

2 Zusammenfassung der eigenen Arbeiten

Gegenstand eigener Arbeiten war die Entwicklung, experimentelle Erprobung und erste klinische Anwendung interventioneller kardiovaskulärer MRT Methoden. Die Untersuchungen bezogen sich dabei auf drei Schwerpunkte. (i) Anfänglich wurden verschiedene Verfahren zum Orten endovaskulärer Katheter in der MRT Umgebung entwickelt und/oder erprobt. (ii) Die Erkenntnisse aus diesen Arbeiten dienten als Grundlage für die Durchführung von Machbarkeitsstudien zur MRT kontrollierten Implantation endovaskulärer Stents und Herzklappenstents. Im Rahmen dieser Studien wurde zudem das MRT Artefaktverhalten verschiedener Stenttypen evaluiert. (iii) Die Erfahrungen der experimentellen Untersuchungen konnten dann in ersten klinischen Studien zur MRT kontrollierten Herzkatheterisierung nachvollzogen werden.

2.1 MRT kontrollierte Führung endovaskulärer Katheter ⁽²⁵⁻²⁹⁾

Zuverlässige Verfahren zur Ortung endovaskulärer Katheter sind eine Grundvoraussetzung für die erfolgreiche Durchführung MRT gestützter kardiovaskulärer Interventionen. In mehreren Studien wurden passive und Hybridverfahren zur Ortung endovaskulärer Katheter entwickelt und/oder erprobt:

(1) *Passive Verfahren:* Kontrastmittel aus Gadolinium und Kohlendioxid (CO₂) sowie ferromagnetische Suszeptibilitätsmarker wurden auf endovaskuläre Katheter aufgebracht und mit T1 und T2/T1 gewichteten Echtzeitsequenzen untersucht.²⁵⁻²⁷ Gadolinium erzeugte auf T1 gewichteten Sequenzen ein helles Signal, das sich gut gegenüber einer dunklen Hintergrundanatomie (z.B. Bereiche der peripheren Pulmonalarterien) abhob.²⁷ CO₂-Kontrastmittel und ferromagnetische Marker verursachten hingegen auf T2/T1 gewichteten Aufnahmen umschriebene

Suszeptibilitätsartefakte, die deutlich gegenüber dem hellen Blutpool größerer Gefäße oder der Herzkammern kontrastierten.^{25,26}

(2) *Hybridverfahren*: Kabellose Resonanzschwingkreise können in der angeregten Schicht direkt sichtbar gemacht und über optische Faserverbindungen automatisch geortet werden. Die Technik entspricht damit einem Hybrid zwischen aktiven und passiven Ortungsverfahren. In den durchgeführten Arbeiten wurden Resonanzschwingkreise entwickelt, die von ihrer Orientierung zum statischen Magnetfeld (B_0 Feld) des MRT unabhängig und als Marker von Einführbestecken endovaskulärer Stents geeignet sind.^{28,29} Die entwickelten Resonanzschwingkreise erzeugten ein konstantes gegenüber einer beliebigen Hintergrundanatomie gut abgrenzbares MRT Signal, das eine sichere Führung der Einführbestecke und eine genaue Positionsbestimmung der eingezogenen Stents ermöglichte.^{28,29}

2.2 MRT kontrollierte Intervention: Transkatheterimplantation von endovaskulären Stents und Herzklappenstents ^(26,27,29-31)

MRT gestützte Interventionen erfordern neben der Verwendung zuverlässiger Verfahren zur Katheterortung auch den Einsatz von Implantaten mit einem MRT kompatiblen Artefaktverhalten. Dementsprechend wurde in mehreren Studien das Artefaktverhalten verschiedener Stenttypen untersucht. Es konnte gezeigt werden, dass aus Stahl gefertigte Stents wegen ausgeprägter Suszeptibilitätsartefakte nicht für den Gebrauch in der MRT geeignet sind.³⁰ Nitinol- und Platinstents erzeugten hingegen nur lokale Suszeptibilitätsartefakte und ermöglichten eine quantitative Bestimmung von Blutfluss im Lumen der Stents.^{30,31}

In Machbarkeitsstudien ließ sich zudem nachweisen, dass (i) endovaskuläre Nitinolstents in peripheren und zentralen Arterien^{27,29} und (ii) aus Nitinol und Teflon

gefertigten Herzklappenstents in Position der Aortenklappe unter MRT Kontrolle implantiert werden können.²⁶ Dabei ermöglichten die MRT interventionelle Instrumente in einem kontinuierlichen Bezug zur Hintergrundanatomie und in beliebiger Angulierung im dreidimensionalen Raum darzustellen und die anatomischen Informationen mit funktionellen Parametern (Blutfluss und Ventrikelfunktion) zu kombinieren.

2.3 MRT kontrollierte Herzkatheterisierung: Funktionsanalyse des rechten Ventrikels mit Druck-Volumenmessungen ^(25,32)

Die MRT gilt derzeit als das Verfahren der Wahl (Goldstandard) zur quantitativen Analyse von Ventrikelvolumen und Blutfluss.⁸⁻¹⁰ Für eine nichtinvasive Bestimmung hämodynamischer Druckwerte ist die MRT hingegen nur begrenzt geeignet. In unseren Studien wurden über endovaskuläre Katheter Druckmessungen im RV und in der Pulmonalarterie durchgeführt und mit Ventrikelvolumen- und pulmonalarteriellen Blutflussmessungen kombiniert.^{25,32} Aus den Messwerten wurden Druck-Volumenrelationen konstruiert, aus denen sich neben konventionellen Parametern der RV Pumpfunktion auch Parameter (*i*) der myokardialen Kontraktilität (E_{\max} =Steigung der endsystolischen Druck-Volumenrelation), (*ii*) der Effizienz der mechanischen Kopplung des RV mit dem pulmonalarteriellen System (E_{\max}/E_a =Effizienz der Kopplung zwischen RV und pulmonalarteriellem System) sowie (*iii*) des pulmonalvaskulären Widerstandes abgeleitet werden konnten.

In Tierversuchen wurden diese mittels MRT gemessenen Parameter mit Conductance-Kathetertechniken (für E_{\max} und E_{\max}/E_a) und Thermodilutionsmethoden (für den pulmonalvaskulären Widerstand) validiert. Dabei fand sich eine gute Übereinstimmung zwischen den Methoden bei sehr niedriger Varianz der MRT

Messungen.^{25,32} Nach Abschluss der Validierungsarbeiten konnte in einer klinischen Studie belegt werden, dass die MRT Methode auch bei Patienten zuverlässige Ergebnisse liefert und einen differenzierten Einblick in die komplexe Pathophysiologie des RV und dessen mechanische Kopplung mit dem pulmonalarteriellen Systems ermöglicht.