 cm	-	132 cm

Tabelle 7: Spezifikationen bzgl. Aufbaus der kabelgebundenen Headsets



Abbildung 19: Plantronics MX250 Quelle: www.plantronics.com



Abbildung 20: Nokia HS-47 Quelle: www.nokia.com)



Abbildung 21: Motorola HS120 Quelle: www.motorola.com)

4.3 Kabellose Headsets

Abbildungen 22, 23, 24 zeigen die in der experimentellen Studie verwendeten kabellosen Headsets. Alle Headsets verwenden die Bluetooth-Technologie. Sie benutzen also das 2450 MHz-Band. Beim Logitech Mobile Pro Headset handelt es sich um ein supraaurales Headset mit Mikrofonausleger. Laut Handbuch hat dieses Headset eine HF-Ausgangsleistung von 2.5 mW und entspricht damit der Bluetooth-Leistungsklasse 2. Bei den beiden anderen Headsets handelt es sich um intraaurale Headsets, wobei das Logitech Mobile Express Headset einen kurzen Mikrofonausleger hat und das Samsung WEP500 eines der kleinsten heutzutage verfügbaren Headsets kompakter Aufbauform ist.



Abbildung 22: Logitech Mobile Pro Headset, Quelle: www.logitech.ch



Abbildung 23: Logitech Mobile Express Headset, Quelle: www.logitech.ch

5 Resultate der experimentellen SAR-Bestimmung

5.1 Telefone mit kabelgebundenen Headsets

In den folgenden Abschnitten werden Mobiltelefone mit und ohne angeschlossenes kabelgebundenes Headset dosimetrisch untersucht. Es kommen hierbei die in den Abschnitten 4.1 und 4.2 näher beschriebenen Prüflinge zum Einsatz. Alle beschriebenen Untersuchungen, mit Ausnahme der SAR-Messungen am SAM-Kopf, wurden in den Mittenfrequenzen des GSM900- (902.4 MHz), GSM1800- (1747,4 MHz) und UMTS1950-Bandes (1950 MHz) durchgeführt. Auf Grund der Kompatibilität der Headsetanschlüsse der beiden Telefonprüflinge sind sechs Kombinationen der Telefone und Headsets möglich. Hinzu kommen in den meisten



Abbildung 24: Samsung WEP500, Quelle: www.samsung.ch

getesteten Fällen noch die Konfiguration ohne Headset. Die sich ergebenden Testkonfigurationen sowie Kürzel zur späteren Identifikation dieser sind in Tabelle 8 gegeben.

	ohne Headset	Nokia HS-47	Motorola HS120	Plantronics MX250
Nokia 6120c	N	NN	NM	NB
Motorola V1050	M	MN	MM	MB

Tabelle 8: Kombinationen der Telefone und Headsets sowie verwendete Kürzel zur Identifikation der Kombination im Bericht.

5.1.1 SAR durch Telefone am SAM-Kopf

Zur Normalisierung der SAR bei Verwendung von Headsets wurden die Mobiltelefonprüflinge dosimetrisch ausgewertet. Es wurde hierbei eine über die Forderungen des IEC62209 Teil 1 Standards hinausgehende ausführliche Charakterisierung der SAR vorgenommen. Das heißt, die SAR wurde in den drei Kommunikationsbändern in drei Unterfrequenzen (untere und obere Bandgrenze sowie Bandmittenfrequenz) in jeweils anliegender und abgewinkelter Orientierung des Telefons bestimmt. Die Resultate sind in Tabellen 9 und 10 zusammengefasst. Für die weiteren dosimetrischen Auswertungen wird jedoch nur der SAR-Wert der jeweiligen Bandmittenfrequenzen als Normalisierungsreferenz herangezogen. Dieser Wert ist in den Tabellen durch Fettschrift hervorgehoben. Zu den Maximalwerten für den Betrieb im GSM-System gibt es anzumerken, dass das SAR entsprechend einer Sprachübertragung mit maximaler Ausgangsleistung und einem belegten Zeitschlitz ermittelt wurde.

Frequenz/MHz	Messphantom	Telefonorientierung	peak spatial average SAR /(W/kg)	
			1g	10g
890.2	SAM links	anliegend	0.65	0.465
902.4	SAM links	anliegend	0.643	0.466
915.8	SAM links	anliegend	0.565	0.409
890.2	SAM links	abgewinkelt	0.44	0.307
902.4	SAM links	abgewinkelt	0.438	0.31
915.8	SAM links	abgewinkelt	0.385	0.273
890.2	SAM rechts	anliegend	0.65	0.46
902.4	SAM rechts	anliegend	0.648	0.461
915.8	SAM rechts	anliegend	0.567	0.401
890.2	SAM rechts	abgewinkelt	0.467	0.327
902.4	SAM rechts	abgewinkelt	0.431	0.305
915.8	SAM rechts	abgewinkelt	0.321	0.224
1710.2	SAM links	anliegend	0.148	0.0812
1747.4	SAM links	anliegend	0.245	0.132
1784.8	SAM links	anliegend	0.256	0.145
1710.2	SAM links	abgewinkelt	0.104	0.11
1747.4	SAM links	abgewinkelt	0.192	0.106
1784.8	SAM links	abgewinkelt	0.224	0.123
1710.2	SAM rechts	anliegend	0.114	0.0721
1747.4	SAM rechts	anliegend	0.193	0.124
1784.8	SAM rechts	anliegend	0.172	0.101
1710.2	SAM rechts	abgewinkelt	0.00993	0.0578
1747.4	SAM rechts	abgewinkelt	0.158	0.091
1784.8	SAM rechts	abgewinkelt	0.179	0.103
1922.4	SAM links	anliegend	0.36	0.194
1950	SAM links	anliegend	0.318	0.166
1977.6	SAM links	anliegend	0.488	0.258
1922.4	SAM links	abgewinkelt	0.381	0.204
1950	SAM links	abgewinkelt	0.355	0.188
1977.6	SAM links	abgewinkelt	0.497	0.263
1922.4	SAM rechts	anliegend	0.287	0.165
1950	SAM rechts	anliegend	0.26	0.149
1977.6	SAM rechts	anliegend	0.351	0.202
1922.4	SAM rechts	abgewinkelt	0.352	0.193
1950	SAM rechts	abgewinkelt	0.309	0.171
1977.6	SAM rechts	abgewinkelt	0.452	0.251

Tabelle 9: SAR-Messresultate, welche unter Verwendung des IEC62209 Teil 1 Standards für das Nokia 6120c Telefon ermittelt wurden. (SAR-Maximalwerte der Bandmittenfrequenz in Fettschrift)

Frequenz/MHz	Messphantom	Telefonorientierung	peak spatial average SAR /(W/kg)	
			1g	10g
890.2	SAM links	anliegend	0.808	0.564
902.4	SAM links	anliegend	0.987	0.692
915.8	SAM links	anliegend	0.923	0.647
890.2	SAM links	abgewinkelt	0.346	0.258
902.4	SAM links	abgewinkelt	0.39	0.291
915.8	SAM links	abgewinkelt	0.376	0.282
890.2	SAM rechts	anliegend	0.894	0.627
902.4	SAM rechts	anliegend	0.962	0.676
915.8	SAM rechts	anliegend	0.929	0.652
890.2	SAM rechts	abgewinkelt	1.03	0.708
902.4	SAM rechts	abgewinkelt	1.12	0.775
915.8	SAM rechts	abgewinkelt	1.08	0.75
1710.2	SAM links	anliegend	0.234	0.149
1747.4	SAM links	anliegend	0.204	0.132
1784.8	SAM links	anliegend	0.194	0.124
1710.2	SAM links	abgewinkelt	0.0681	0.0432
1747.4	SAM links	abgewinkelt	0.061	0.0388
1784.8	SAM links	abgewinkelt	0.0597	0.0377
1710.2	SAM rechts	anliegend	0.203	0.117
1747.4	SAM rechts	anliegend	0.215	0.122
1784.8	SAM rechts	anliegend	0.232	0.134
1710.2	SAM rechts	abgewinkelt	0.0395	0.0263
1747.4	SAM rechts	abgewinkelt	0.0686	0.0437
1784.8	SAM rechts	abgewinkelt	0.0678	0.0428
1922.4	SAM links	anliegend	0.375	0.229
1950	SAM links	anliegend	0.506	0.308
1977.6	SAM links	anliegend	0.456	0.276
1922.4	SAM links	abgewinkelt	0.179	0.109
1950	SAM links	abgewinkelt	0.177	0.109
1977.6	SAM links	abgewinkelt	0.156	0.095
1922.4	SAM rechts	anliegend	0.435	0.254
1950	SAM rechts	anliegend	0.55	0.322
1977.6	SAM rechts	anliegend	0.49	0.288
1922.4	SAM rechts	abgewinkelt	0.134	0.0819
1950	SAM rechts	abgewinkelt	0.187	0.113
1977.6	SAM rechts	abgewinkelt	0.172	0.104

Tabelle 10: SAR-Messresultate, welche unter Verwendung des IEC62209 Teil 1 Standards für das Motorola V1050 Telefon ermittelt wurden. (SAR-Maximalwerte der Bandmittenfrequenz in Fettschrift)

5.1.2 SAR im Kopf bei Verwendung eines Headsets

Abbildungen 25, 26 und 27 zeigen die relativen über 10 g gemittelten SAR-Werte bei der Verwendung der Telefonprüflinge mit verschiedenen Headsetkombinationen.

Es ist aus Abbildung 25 ersichtlich, dass es in keinem der getesteten Fälle bei Verwendung der Headsets im GSM900-Band zu einer Erhöhung der SAR gegenüber der Benutzung des Telefons kommt. Weiterhin sind für die Testszenarien mit und ohne berührendes Headsetkabel kaum Unterschiede erkennbar. Die durchschnittliche Verringerung der SAR beträgt 7,6 dB ohne Berührung und 7,8 dB mit Berührung. Auch eine Erhöhung des Winkels hat durchschnittlich nur eine Erhöhung um 1 dB zur Auswirkung. Bei parallelem Verlauf des Kabel in einer Distanz bis zum ersten Berührungspunkt am Messphantom sind die durchschnittlichen Dämpfungen gegenüber der Benutzung des Telefons am Kopf 11.1 dB für 15 mm, 13.9 dB für 5 mm und 19.8 dB für 0 mm Distanz zum absorbierenden Phantom.

In den in Abbildung 26 dargestellten Resultaten für das GSM1800-Band sind gegenüber dem GSM900-Band deutliche Erhöhungen der SAR in den getesteten Grenzfallszenarien mit abgewinkelt vom Phantom davonlaufendem Kabel zu erkennen. Auch ist die durchschnittliche SAR im Testszenario mit berührendem Kabel um ca. 2 dB höher, als wenn das Kabel das Phantom nicht berührt. In vier von sechs Kombinationen ist die SAR mit berührendem Kabel höher. Nur das Motorola Headset verursacht ohne Berührung eine höhere SAR. Die durchschnittliche Erhöhung der SAR bei Vergrößerung des Winkels auf 22° beträgt ca. 1 dB und ist somit gleich der bei 900 MHz. Bei parallelem Verlauf des Kabels bis zum ersten Berührungspunkt am Messphantom sind die durchschnittlichen Dämpfungen gegenüber der Benutzung des Telefons am Kopf 3.1 dB für 15 mm, 7.0 dB für 5 mm und 16.1 dB für 0 mm Distanz zum absorbierenden Phantom.

Abbildung 27 stellt die Resultate für UMTS-Betrieb bei 1950 MHz dar. Die höchste SAR wird für alle Kombinationen in der Konfiguration mit am Messphantom im Kopfbereich anliegendem Kabel erreicht. Der Einfluss dessen ist jedoch nur für die Nokia und Plantronics Headset ausgeprägt und beträgt durchschnittlich ca. 4,5 dB. Dies lässt auf eine ähnlich Feldverteilung am Kopfende des Kabels wie im GSM1800-Band schließen. Es wird daher vermutet, dass die stärkere Abschwächung gegenüber der Benutzung des Telefons am Kopf im Vergleich zu GSM1800 (ca. 4.5 dB) auf eine durchschnittlich 3 dB höhere SAR bei UMTS am Kopf sowie eine etwas stärkere Dämpfung und eventuell eine etwas schlechtere Kopplung der Leistung vom Telefon auf das Kabel zurückzuführen ist. Bei parallelem Verlauf des Kabels in einer Distanz bis zum ersten Berührungspunkt am Messphantom sind die durchschnittlichen Dämpfungen gegenüber der Benutzung des Telefons am Kopf 8.5 dB für 15 mm, 12.3 dB für 5 mm und 18.7 dB für 0 mm Distanz zum absorbierenden Phantom.

Abbildungen 25-27 lassen eine gute Aussage bzgl. der Dämpfung bzw. Erhöhung der SAR im Kopf bei Verwendung eines Headsets zu. Es gilt jedoch zu beachten dass, die Darstellungen die Vergleichbarkeit hinsichtlich des Headsets allein aufgrund der Normalisierung auf die jeweilige SAR des Telefons leicht verfälschen. Denn die Belastung durch ein Headset ist primär nur von der Kopplungseffizienz des Telefon auf das Headsetkabel sowie von der Ausgangsleistung des Telefons abhängig. Aus diesem Grund sind in Abbildungen 28, 29 und 30 die absoluten SAR-Werte für die Headset dargestellt. Es ist ersichtlich, dass das Plantronics Headset in 23 (GSM900:7; GSM1800:11; UMTS:5) von 36 Testkonfiguration die höchste SAR liefert. Demgegenüber liefert das Nokia Headset in 19 (GSM900:9; GSM1800:6; UMTS:4) von 36 Fällen die niedrigste SAR. Das Motorola Headset liefert in 15 (GSM900:2; GSM1800:6; UMTS:7) Fällen die niedrigste SAR. Der deutliche Unterschied der Motorola und Nokia Headsets gegenüber dem Plantronics Headset lässt sich dadurch erklären, dass es sich bei den Motorola und Nokia Headsets um Stereo-Headsets handelt, sich somit die Energie auf die beiden Kabel aufteilt und ein Teil der Energie z. B. im Rumpfbereich absorbiert wird. Dieser Effekt ist in Abbildung 31 dargestellt. Es ist daraus ersichtlich, dass es bereits nach der Verzweigung zum zweiten Kopfhörer ein SAR-Maximum entsteht. Die im Mittel etwas höhere SAR des Motorola-Headsets gegenüber dem Nokia-Headset bedingt sich sehr wahrscheinlich durch die größere Länge des Kabels des Nokia-Headsets und damit durch geringfügig größere Verluste durch Abstrahlung entlang des Kabels.

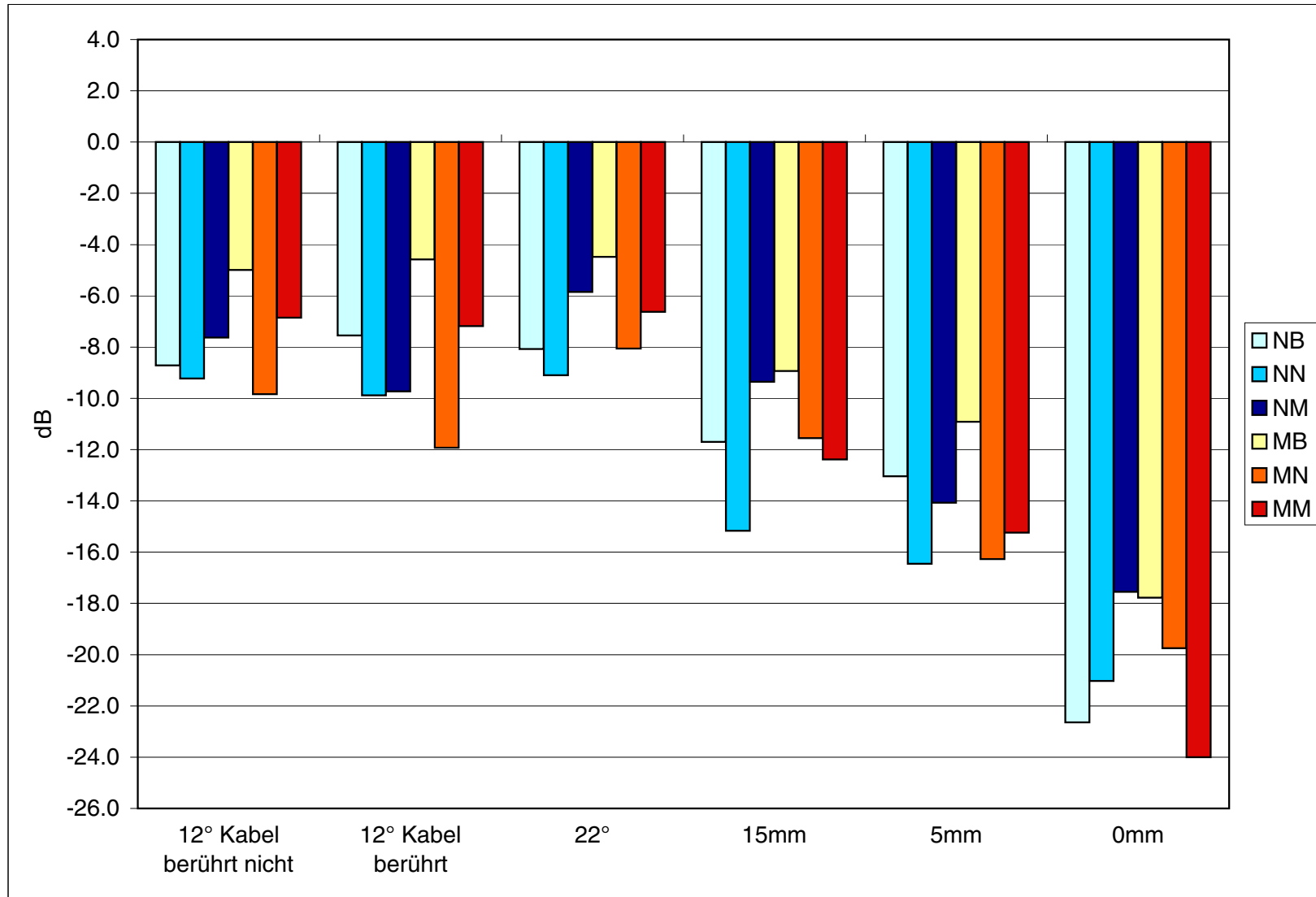


Abbildung 25: Die Abbildung zeigt die relative SAR im Kopf (10 g Mittelwert) im GSM900-Band bei der Verwendung von Headsets. Die relative SAR im Kopf wurde auf die SAR im Kopf bei der Verwendung der Telefonprüflinge ohne Headset normalisiert. Dargestellt ist die relative SAR im Kopf für die Konfiguration: 1) Kabel um 12° zum Phantom abgewinkelt weglaufend, 2) Kabel an einem Punkt bis zu 10 cm vom Ohrknopf entfernt das Phantom berührend und dann 12° zum Phantom abgewinkelt weglaufend. Außerdem sind die weiteren Konfigurationen für die Maximalkonfiguration von 1 oder 2 (berührend oder nicht berührend) dargestellt: 3) Kabel 2 2° zum Phantom abgewinkelt weglaufend, 4) in 15 mm Distanz parallel zum Phantom verlaufend, 5) in 5 mm Distanz parallel zum Phantom verlaufend sowie 6) in 0 mm Distanz parallel zum Phantom verlaufend

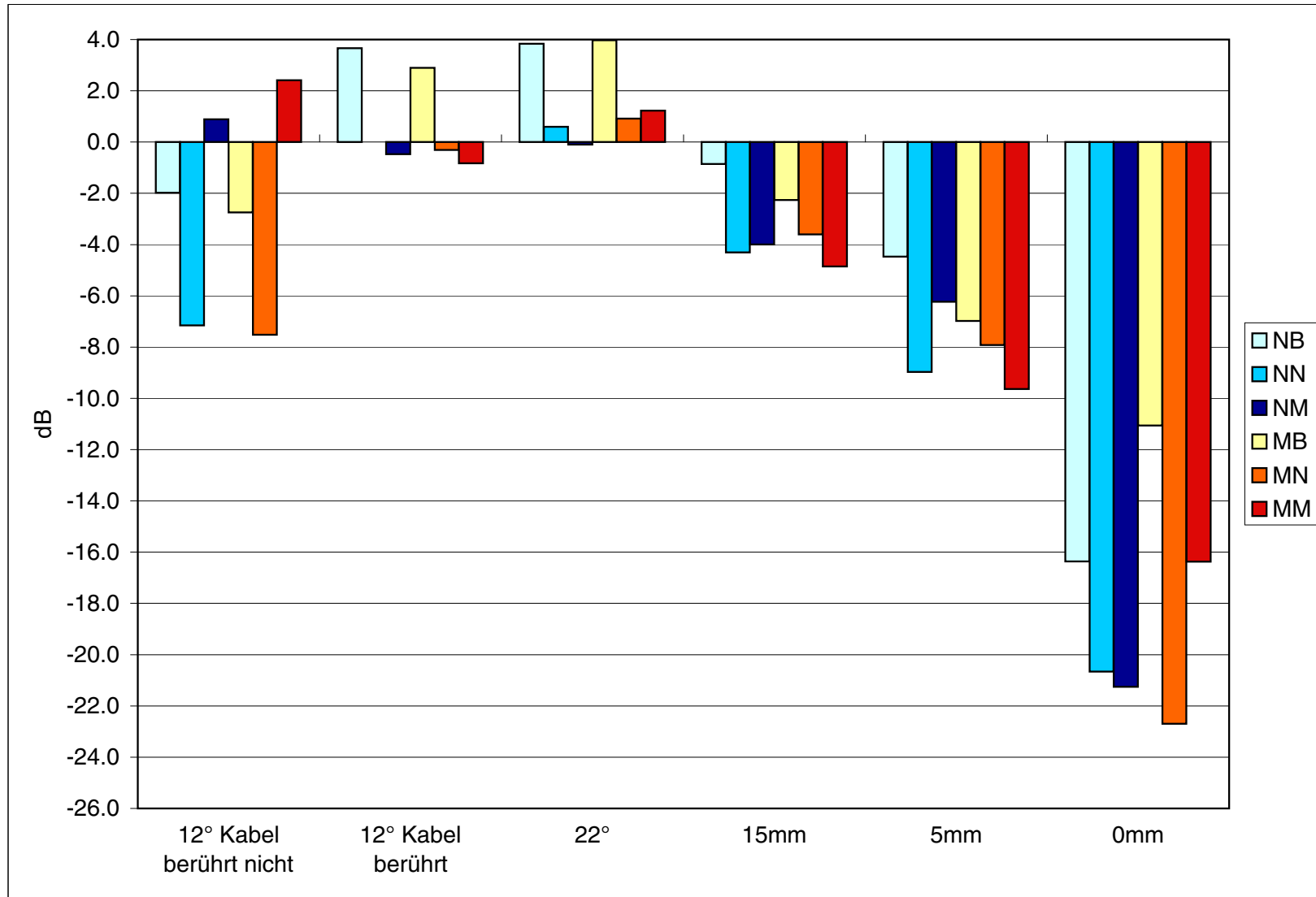


Abbildung 26: Die Abbildung zeigt die relative SAR im Kopf (10 g Mittelwert) im GSM1800-Band bei der Verwendung von Headsets. Die relative SAR im Kopf wurde auf die SAR im Kopf bei der Verwendung der Telefonprüflinge ohne Headset normalisiert. Dargestellt ist die relative SAR im Kopf für die Konfiguration: 1) Kabel um 12° zum Phantom abgewinkelt weglaufend, 2) Kabel an einem Punkt bis zu 10 cm vom Ohrknopf entfernt das Phantom berührend und dann 12° zum Phantom abgewinkelt weglaufend. Außerdem sind die weiteren Konfigurationen für die Maximalkonfiguration von 1 oder 2 (berührend oder nicht berührend) dargestellt: 3) Kabel um 22° zum Phantom abgewinkelt weglaufend, 4) in 15 mm Distanz parallel zum Phantom verlaufend, 5) in 5 mm Distanz parallel zum Phantom verlaufend, sowie 6) in 0 mm Distanz parallel zum Phantom verlaufend

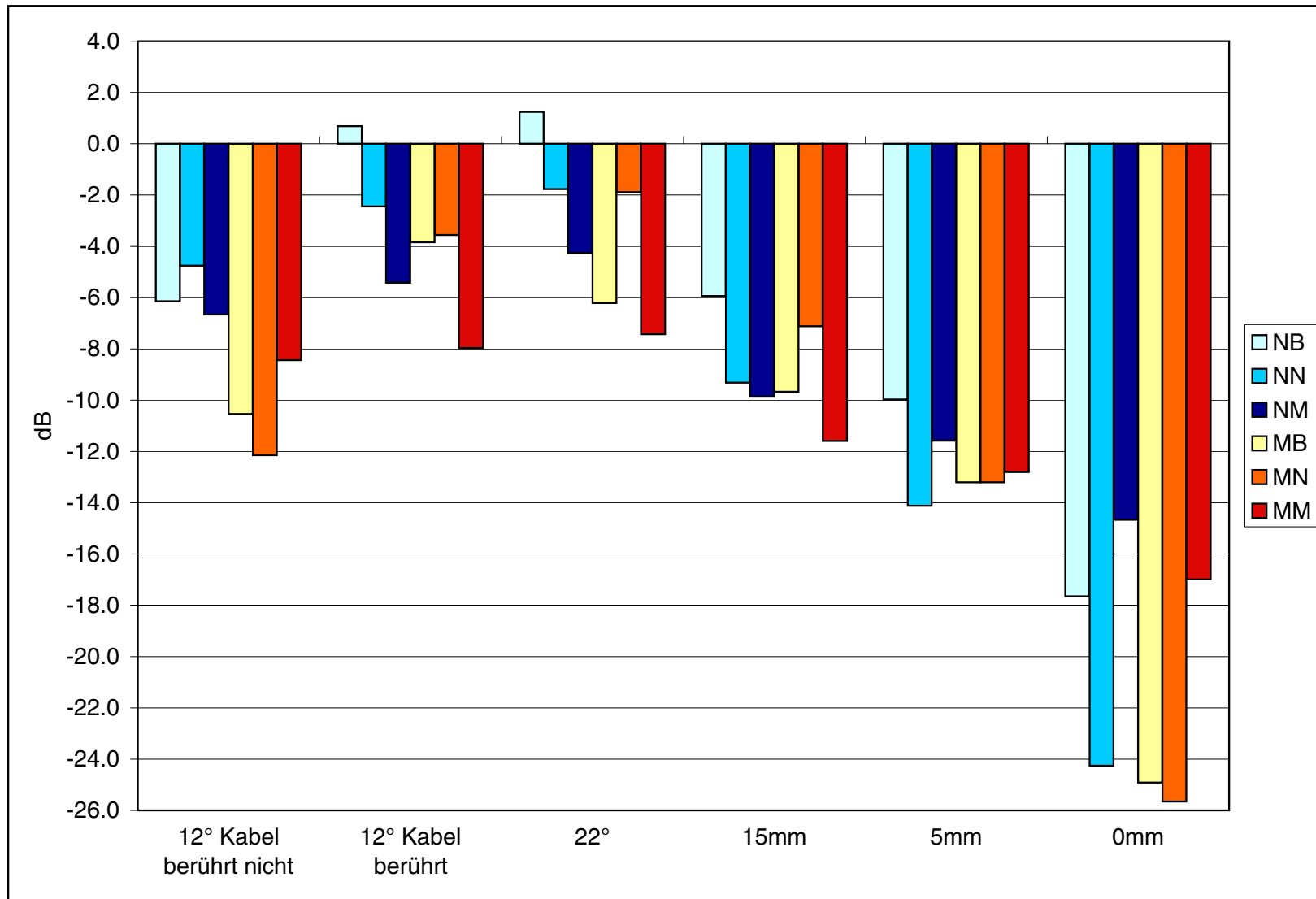


Abbildung 27: Die Abbildung zeigt die relative SAR im Kopf (10g Mittelwert) im UMTS1950-Band bei der Verwendung von Headsets. Die relative SAR im Kopf wurde auf die SAR im Kopf bei der Verwendung der Telefonprüflinge ohne Headset normalisiert. Dargestellt ist die relative SAR im Kopf für die Konfiguration: 1) Kabel um 12° zum Phantom abgewinkelt weglaufend, 2) Kabel an einem Punkt bis zu 10 cm vom Ohrknopf entfernt das Phantom berührend und dann 12° zum Phantom abgewinkelt weglaufend. Außerdem sind die weiteren Konfigurationen für die Maximalkonfiguration von 1 oder 2 (berührend oder nicht berührend) dargestellt: 3) Kabel um 22° zum Phantom abgewinkelt weglaufend, 4) in 15 mm Distanz parallel zum Phantom verlaufend, 5) in 5 mm Distanz parallel zum Phantom verlaufend, sowie 6) in 0 mm Distanz parallel zum Phantom verlaufend

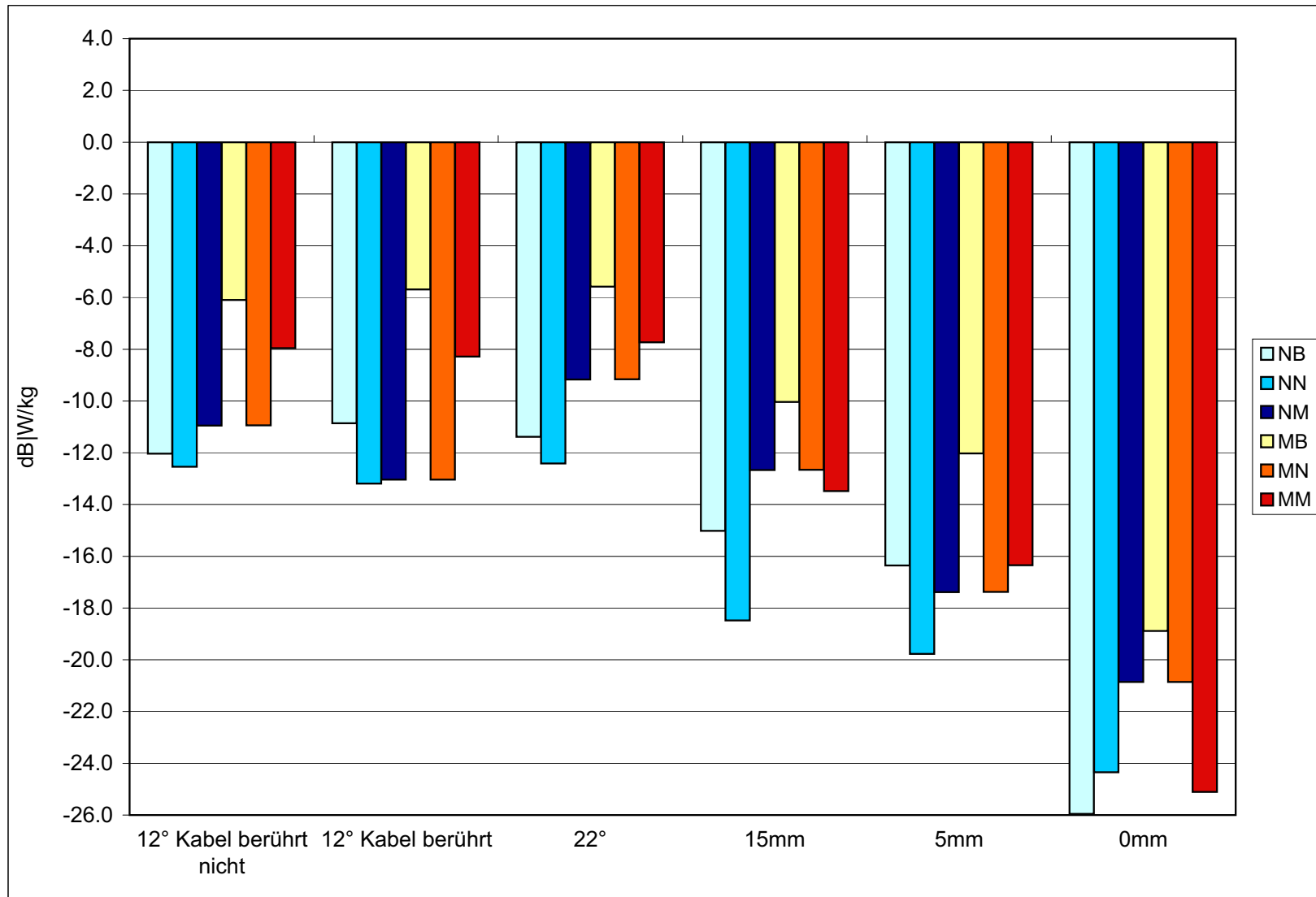


Abbildung 28: Die Abbildung zeigt die absolute SAR im Kopf (10 g Mittelwert) im GSM900-Band bei der Verwendung von Headsets. Dargestellt ist die absolute SAR im Kopf für die Konfiguration: 1) Kabel um 12° zum Phantom abgewinkelt weglaufend, 2) Kabel an einem Punkt bis zu 10 cm vom Ohrknopf entfernt das Phantom berührend und dann um 12° zum Phantom abgewinkelt weglaufend. Außerdem sind die weiteren Konfigurationen für die Maximalkonfiguration von 1 oder 2 (berührend oder nicht berührend) dargestellt: 3) Kabel um 22° zum Phantom abgewinkelt weglaufend, 4) in 15 mm Distanz parallel zum Phantom verlaufend, 5) in 5 mm Distanz parallel zum Phantom verlaufend, sowie 6) in 0 mm Distanz parallel zum Phantom verlaufend

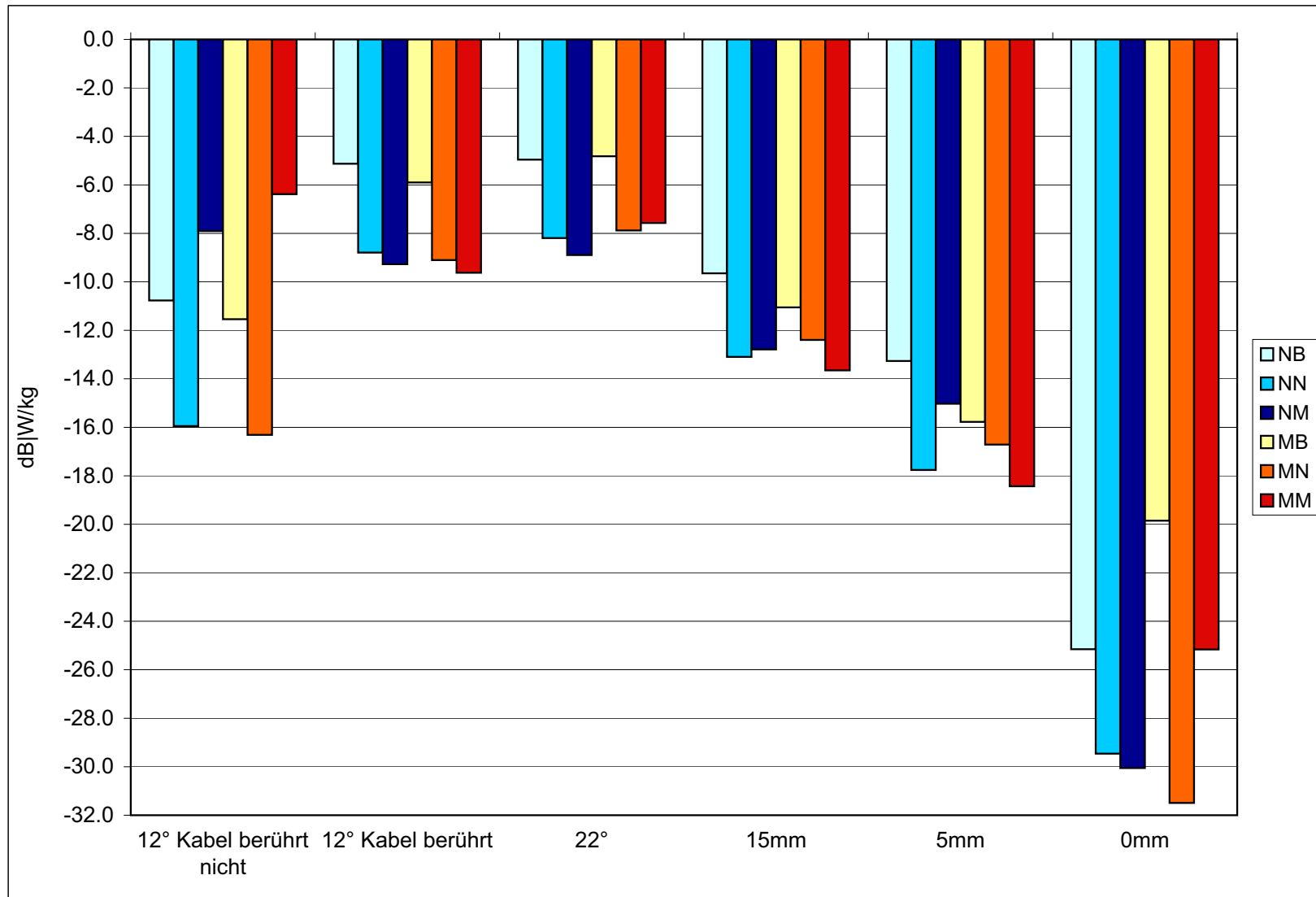


Abbildung 29: Die Abbildung zeigt die absolute SAR im Kopf (10 g Mittelwert) im GSM1800-Band bei der Verwendung von Headsets. Dargestellt ist die absolute SAR im Kopf für die Konfiguration: 1) Kabel um 12° zum Phantom abgewinkelt weglaufend, 2) Kabel an einem Punkt bis zu 10 cm vom Ohrknopf entfernt das Phantom berührend und dann 12° zum Phantom abgewinkelt weglaufend. Außerdem sind die weiteren Konfigurationen für die Maximalkonfiguration von 1 oder 2 (berührend oder nicht berührend) dargestellt: 3) Kabel um 22° zum Phantom abgewinkelt weglaufend, 4) in 15 mm Distanz parallel zum Phantom verlaufend, 5) in 5 mm Distanz parallel zum Phantom verlaufend, sowie 6) in 0 mm Distanz parallel zum Phantom verlaufend

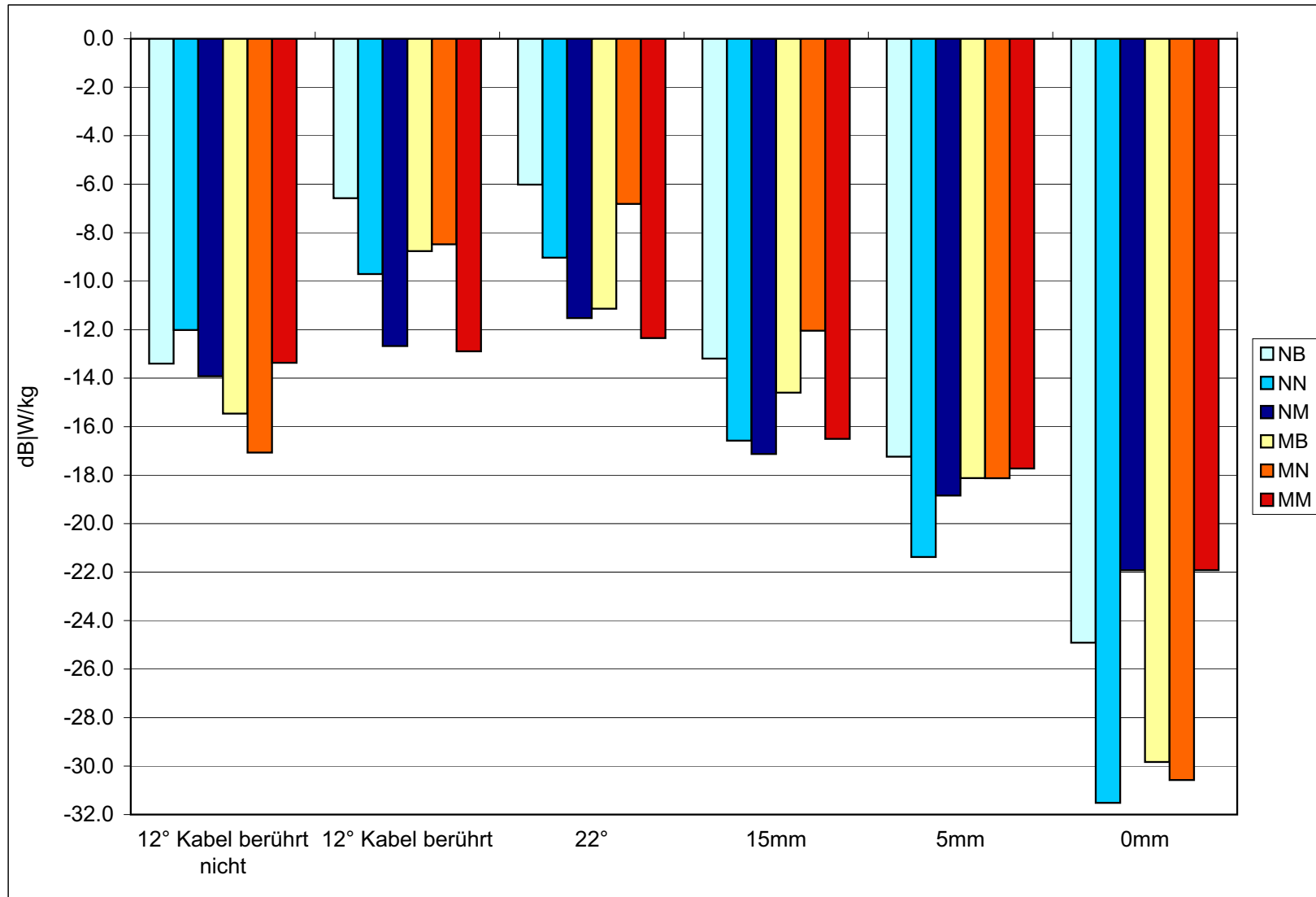


Abbildung 30: Die Abbildung zeigt die absolute SAR im Kopf (10g Mittelwert) im UMTS1950-Band bei der Verwendung von Headsets. Dargestellt ist die absolute SAR im Kopf für die Konfiguration: 1) Kabel um 12° zum Phantom abgewinkelt weglaufend, 2) Kabel an einem Punkt bis zu 10 cm vom Ohrknopf entfernt das Phantom berührend und dann um 12° zum Phantom abgewinkelt weglaufend. Außerdem sind die weiteren Konfigurationen für die Maximalkonfiguration von 1 oder 2 (berührend oder nicht berührend) dargestellt: 3) Kabel um 22° zum Phantom abgewinkelt weglaufend, 4) in 15 mm Distanz parallel zum Phantom verlaufend, 5) in 5 mm Distanz parallel zum Phantom verlaufend, sowie 6) in 0 mm Distanz parallel zum Phantom verlaufend

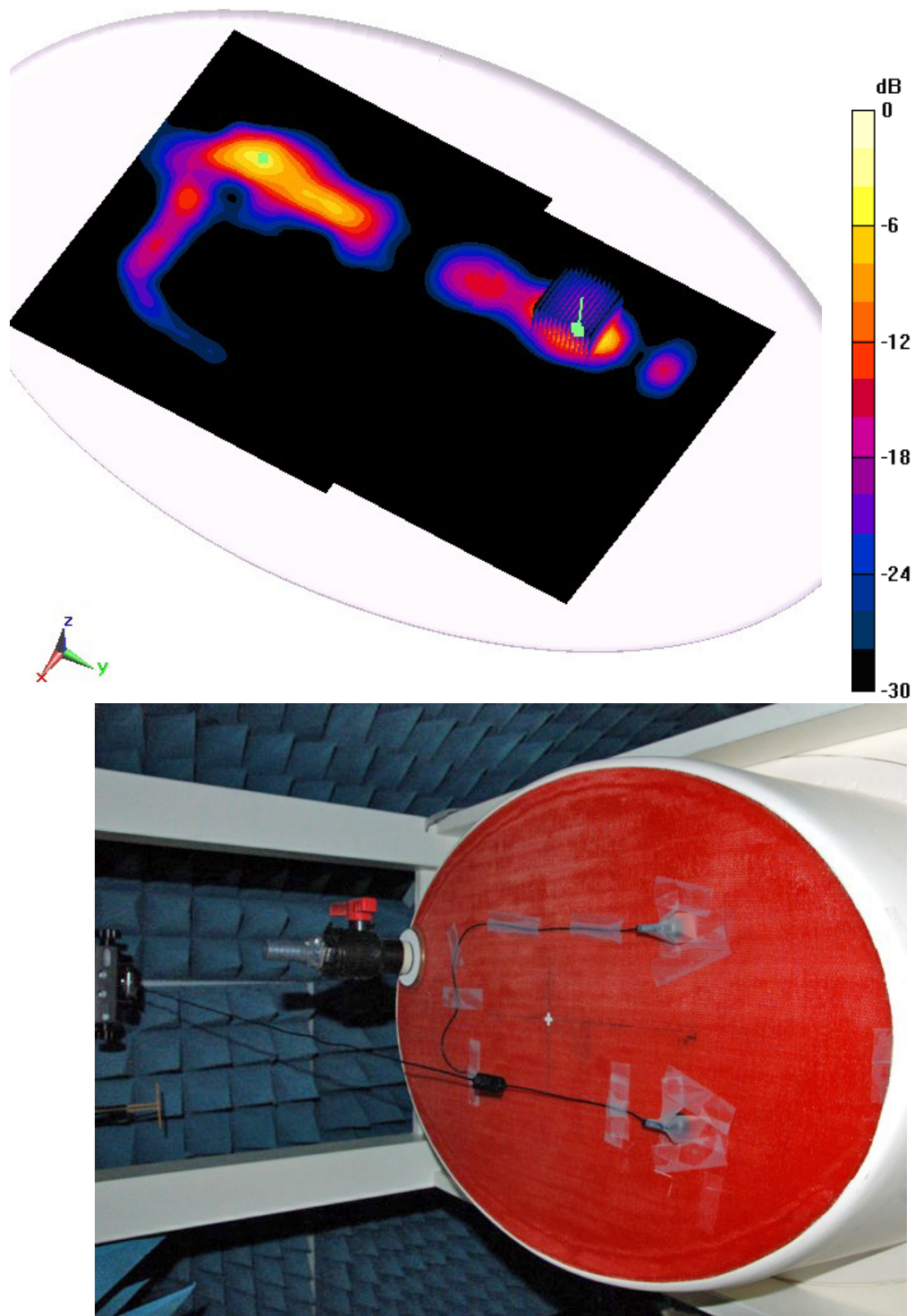


Abbildung 31: Messaufbau des Nokia HS-47 Stereo-Headsets sowie SAR-Verteilung entlang eines Stereoheadsets in um 12° abgewinkelter Orientierung. Es ist ersichtlich, dass beim Berührungspunkt des zweiten Ohrknopfkabels ein weiteres Maximum auftritt.

5.1.3 SAR im Rumpf

Die SAR der Telefonprüflinge wurde am Flachphantom mit und ohne angeschlossenes Headset bei den Mittenfrequenzen der jeweiligen Bänder ermittelt. Abbildungen 32, 33 und 34 stellen die über 10 g gemittelten SAR-Spitzenwerte für die jeweiligen Testkonfigurationen dar. In den Abbildungen stellen die dunkelroten und dunkelblauen Farbtöne die am Flachphantom gemessene SAR ohne angeschlossenes Headset dar. Diese Werte sollen wiederum zur Normalisierung dienen, da sie während der Zulassungsprüfung einfach und ohne Rücksicht auf ein angeschlossenes Headset ermittelt werden können. Wie auf Grund eines für den Betrieb am Kopf optimierten Abstrahlungsverhaltens zu erwarten ist, weisen die Telefone, wenn sie dem Phantom mit der Rückseite zugewandt sind, eine deutlich höhere SAR auf, als wenn sie dem Phantom mit der Vorderseite zugewandt vermessen werden. Interessant bzgl. des alleinigen Betriebs der Telefone am Flachphantom ist noch der Anstieg der SAR beim Nokia-Telefon bei GSM900-Betrieb (Vorderseite), wenn der Abstand zwischen dem Gerät und dem Phantom von 0 mm auf 5 mm vergrößert wird. Dieser Effekt ist bekannt und lässt sich in der Regel durch eine Veränderung der Fußpunktimpedanz bei der Distanzveränderung und deren Rückwirkung auf die Leistungsendstufe erklären. Beachtenswert ist auch der hohe SAR-Wert der Rückseite des Nokia 6120c im UMTS-Band bei 0 mm Abstand zum Phantom. Es ist daher daran zu erinnern, dass laut der letzten Arbeitsversion von IEC62209 Teil 2 zukünftig Zulassungstests in einer vom Hersteller im Handbuch spezifizierten Distanz bzw. mit einer Standarddistanz von 15 mm durchgeführt werden sollen.

Beim Betrieb der Telefone mit der Rückseite zum Phantom wurde in allen Kombinationen und Distanzen mit angeschlossener Headset eine geringere SAR gemessen als ohne Headset. Die Verringerung lässt sich einerseits durch einen leicht vergrößerten Abstand zum Phantom beim Betrieb mit Headset erklären (Headsetkabel befindet sich zwischen Telefon und Phantom), da sich das Headset dann in freifeldkopplungsmaximierter Position zwischen Phantom und Telefon befindet. Andererseits verteilt sich in der Regel bei angeschlossener Headset die zur Verfügung stehende Energie auf eine größere Fläche als ohne Headset (siehe zum Vergleich Abbildungen 35.1 und 35.2).

Werden die Telefone mit der Vorderseite zum Phantom gerichtet vermessen kann es zu Erhöhungen beim Betrieb mit Headset gegenüber dem Betrieb ohne Headset kommen. Dies tritt nur beim Nokia-Telefon auf, da die SAR mit der Vorderseite zum Flachphantom eher niedrig ist. Zur Erhöhung kommt es dann dadurch, dass in freifeldkopplungsmaximierter Headsetkonfiguration Energie auf das Kabel gekoppelt wird und dann im Phantom absorbiert wird (Abbildungen 36.1 und 36.2). Trotzdem bleibt festzuhalten, dass die Erhöhungen durch das Headset beim Betrieb mit der Vorderseite zum Phantom in jedem Fall niedriger waren als die SAR-Werte, die mit der Rückseite des jeweiligen Telefons und Distanz ohne Headset ermittelt wurden.

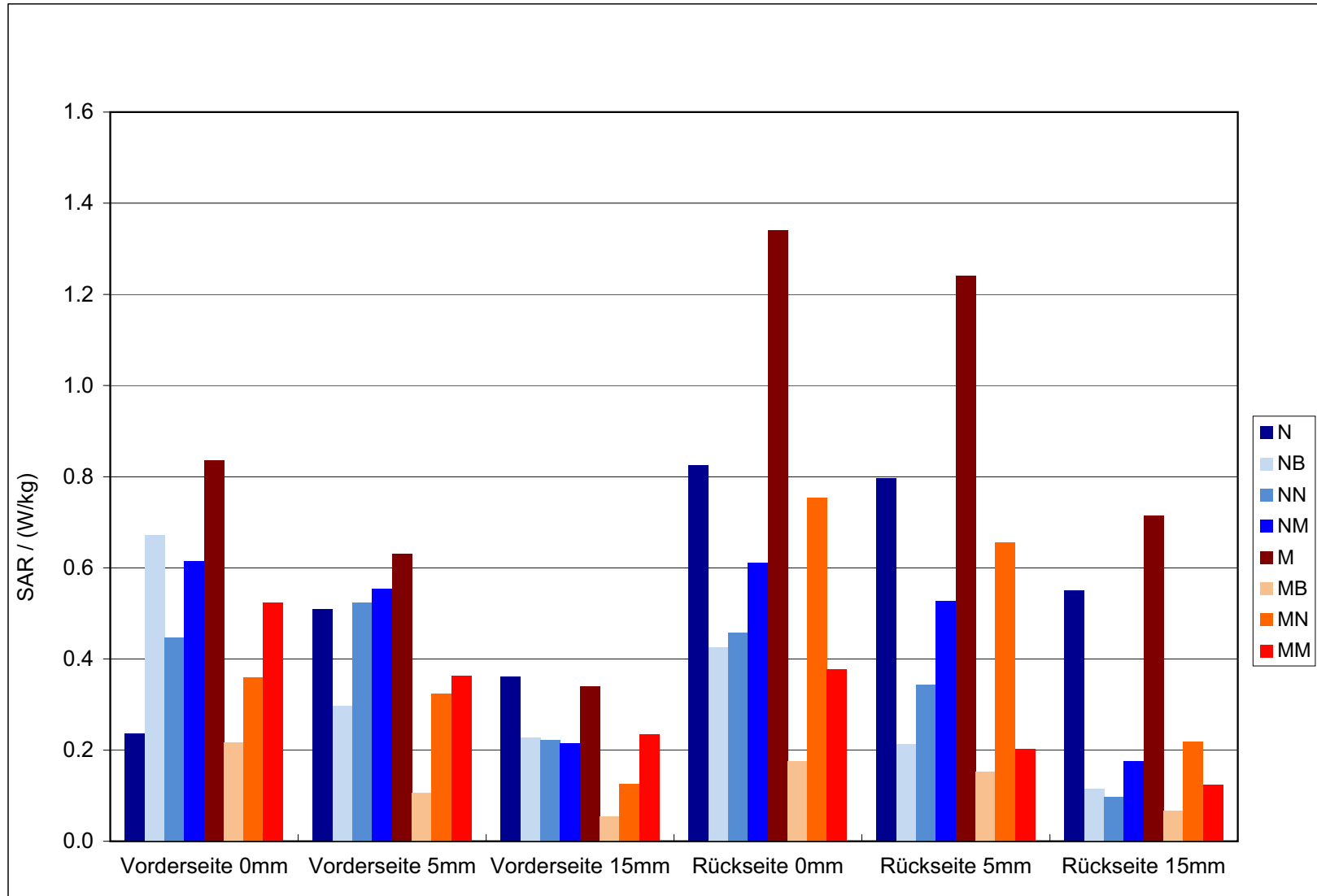


Abbildung 32: Die Abbildung zeigt den über 10 g gemittelten SAR-Spitzenwert im Rumpf für am Körper getragene Telefone im GSM900-Band (902.4 MHz) mit und ohne angeschlossenes kabelgebundenes Headset. Blautöne stellen Messwerte des Nokia 6120c dar (dunkelblau ohne angeschlossenes Headset). Rottöne stellen Messwerte des Motorola V1050 dar (dunkelrot ohne angeschlossenes Headset). Es sind jeweils Resultate für die Vorder- und Rückseite der Telefone in 0 mm, 5 mm und 15 mm Distanz zum Phantom gegeben.

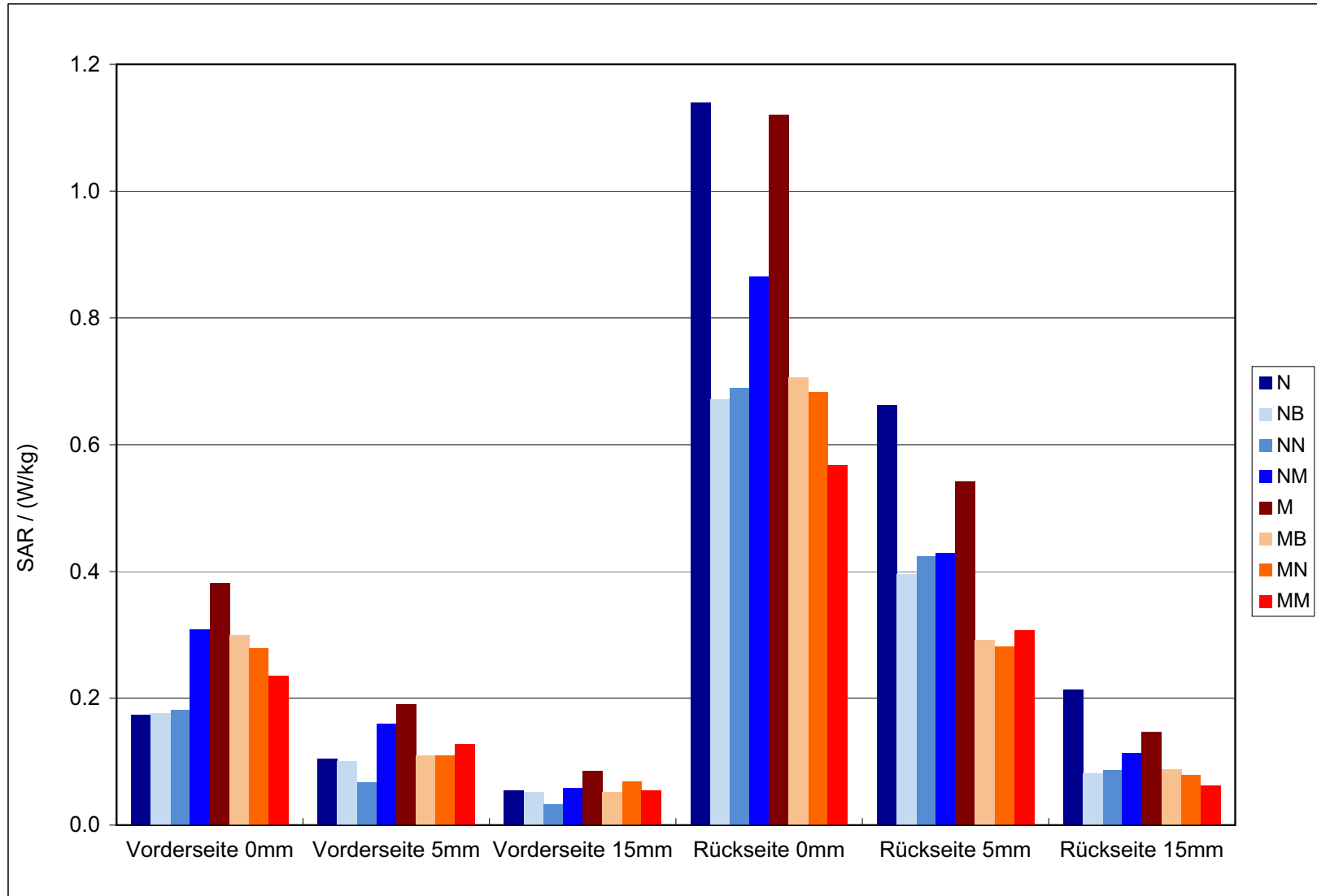


Abbildung 33: Die Abbildung zeigt den über 10 g gemittelten SAR-Spitzenwert im Rumpf für am Körper getragene Telefone im GSM1800-Band (1747.4 MHz) mit und ohne angeschlossenes kabelgebundenes Headset. Blautöne stellen Messwerte des Nokia 6120c dar (dunkelblau ohne angeschlossenen Headset). Rottöne stellen Messwerte des Motorola V1050 da (dunkelrot ohne angeschlossenes Headset). Es sind jeweils Resultate für die Vorder- und Rückseite der Telefone in 0 mm, 5 mm und 15 mm Distanz zum Phantom gegeben.

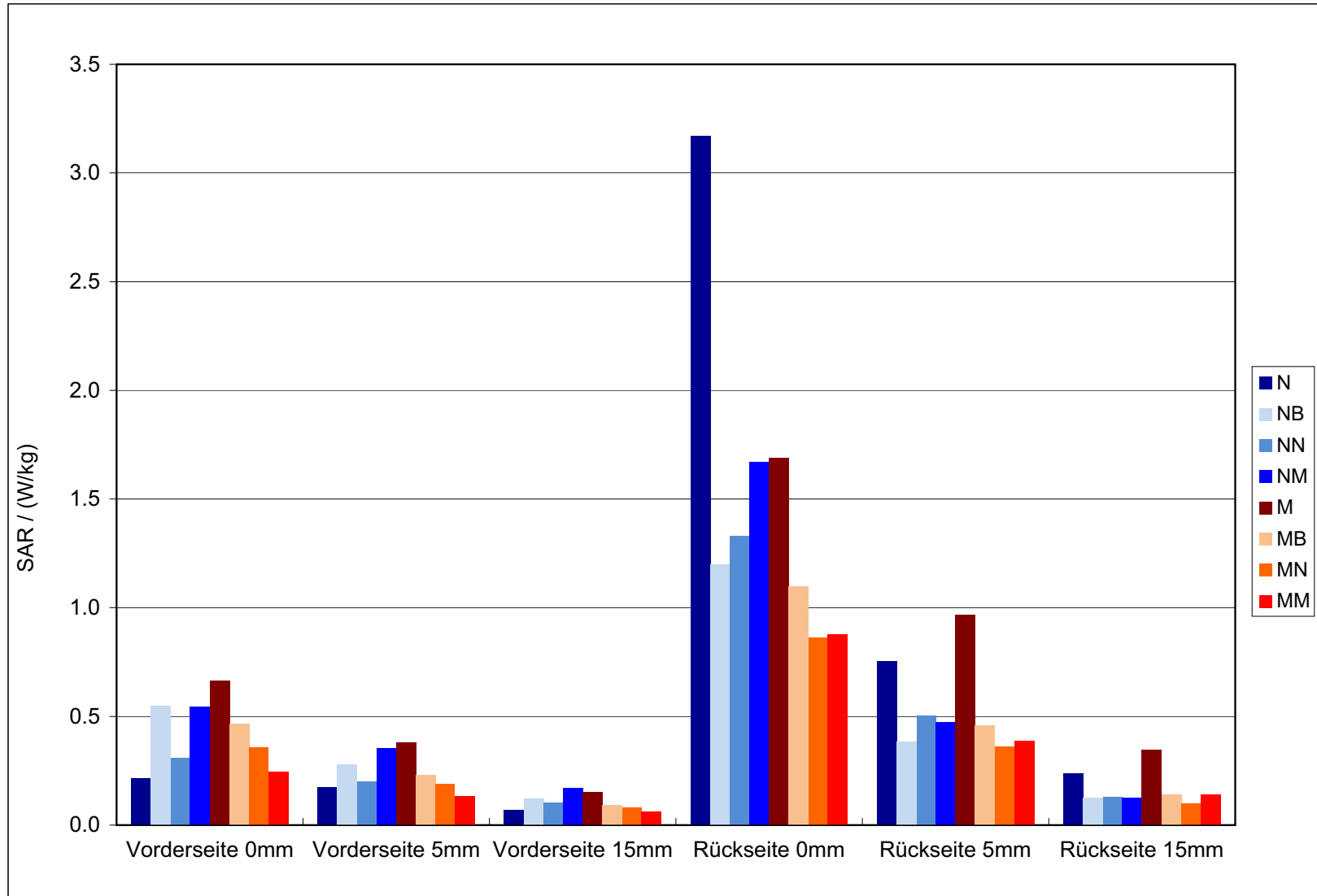
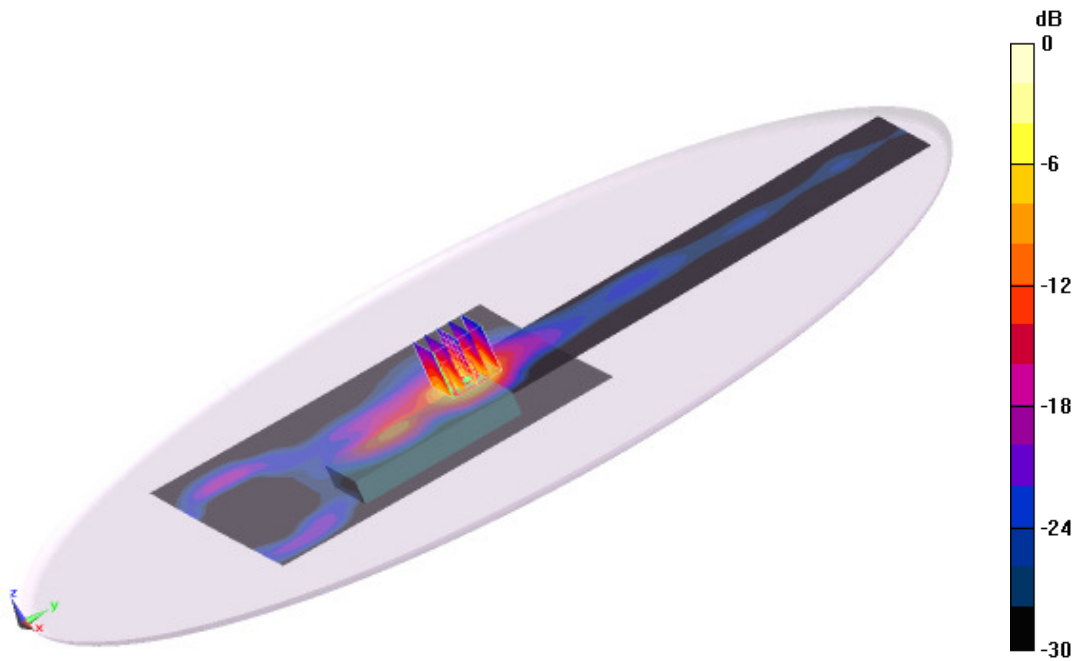
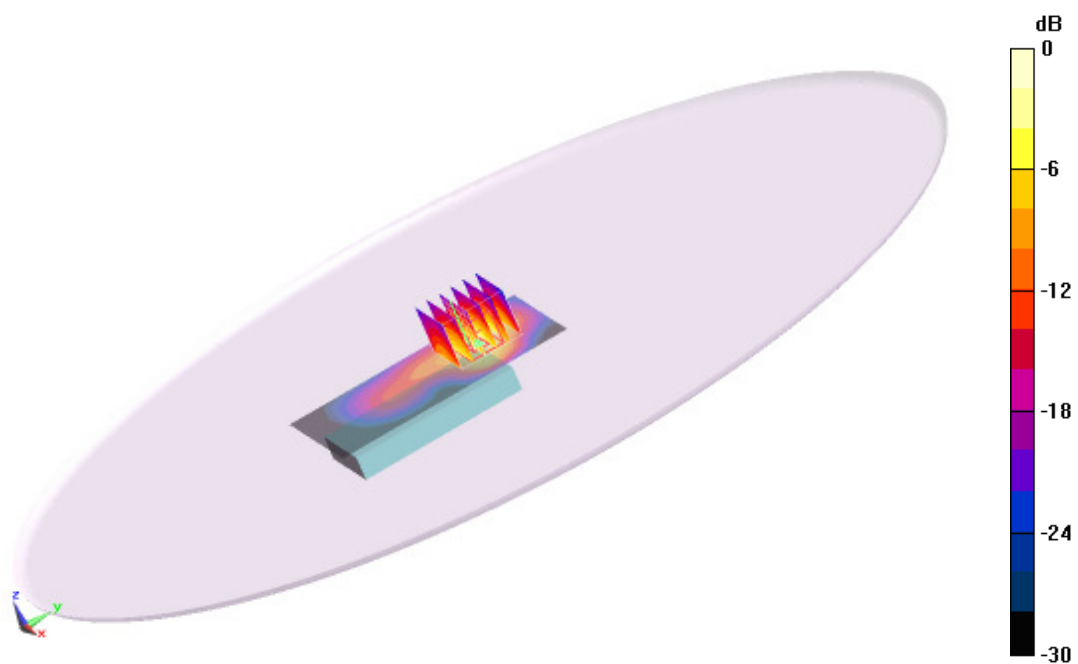


Abbildung 34: Die Abbildung zeigt den über 10 g gemittelte SAR-Spitzenwert im Rumpf für am Körper getragene Telefone im UMTS1950-Band (1950 MHz) mit und ohne angeschlossenes kabelgebundenes Headset. Blautöne stellen Messwerte des Nokia 6120c dar (dunkelblau ohne angeschlossenes Headset). Rottöne stellen Messwerte des Motorola V1050 dar (dunkelrot ohne angeschlossenen Headset). Es sind jeweils Resultate für die Vorder- und Rückseite der Telefone in 0 mm, 5 mm und 15 mm Distanz zum Phantom gegeben.

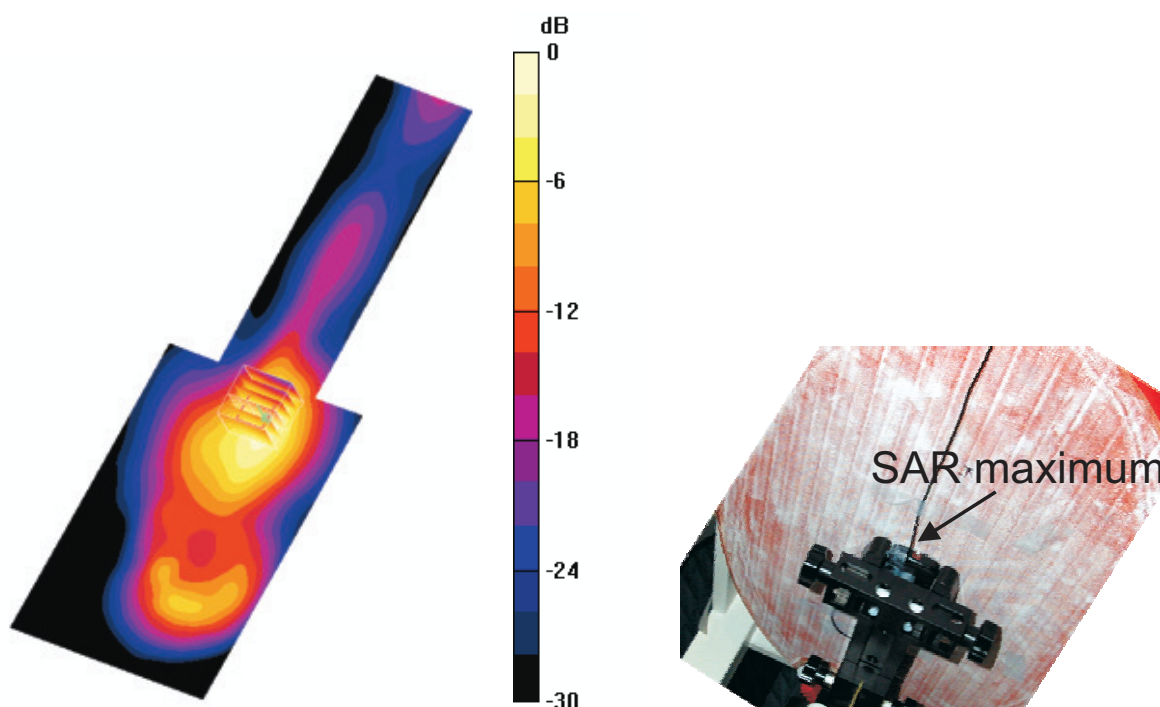


35.1: mit angeschlossenem Nokia Headset ($SAR_{peak}=3.2$ W/kg; 0 dB entsprechen 10.0 W/kg)



35.2: ohne Headset; Ausschnitt entspricht dem in Abbildung 35.1 markierten Bereich ($SAR_{peak}=7.79$ W/kg; 0 dB entsprechen 10.0 W/kg)

Abbildung 35: SAR-Verteilung des Nokia 6120 mit und ohne Headset in 0 mm Distanz zum Flachphantom im UMTS-Band.



36.1: mit angeschlossenem Nokia Headset ($SAR_{peak}=3.2\text{ W/kg}$)

36.2: Photographie des Testaufbaus und Ort des auftretenden SAR-maximums.)

Abbildung 36: SAR-Verteilung des Nokia 6120 mit in 0 mm Distanz zum Flachphantom im GSM900-Band.

5.2 Kabellose Headsets

Tabelle 11 fasst die Meßergebnisse der über 1 g und 10 g gemittelten SAR-Spitzenwerte der kabellosen Headsets zusammen. Es ist ersichtlich, dass die gemittelten SAR Werte unterhalb der spezifizierten Empfindlichkeit des DASY5-Messsystems liegen, weshalb nur der Wert $<0,005$ W/kg angegeben wurde. Diese niedrigen Resultate werden auch beim betrachten der Feldplots in Darstellungen 37 und 38 deutlich. Grundsätzlich ist nur beim Logitech Mobile Pro Headset ein Messpunkt etwas oberhalb der Rauschgrenze ($0,002$ mW/g) zu erkennen.

	SAR / (mW/g)	
	1 g	10 g
Samsung AWEP500	$<0,005$	$<0,005$
Logitech Mobile Pro	$<0,005$	$<0,005$
Logitech Express	$<0,005$	$<0,005$

Tabelle 11: SAR Werte der kabellosen Headsets

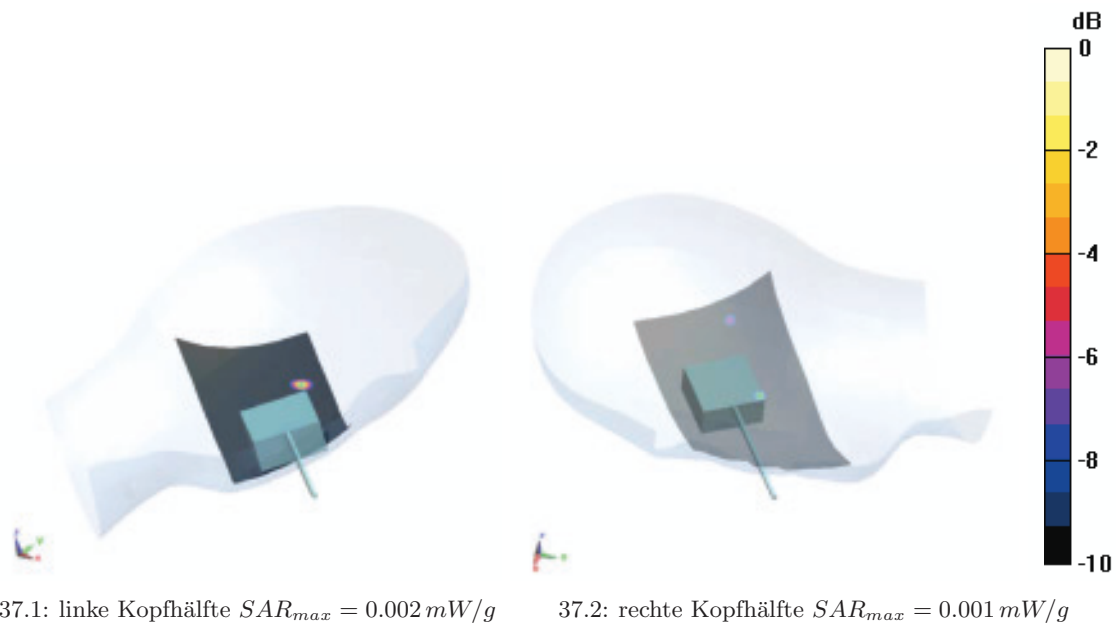
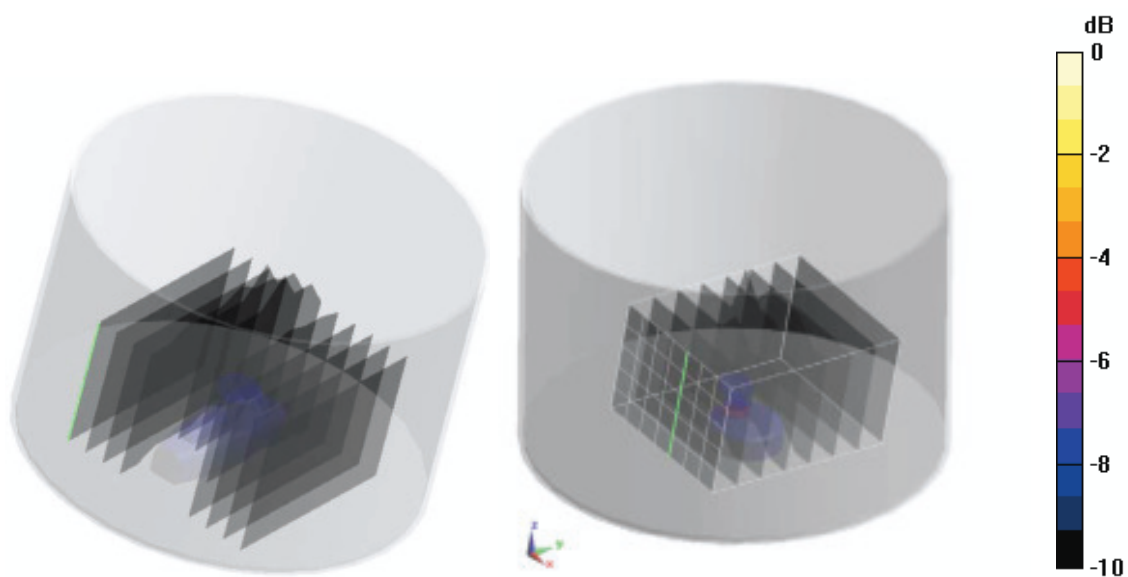


Abbildung 37: SAR-Verteilung des Logitech Mobile Pro Headsets am SAM-Phantom



38.1: Logitech Mobile Express Headset $SAR_{max} = 0.005 \text{ mW/g}$
 38.2: Samsung WEP500 Headset $SAR_{max} = 0.005 \text{ mW/g}$

Abbildung 38: SAR-Verteilung der intraauralen Headset gemessen im Unterdruckphantom (alle Messwerte unterhalb der Empfindlichkeitsgrenze des Messsystems).

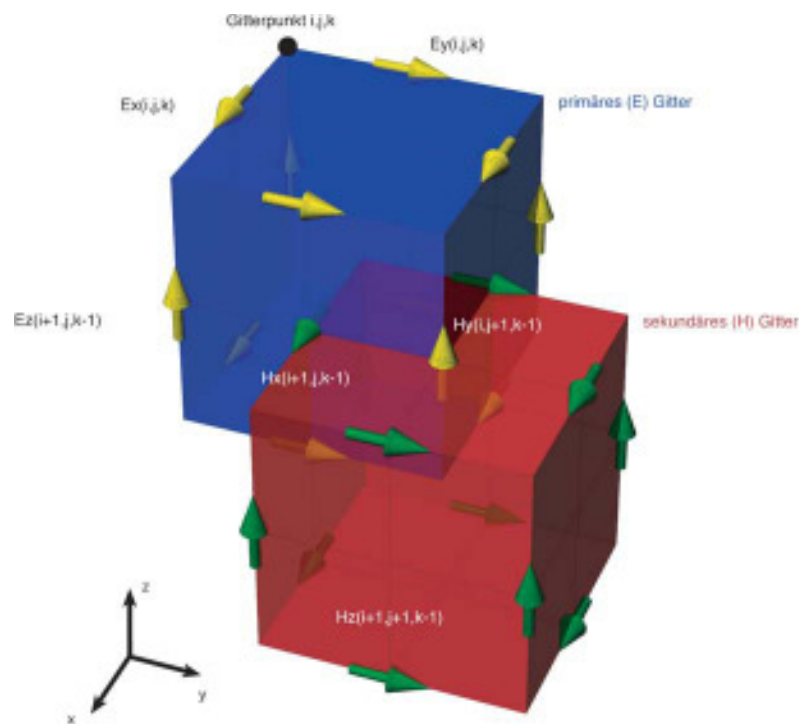


Abbildung 39: FDTD-Gitter mit den Vektorkomponenten der E- und H-Felder einer Zelle

6 Numerische Bestimmung der SAR

6.1 Numerische Methode

Zur numerischen Bestimmung der durch die Telefone in den experimentellen und anatomischen Modellen hervorgerufenen SAR wird die Methode der finiten Differenzen im Zeitbereich (Finite-Difference Time-Domain, FDTD) [Taflove and Hagness, 2000] verwendet. Die Methode berechnet E- und H-Feldvektoren direkt an jedem Ort des Rechenraumes. Die Vektorkomponenten der E- und H-Felder werden in einem rechtwinkligen Gitter angeordnet (Abbildung 39). Dadurch wird es möglich, die Rotationsoperatoren der ersten beiden Maxwell'schen Gleichungen durch eine finite Differenzenform zweiter Ordnung anzunähern. E- und H-Felder lassen sich dann in aufeinanderfolgenden Rechenschritten aus ihren jeweils zeitlich vorausgehenden Werten berechnen. Auf diese Weise können sich Felder und Wellen im Rechengitter ausbreiten. Für eine Auflösung des Rechenraumes (Gitterschrittweite von etwa $\lambda/10$) ist die Rechengenauigkeit des Algorithmus' für die meisten dosimetrischen Probleme hinreichend. Bei den Anwendungen dieser Studie sind jedoch die Maße der anatomischen Details der Kopfmodelle sowie Geometrie des Telefons maßgeblich, so dass Schrittweiten von weniger als einem Millimeter verwendet werden.

Die FDTD-Methode eignet sich sehr gut zur Simulation anatomischer Modelle, da komplexe Gewebeverteilungen mit geringem Aufwand im Rechengitter abgebildet werden können. Den diskretisierten Maxwellgleichungen des Algorithmus' lassen sich die Materialeigenschaften der jeweiligen Gitterkante zuordnen, auf denen die E- und H-Felder berechnet werden. Für sämtliche Berechnungen wird die integrierte Simulationsplattform Sencad X (Schmid & Partner Engineering AG, Zürich) verwendet. Diese erlaubt die detailgetreue Modellierung des Mobiltelefons in Verwendung mit anatomischen Modellen (Abschnitt 6.2) sowie die Berechnung der Peak Spatial Average SAR nach [IEEE, 2002].

6.2 Anatomische Ganzkörpermodelle

Für die Berechnung der SAR im menschlichen Körper werden ein anatomisches Modell eines männlichen Erwachsenen („Duke“) und eines elfjährigen Mädchens („Billie“) verwendet (Abbildung 40). Maße und Gewicht finden sich in Tabelle 12. Die Modelle wurden aus hochauflösenden Magnetresonanzaufnahmen entwickelt. Organe und Gewebe auf diesen Aufnahmen wurden mit Hilfe eines speziell entwickelten Segmentierungsprogrammes identifiziert und als dreidimensionale CAD-Objekte rekonstruiert. Diese CAD-Objekte lassen sich im Rechenraum unabhängig vom Gitter positionieren. Feine anatomische Details und dünne Gewebeschichten werden bei entsprechender Gitterauflösung korrekt wiedergegeben. Insgesamt unterscheiden die Modelle über 80 Gewebetypen. Weitere Angaben zur Entwicklung der Modelle finden sich in [Christ et al., 2007a, Christ et al., 2007b].

Name	Alter	Geschlecht	Größe [m]	Gewicht [kg]	BMI [kg/m ²]
Billie	11	weiblich	1,48	34	15,5
Duke	34	männlich	1,74	70	23,1

Tabelle 12: Daten der anatomischen Modelle

6.3 Experimentelle Validierung der Numerischen Modelle

Für die modernen UMTS-tauglichen Telefone aus der experimentellen Studie konnten die „Intellectual Property Rights“ (IPR) seitens der Hersteller nicht freigegeben werden. Deshalb kommt in der numerischen Studie ein drittes Telefon sowie ein dazugehöriges Headset zum Einsatz. Die numerischen Modelle dieser wurden dann auch experimentell validiert.

6.3.1 Validierung des Telefonmodells

Abbildung 41 zeigt das numerische Modell des Telefons Motorola SLVRL7, das aus einem CAD-Datensatz entwickelt wurde, den der Hersteller zur Verfügung stellte. Zur Validierung der Feldverteilung des Modells und zur Ermittlung der zur Normierung der Simulationsergebnisse notwendigen Sendeleistung wurde das Telefon an dem in [IEC, 2007] definierten Flachphantom (elliptische Grundfläche mit Radii von 600 mm und 400 mm und 2 mm Bodenstärke) gemessen und simuliert (Abbildung 42). Die dielektrischen Parameter der gewebesimulierenden Flüssigkeit sind in Tabelle 13 angegeben. Um den Einfluss der Verstimmung der Antenne durch Änderung der Belastung durch das Phantom zu berücksichtigen, wurden drei verschiedene Abstände (0 mm, 5 mm und 15 mm) zum Boden des Phantoms gewählt. Das Telefon wurde bei 900 MHz, 1750 MHz und 1910 MHz betrieben, wobei sowohl die Vorderseite als auch die Rückseite dem Flachphantom zugewandt wurden.² Simulationen am anatomischen Modell werden dann jedoch mit der UMTS Mittenfrequenz UMTS-Band 1 (1950 MHz) durchgeführt und leistungsmäßig auf die Messungen im GSM1900-Band normiert. Da das Telefon im GSM1900 Band eine nominale gemittelte Ausgangsleistung von 21 dBm besitzt, entspricht die Simulationsleistung der gemittelten Ausgangsleistung eines UMTS-Telefons der Leistungsklasse 4.

Zur Ermittlung der Sendeleistung des numerischen Modells wurde aus der gemessenen und simulierten Peak Spatial Average SAR (10 g, alle Positionen) für jede untersuchte Frequenz ein Normierungsfaktor ermittelt. Dieser ist zusammen mit den jeweiligen Mess- und Simulationsergebnissen in den Abbildungen 43- 48 dargestellt. Die maximalen Abweichungen lagen innerhalb von 1,8 dB für 900MHz, 0,6 dB für 1800 MHz und 1,1 dB für 1910 MHz. Die mit dieser Prozedur ermittelten Sendeleistungen für die jeweiligen Konfigurationen dienen ebenfalls der Normalisierung der Eingangsleistungen in den Simulationen am anatomischen

²Da das Telefon Motorola SLVRL7 nicht über UMTS verfügt, wurde es zur Validierung des numerischen Modells alternativ im GSM1900-Band bei 1910 MHz betrieben. Unterschiede bei der Absorption der hochfrequenten Felder im UMTS-Band bei 1950 MHz können als vernachlässigbar angenommen werden.

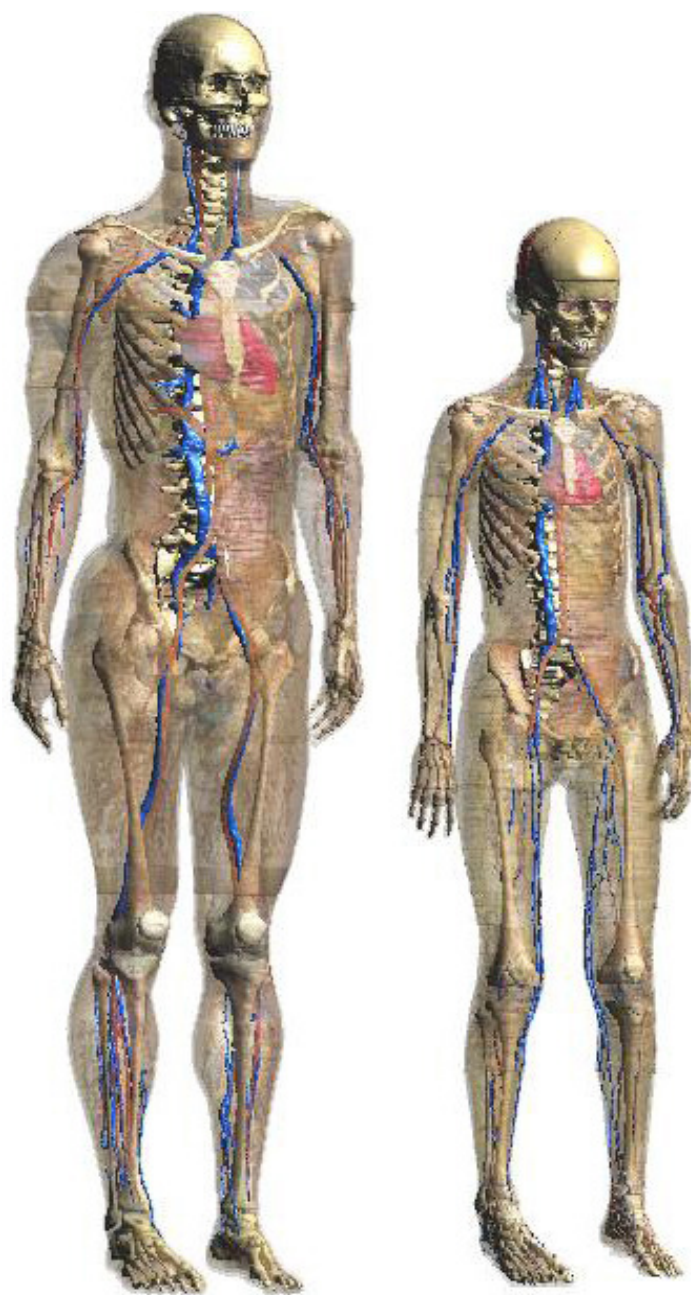


Abbildung 40: Anatomische Ganzkörpermodelle eines männlichen Erwachsenen „Duke“ (links) und eines elfjährigen Mädchens „Billie“ (rechts)

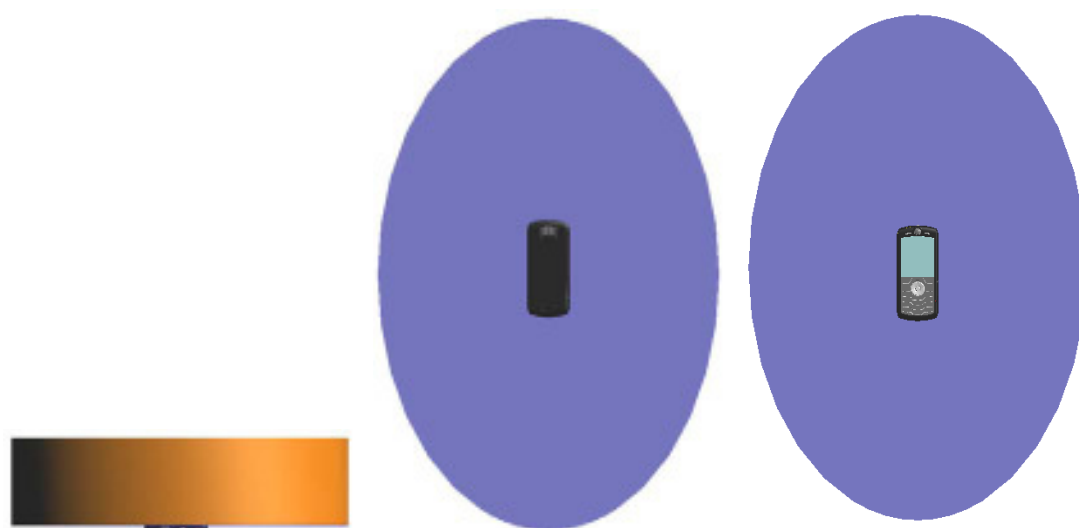
Menschenmodell. Die Unsicherheit der Simulationsergebnisse am Flachphantom (10 g SAR) liegt bei <2 dB.



Abbildung 41: Numerisches Modell des Motorola SLVR L7 (Die rechte Abbildung zeigt den inneren Aufbau des Telefons, wobei die Antenne und die zu ihr gehörenden Hochfrequenz führenden Teile gelb hervorgehoben sind.)

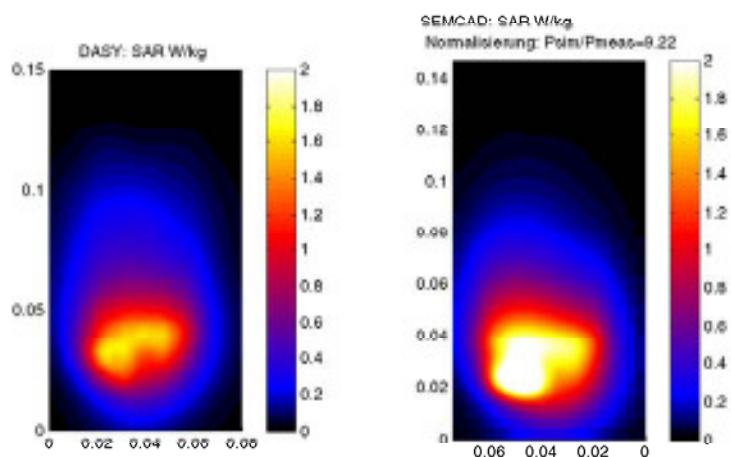
Freq.[MHz]	ϵ_r	$\sigma[S/m]$
900	41,5	0,97
1750	40,1	1,37
1910 und 1950	40	1,4

Tabelle 13: Dielektrische Parameter der gewebesimulierenden Flüssigkeiten bei 900 MHz, 1750 MHz und 1910 MHz

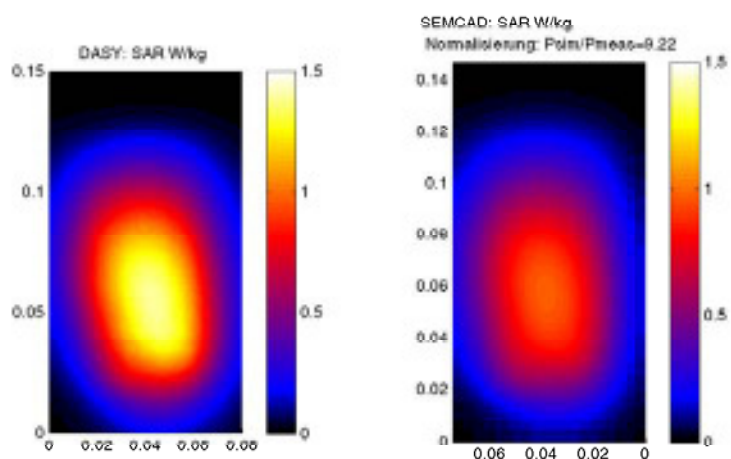


42.1: 900 MHz, Rückseite am Flachphantom, 0 mm Distanz 42.2: 900 MHz, Vorderseite am Flachphantom, 0 mm Distanz 42.3: 900 MHz, Rückseite am Flachphantom, 5 mm Distanz

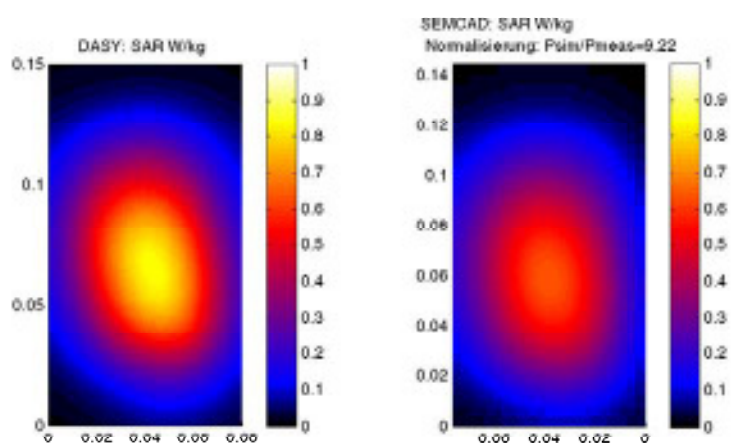
Abbildung 42: Positionierung des Telefonmodells am Flachphantom



43.1: 900 MHz, Rückseite, 0 mm Abstand

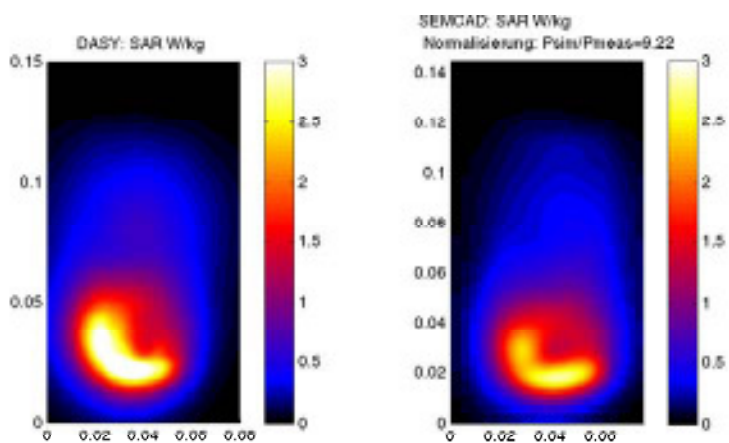


43.2: 900 MHz, Rückseite, 5 mm Abstand

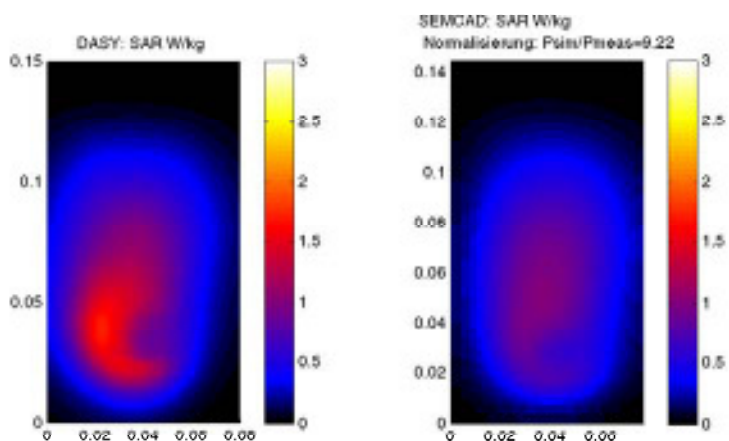


43.3: 900 MHz, Rückseite, 15 mm Abstand

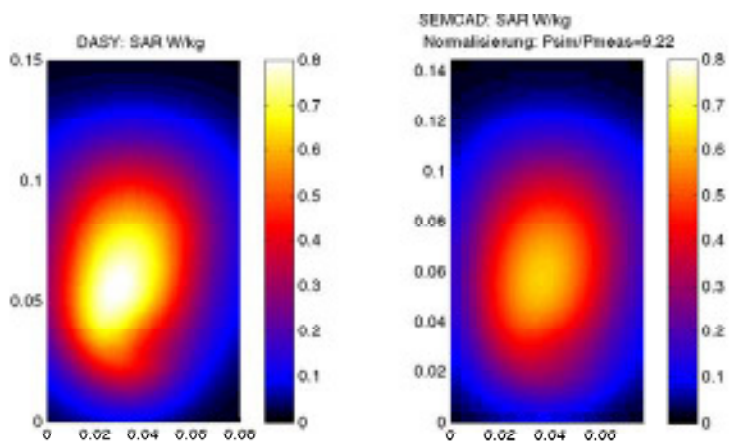
Abbildung 43: Vergleich der Messungen und Simulationen der Telefone am Flachphantom: Rückseite bei 900 MHz



44.1: 900 MHz, Vorderseite, 0 mm Abstand

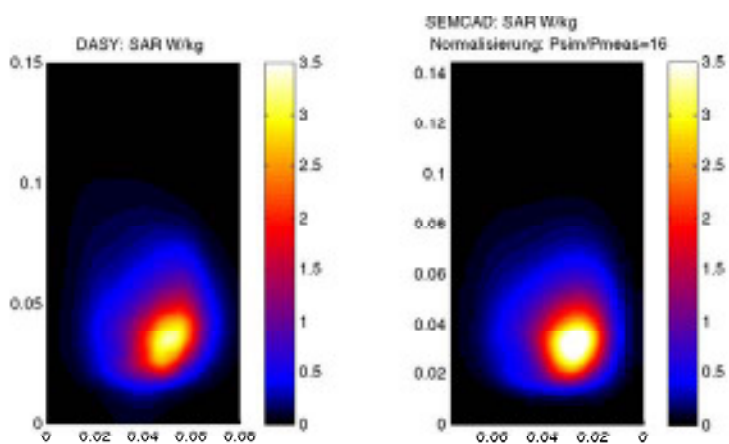


44.2: 900 MHz, Vorderseite, 5 mm Abstand

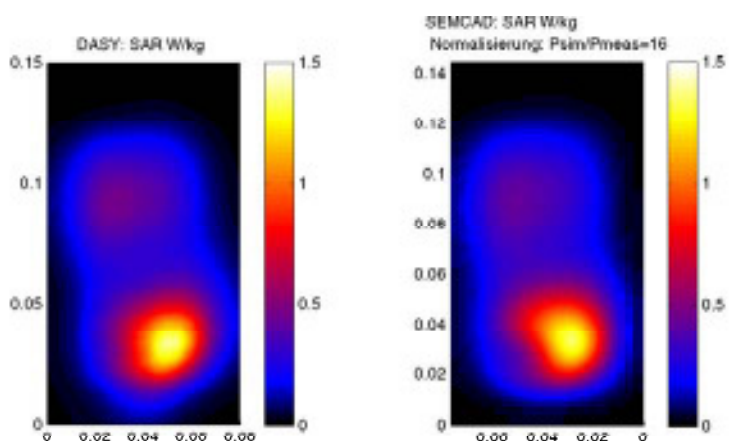


44.3: 900 MHz, Vorderseite, 15 mm Abstand

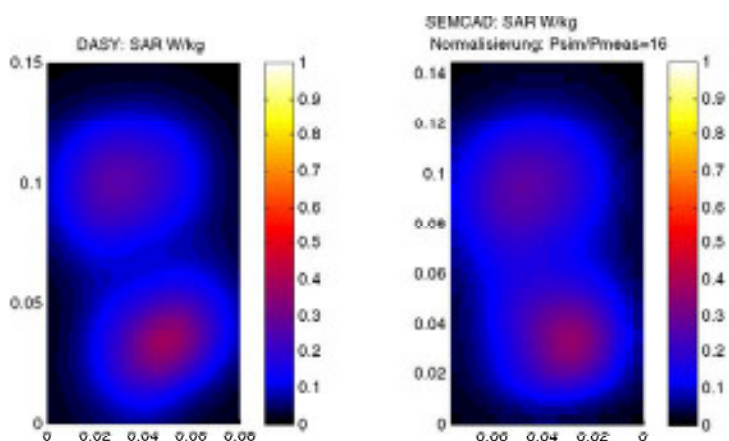
Abbildung 44: Vergleich der Messungen und Simulationen der Telefone am Flachphantom: Vorderseite bei 900 MHz



45.1: 1750 MHz, Rückseite, 0 mm Abstand

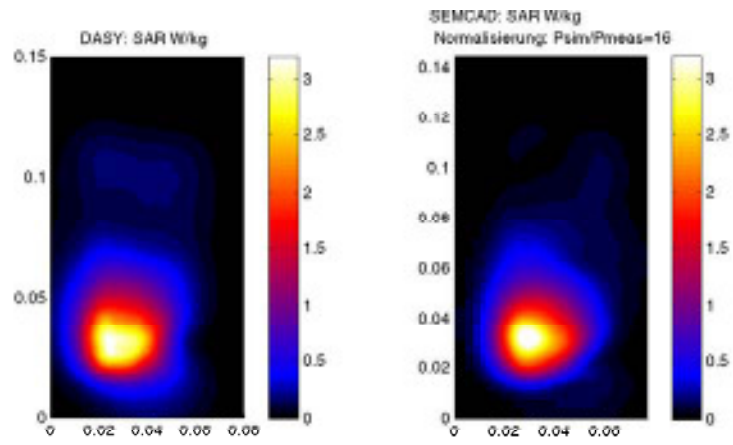


45.2: 1750 MHz, Rückseite, 5 mm Abstand

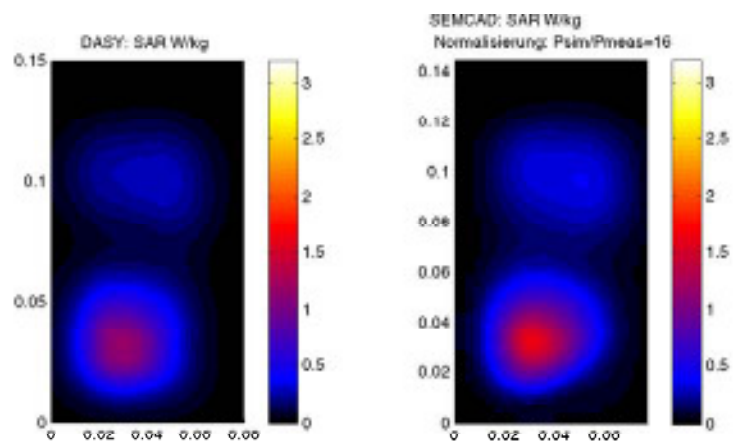


45.3: 1750 MHz, Rückseite, 15 mm Abstand

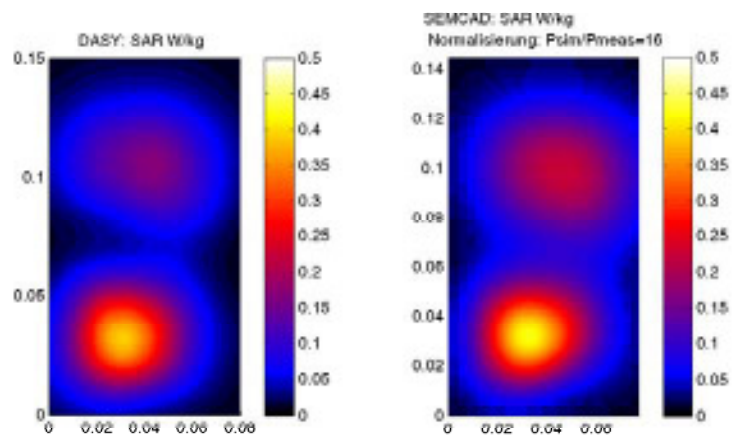
Abbildung 45: Vergleich der Messungen und Simulationen der Telefone am Flachphantom: Rückseite bei 1750 MHz



46.1: 1750 MHz, Vorderseite, 0 mm Abstand

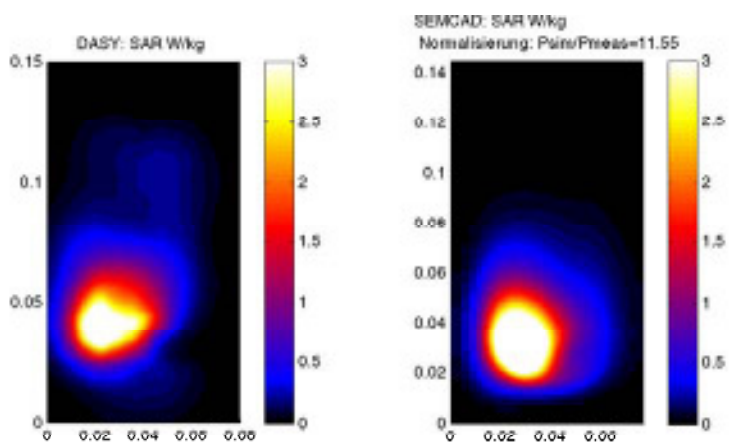


46.2: 1750 MHz, Vorderseite, 5 mm Abstand

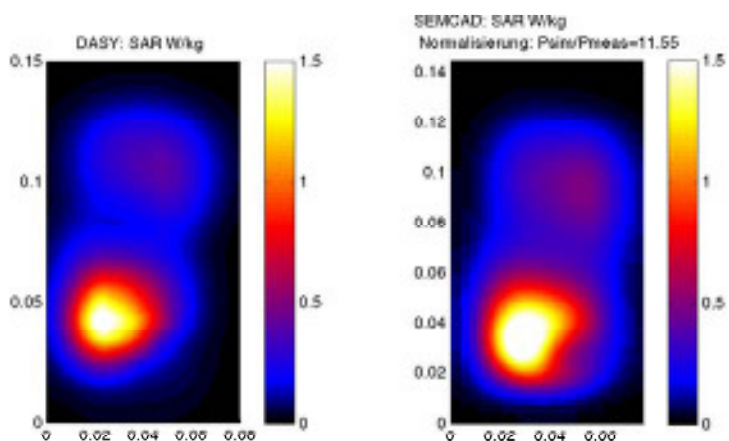


46.3: 1750 MHz, Vorderseite, 15 mm Abstand

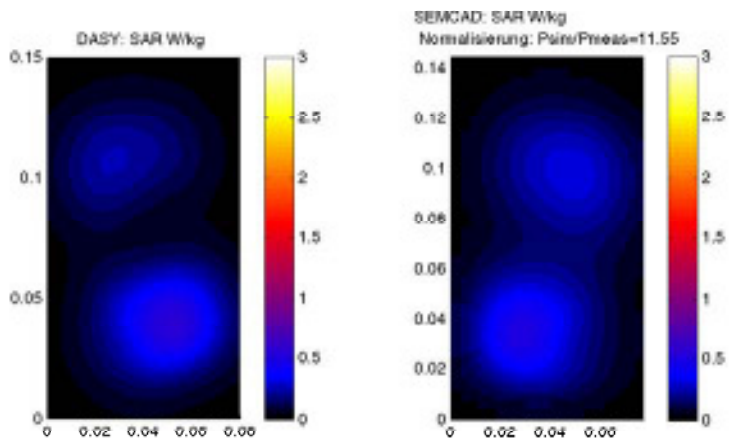
Abbildung 46: Vergleich der Messungen und Simulationen der Telefone am Flachphantom: Vorderseite bei 1750 MHz



47.1: 1910 MHz, Rückseite, 0 mm Abstand

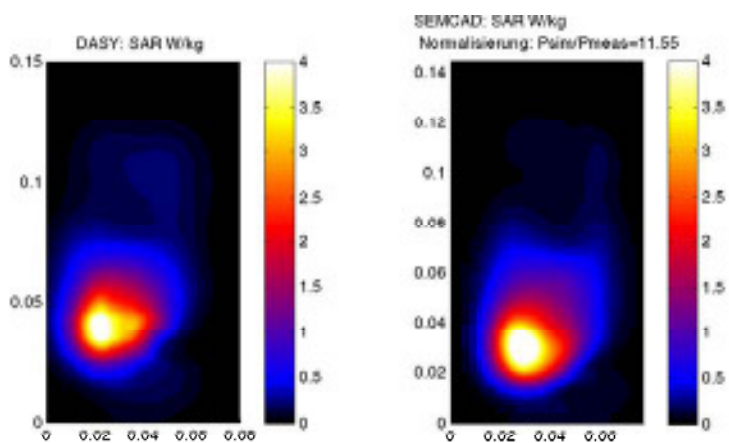


47.2: 1910 MHz, Rückseite, 5 mm Abstand

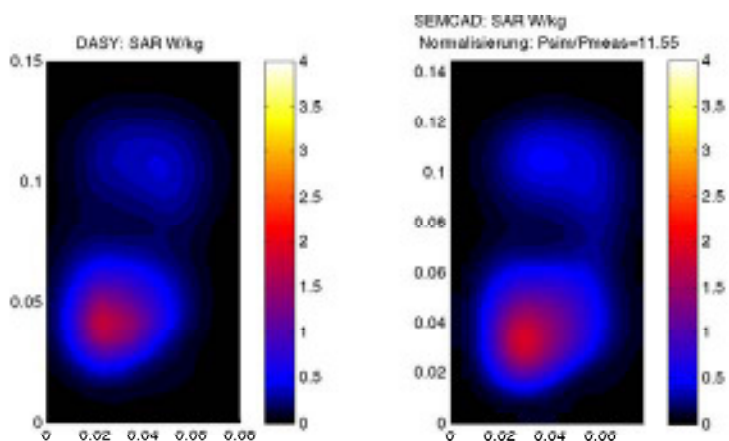


47.3: 1910 MHz, Rückseite, 15 mm Abstand

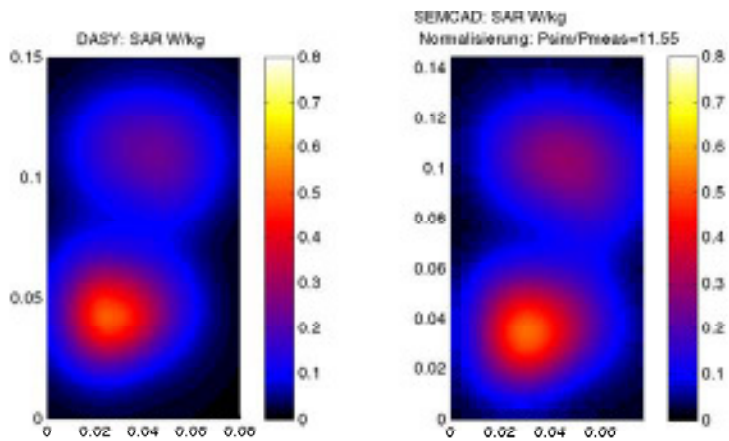
Abbildung 47: Vergleich der Messungen und Simulationen der Telefone am Flachphantom: Rückseite bei 1910 MHz



48.1: 1910 MHz, Vorderseite, 0 mm Abstand



48.2: 1910 MHz, Vorderseite, 5 mm Abstand



48.3: 1910 MHz, Vorderseite, 15 mm Abstand

Abbildung 48: Vergleich der Messungen und Simulationen der Telefone am Flachphantom: Vorderseite bei 1910 MHz

6.3.2 Validierung des Headsetmodells

Als Modell des kabelgebundenen Headsets wurde eine einfache Eindrahtleitung von 1320 mm Länge gewählt, die mit einem Kopfhörer in Form eines metallischen kegelförmig erweiterten Zylinders von 145 mm Höhe und 8 mm Durchmesser abgeschlossen wurde. Das Zusammenfassen der Leitungen des Kabels des Headsets zu einem einzigen Draht ist zulässig, da die Leitungen durch die Einkopplung der hochfrequenten Ströme im Gleichtakt angeregt werden [Zinke and Brunswig, 1995].

Zur Validierung der Stromverteilung auf der Eindrahtleitung bzw. der dadurch induzierten SAR wurde eine der in Abbildung 11 gezeigten ähnliche Anordnung mit dem Messsystem DASY 5 gewählt (Abbildung 50). Die Leitung wurde in einem Winkel von 12° weggeführt und an ihrem Fußpunkt über einen Generator gespeist. Als Masse diente eine leitende rechteckige Platte mit einer Kantenlänge von $40 \text{ mm} \times 100 \text{ mm}$. Vergleichsmessungen wurden mit dem in Abbildung 49 dargestellten Headset Motorola HS700 (Spezifikationen in Tabelle 14) durchgeführt. Für die numerische Studie wurde das Motorola HS700 gewählt, da es mit einem Mini-USB Anschluss ausgerüstet und somit kompatibel mit dem Motorola SLVR L7 Telefon ist.

Modell und Anschluss	Kabellängen			
	Stecker bis Verzweigung	Stecker bis zum rechten Ohrknopf	Stecker bis zum linken Ohrknopf	Stecker bis zum Mikrophon
Motorola HS700, Mini-USB	-	132 cm	-	115 cm

Tabelle 14: Spezifikationen bzgl. Aufbau der kabelgebundenen Headsets



Abbildung 49: Mono-Headset Motorola HS700

Abbildungen 51-53 zeigen die mit dem DASY5 gemessene und die im Flachphantom simulierte SAR bei 900 MHz, 1750 MHz und 1910 MHz. Die simulierte Peak Spatial Average SAR ist in Tabelle 15 gegeben. Die Übereinstimmung der Positionen und Höhe der jeweiligen Feldmaxima ist befriedigend bis gut. Das vereinfachte Modell der Leitung und des Kopfhörers erscheint daher geeignet, die Ausbreitungs- und Kopplungseffekte des Headsets zu simulieren.

	$SAR_{1g} [W/kg]$	$SAR_{10g} [W/kg]$
900 MHz	1,5	0,62
1750 MHz	1,2	0,56
1910 MHz	1,6	0,79

Tabelle 15: SAR_{1g} und SAR_{10g} im Flachphantom für den in Abbildung 50 gezeigten Aufbau bei Normierung auf die Ausgangsleistung des Telefons nach Abschnitt 6.3.1

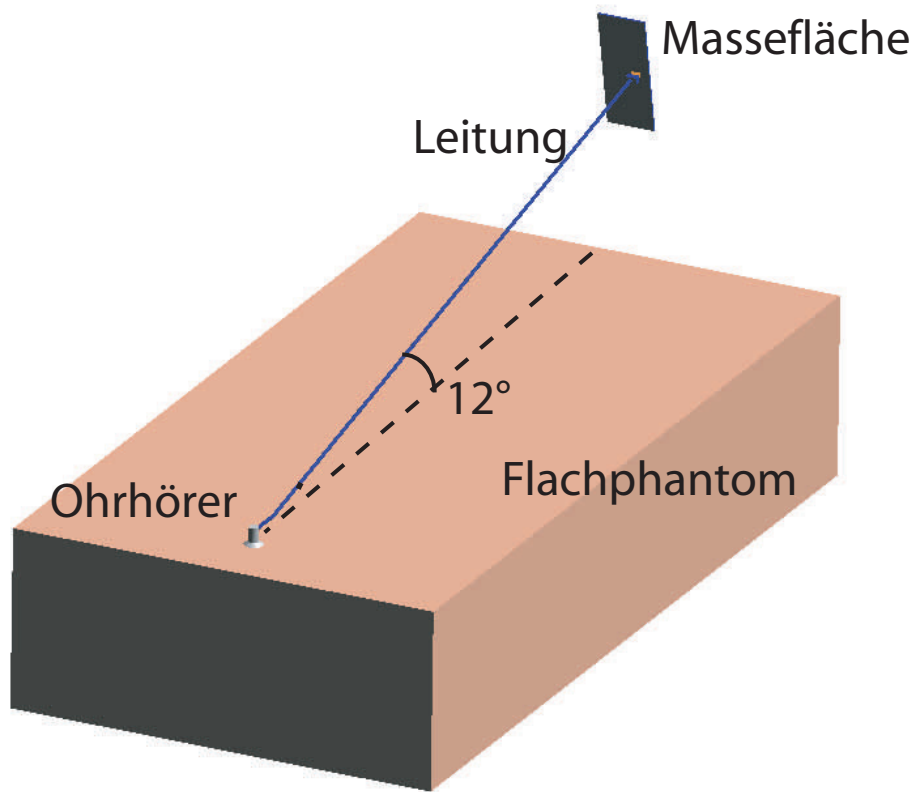


Abbildung 50: Anordnung zur Validierung des Headsetmodells

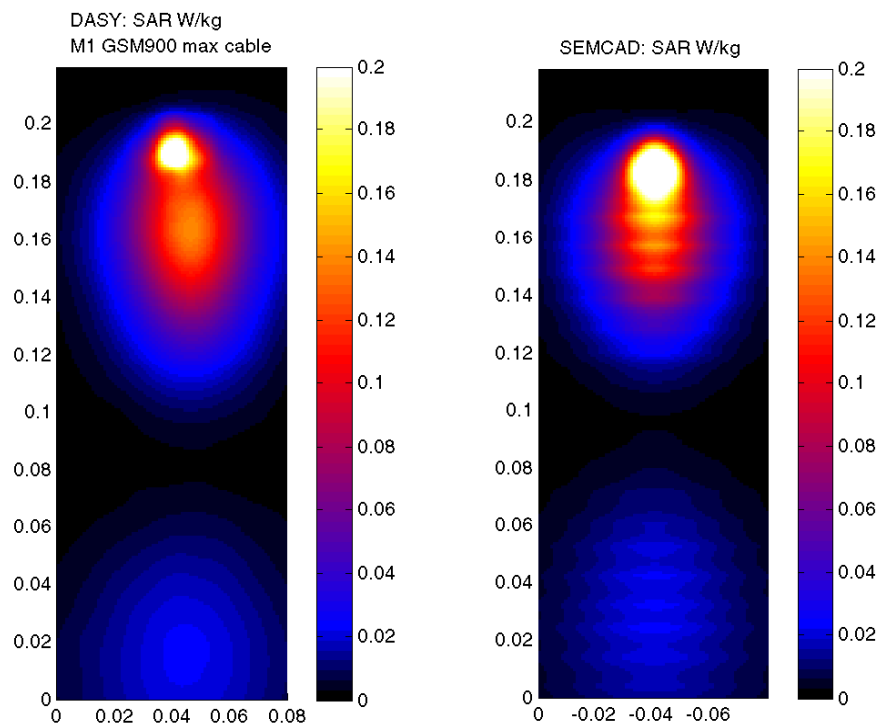


Abbildung 51: Mess- und Simulationsergebnisse des Modells des Headsets bei 900 MHz

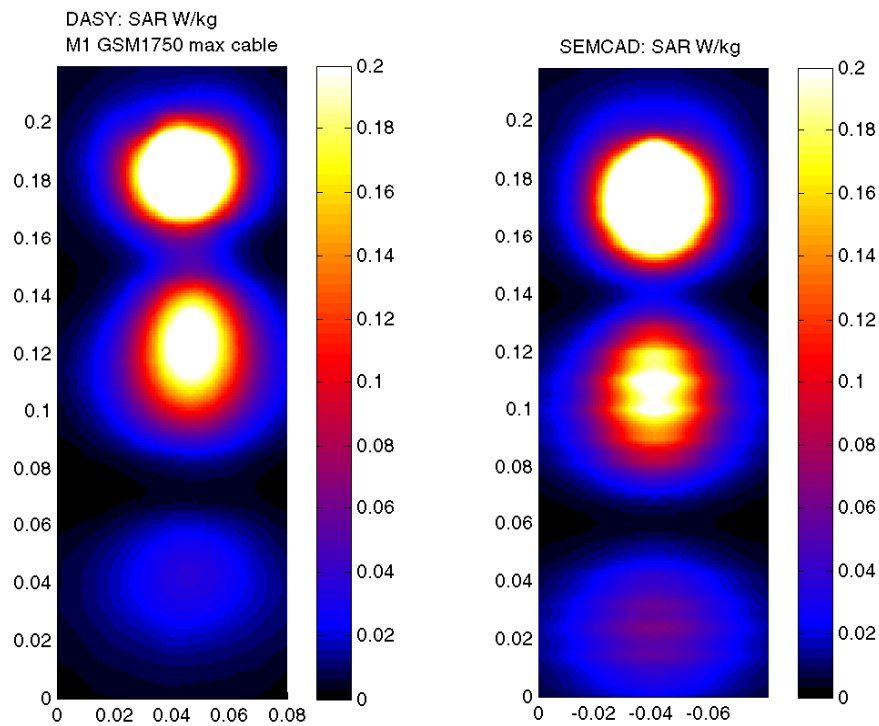


Abbildung 52: Mess- und Simulationsergebnisse des Modells des Headsets bei 1750 MHz

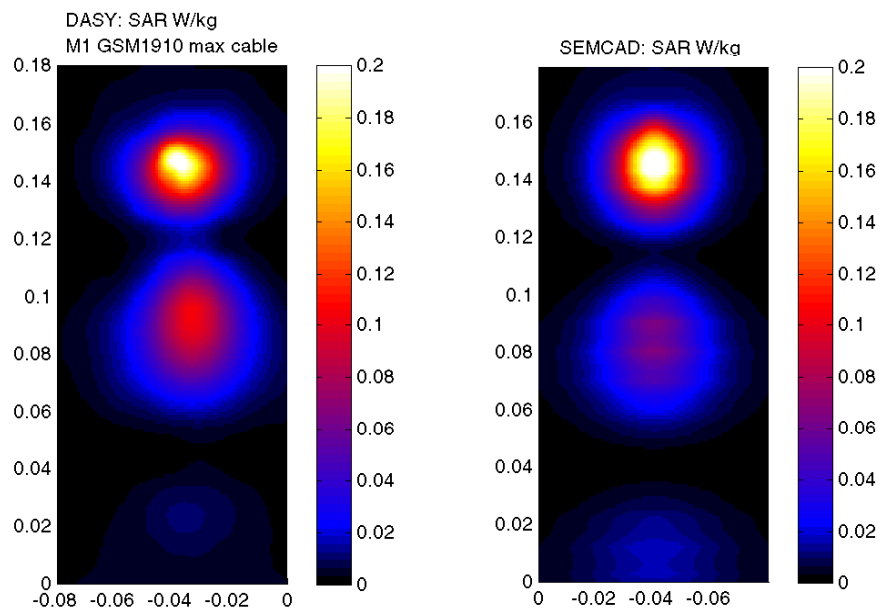


Abbildung 53: Mess- und Simulationsergebnisse des Modells des Headsets bei 1910 MHz

6.4 Auswertung der Belastung des Innenohres

Zur Auswertung der Belastung der Innenohrs wurde das vereinfachte Modell des Headsets (Abschnitt 6.3.2) im Ohr der anatomischen Modelle (Duke) platziert (Abbildung 54). Um die größtmögliche Belastung zu ermitteln, wurde das Kabel in gerader Linie und einem Winkel von etwa 12° vom Körper weggeführt, so dass die Ströme auf der Leitung nicht durch das

	R_{1g} [dB]	R_{10g} [dB]
900 MHz	5,2	1,4
1750 MHz	5,1	1,0
1950 MHz	3,6	-0,3

Tabelle 16: Numerisch ermitteltes Verhältnis der 1 g und 10 g gemittelten SAR-Spitzenwerte wie sie im Flachphantom bzw. in der Simulation im Kopf (unter Ausschluss des Ohres) bestimmt werden ($R = SAR_{\text{Kopf}}/SAR_{\text{Flachphantom}}$ in dB)

Körpergewebe gedämpft wurden. Tabelle 16 zeigt die Peak Spatial Average SAR bei dieser Anordnung im Verhältnis zur SAR im Flachphantom. Die absoluten Werte finden sich in Tabelle 17.

Die Übereinstimmung der Simulation Messaufbaus und der Simulationsergebnisse der 10 g Peak Spatial Average SAR ist zufriedenstellend bis gut. Bei 1 g Masse des Mittelungsvolumens sind die Abweichungen jedoch sehr hoch; die Simulationen überschätzen die Messungen um bis zu 5 dB. Dies ist auf die starke lokale Konzentration der SAR im Kopf bzw. im Innenohr zurückzuführen. Für eine genauere Auswertung sowie zum Erfassen der Belastung der einzelnen Hirnregionen sind weitere Simulationen mit zusätzlichen anatomischen Modellen erforderlich.

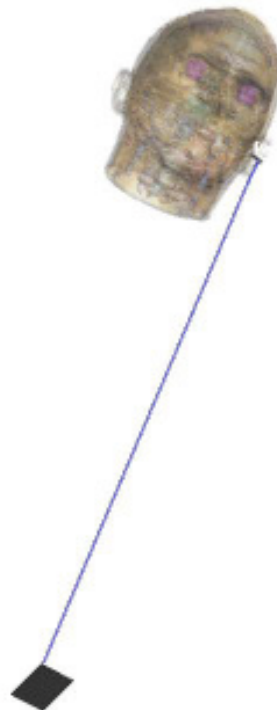


Abbildung 54: Anordnung des generischen Headsets im Ohr des anatomischen Modells „Duke“.

	$\text{SAR}_{1g} [W/kg]$	$\text{SAR}_{10g} [W/kg]$
900 MHz	4,8	0,86
1750 MHz	3,7	0,71
1950 MHz	3,7	0,73

Tabelle 17: SAR_{1g} und SAR_{10g} im Innenohr des „Duke“-Modells nach Abbildung 54 bei Normierung auf die Ausgangsleistung des Telefons nach Abschnitt 6.3.1

6.5 Bestimmung der lokalen SAR in Kopf und Rumpf

In Abschnitt 6.4 wurde die lokale Verteilung der Belastung im Innenohr der Benutzers mit der im Flachphantom ermittelten SAR korreliert. Ebenso wurde die Grenzfallbelastung durch kabelgebundene Headsets diskutiert, wie sie auftreten kann, wenn die Dämpfung der induzierten Hochfrequenzströme durch den Körper des Benutzers entfällt. Verläuft das Kabel direkt am Körper, ist die Belastung im Ohr in der Regel geringerer, es kommt jedoch zu lokaler Exposition des Körpers entlang dem Kabel. Um diese zu quantifizieren und mit den Meßergebnissen aus Abschnitt 5 zu vergleichen, sollen folgende Anordnungen simuliert werden:

- „Duke“ und „Billie“
- Mobiltelefon in Brust- und Hosentasche
- Vorder- und Rückseite dem Benutzer zugewandt
- kabelgebundenes Headset
- Frequenzbänder GSM900, GSM1800 und UMTS

Abbildung 55 zeigt die beiden anatomischen Modelle mit dem Mobiltelefon in Brust- und Hosentaschenposition. Zwischen Telefon und Körper wurde ein minimaler Abstand von 1,5 mm gewählt, die durchschnittlichen Abstände lagen bei circa 4 mm. Die Kabelführung ist in Abbildungen 56 und 57 dargestellt.

Tabelle 18 zeigt die Peak Spatial SAR im Rumpf der Modelle bei Belastung durch das Telefon ohne Headset in den oben beschriebenen Konfigurationen. Werden diese Werte mit der simulierten SAR am Flachphantom bei 5 mm Abstand verglichen, so ist die SAR ohne Headset am anatomischen Modell um durchschnittlich 2,5 dB niedriger als am Flachphantom. Die Erklärung für dieses deutlich konservative Ergebnis des Flachphantoms ist auf das Fettgewebe der anatomischen Modelle unterhalb der gewählten Testpositionen zurückzuführen, welches eine deutlich geringere elektrische Leitfähigkeit besitzt als die in der Typenprüfung benutzten gewebesimulierenden Flüssigkeiten. Die Unterschiede im 10g Peak Spatial SAR zwischen den "Billie"- und "Duke"-Modellen sind innerhalb von maximal 1.4 dB, sind somit eher gering.

Tabelle 19 zeigt die Peak Spatial SAR im Rumpf der Modelle bei Belastung durch das Telefon mit angeschlossenem Headset in den oben beschriebenen Konfigurationen. Die Simulationen spiegeln hier die Resultate der experimentellen Studie wider. Für die mit der Rückseite des Telefons zum Körper gewandten Konfigurationen sind die Unterschiede zu den jeweiligen Konfiguration ohne Headset im Rahmen von -1.4 dB bis 0.8 dB. Für die Konfigurationen mit der Vorderseite des Telefons sind die Abweichungen etwas größer und innerhalb -4 dB bis 3.4 dB. Der Einfluss auf die maximale über alle Konfigurationen ermittelte Peak Spatial SAR je mit und ohne Headset ist 1.2 dB und somit relativ gering. In keinem Fall wurde der Grenzwert von 2 W/kg überschritten.

Tabelle 20 stellt die Peak Spatial SAR im Kopf der Modelle (in der Nähe des Ohrknopfs) bei Belastung durch das Telefon mit angeschlossenem Headset dar. Auch hier liegen die Simulationsresultate wieder innerhalb der von den Messungen zu erwartenden Bereiche. So wurde im Kopf des Duke-Modells für die Hosentaschenposition eine durchschnittliche SAR von $-18.3 \text{ dB}_{W/kg}$ ermittelt. Diese liegt in der Größenordnung der stromkopplungsoptimierten Messresultate bei 0 mm - 5 mm Abstand des Kabels zum Flachphantom. In der Simulation an "Duke" ist das Kabel durchschnittlich etwas weiter vom Rumpf entfernt (ca. 1.5 cm, Abbildung 59), jedoch wurde in der Simulation die Kopplung des Stroms auf das Kabel nicht speziell maximiert. Bei der Hosentaschenposition in "Billie" ist das durchschnittliche SAR am Ohrknopf um ca. 5 dB höher als in "Duke". Dies lässt sich auf Grund des über eine kürzere am Körper verlaufende Strecke des Kabel sowie einen generell etwas größeren Abstand des Kabels zum Körper erklären (Abbildung 58). Ebenfalls wirkt sich die unterschiedliche Kabelführung in der Hemdtaschenposition aus. Während das Kabel bei "Duke" im Brust und Schulterbereich noch recht nahe am Körper verläuft, hat es bei "Billie" einen größeren Abstand zum Körper. Die dadurch geringere Dämpfung entlang des Kabels spiegelt sich dann auch im SAR am Ohrknopf von durchschnittlich $-9.2 \text{ dB}_{W/kg}$ in "Duke" gegenüber durchschnittlich $-7.4 \text{ dB}_{W/kg}$ in "Billie" wider.

Zusammenfassend lässt sich also sagen dass die Resultate am anatomischen Ganzkörpermodell den Erwartungen aus den Experimenten gut entsprechen.



55.1: Duke Modell mit Telefon in der Hosentaschenposition.

55.2: Billie Modell mit Telefon in der Hosentaschenposition.

55.3: Duke Modell mit Telefon in der Brusttaschenposition.

55.4: Billie Modell mit Telefon in der Brusttaschenposition.

Abbildung 55: Positionen der Telefone an den anatomischen Modellen

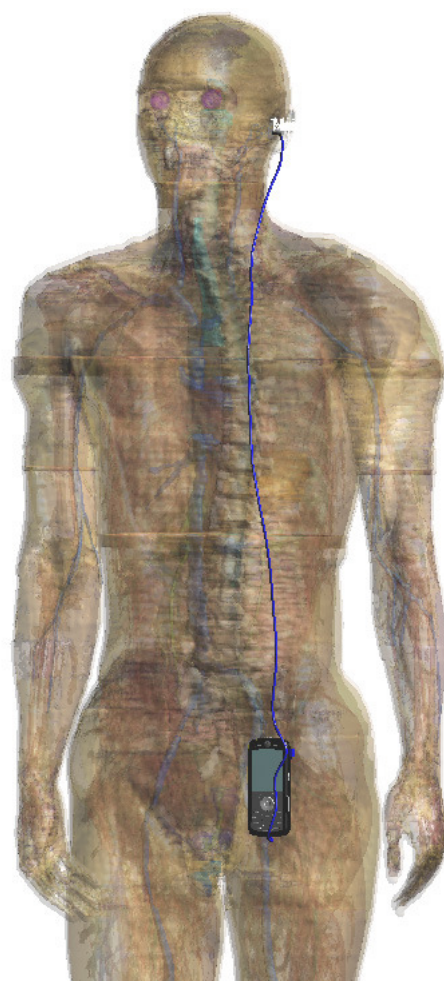


Abbildung 56: „Duke“-Modell mit generischem Headset und Telefon in der Hosentaschenposition.

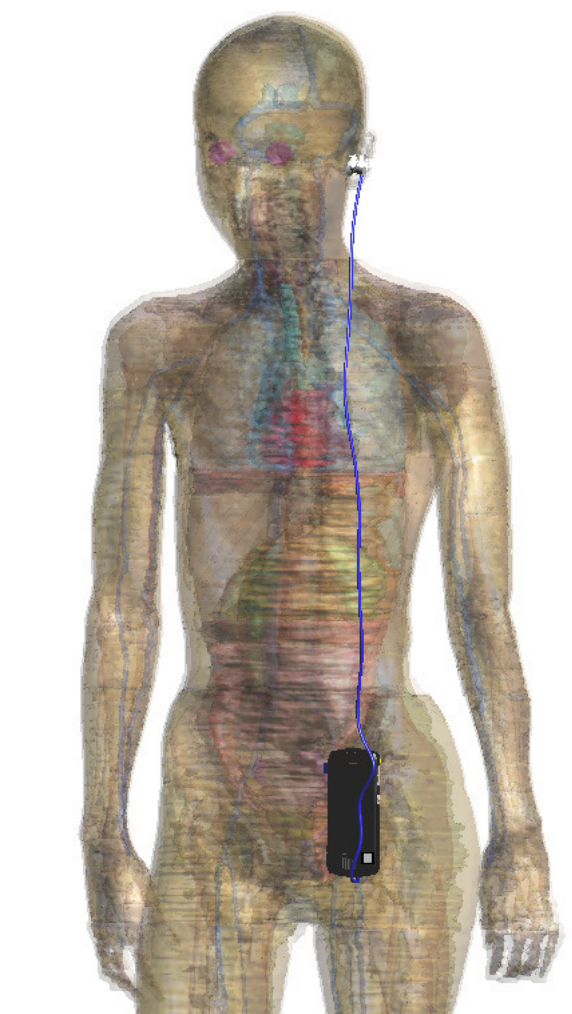


Abbildung 57: „Billie“-Modell mit generischem Headset und Telefon in der Hosentaschenposition.



Abbildung 58: Seitenansicht des „Billie“-Modells mit generischem Headset und Telefon in Hemd- und Hosentaschenposition.

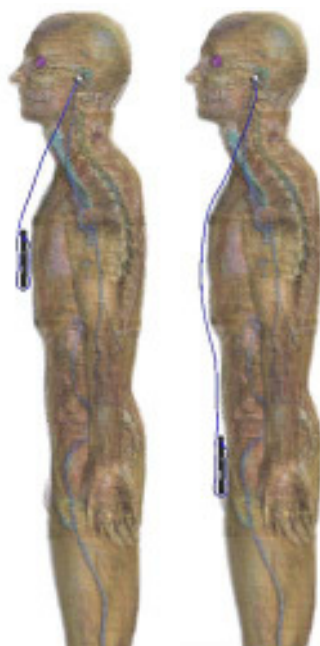


Abbildung 59: Seitenansicht des „Duke“-Modells mit generischem Headset und Telefon in Hemd- und Hosentaschenposition.

Position am Körper	Orientierung	Frequenz [MHz]	Duke SAR _{10g} [W/kg]	Billie SAR _{10g} [W/kg]
Hosentasche	Rückseite	900	0,47	0,45
		1750	0,45	0,54
		1950	0,74	0,82
	Vorderseite	900	0,52	0,49
		1750	0,33	0,37
		1950	0,69	0,50
Brusttasche	Rückseite	900	0,20	0,23
		1750	0,22	0,23
		1950	0,36	0,26
	Vorderseite	900	0,25	0,25
		1750	0,13	0,16
		1950	0,27	0,26

Tabelle 18: SAR_{10g} *im Rumpf* der beiden anatomischen Modelle „Duke“ und „Billie“ bei Belastung durch das *Telefon ohne Headset*. Die Speiseleistung der Simulationen wurde mit den am Flachphantom durch Vergleich von Messung und Simulation ermittelten Faktoren normalisiert.

Position am Körper	Orientierung	Frequenz [MHz]	Duke SAR _{10g} [W/kg]	Billie SAR _{10g} [W/kg]
Hosentasche	Rückseite	900	0.349	0.4
		1750	0.272	0.65
		1950	0.57	0.75
	Vorderseite	900	0.59	0.51
		1750	0.525	0.55
		1950	0.71	1.1
Brusttasche	Rückseite	900	0.15	0.185
		1750	0.18	0.186
		1950	0.295	0.21
	Vorderseite	900	0.157	0.224
		1750	0.27	0.147
		1950	0.28	0.103

Tabelle 19: SAR_{10g} *im Rumpf* der beiden anatomischen Modelle „Duke“ und „Billie“ bei Belastung durch das *Telefon mit Headset*. Die Speiseleistung der Simulationen wurde mit den am Flachphantom durch Vergleich von Messung und Simulation ermittelten Faktoren normalisiert.

Position am Körper	Orientierung	Frequenz [MHz]	Duke SAR_{10g} [W/kg]	Billie SAR_{10g} [W/kg]
Hosentasche	Rückseite	900	0.045	0.036
		1750	0.014	0.108
		1950	0.007	0.066
	Vorderseite	900	0.004	0.03
		1750	0.008	0.022
		1950	0.011	0.003
Brusttasche	Rückseite	900	0.366	0.039
		1750	0.137	0.223
		1950	0.143	0.298
	Vorderseite	900	0.006	0.016
		1750	0.053	0.176
		1950	0.016	0.34

Tabelle 20: SAR_{10g} im Kopf der beiden anatomischen Modelle „Duke“ und „Billie“ bei Belastung durch das *Telefon mit Headset*. Die Speiseleistung der Simulationen wurde mit den am Flachphantom durch Vergleich von Messung und Simulation ermittelten Faktoren normalisiert.

7 Zusammenfassung

Zur Normalisierung der Resultate der SAR-Messungen mit Headset wurden zu Beginn der experimentellen Studie die Telefonprüflinge am SAM-phantom (Benutzung am Kopf) sowie am Flachphantom (Benutzung am Rumpf) dosimetrisch ausgewertet. Hier fiel lediglich in einem Fall auf, dass die Benutzung eines Telefons am Rumpf bei 0 mm Abstand zu einem über 10 g gemittelten SAR-Spitzenwert über dem ICNIRP Grenzwert von 2,0 W/kg führte.

In der experimentellen Studie wurde eine Grenzfallbetrachtung bzgl. der maximalen Exposition des Menschen bei der Verwendung kabelgebundener Headsets im Ohr durchgeführt. Hierbei wurde insbesondere auf etwaige Überschreitungen der Grenzwerte der ICNIRP Richtlinien geachtet. Hierzu wurden 1) eine Methode zur Maximierung der Stromkopplung auf das Headsetkabel angewandt sowie 2) Verluste entlang der Headsetkabel vernachlässigt. In keinem der getesteten Fälle wurden die Grenzwerte der ICNIRP Richtlinien erreicht. Vielmehr war selbst die maximale am Headset gemessene SAR um einen Faktor fünf kleiner als der Grenzwert der ICNIRP Richtlinien. Betrachtet man die relative Erhöhung bzw. Abschwächung der SAR bei der Verwendung von Headsets gegenüber dem Telefon direkt am Kopf, kann es zwar für den betrachteten Grenzfall zu einer relativen Erhöhung kommen. Jedoch ist dieser Unterschied hauptsächlich dem geringen SAR moderner, SAR-optimierter Mobiltelefone geschuldet, wenn diese am Kopf betrieben werden. Die Studie hat trotz des stark unterschiedlichen Aufbaus der Telefone und der Headsets keine signifikanten Unterschiede der SAR am Ohrknopf gezeigt. Die SAR am Ohrknopf der Headsets hängt somit also in erster Linie von der Ausgangsleistung des Telefons ab. Bezüglich der Typenprüfung kann man somit schlussfolgern, dass man keine separate Prüfung der Headsets benötigt.

Zusätzlich zur Grenzfalluntersuchung wurden auch verschiedene Experimente zum Dämpfungsverhalten mit weiterhin maximierter Stromkopplung bei Kabelführung in verschiedenen Distanzen zum Körper durchgeführt. Hierbei zeigte sich, dass bei einer Distanz des Kabels von 15 mm zum Körper bereits eine Verringerung der SAR von durchschnittlich 4 dB-15 dB zu erwarten ist. Bei 5 mm Abstand wurde eine Verringerung der SAR von 7 dB-18 dB erreicht. Bei direktem Kontakt zum Körper sind Dämpfungswerte von 13 dB-26 dB zu erwarten.

Die dosimetrische Bewertung der kabellosen Headsets hat gezeigt, dass man von diesen eine sehr geringe Belastung erwarten kann, welche sich im Bereich der SAR durch kabelgebundene Headsets bei starker Dämpfung entlang des Körpers bewegt.

Eine ausführliche Betrachtung der SAR durch Mobiltelefone mit und ohne Headset am Rumpf hat ebenfalls gezeigt, dass es bei der Verwendung von Headsets zu keiner Erhöhung der SAR im Vergleich zu den Maximalwerten bei Verwendung des Telefons ohne Headset direkt am Rumpf kommt.

In der numerischen Studie wurden ein Telefon sowie ein zugehöriges Headset modelliert. Beide Modelle wurden ebenfalls experimentell validiert. Diese Modelle kommen dann an zwei realistischen menschlichen Ganzkörpermodellen zum Einsatz. Dort wurden Simulationen mit dem Telefon an den der Brust und in der Hosentasche durchgeführt, bei denen sowohl die Vorderseite als auch die Rückseite des Telefons dem Körper zugewandt waren. Dabei wurde auf realitätsnahe Modellierung der Kabelführung zum Ohr geachtet. Die Auswertung dieser realitätsnahen Expositionsszenarien bestätigte die Ergebnisse der experimentellen Studie. So lagen die SAR-Werte im Kopf bei Verwendung eines kabelgebundenen Headsets am Telefon in der Hosentaschenposition im Bereich der SAR-Werte bei Kabelführung in 0-5 mm Abstand zum Flachphantom. In der Hemdtaschenposition zeigte sich insbesondere die Auswirkung der geringeren Dämpfung entlang des Kabels am Körper. Auch die Variationen der SAR im Rumpf lagen innerhalb des auf Grund der experimentellen Studie zu erwarteten Bereichs.

Der Vergleich der Belastung bei gleicher Eingangsleistung am Flachphantom zeigt, dass das Flachphantom für die gewählten Positionen und Telefone um durchschnittlich 2,5 dB höhere SAR-Werte gegenüber dem anatomischen Modell liefert. Diese Überschätzung tritt durch eine verminderte Absorption auf Grund einer Fettschicht unterhalb des Telefons in den numerischen Modellen auf.

Zusätzlich wurde ein generisches Expositionsszenario mit einem Headset im Ohr des anatomischen Modells modelliert und mit Hilfe von Simulationen mit der messtechnisch ermittelbaren SAR im Flachphantom verglichen. Diese Untersuchungen haben gezeigt, dass das

Flachphantom den über 10 g gemittelten SAR-Spitzenwert für dieses Beispiel in guter Weise wiedergibt (Unterschätzung <1.4 dB). Demgegenüber kommt es durch das Flachphantom zu Unterschätzungen der über 1 g gemittelten SAR von 5 dB. Dies deutet auf sehr lokale Exposition im Innenohr hin, welche durch das Flachphantom nicht exakt wiedergegeben wird.

Im Extremfall kann es zu einer stark lokalisierten Überhöhung der Exposition im Innenohr bei der Verwendung kabelgebundener Headsets kommen. Im Alltag führen Headsets zu einer markanten Reduzierung der Exposition des Kopfbereiches verglichen mit dem Telefon direkt am Kopf. Bei Verwendung von kabelgebundenen Headsets hängt die SAR im Kopf von der Sendeleistung des Mobiltelefons, von der Kopplung von der Antenne auf das Kabel, der äusseren Dämpfung und evtl. der kabelspezifischen Dämpfung ab. Bei der Verwendung kabelloser Headsets ist mit einer geringen aber im Betrieb konstanten Exposition zu rechnen, dahingegen hängt die Exposition durch kabelgebundene Headsets von den oben genannten Faktoren insbesondere auch von der Leistungsregelung des Telefons ab.

In zukünftigen Forschungsarbeiten sollten insbesondere die Exposition bei der Verwendung von Headsets unter realistischen Kopplungsbedingungen betrachtet werden. Weitere Untersuchungen sind notwendig, um festzustellen ob funktionale Regionen im Innenohr bzw. im Gehirn durch die sehr lokale Belastung am Headsetknopf exponiert werden.

Literatur

- [CEN, 2001] (2001). *EN 50361, Basic standard for the measurement of Specific Absorption Rate related to human exposure to electromagnetic fields from mobile phones*. rue de Stassart 35, 1050 Brussels, Belgium.
- [IEC, 2007] (2007). *IEC 62209 Part 2, Human Exposure to Radio Frequency Fields from Handheld and Body-Mounted Wireless Communication Devices - Human Models, Instrumentation and Procedures, Part 2: Procedure to determine the Specific Absorption Rate (SAR) in the head and body for 30 MHz to 6 GHz Handheld and Body-Mounted Devices used in close proximity to the Body, CD-Version*. Geneva, Switzerland.
- [63.19, 2005] 63.19, A. (2005). American National Standard for Methods of Measurement of Compatibility between Wireless Communications Devices and Hearing Aids (Revision Draft 3.8).
- [Ackerman, 1998] Ackerman, M. J. (1998). The Visible Human Project. *Proceedings of the IEEE*, 86(3):504–511.
- [Bit-Babik et al., 2003] Bit-Babik, G., Chou, C., Faraone, A., Gessner, A., Kanda, M., and Balzano, Q. (2003). Estimation of the SAR in the human head and body due to radio-frequency radiation exposure from handheld mobile phones with hands-free accessories. *Radiations Research*, 159:550–557.
- [Christ et al., 2007a] Christ, A., Kainz, W., Hahn, E., Honegger, K., Shen, J., Rascher, W., Janka, R., Bautz, W., Kiefer, B., Schmitt, P., Hollenbach, H.-P., Chen, J., Kam, A., Neufeld, E., Oberle, M., and Kuster, N. (2007a). The “Virtual Family” Project - Development of anatomical whole-body models of two adults and two children. In *Proceedings of the 23rd Annual Review of Progress in Applied Computational Electromagnetics (ACES) 2007*, Verona, Italy. Session 16: Modeling of Biomedical Problems - 1 (March 21).
- [Christ et al., 2007b] Christ, A., Schmid, G., Honegger, K., Zefferer, M., Überbacher, R., Neufeld, E., and Kuster, N. (2007b). Numerische Bestimmung der Spezifischen Absorptionsrate bei Ganzkörperexposition von Kindern: 1. Zwischenbericht. techreport, IT'IS Foundation, ETH Zurich, Zeughausstrasse 43, 8004 Zurich, Switzerland.
- [IEC 62209/1, 2001] IEC 62209/1 (2001). *Procedure to measure the Specific Absorption Rate (SAR) for hand-held mobile telephones in the frequency range of 300 MHz to 3 GHz*.
- [IEEE, 2002] IEEE (2002). *IEEE Std C95.3 Recommended Practice for Measurements and Computations of Radio Frequency Electromagnetic Fields With Respect to Human Exposure to Such Fields, 100 kHz–300 GHz*. IEEE Standards Department, International Committee on Electromagnetic Safety, The Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc. 3 Park Avenue, New York, NY 10016-5997, USA.
- [Jidhage and Stjernman, 2004] Jidhage, H. and Stjernman, A. (2004). Hooked loop antenna concept for bluetooth headset applications. In *Antennas and Propagation Society International Symposium, 2004. IEEE*, volume 4, pp 3521–3524.
- [Kühn et al., 2007] Kühn, S., Lott, U., Kramer, A., and Kuster, N. (2007). Assessment methods for demonstrating compliance with safety limits of wireless devices used in home and office environments. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, 49(3):519–525.
- [Kühn et al., 2006] Kühn, S., Schmid, T., Schmid, D., and Kuster, N. (2006). Fast dosimetric assessment system for pre-compliance, rapid prototyping and production line testing. Presentation at the 28th Annual Meeting of the Bioelectromagnetics Society, Cancun, Mexico, June 11–15. Oral Presentation S8-4 in Session 8: Mechanisms & Analysis, (13 June).
- [Manning and Gabriel, 2000] Manning, M. and Gabriel, C. (2000). SAR tests on mobile phones used with and without personal hands-free kits. Technical report, SARTest.
- [Porter et al., 2004] Porter, S., Capstick, M., Faraci, F., Flintoft, I., and Marvin, A. (2004). SAR and induced current measurements on wired hands-free mobile telephones. *IEE The Institution of Electrical Engineers*, (10663):9–13.

- [SPEAG, Schweiz, 2005] SPEAG, Schweiz (2005). *DASY4 System Manual*.
- [Subramaniam et al., 2005] Subramaniam, K., Esa, M., and Subahir, S. (2005). Compact printed square meander loop antenna for a bluetooth headset. In *Applied Electromagnetics, 2005. APACE 2005. Asia-Pacific Conference on*.
- [Taflove and Hagness, 2000] Taflove, A. and Hagness, S. C. (2000). *Computational Electromagnetics: The Finite-Difference Time-Domain Method*. Artech House, Inc., Boston, USA, London, United Kingdom, second edition.
- [Troulis et al., 2004] Troulis, S., Scanlon, W., and Evans, N. (2004). Effect of a hands-free wire on specific absorption rate for a waist-mounted 1.8 GHz cellular telephone handset. *Physics in Medicine and Biology*, 48:1675–1684.
- [Wong et al., 2006] Wong, K.-L., Hsu, M.-R., Li, W.-Y., Su, S.-W., and Chen, A. (2006). Study of the bluetooth headset antenna with the user’s head. *Microwave and Optical Technology Letters*, 49(1):19–23.
- [Zinke and Brunswig, 1995] Zinke, O. and Brunswig, H. (1995). *Hochfrequenztechnik 1*. Springer-Verlag, Berlin Heidelberg New York.

A Übersicht kabelgebundener Headsets

Hersteller	Typenbezeichnung	Aufbau
Motorola:	HSK7005	Ohrknopf (intraaural)
	S805	Kopfhörer (zirkumaural), Stereo
	HSK8000	Ohrknopf (intraaural)
	S200	Ohrknöpfe (intraaural), Stereo
Nokia:	HS-5	Ohrknopf (intraaural)
	HDB-4	Ohrbügel (intraaural), Mikrofonausleger
	HDB-5	Ohrbügel (intraaural), Mikrofonausleger
	HDC-5	Ohrknopf (intraaural)
	HS-2R	Ohrknopf (intraaural) mit Radio
	HS-23	Ohrknöpfe (intraaural), Stereo
	HS-6	Ohrknöpfe (intraaural), Stereo
	HS-8	Ohrknöpfe (intraaural), Stereo
	HS-20	Ohrknöpfe (intraaural), Stereo
	HS-31	Ohrknöpfe (intraaural), Stereo
	HS-69	Ohrknöpfe (intraaural), Stereo
	HS-62	Kopfhörer (supraaural)
	HS-81	Kopfhörer (supraaural)
	HS-16	Kopfhörer (supraaural)
	HS-40	Ohrknopf (intraaural)
HS-47	Ohrknöpfe (intraaural), Stereo	
Samsung:	AEP131SLEC/STD	Ohrknopf (intraaural)
	AEP131NLEC/STD	Ohrknöpfe (intraaural), Stereo
	AEP292SLEC/STD	Ohrknopf (intraaural)
	AEP421SSEC/STD	Ohrknöpfe (intraaural), Stereo
	AEP420SBEC/STD	Ohrknöpfe (intraaural), Stereo
	ASP020GBEC/STD	Ohrknöpfe (intraaural), Stereo
LG:	SGEY0003602	Ohrknöpfe (intraaural), Stereo
	SGEY0003610	Ohrknöpfe (intraaural), Stereo
	SGEY0000301	Ohrknopf (intraaural)
	SGEY0003208	Ohrknopf (intraaural)
	SGEY0003607	Ohrknöpfe (intraaural), Stereo
	SGEY0007301	Ohrknöpfe (intraaural), Stereo
	SGEY0003204	Ohrknopf (intraaural)
	SGBS0002102	Ohrknöpfe (intraaural), Stereo
	SGEY0000301	Ohrknopf (intraaural)
	SGBS0001606	Kopfhörer (supraaural)

Tabelle 21:

B Übersicht kabelloser Headsets

Hersteller	Typenbezeichnung	Aufbau
Motorola	RAZR H3	intraaural, kurzer Mikrophonausleger
	H300	intraaural, kurzer Mikrophonausleger
	H500	intraaural, kurzer Mikrophonausleger
	H670	intraaural, kurzer Mikrophonausleger
	H700	intraaural, kurzer Mikrophonausleger
	HS801	intraaural, kurzer Mikrophonausleger
	H605	intraaural, Hinter-dem-Ohr
	H9	intraaural, Ohrknopf
	H350	intraaural, kurzer Mikrophonausleger
	H800	intraaural, kurzer Mikrophonausleger
	HS820	intraaural, kurzer Mikrophonausleger
	HS850	intraaural, kurzer Mikrophonausleger
	S9	intraaural, kurzer Mikrophonausleger
	Nokia	BH-903
BH-903		intraaural, kurzer Mikrophonausleger
BH-803		intraaural, kurzer Mikrophonausleger
BH-604		zirkumaural, Kopfhörer / Stereo
BH-602		intraaural, kurzer Mikrophonausleger
BH-701		intraaural, kurzer Mikrophonausleger
BH-303		intraaural, Kompakt
BH-208		intraaural, Kompakt
BH-301		intraaural, kurzer Mikrophonausleger
BH-201		intraaural, kurzer Mikrophonausleger
BH-100		intraaural, Kompakt
BH-205		intraaural, Kompakt
BH-801		intraaural, kurzer Mikrophonausleger
BH-302		intraaural, kurzer Mikrophonausleger
BH-207		intraaural, kurzer Mikrophonausleger
BH-204		intraaural, kurzer Mikrophonausleger
BH-202		intraaural, kurzer Mikrophonausleger
BH-203		intraaural, Kompakt
BH-501		supraaural, Kopfhörer / Stereo
BH-500		intraaural, Ohrknöpfe / Stereo / Bluetooth Remote Unit (über Kabel verbunden)
BH-700		intraaural, kurzer Mikrophonausleger
BH-600		intraaural, kurzer Mikrophonausleger
BH-300		intraaural, kurzer Mikrophonausleger
BH-601		supraaural, Kopfhörer / Stereo
BH-900		intraaural, Mikrofonausleger
BH-800		intraaural, Kompakt
BH-200		intraaural, Kompakt
HS-36W		intraaural, kurzer Mikrophonausleger
HS-26W		intraaural, kurzer Mikrophonausleger
HS-13W		intraaural, Ohrknopf / Bluetooth Remote Unit (über Kabel verbunden)

<i>Fortsetzung</i> Hersteller	Typbezeichnung	Aufbau
Samsung	WKT150HBEG/XSA WKT170HBEG/XSA AWEP200HBECXSA SBH100HBEG/XSA ASBH170EBE	intraaural, kurzer Mikrofonausleger intraaural, kurzer Mikrofonausleger intraaural, kurzer Mikrofonausleger supraaural, Kopfhörer / Stereo supraaural, Kopfhörer / Stereo
LG:	HBM-550 HBM-500 HBM-750 HBS-200 HBM-730 HBM-560	intraaural, Kompakt intraaural, kurzer Mikrofonausleger intraaural, kurzer Mikrofonausleger supraaural, Kopfhörer / Stereo intraaural, kurzer Mikrofonausleger intraaural, Kompakt
Jabra	BT8010 BT2010 BT3010 BT500v BT5010 BT5020 JX10 BT135 BT160 BT125 BT250v	intraaural, kurzer Mikrofonausleger intraaural, kurzer Mikrofonausleger intraaural, kurzer Mikrofonausleger intraaural, Hinter-dem-Ohr, Mikrofonausleger intraaural, Kompakt intraaural, Hinter-dem-Ohr, Mikrofonausleger intraaural, Kompakt intraaural, kurzer Mikrofonausleger intraaural, kurzer Mikrofonausleger intraaural, Kompakt intraaural, Hinter-dem-Ohr, Mikrofonausleger
Logitech	Mobile Pro Headset Mobile Traveller Headset Mobile Freedom Headset Mobile Express Headset	supraaural, Mikrofonausleger intraaural, kurzer Mikrofonausleger intraaural, kurzer Mikrofonausleger intraaural, kurzer Mikrofonausleger
Apple	iPhone Bluetooth Headset	intraaural, kurzer Mikrofonausleger

Tabelle 22: