

3 Wissenschaftlicher Hintergrund

3.1. MRT kontrollierte Führung endovaskulärer Katheter

Zuverlässige Verfahren zur Ortung endovaskulärer Katheter sind eine wichtige Voraussetzung für die Durchführung MRT gestützter Interventionen. Derzeit für konventionelle Röntgendurchleuchtung verfügbare Katheter sind oftmals mit metallischen Komponenten versehen, um u.a. eine höhere Biegeelastizität zu erreichen. Solche Katheter sind im Allgemeinen für Anwendungen in der MRT nicht geeignet, da die metallischen Komponenten durch Suszeptibilitätsartefakte zur Bildzerstörung führen und potentiell Hitzeeffekte induzieren können.³³⁻³⁵ Katheter, die hingegen ausschließlich aus Kunststoffen gefertigt werden, erzeugen im MRT kein Signal und sind folglich auf den MRT Aufnahmen nicht sichtbar.

Ein Anliegen unserer Arbeiten war es daher, zuverlässige und für den Patienten sichere Katheterführungsverfahren zu entwickeln. Idealerweise erzeugen solche Techniken einen guten Kontrast zwischen Katheter und der Hintergrundanatomie und ermöglichen eine automatische Ortung der Schicht, in der der Katheter geführt wird. Derzeit kann zwischen aktiven, passiven und Hybridverfahren zur Katheterortung unterschieden werden.

3.1.1 Aktive Verfahren zur Katheterortung

Aktive Verfahren basieren auf der Integration kleiner Empfangspulen in den Kathetern.^{19,20,36} Die Spulen senden bei Anregung durch Radiofrequenzimpulse Signale aus (recall echos), die über eine elektrische Verbindung im Katheterschaft an eine Empfangsstation weitergeleitet und mittels eines mathematischen Algorithmus im dreidimensionalen Raum geortet werden können. In diesen für die Signalübermittlung

notwendigen elektrischen Leitern können jedoch bei einer kritischen Länge von mehr als 20 cm (bei 1.5 Tesla Geräten) potentiell Hitzeeffekte induziert werden.^{37,38} Daher sind derzeit verfügbare aktive Verfahren für eine Anwendung am Patienten nicht zulässig.

3.1.2 Passive Verfahren zur Katheterortung

Passive Verfahren basieren auf der direkten Sichtbarmachung eines Katheters innerhalb der angeregten Schicht. Dafür werden in der Regel lokale Signalauslöschungen durch Suszeptibilitäts- und Feldinhomogenitätseffekte oder Signalverstärkungen durch MR Kontrastmittel genutzt.^{21-24,39,40} Diesen Verfahren ist gemeinsam, dass sie entweder einen nur geringen und oft unzureichenden Signalkontrast zwischen Katheter und Hintergrundanatomie erzeugen oder die von den Kathetern ausgehenden Signalauslöschungen so ausgedehnt sind, dass sie zu einer Bildzerstörung der umgebenen anatomischen Strukturen führen.

3.1.3 Hybridverfahren zur Katheterortung

Hybridverfahren mit Resonanzschwingkreisen basieren auf der Integration von kleinen kabellosen Spulen, die in der angeregten Schicht direkt sichtbar gemacht und automatisch geortet werden können.⁴¹⁻⁴³ Resonanzschwingkreise können dementsprechend als ein Hybrid von aktiven und passiven Ortungsverfahren betrachtet werden. Auf die Larmofrequenz des Tomographen getrimmte Resonanzschwingkreise erzeugen bei Kopplung mit dem B1 Feld lokale Flipwinkelerhöhungen, die zu einer Signalverstärkung in der unmittelbaren Umgebung der Schwingkreise führen.²⁸ Die Trimmung von Resonanzschwingkreisen kann von außen über optische Faserverbindungen, die mit in den Schwingkreis integrierten Photodioden verbunden

sind, beeinflusst werden.⁴³ Mit Hilfe von Projektionsaufnahmen ist bei einem schnellen Wechsel zwischen Kopplung und Entkopplung (Ein- und Ausschalten) die Position des Schwingkreises im dreidimensionalen Raum bestimmbar. Da bei diesem Verfahren zur Signalübertragung optische und keine elektrischen Leiter benutzt werden, können Resonanzschwingkreise als bioelektrisch sicher betrachtet werden.⁴³

3.2 MRT kontrollierte Intervention: Transkatheterimplantation endovaskulärer Stents und Herzklappenstents

3.2.1 Evaluierung des Artefaktverhaltens metallischer Stents

Die MRT ist eine anerkannte Methode, um Gefäßstenosen nichtinvasiv zu evaluieren. Um den Patientenkomfort zu erhöhen und die Behandlungskosten durch Mehrfachuntersuchungen zu senken wäre es wünschenswert, wenn Diagnose, Therapie und Überprüfung des Therapieerfolges innerhalb nur einer Sitzung durchgeführt werden könnten. Hämodynamisch relevante Gefäßstenosen können derzeit endovaskulär durch Ballonangioplastie oder die Implantation von Stents behandelt werden.^{44,45} Die Evaluierung metallischer Stents mit der MRT ist jedoch durch Suszeptibilitäts- und Radiofrequenzabschirmungsartefakte erschwert bzw. unmöglich.⁴⁶⁻⁵⁰ Solche Phänomene können, abhängig vom verwendeten Stenttyp, zu örtliche Stenosen vortäuschenden Artefakten bis hin zu weitreichenden Bildzerstörungen führen.⁵¹⁻⁵³ Das Ausmaß von Suszeptibilitätsartefakten ist dabei im Wesentlichen durch die paramagnetischen Eigenschaften der verwendeten Metalle bestimmt.^{46,50} Radiofrequenzabschirmungseffekte werden hingegen durch Wirbelstrombildung auf der Oberfläche metallischer Stents verursacht und sind in ihrem Ausmaß vor allem durch spezifische Charakteristika des Stentdesigns bedingt.^{46,50,54}

3.2.2 Implantation endovaskuläre Stents

Die MRT kontrollierte Implantation endovaskulärer Stents erfordert vielseitige technische Lösungen bei der Entwicklung von (i) Hard- und Software zur MRT Echtzeitbildgebung, (ii) Verfahren zur Katheterortung und (iii) MRT kompatiblen Stents. Moderne Gradientensysteme und Pulssequenzen verfügen über ausreichend kurze Echozeiten, um MR Aufnahmen in Echtzeit mit bis zu 10-20 Bildern pro Sekunde bei akzeptablem Signal-zu-Rausch Verhältnis zu akquirieren.⁵⁵ Die in den vergangenen Jahren erreichte Qualität der MRT Echtzeitbildgebung sowie zunehmende Erfahrungen bei der Entwicklung und dem Einsatz von Katheterortungsverfahren waren die Grundlage erster Studien zur MRT kontrollierten Implantation endovaskulärer Stents im Bereich der A. iliaca und Aorta.⁵⁶⁻⁵⁸ Für eine patientensichere und qualitätsorientierte Implantation ist es jedoch erforderlich, neben dem Prozess der Stentablage auch mögliche Komplikationen wie Fehlplatzierungen, Stentmigration, Stentstenosen oder Gefäßverletzungen zuverlässig erkennen zu können.

3.2.3 Implantation von Herzklappenstents

Klappentragende Stents konnten in den vergangenen Jahren erfolgreich in Tierversuchen und ersten klinischen Studien mit perkutanen Transkathetertechniken implantiert werden.⁵⁹⁻⁶³ Dieses Verfahren erfordert eine hohe Ablagegenauigkeit, da Fehlplatzierungen besonders in Position der Aortenklappen durch ein Überstenten der Koronargefäße oder Mitralklappensegel zu vital gefährlichen Situationen führen können.⁶² Um eine hohe Genauigkeit bei der Implantation von Herzklappenstents zu erreichen, wäre es wünschenswert, während der Intervention anatomische Orientierungspunkte wie die Koronargefäße oder die Mitralklappen darstellen zu

können. Konventionelle Methoden der Röntgendurchleuchtung können Weichteilstrukturen jedoch nur mit begrenztem Kontrast wiedergeben. Vor diesem Hintergrund eröffnet die MRT neuartige Möglichkeiten, bei denen *(i)* interventionelle Instrumente gemeinsam mit detaillierten anatomischen Informationen in beliebiger Schichtorientierung im dreidimensionalen Raum sichtbar gemacht und *(ii)* anatomische Informationen mit funktionellen Messungen kombiniert werden können. Durch den Einsatz dieser Technik könnten bestehende Interventionstechniken optimiert und die Anzahl an Kathetermanipulationen verringert werden.

3.3 MRT kontrollierte Herzkatheterisierung: Funktionsanalyse des rechten Ventrikels mit Druck-Volumenrelationen

Ein genaue Analyse der RV Funktion ist bei einer Vielzahl von Patienten mit angeborenen Herzfehlern von zentraler Bedeutung. Die Bestimmung von Druck-Volumenrelationen ermöglicht einen weitreichenden Einblick in die komplexe Pathophysiologie des RV.⁶⁴ Aus ihnen können konventionelle Parameter der *(i)* ventrikulären Pumpfunktion und *(ii)* des pulmonalarteriellen Widerstandes als auch von Vor- und Nachlast unabhängige Parameter der *(iii)* myokardialen Kontraktilität und *(iv)* ventrikulo-arteriellen Kopplung abgeleitet werden.⁶⁴⁻⁶⁷

Die kombinierte Messung von Druck- und Volumenwerten ist im asymmetrisch geformten RV technisch schwierig zu realisieren. Derzeit verfügbare Methoden wie *(i)* Conductance-Kathetertechniken zur Bestimmung von Pumpfunktion, Kontraktilität und Kopplung oder *(ii)* Thermodilution- und Oxymetriemethoden zur Messung des pulmonalarteriellen Widerstandes unterliegen mehreren Einschränkungen bei einem Einsatz in der klinischen Routine. Conductance-Katheter sind teuer, in ihrer Anwendung technisch aufwendig und bedürfen oft vielfacher

Kathetermanipulationen.^{66,67} Desweiteren müssen bei der Bestimmung absoluter Messwerte Referenzmethoden (wie z.B. die MRT) für eine Kalibrierung der Conductance-Kathetermessungen verwendet werden.^{64,66} Andererseits weisen Thermodilutions- oder Oxymetriemethoden insbesondere bei Patienten mit Shuntvitien oder RV Dysfunktion nur eine begrenzte Genauigkeit und Reproduzierbarkeit der Messwerte auf.⁶⁸⁻⁷⁰

Die MRT gilt derzeit als die Methode der Wahl (Goldstandard) zur quantitativen Analyse von Ventrikel- und Blutflussvolumen, ist jedoch bei der Messung von kardiovaskulären Druckwerten limitiert.^{8-10,71,72} Fortschritte in der MRT Echtzeitbildgebung und ein verbessertes Verständnis von MRT kontrollierten Katheterführungsverfahren haben jedoch die Möglichkeit geschaffen, RV- und pulmonalarterielle Druckwerte invasiv zu messen und mit quantitativen Ventrikelvolumen und pulmonalarteriellen Blutflussmessungen zeitlich zu synchronisieren.^{4,12}