

# **Forschungsprojekt:**

## **Auswirkung der Exposition mit starken statischen Magnetfeldern auf die kognitive Leistungsfähigkeit von Probanden**

### **Erster Bericht an das Bundesamt für Strahlenschutz**

#### **Arbeitspaket 6.1: Sichtung der Literatur**

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.

#### **Berichtbeteiligte:**

Prof. Dr. Dr. Wolfhard Semmler  
Leiter der Abteilung für Medizinische Physik in der Radiologie  
Deutsches Krebsforschungszentrum  
Im Neuenheimer Feld 280  
69120 Heidelberg  
Tel\_1: +49 6221 42 2550 direkt  
Tel\_2: +49 6221 42 2552 Sek. Fr. Koch  
Tel\_3: +49 6221 42 2553 Sek. Fr. Fritz  
Fax: +49 6221 42 2613  
Net: [office.e020@dkfz.de](mailto:office.e020@dkfz.de)

Prof. Dr. med. Andreas Meyer-Lindenberg  
Direktor des Zentralinstituts für Seelische Gesundheit  
J5  
68159 Mannheim  
Tel\_1: +49 621 1703 2001 direkt  
Tel\_2: +49 621 1703 2002 Sek. Fr. Steymann  
Fax: +49 621 1703 2005  
Net: [a.meyer-lindenberg@zi-mannheim.de](mailto:a.meyer-lindenberg@zi-mannheim.de)

Prof. Dr. Herta Flor  
Wissenschaftliche Direktorin  
Institut für Neuropsychologie und Klinische Psychologie  
Zentralinstitut für Seelische Gesundheit (ZI)  
J 5  
68159 Mannheim  
Tel\_1: +49 621 1703 6301 direkt  
Tel\_2: +49 621 1703 6302 Frau Angelika Bauder  
Fax: +49 621 1703 6305  
Net: [herta.flor@zi-mannheim.de](mailto:herta.flor@zi-mannheim.de)

Dr. rer. nat. Jaane Rauschenberg  
Deutsches Krebsforschungszentrum  
Im Neuenheimer Feld 280  
69120 Heidelberg  
Tel: +49 6221 42 2533  
Fax: +49 6221 42 2572  
Net: [j.rauschenberg@dkfz.de](mailto:j.rauschenberg@dkfz.de)

Prof. (apl) Dr. med. Michael Deuschle  
Zentralinstituts für Seelische Gesundheit  
J5  
68159 Mannheim  
Tel\_1: +49 621 1703 2564 direkt  
Tel\_2: +49 621 1703 2322 Sek. Fr. Schäfer  
Fax: +49 621 1703 2325  
Net: [michael.deuschle@zi-mannheim.de](mailto:michael.deuschle@zi-mannheim.de)

Dr. Dipl.-Psych. Patric Meyer  
Zentralinstitut für Seelische Gesundheit  
J5  
68159 Mannheim  
Tel.: +49 621 1703 6314  
Net: [patric.meyer@zi-mannheim.de](mailto:patric.meyer@zi-mannheim.de)

Dr. Dipl.-Psych. Frauke Nees  
Zentralinstitut für Seelische Gesundheit  
J5  
68159 Mannheim  
Tel.: +49 621 1703 6306  
Net: [frauke.nees@zi-mannheim.de](mailto:frauke.nees@zi-mannheim.de)

## **Inhaltsverzeichnis**

1.	Einleitung .....	4
2.	Medizinische Aspekte .....	5
2.1.	Bewegungsinduzierte Ströme / magnetohydrodynamische Effekte.....	5
2.2.	Sensorische Effekte .....	6
3.	Psychologische Aspekte: Auswirkung auf die Neurokognition.....	7
4.	Physikalisch-technische Aspekte .....	8
4.1.	Bewegungsabläufe .....	8
4.2.	Art der Präsentation.....	9
4.3.	Expositionsmessungen .....	9
4.4.	Kontrollbedingung bei 0 T .....	9
5.	Schlussfolgerungen für das Projekt.....	10
6.	Literatur .....	12

# 1. Einleitung

Aufgabe dieser Studie ist es, die Auswirkung der Exposition von starken statischen Magnetfeldern, wie sie bei Magnetresonanz (MR)-Systemen auftreten, und der Exposition von kontrollierten Bewegungen im Streufeld auf die Kognition, die Reaktionsfähigkeit, die Feinmotorik, sowie auf Stresssymptome und die Belastbarkeit von Probanden zu untersuchen. Dabei sollen Untersuchungen im Streufeld eines 7T, 3T und 1,5 T MR-Systems und unter Kontrollbedingungen eines Tomographen ohne Magnetfeld stattfinden.

Ziel der Studie ist die Überprüfung, ob und in welchem Maße das Wohlbefinden und die kognitive Leistungsfähigkeit von Patienten und im Besonderen des medizinischen Personals durch die Exposition mit statischen Magnetfeldern beeinträchtigt werden. Wegen der zunehmenden Verbreitung der MR-Geräte und der Verwendung von immer höheren Magnetflussdichten ist eine ausführliche Sicherheitsstudie, wie sie in diesem Projekt angestrebt wird, von dringender Notwendigkeit. Durch die bisher schwache experimentelle Datenlage zu diesem Thema wurde in einem ICNIRP-Statement zum Forschungsbedarf im Zusammenhang mit der Einführung neuer Technologien festgestellt, dass systematische Untersuchungen unter kontrollierten Bedingungen durchgeführt werden müssen [1].

Mit der ansteigenden Magnetflussdichte der heute verwendeten MR-Systeme wachsen auch die allgemeinen Risiken durch das statische Magnetfeld. Prinzipiell sind folgende Auswirkungen denkbar:

- Kräfte und Drehmomente
- Auswirkung auf Nervenleitung
- Auswirkung auf die Reproduktion
- Bewegungsinduzierte Ströme / magnetohydrodynamische Effekte
- Sensorische Effekte
- Auswirkung auf die kognitive Leistungsfähigkeit

Kräfte und Drehmomente spielen hauptsächlich bei der Verwendung von paramagnetischen und insbesondere ferromagnetischen Materialien eine Rolle [2]. Effekte im Inneren des Körpers, wie die Erhöhung des Venendrucks durch die Kraft in Richtung abnehmender Magnetfeldstärke von diamagnetischen Materialien (Moses-Effekt) sind selbst bei 10 T nicht klinisch relevant [3]. Modellrechnungen zeigen, dass selbst eisenhaltige Erythrozyten im 8 T Feld höchstens einer Kraftwirkung von ca. 16% des Gravitationsfeldes unterliegen [4]. Allerdings konnte bei Hamstern bereits in einem 0,5 T Feld eine Minderung der kapillaren Flussgeschwindigkeit von Erythrozyten um bis zu 40% festgestellt werden [5].

Auswirkungen auf die Nervenleitung sind prinzipiell denkbar, da die bewegte elektrische Ladung eines Aktionspotenziales im Magnetfeld der Lorenzkraft ausgesetzt ist. Der resultierende Hall-Effekt kann – abhängig von der Ausrichtung der Nerven im Feld – zu einer Änderung der Reizleitung führen. Modellrechnungen zeigen, dass ein Feld von 24 T notwendig wäre, um die Nervenleitgeschwindigkeit um 10% zu ändern [6]

Die Datenlage zur Auswirkung der statischen Magnetfelder auf die Reproduktion ist schwach. Für statische Magnetfelder bis 10 T konnte kein Effekt auf Zellwachstum oder Genotoxizität nachgewiesen werden [7]. In anderen Untersuchungen fand sich kein Anhaltspunkt für DNA-Schädigungen bei statischen Feldern von 3 T [8]. Die embryonale Entwicklung von Fröschen im 8 T Feld zeigte sich unbeeinflusst [9]. Unklar bleiben die Befunde zu reproduktiven Funktionen mit 15%-iger Reduktion testikulärer Spermien bei Mäusen nach Exposition im 1,5 T-Feld [10], während andere Untersucher bei kurzzeitiger oder chronischer Exposition (35 Tage) im 0,7 T Feld keinerlei Veränderungen von Spermienproduktion oder –beweglichkeit bei Mäusen fanden [11; 12]. Entsprechende Human-daten aus experimentellen Untersuchungen liegen nicht vor, wobei epidemiologische Untersuchungen bei weiblichem MR-Personal keinen Einfluss auf Fertilität, Frühgeburtslichkeit oder Geburtsgewicht fanden [13].

Die anderen oben genannten Auswirkungen der statischen Magnetfelder haben eine übergeordnete Bedeutung für dieses Projekt und werden im Folgenden genauer betrachtet. Dabei werden die Effekte in medizinische und psychologische Aspekte unterteilt. Ein weiterer Abschnitt des Berichts befasst sich mit physikalisch-technischen Aspekten der vorausgegangenen Untersuchungen wie die Messung der Magnetfeldexposition, Durchführung von Bewegungsexperimenten und Realisierung von Kontrollbedingungen im 0T-Feld. Abschließend werden die Konsequenzen für das Projekt aufgeführt, die sich aus den gewonnenen Kenntnissen durch das Literaturstudium ergaben.

## **2. Medizinische Aspekte**

### **2.1. Bewegungsinduzierte Ströme / magnetohydrodynamische Effekte**

Wenn Ionenlösungen (z.B. Zellen oder Blut) im magnetischen Feld bewegt werden (z.B. Tisch- oder Kopfbewegung oder Blutfluss), wird ein zusätzliches elektrisches Feld aufgebaut. Bezüglich der kardialen Reizleitung ist es nachgewiesen, dass es ab 0,3 T zu Verstärkungen der T-Wellen im EKG kommt, die Repolarisierungsvorgänge abbilden [14]. Die internationale elektrotechnische Kommission (IEC) nimmt an, dass durch die Verstärkung der T-Wellen bis 7 T keine Sicherheitsprobleme zu erwarten sind [15]. Für statische Felder bis 10 T

werden resultierende Stromdichten im Sinoatrialknoten bis  $200 \text{ mA/m}^2$  angenommen, die deutlich unter den physiologischen Stromdichten von ca.  $1000 \text{ mA/m}^2$  liegen [16]. Flusspotenziale der Koronararterien bewirken entgegen gesetzte Polarität auf gegenüberliegenden Herzseiten, so dass das Risiko für Reentry-Arhythmien als erhöht erachtet wird [17]. Obwohl entsprechende Beobachtungen am Menschen bis 8 T bislang nicht vorliegen, scheint eine systematische Untersuchung sinnvoll.

Bezüglich des Blutflusses wird angenommen, dass bis 10 T keine Probleme durch induzierte Spannungen in der Aorta zu erwarten sind [18]. In diesen Feldstärken werden Blutdruckerhöhungen von 0,2% [19] und eine Reduktion des aortalen Blutflusses um 5% erwartet [16].

Eine Auswirkung einer Feldstärke von 1,5 T auf die Kreislauffunktion von Affen und Hunden konnte nicht nachgewiesen werden [16]. Ebenso konnte bei Schweinen kein Effekt auf linksventrikulären Druck, Auswurfraction oder kardiale Enzyme bei 8 T nachgewiesen werden [20]. Untersuchungen von Probanden ( $n=25$ ) bei Feldstärken von 1,5 bis 8 T wiesen klinisch nicht signifikante Erhöhungen des systolischen Blutdruckes um 3%, jedoch keine Veränderung von Herz- oder Atemfrequenz, EKG oder Blutoxygenierung oder Körpertemperatur nach [21; 22; 23]. Chakeres et al. bestimmten außerdem die Änderung des Blutdruckes im Zusammenhang mit der Position des Probanden [21]. Der Anstieg aufgrund des Magnetfeldes war nur halb so groß wie der Anstieg, der darauf zurückzuführen ist, dass die Person von der Rückenlage in eine sitzende Position wechselt. Im Vergleich von 0,5 T mit 8 T bei 25 gesunden Probanden zeigte sich kein systematischer Effekt auf die Herzrate [21].

Es gibt demnach eine beachtliche Literatur, die auf Grundlage von Modellrechnungen den potenziellen Einfluss starker Felder auf Durchblutung und Reizleitung abschätzt. Sowohl diese medizinphysikalischen Abschätzungen als auch die praktische Erfahrung sprechen gegen relevante Nebenwirkungen in diesem Bereich. Auswirkungen auf die kardiale Reizleitung und erhöhtes Risiko für ektope kardiale Reizgenerierung sind prinzipiell denkbar. Systematische, experimentelle Untersuchungen, die idealerweise eine Kontrolle von EKG und Rhythmus beinhalten, fehlen weitestgehend.

## **2.2. Sensorische Effekte**

Bei Bewegung im Feld, wie sie bei Tischbewegungen mit dem Probanden im Feld oder bei schnellen Kopfbewegungen auftreten, sind transiente Phänomene wie Schwindelgefühle, Übelkeit, metallischer Geschmack oder Wahrnehmung von Lichtblitzen (Magnetophosphene) beschrieben [24; 25]. Diese Beobachtungen decken sich mit Untersuchungen, in denen Arbeiter in der MR-Magnetfertigung mit Kontrollgruppen verglichen wurden und bei denen –

abhängig von Expositionsdauer und Bewegung im Feld – vermehrt Schwindel, Metallgeschmack oder Konzentrationsstörungen beschrieben wurden [26]. Dies genauer und kontrollierter zu untersuchen erscheint besonders wichtig, um Beeinträchtigungen des Operators und damit letztendlich Risiken für den Patienten zu erkennen.

Die Wahrnehmung von Magnetophosphenen im abgedunkelten Raum, die bei schnellen Augenbewegungen im Feld auftreten können, werden auf Reizung diamagnetischer Stäbchenzellen im schwachen Drehmoment des Feldes zurückgeführt und gelten als unbedenklich [3; 4].

Schnelle Kopfbewegungen können Schwindel und Übelkeit wie bei Reisekrankheit bewirken [27]. Als Erklärung werden bewegungsinduzierte Spannungen und Druckschwankungen der Bogengänge des Innenohres sowie Unterschiede magnetischer Suszeptibilitäten von Gleichgewichtsorgan und Umgebung angenommen [27].

Gelegentlich beschriebener Metallgeschmack rührt nicht von Metallfreisetzung aus Amalgam oder Zahnersatz, sondern von elektrolytischen Vorgängen im Speichel, die durch induzierte Ströme ausgelöst werden [28; 29].

Simulationen legen nahe, dass bei einem 7 T Feld ab einer Bewegung von 80 cm/s elektrische Felder induziert werden, die an der Stimulationsschwelle peripherer Nerven liegen. Allerdings sind typische Geschwindigkeiten von Patientenliegen deutlich langsamer (ca. 20 cm/s), so dass eher schnelle Augen- und Körperbewegungen Effekte auslösen könnten [30].

Es liegen keine Daten zur Modulation der Stressreagibilität in starken Feldern vor.

### **3. Psychologische Aspekte: Auswirkung auf die Neurokognition**

Die Sichtung einschlägiger Literatur zu Einflüssen von homogenen und inhomogenen statischen Magnetfeldern auf die kognitive Leistungsfähigkeit von Menschen ergab deutliche Hinweise auf einen Einfluss statischer Magnetfelder mit Flussdichten zwischen 1,5 und 8 T auf verschiedene neurokognitive Funktionen. Neben einer leicht reduzierten Leistung in der visuellen Kontrastempfindlichkeit im Nahbereich [31; 32; 33] konnte eine reduzierte Geschwindigkeit bei der Auge-Hand-Koordination bei 1,5 T festgestellt werden, die darüber hinaus mit zunehmender Magnetfeldstärke weiter beeinträchtigt wurde [34]. Die Ergebnisse über verschiedene Studien hinweg erwiesen sich allerdings als nicht immer konsistent, so dass es möglich erscheint, dass diese nicht in erster Linie auf das statische Magnetfeld an sich zurückzuführen sind, sondern auf die durch Bewegungen verursachten zeitlich variierenden magnetischen Felder.

Neben den bereits erwähnten Auswirkungen konnten Beeinträchtigungen bei einer visuellen Nachverfolgungsaufgabe festgestellt werden [32]. Auch hier spielte die Stärke des umgebenden Magnetfeldes eine entscheidende Rolle. Mit stärker werdendem Magnetfeld stieg auch die Beeinträchtigung. Die Bearbeitungszeit des visuellen Nachverfolgungstests wurde ebenfalls durch Kopfbewegungen negativ beeinflusst. Allerdings fanden die kontrollierten Kopfbewegungen und die Tests sequentiell statt. Hierbei ist davon auszugehen, dass die Auswirkungen von Bewegungen nicht über einen so langen Zeitraum persistieren.

An anderer Stelle konnte eine geringe Beeinträchtigung der Wiedererkennungslleistung (Hopkins Verbal Learning Test) bei 8 T festgestellt werden [21]. In neueren Untersuchungen konnte gezeigt werden, dass nicht in erster Linie die Umgebungsbedingungen wie Rückenlage und Einengung etc. sondern tatsächlich das statische Magnetfeld für die deutlich verlangsamte Reaktionszeit bei Detektions- (+30%) und Diskriminationsaufgaben (+18%) verantwortlich ist [35]. In der gleichen Publikation wurde die zeitliche Auflösung visueller Stimuli gemessen. Diese beschreibt das Zeitintervall, das benötigt wird, um zwei Reize als aufeinander folgend oder gleichzeitig auftretend wahrzunehmen. Auch hier wurde eine Beeinträchtigung festgestellt, die nur auf das Magnetfeld an sich und nicht die Umgebungsbedingungen zurück zu führen war.

## **4. Physikalisch-technische Aspekte**

### **4.1. Bewegungsabläufe**

Wie bereits erwähnt, hat hauptsächlich die Arbeitsgruppe um de Vocht signifikante Ergebnisse zur Untersuchung der Auswirkung auf die kognitive Leistungsfähigkeit gemessen [26; 32; 36]. Diese Gruppe hat ausführliche Untersuchungen der Bewegung im Streufeld durchgeführt, allerdings ohne dabei die Tests während der Bewegung vorzunehmen. Die Zielstellung des Projekts, die Beeinträchtigung des an MR-Systemen tätigen Personals (z.B. des operierenden Arztes bei interventionellen MR-Verfahren) zu untersuchen, schließt jedoch die Durchführung der Tests bei Bewegung unbedingt mit ein. Die in der Literatur zu findenden Bewegungsabläufe wie Kopfdrehung [32; 36], Augenbewegungen [24] oder die einem Operateur nachempfundenen Bewegungen [31] sind schwer zu vergleichen und rechnerisch zu analysieren. Die im Antrag vorgesehene passive Bewegung der Probanden durch Verfahren der Patientenliege ermöglicht die Analyse definierter Bewegungsstrecken und -dimensionen und deren Auswirkungen.

Um die Geschwindigkeit des Bewegungsablaufs zu bestimmen, können numerische Simulationen von Crozier et al. [30; 37] herangezogen werden. Darin wurde berechnet, dass für



ungeschirmte 7 Tesla-Magneten bei einer Geschwindigkeit der Patientenliege von 80 cm/s elektrische Felder induziert werden können, die an der Stimulationsschwelle peripherer Nerven liegen. Die in diesem Projekt verwendeten MR-Systeme mit automatischer Liegebewegung (3 T und 1,5 T) besitzen eine maximale Liegegengeschwindigkeit von lediglich 20 cm/s, so dass keine Nervenstimulationen zu erwarten sind. Wie bereits in Abschnitt 2.2 besprochen wurde, können Schwindel und Übelkeit bereits bei wesentlich niedrigeren Geschwindigkeiten auftreten. In einer Anweisung der *Health Protection Agency UK* wird empfohlen, eine Magnetfeldänderung  $dB/dt$  von 1 T/s nicht zu überschreiten [38]. Dies sollte bei dem in diesem Projekt verwendeten Bewegungsablauf berücksichtigt werden.

#### **4.2. Art der Präsentation**

Die Literaturrecherche ergab, dass in den vorangegangenen Untersuchungen die neurokognitiven Tests weitestgehend an einem Tisch sitzend sequentiell zu den Bewegungsabläufen durchgeführt wurden [32; 36]. Im vorliegenden Projekt soll möglichst die Bewegung gleichzeitig mit der Testung stattfinden. Übliche Projektoren, wie sie in der funktionellen MRT verwendet werden, führen dazu, dass sich bei der Tischbewegung die Projektionsfeldgröße ändert, weshalb Testung und Probandenbewegung nur sequentiell möglich sind. Dies bedeutet eine Verlängerung der Untersuchungszeit. Bei der Verwendung von Projektionsbrillen kann eine gleichzeitige Bewegung und Testung realisiert werden. Projektionsbrillen sind jedoch nur bis zu einer magnetischen Flussdichte von 3 T kommerziell erhältlich. Somit beeinflusst die Art der Projektion die Zeit, die zur neuropsychologischen Testung zur Verfügung steht und somit die Anzahl an möglichen Tests.

#### **4.3. Expositionsmessungen**

Die Messung einer Exposition mit statischen Magnetfeldern wurde in den erwähnten Publikationen lediglich durch Angabe der magnetischen Flussdichte und der Aufenthaltsdauer der Probanden berücksichtigt. Um die Exposition bei Bewegung im Streufeld des Magneten zu bestimmen, hat Glover et. al. eine Methode zur quantitativen Bestimmung der induzierten elektrischen Felder entwickelt [39; 40]. Dabei sind unabhängige Messungen der zeitlichen Veränderung des Magnetfelds  $dB/dt$  und des induzierten elektrischen Felds  $E_{ind}$  möglich.

#### **4.4. Kontrollbedingung bei 0 T**

In mehreren berichteten Experimenten wurden nicht ausreichend gute Kontrollbedingungen geschaffen. Oft wurden die Probanden nicht in einer 0 T Bedingung untersucht, sondern in einem 0,05 T Magnetfeld (z.B. [21]). Hierbei handelt es sich allerdings bereits um das Tausendfache des Erdmagnetfeldes, so dass eventuelle Auswirkungen bei dieser Feldstärke

nicht a priori ausgeschlossen werden sollten. Auch ist über das Verhältnis von Magnetfeldstärke und kognitiven Beeinträchtigungen erst wenig bekannt. Obwohl intuitiv ein linearer Bezug anzunehmen wäre, ist das tatsächliche Verhältnis völlig unklar. Neuere Untersuchungen zeigen, dass der Einsatz eines stillgelegten MR-Systems (eines sog. Mock-Scanners), bei dem ein Magnetfeld in etwa der Stärke des Erdmagnetfeldes besteht, sinnvoll ist, um genaue Ursachen kognitiver Veränderungen im Zusammenhang mit MR festzustellen [35].

## **5. Schlussfolgerungen für das Projekt**

Im Hinblick auf die in den berichteten Studien durchgeführten neuropsychologischen Testbatterien muss abschließend festgehalten werden, dass diese häufig kein umfassendes kognitives Leistungsspektrum abdecken konnten. Darüber hinaus erwies sich die Testung über die verschiedenen Studien hinweg als weitestgehend redundant. Der Einsatz weiterer neuropsychologischer Tests und somit die Erweiterung der im Antrag genannten Testbatterie kann nach intensiver Literaturrecherche als essentiell angesehen werden. Neben Kontrastwahrnehmung, Auge-Hand-Koordination, Arbeitsgedächtnis sowie visuelle Nachverfolgung sind auch Aufmerksamkeitsprozesse sowie visuelles Gedächtnis und visuelle Diskriminationsfähigkeit grundlegende und somit entscheidende Faktoren kognitiver Leistungsfähigkeit. Folgende Tests sollen daher in die neuropsychologische Testbatterie mit aufgenommen werden:

1. Attention Network Tests (ANT) [41]: Dieser Test erfasst die drei Aufmerksamkeitsnetzwerke der „Aufmerksamkeitsaktivierung“, „Orientierung“ und „exekutiven Kontrolle“. Nach rechts oder links weisende Pfeile werden über oder unter einem Fixationskreuz dargeboten. Die Aufgabe der Versuchsperson ist es jeweils anzugeben, ob der Pfeil nach rechts oder links zeigt. Diese Pfeile werden zum Teil durch zusätzliche neutrale, kongruente oder inkongruente Pfeile flankiert. Darüber hinaus werden diese Stimuli manchmal durch einen vorangehenden Hinweisreiz antezediert.
2. Rekognitionsgedächtnis-Test: Dieser Test untersucht das verbale Langzeitgedächtnis. Der Proband sieht eine Liste von Wörtern und muss diese Wörter aus einer Auswahl von Wörtern (neue und zuvor gesehene Wörter) wieder erkennen.
3. Test zur visuellen Diskriminierung: Hierbei werden den Probanden Buchstaben in schneller Abfolge präsentiert. Ein Buchstabe wird als Target, d.h. als Zielreiz vorgegeben. Die Aufgabe des Probanden ist es nun, immer bei Erscheinen dieses Zielreizes eine Taste zu drücken.

Das in Abschnitt 4.2 angesprochene Problem der Art der Präsentation (Projektor vs. Brille) konnte folgendermaßen gelöst werden. Eine für 1,5 T konzipierte, am Zentralinstitut in Mannheim nicht weiter verwendete Brille wurde am 7 T MR-System am DKFZ getestet. Die Brille behielt ihre Funktionsfähigkeit unter dem hohen Magnetfeld bei, so dass die Brille für die neuropsychologische Testung verwendet werden kann. Somit sind die oben angegebenen Tests auch während der kontrollierten Liegenbewegung zu realisieren.

Da keine Studie zur passiven Patientenbewegung mittels Verfahren der Patientenliege existiert, konnte somit keine Information über Probandenplatzierung aus vorhandener Literatur gewonnen werden. Die Modalitäten sollten der Situation einer typischen MR-geführten Intervention entsprechen, bei der sich der operierende Arzt in einem Bereich zwischen ca. 20 cm vor und 20 cm in der Bohrung befindet. Die Probandenpositionierung sollte entsprechend erfolgen, d.h. der Kopf sollte etwa in der Mitte der Patientenliege gelagert werden. Bei einem Verfahren der Liege um 40 cm durchläuft ein entsprechend positionierter Proband mit seinem Kopf genau den geforderten Bereich.

Die von Glover und Bowtell vorgestellte Methode zur Messung der Exposition bei Bewegung im Streufeld [39; 40] wird zur Quantifizierung der geplanten Bewegungsabläufe in diesem Projekt herangezogen. Dies ermöglicht eine von der individuellen Probandenwahrnehmung unabhängige Messung des physikalischen Effekts der Bewegung im Streufeld. Außerdem kann somit abgeschätzt werden, ob die in der Literatur angegebene oft sehr unterschiedliche Positionierung der Probanden einen Einfluss auf die Testergebnisse hat. Ein erster Prototyp des Sensors zur Messung der zeitlichen Änderung des Magnetfelds  $dB/dt$  bei Bewegung wurde bereits entwickelt.

Um die 0 T-Bedingung realisieren zu können, wurde im Projektantrag die Verwendung eines am DKFZ ausrangierten MR-Systems angegeben. Aufgrund von Sanierungsarbeiten ist der Zugang zum Gerät seit kurzem gar nicht mehr möglich. Eine Alternative stellt das Herunterfahren des Magnetfelds eines der anderen MR-Systeme für mehrere Wochen dar. Die Systemausfallzeiten sind für ein derartiges Anliegen jedoch sehr hoch. Es wird eine Lösung mit einem ausrangierten MR-System angestrebt.

## 6. Literatur

- [1] ICNIRP STATEMENT ON EMF-EMITTING NEW TECHNOLOGIES. The International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection, c/o BfS, G. Ziegelberger, Ingolstaedter Landstr. 1, 85764 Oberschleissheim, Germany. (2007).
- [2] J.F. Schenck, Safety of strong, static magnetic fields. *J Magn Reson Imaging* 12 (2000) 2-19.
- [3] J.F. Schenck, Physical interactions of static magnetic fields with living tissues. *Prog Biophys Mol Biol* 87 (2005) 185-204.
- [4] A. Kangarlu, and P.M.L. Robitaille, Biological effects and health implications in magnetic resonance imaging. *Concepts in Magnetic Resonance* 12 (2000) 321-359.
- [5] G. Brix, S. Strieth, D. Strelczyk, M. Dellian, J. Griebel, M.E. Eichhorn, W. Andra, and M.E. Bellemann, Static magnetic fields affect capillary flow of red blood cells in striated skin muscle. *Microcirculation* 15 (2008) 15-26.
- [6] J.P. Wikswo, and J.P. Barach, An estimate of the steady magnetic field strength required to influence nerve conduction. *IEEE Trans Biomed Eng* 27 (1980) 722-3.
- [7] J. Miyakoshi, The review of cellular effects of a static magnetic field. *Science and Technology of Advanced Materials* 7 (2006) 305-307.
- [8] N.F. Schwenzer, R. Bantlon, B. Maurer, R. Kehlbach, C. Schraml, C.D. Claussen, and E. Rodegerdts, Detection of DNA double-strand breaks using gamma H(2)AX after MRI exposure at 3 Tesla: An in vitro study. *Journal of Magnetic Resonance Imaging* 26 (2007) 1308-1314.
- [9] S. Ueno, M. Iwasaka, and K. Shiokawa, Early Embryonic-Development of Frogs under Intense Magnetic-Fields up to 8-T. *Journal of Applied Physics* 75 (1994) 7165-7167.
- [10] V.R. Narra, R.W. Howell, S.M. Goddu, and D.V. Rao, Effects of a 1.5-tesla static magnetic field on spermatogenesis and embryogenesis in mice. *Investigative Radiology* 31 (1996) 586-590.
- [11] L. Tablado, F. Perez-Sanchez, J. Nunez, M. Nunez, and C. Soler, Effects of exposure to static magnetic fields on the morphology and morphometry of mouse epididymal sperm. *Bioelectromagnetics* 19 (1998) 377-383.
- [12] L. Tablado, C. Soler, M. Nunez, J. Nunez, and F. Perez-Sanchez, Development of mouse testis and epididymis following intrauterine exposure to a static magnetic field. *Bioelectromagnetics* 21 (2000) 19-24.
- [13] E. Kanal, J. Gillen, J.A. Evans, D.A. Savitz, and F.G. Sherlock, Survey of Reproductive Health among Female Mr Workers. *Radiology* 187 (1993) 395-399.
- [14] D.E. Beischer, and J.C. Knepton, Influence of Strong Magnetic Fields on Electrocardiogram of Squirrel Monkeys ( *Saimiri Sciureus* ). *Aerospace Medicine* 35 (1964) 939-944.
- [15] Europäische Norm EN60601-2-23. IEC 60601-2-33, Brüssel, 2002.
- [16] T.S. Tenforde, Magnetically induced electric fields and currents in the circulatory system. *Prog Biophys Mol Biol* 87 (2005) 279-88.

- [17] A.V. Holden, The sensitivity of the heart to static magnetic fields. *Prog Biophys Mol Biol* 87 (2005) 289-320.
- [18] Y. Kinouchi, H. Yamaguchi, and T.S. Tenforde, Theoretical analysis of magnetic field interactions with aortic blood flow. *Bioelectromagnetics* 17 (1996) 21-32.
- [19] J.R. Keltner, M.S. Roos, P.R. Brakeman, and T.F. Budinger, Magneto-hydrodynamics of blood flow. *Magn Reson Med* 16 (1990) 139-49.
- [20] A. Kangarlu, R.E. Burgess, H. Zhu, T. Nakayama, R.L. Hamlin, A.M. Abduljalil, and P.M. Robitaille, Cognitive, cardiac, and physiological safety studies in ultra high field magnetic resonance imaging. *Magn Reson Imaging* 17 (1999) 1407-16.
- [21] D.W. Chakeres, A. Kangarlu, H. Boudoulas, and D.C. Young, Effect of static magnetic field exposure of up to 8 Tesla on sequential human vital sign measurements. *J Magn Reson Imaging* 18 (2003) 346-52.
- [22] I.C. Atkinson, L. Renteria, H. Burd, N.H. Pliskin, and K.R. Thulborn, Safety of human MRI at static fields above the FDA 8 T guideline: sodium imaging at 9.4 T does not affect vital signs or cognitive ability. *J Magn Reson Imaging* 26 (2007) 1222-7.
- [23] D.W. Chakeres, R. Bornstein, and A. Kangarlu, Randomized comparison of cognitive function in humans at 0 and 8 Tesla. *J Magn Reson Imaging* 18 (2003) 342-5.
- [24] J.F. Schenck, Health and physiological effects of human exposure to whole-body four-tesla magnetic fields during MRI. *Ann N Y Acad Sci* 649 (1992) 285-301.
- [25] J.M. Theysohn, S. Maderwald, O. Kraff, C. Moeninghoff, M.E. Ladd, and S.C. Ladd, Subjective acceptance of 7 Tesla MRI for human imaging. *MAGMA* 21 (2008) 63-72.
- [26] F. de Vocht, H. van Drooge, H. Engels, and H. Kromhout, Exposure, health complaints and cognitive performance among employees of an MRI scanners manufacturing department. *J Magn Reson Imaging* 23 (2006) 197-204.
- [27] P.M. Glover, I. Cavin, W. Qian, R. Bowtell, and P.A. Gowland, Magnetic-field-induced vertigo: a theoretical and experimental investigation. *Bioelectromagnetics* 28 (2007) 349-61.
- [28] H. Muller-Miny, D. Erber, H. Moller, B. Muller-Miny, and G. Bongartz, Is there a hazard to health by mercury exposure from amalgam due to MRI? *J Magn Reson Imaging* 6 (1996) 258-60.
- [29] I.D. Cavin, P.M. Glover, R.W. Bowtell, and P.A. Gowland, Thresholds for perceiving metallic taste at high magnetic field. *J Magn Reson Imaging* 26 (2007) 1357-61.
- [30] S. Crozier, A. Trakic, and H. Wang, Numerical study of currents in workers induced by body motion around high-untra-high field MRI magnets. *J Magn Reson Imaging* 26 (2007) 1261-1277.
- [31] F. de Vocht, B. van-Wendel-de-Joode, H. Engels, and H. Kromhout, Neurobehavioral effects among subjects exposed to high static and gradient magnetic fields from a 1.5 Tesla magnetic resonance imaging system--a case-crossover pilot study. *Magn Reson Med* 50 (2003) 670-4.
- [32] F. de Vocht, T. Stevens, P. Glover, A. Sunderland, P. Gowland, and H. Kromhout, Cognitive effects of head-movements in stray fields generated by a 7 Tesla whole-body MRI magnet. *Bioelectromagnetics* 28 (2007) 247-55.

- [33] F. de Vocht, P. Glover, H. Engels, and H. Kromhout, Pooled analyses of effects on visual and visuomotor performance from exposure to magnetic stray fields from MRI scanners: application of the Bayesian framework. *J Magn Reson Imaging* 26 (2007) 1255-60.
- [34] F. de Vocht, L. Liket, A. De Vocht, T. Mistry, P. Glover, P. Gowland, and H. Kromhout, Exposure to alternating electromagnetic fields and effects on the visual and visuomotor systems. *Br J Radiol* 80 (2007) 822-8.
- [35] J.R. Foucher, D. Gounot, B.T. Pham, C. Marrer, and A. Dufour, 'Magnetized' brains are slower, The cognitive effects of fMRI. *Nature Precedings* hdl: 10101/npre 2008/2443.1 (2008).
- [36] F. de Vocht, T. Stevens, B. van Wendel-de-Joode, H. Engels, and H. Kromhout, Acute neurobehavioral effects of exposure to static magnetic fields: analyses of exposure-response relations. *J Magn Reson Imaging* 23 (2006) 291-7.
- [37] S. Crozier, and F. Liu, Numerical evaluation of the fields induced by body motion in or near high-field MRI scanners. *Prog Biophys Mol Biol* 87 (2005) 267-78.
- [38] Protection of Patients and Volunteers Undergoing MRI Procedures, Health Protection Agency UK, Documents of the National Radiological Protection Board, Volume 2, No. 1, 2008.
- [39] P.M. Glover, and R. Bowtell, Measurement of electric fields due to time-varying magnetic field gradients using dipole probes. *Physics in Medicine and Biology* 52 (2007) 5119-5130.
- [40] P.M. Glover, and R. Bowtell, Measurement of electric fields induced in a human subject due to natural movements in static magnetic fields or exposure to alternating magnetic field gradients. *Physics in Medicine and Biology* 53 (2008) 361-373.
- [41] A. Collie, P. Maruff, D.G. Darby, and M. McStephen, The effects of practice on the cognitive test performance of neurologically normal individuals assessed at brief test-retest intervals. *J Int Neuropsychology Soc* 9 (2003) 419-428.