

Julia Geiger, M. Markl, R. Arnold, B. Stiller, M. Langer

Analyse der Hämodynamik bei komplexen angeborenen Herzfehlern mit „Whole Heart“ fluss-sensitiver 4D-MRT

Hintergrund:

Ca. 10% der Patienten mit angeborenen Herzfehlern benötigen ein lebenslanges Follow-up, das in erster Linie aus Echokardiographie-Kontrollen besteht. In vielen Fällen sind jedoch ergänzende Herzkatheter-Untersuchungen notwendig. In den letzten Jahren hat sich die kardiovaskuläre MRT zur Diagnose und zum Follow-up von Herzfehlern etabliert. Für eine umfassende Beurteilung des Herzens sind in der Regel umfangreiche MRT-Protokolle bestehend aus Sequenzen für die Anatomie, die Herzbewegung, die Volumetrie der Ventrikel und ergänzend MR-Angiographie und Phasenkontrast-Flussmessungen zur Beurteilung der Klappen nötig. Insbesondere bei komplexen Herzvitien, bei denen postoperativ eine deutlich von der normalen Anatomie zu erwartende Morphologie und Veränderungen des Blutflusses zu erwarten sind, gestalten sich die MRT-Protokolle oft aufwändig und schwierig.

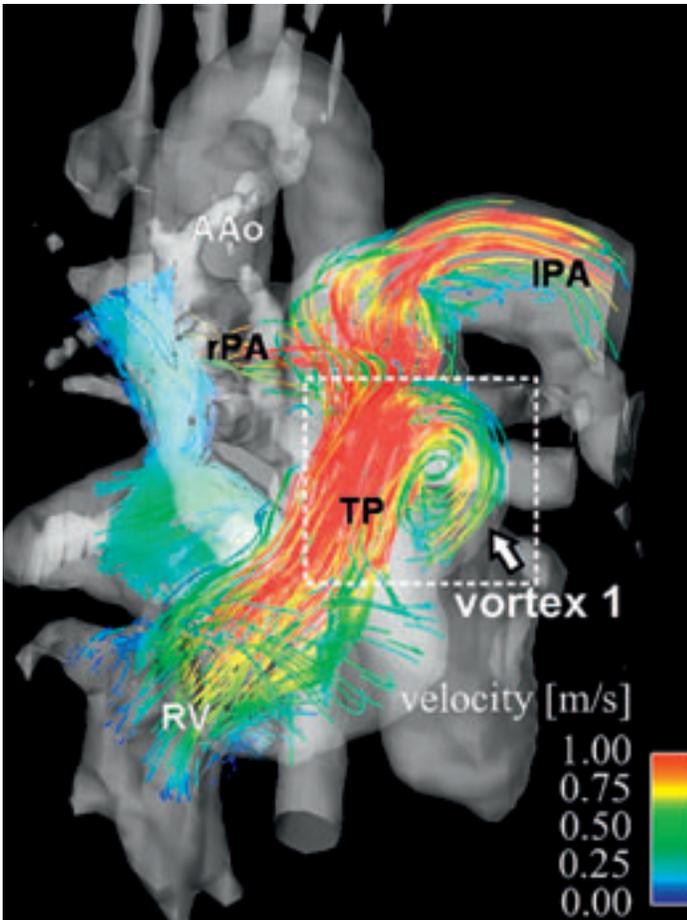
Moderne fluss-sensitive Phasenkontrast-Bildgebung ermöglicht die Messung des Blutflusses in allen drei Raumrichtungen und zusätzlich die zeitaufgelöste Erfassung des Blutflusses zu jedem Zeitpunkt und an jedem Ort der erfassten Gefäße im gesamten Untersuchungsfeld. Mit einer optimierten 3D-Phasenkontrast-GRE-Sequenz mit zeitlicher Auflösung (4D) gelingt die Beurteilung der Gefäßgeometrie und des Blutflusses in vivo. Aufgrund der vollständigen räumlichen und zeitlichen Erfassung der Daten während des EKG-Zyklus besteht die Möglichkeit, an beliebigen Stellen des Gefäßsystems nachträglich Flussgeschwindigkeiten oder andere Parameter zu bestimmen, so dass man nicht auf vordefinierte Ebenen wie bei der 2D PC-Messung angewiesen ist. Die von unserer Arbeitsgruppe entwickelte 4D-Flussmessung ist

ein neuer Meilenstein in der Diagnostik komplexer Flussverhältnisse bei angeborenen Herzfehlern.

Ziel aktueller Studien ist, mittels „whole heart“ fluss-sensitiver 4D MRT die Gefäßmorphologie und die komplexen Strömungsverhältnisse in operierten Herzen bei Kindern und Jugendlichen mit kongenitalen Herzvitien, insbesondere in Hinblick auf die Auswirkungen auf das Pulmonalsystem, zu analysieren.

Zur Erfassung der zeitaufgelösten 3D Hämodynamik im gesamten Herzen und den angrenzenden Gefäßen wurde eine EKG-getriggerte 3D CINE GRE-Sequenz mit 3-direktionaler Flusskodierung (räumliche Auflösung = ca. 2,5mm, zeitliche Auflösung = 38,4 ms, $venc=150-200\text{cm/s}$, $TE/TR=2,4\text{ms}/4,8\text{ms}$, $=7^\circ/15^\circ$) bei freier Patientenat-

mung (Navigator gating) verwendet. Nach dem Preprocessing der Daten mit einer hausintern entwickelten Software (Matlab) erfolgte die Visualisierung der postoperativ veränderten Strömungsverhältnisse mittels zeitaufgelöster 3D particle traces und eines sog. connectivity mapping, mit deren Hilfe die räumliche Verteilung und Dynamik der gemessenen Blutflussgeschwindigkeiten farbkodiert dargestellt werden konnte. Die Auswertung der Visualisierung erfolgte hinsichtlich der Ausprägung von Strömungsturbulenzen (Vortices), retrogradem Fluss und Flussgeschwindigkeit bei den Fallot- und TGA-Patienten. Für die particle traces wurden Ebenen auf Höhe der Pulmonal- und Aortenklappe sowie in die rechte und linke Pulmonalarterie gelegt, in denen auch Flussquantifizierungen mit Bestimmung der Flussgeschwin-



■ Abb. 1: Darstellung des Blutflusses mit particle traces bei einer Patientin mit z.n. Fallot-Korrektur: Flussbeschleunigung im Truncus pulmonalis (TP) und in rechter und linker Pulmonalarterie (rPA, lPA), Vortex im Truncus pulmonalis.

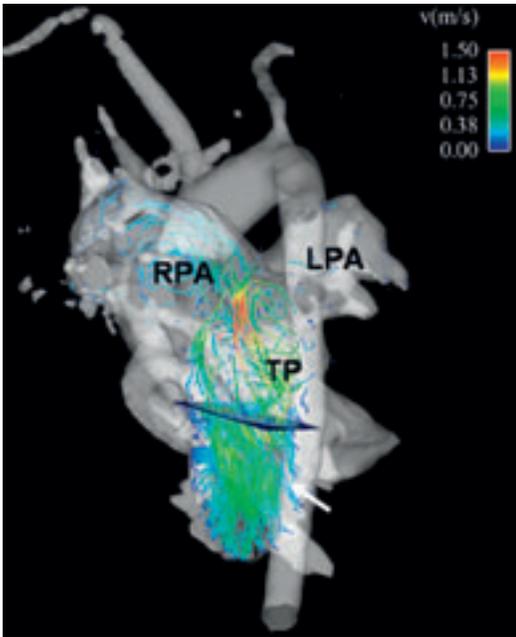
digkeiten und Fluss-Zeitkurven erstellt wurden. Bei den Patienten nach Fontan-Operation erfolgte die Darstellung des Blutflusses ausgehend von der oberen und unteren Hohlvene anstelle der Pulmonalklappe.

Bis jetzt wurden 26 Patienten im Alter von 2 bis 26 Jahren (Durchschnitt 12 Jahre) und jeweils 4 Probanden (Durchschnitt 22 Jahre) am 1,5 und 3T MRT untersucht (Avan-

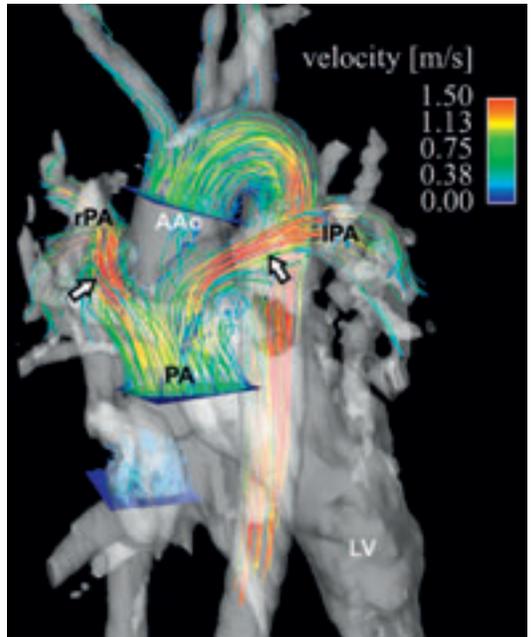
to und Trio, Siemens). Die größte Gruppe bildeten die Patienten nach Fallot-Korrektur mit 10 Patienten, 9 Patienten nach Switch-Operation bei z.n. Transposition der großen Gefäße (TGA) und 7 Patienten mit z.n. TCPC (totaler cavo-pulmonaler Konnektion) bei Hypoplastischem Linksherzsyndrom.

In dieser Studie wurden eine Reihe wissenschaftlich neuer Erkenntnisse zum Blutfluss und der Strömungs-

mechanik in operierten Herzen gefunden. Andere Befunde waren bereits aus den Herzkatheterstudien bekannt oder vermutet worden, und sind durch unsere neue Methode bestätigt worden. Hier einige wichtige Ergebnisse unserer Studie: Bei allen Patienten mit Fallot-Tetralogie zeigten sich eine Flussbeschleunigung im rechtsventrikulären Ausflusstrakt (Abb.1) und ein retrograder Fluss aufgrund einer Pulmonalisinsuffizienz in unterschiedlicher Ausprägung (Abb.2). Die Quantifizierung ergab eine durchschnittliche Regurgitationsfraktion von 30%. Sechs Patienten wiesen deutliche Verwirbelungen im z.T. aneurysmatisch erweiterten Ausflusstrakt, weniger ausgeprägt auch in den Pulmonalarterien, auf (Abb.1). Die Quantifizierung zeigte eine statistisch signifikant erhöhte Flussgeschwindigkeit im Pulmonalsystem auf das Doppelte im Vergleich zu den Probanden ($1,9 \text{ m/s} \pm 0,7 \text{ m/s}$ vs. $0,9 \text{ m/s} \pm 0,1 \text{ m/s}$). Außerdem bestand ein differentes Flussverhältnis der Pulmonalarterien mit einer Dominanz der rechten Pulmonalarterie. Diese typische erhöhte Flussbelastung der rechten Pulmonalarterie wurde in Katheterstudien bislang vermutet und ist durch unser Verfahren nun bestätigt und quantifiziert worden. Es wurden Korrelationen zwischen dem Auftreten von Vortices und dem Gefäßdurchmesser sowie retrogradem Fluss und den aus der MR-Angiographie bestimmbaren



■ Abb. 2: Darstellung des diastolischen retrograden Blutflusses (Pfeil) mit particle traces bei einer anderen Patientin nach Fallot-Korrektur.



■ Abb. 3: Flussvisualisierung bei einem Patienten nach Switch-Operation bei Transposition der großen Gefäße (TGA): Flussbeschleunigung in den Pulmonalarterien (Pfeile)

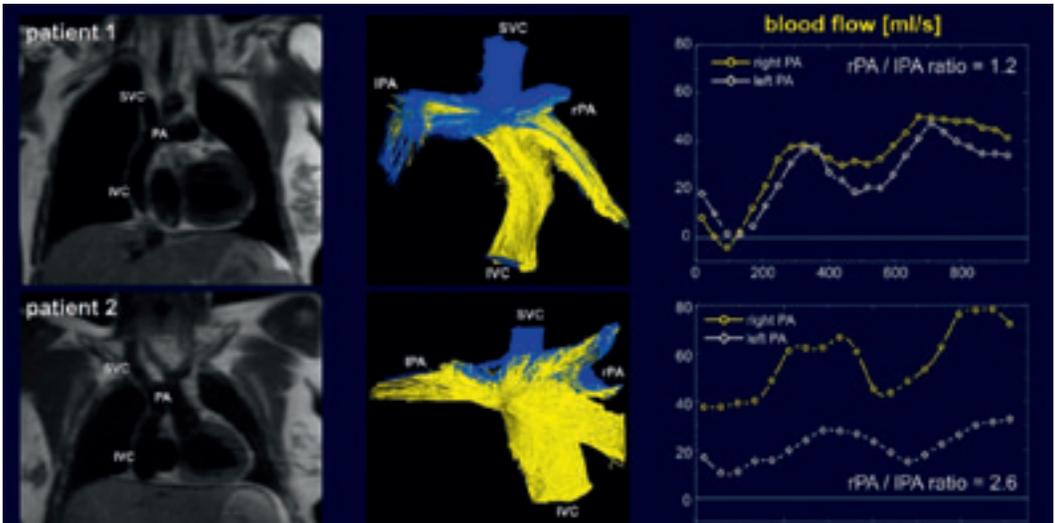
Winkeln zwischen den Pulmonalarterien gefunden. Dies wird Auswirkungen auf die Operationstechnik der Kinderkardiochirurgen haben, die die Korrekturanatomie optimieren und damit das Auftreten von Vortices vermindern können.

Bei allen Patienten mit z.N. TGA ergab die Visualisierung eine deutliche Flussbeschleunigung in den Pulmonalarterien (Abb.3), die sich in der Quantifizierung mit einem Fluss über 2m/s bestätigte. Außerdem fiel auf, dass nur bei den sechs Patienten, bei denen der Truncus pulmonalis postoperativ direkt ventral des Aorta ascendens lokalisiert war, Vortices im rechtsventrikulären

Ausflusstrakt und z.T. in den Pulmonalarterien auftraten, wohingegen bei den drei Patienten mit etwas nach rechts gegenüber der Aorta versetztem Truncus pulmonalis eine laminare Strömung zu sehen war. Auch dies ist für die künftige kardiochirurgische Operationstechnik ein neuer Aspekt.

Die Evaluation der Hämodynamik bei Patienten mit Fontan-Zirkulation (TCPC) erfolgte vorwiegend mit connectivity-mapping, womit das Blut dem originären Gefäß farblich zugeordnet werden kann. Damit kann der Blutfluss während des Herzzyklus und eine Quantifizierung des venösen Blutflusses

aus oberer und unterer Hohlvene in das linke und rechte Pulmonal-system erstmals bestimmt werden: die Mischung der Blutanteile aus der oberen und unteren Hohlvene (z.B. dargestellt mit blauer Farbe für das Blut aus der V. cava superior, in gelber Farbe für die Fraktion aus der V. cava inferior) ist überraschend. Es zeigte sich eine individuell recht variable Blutverteilung aus der oberen Hohlvene (SVC) in die Pulmonalarterien, während sich das Blut aus der unteren Hohlvene (IVC) gleichmäßiger verteilte (Abb.4). Insgesamt fanden wir eine bevorzugte Füllung der rechten Pulmonalarterie (Flussverteilung rPA/lPA=1,7 ± 0,6).



■ Abb. 4: Anatomische Bilder (links), 3D connectivity mapping (Mitte) und Flussquantifizierung (rechts) am Beispiel zweier Patienten nach TCPC. Das Blut aus der oberen Hohlvene (SVC) ist blau, das Blut aus der unteren Hohlvene (IVC) gelb gefärbt. (rPA = rechte Pulmonalarterie, lPA = linke Pulmonalarterie)

Zusammenfassung und Ausblick:

Die Ergebnisse dieser Studie zeigen, dass die fluss-sensitive 4D-MRT die in-vivo Visualisierung des dynamischen Blutflusses im ganzen Herzen und den zu- und abführenden Gefäßen ermöglicht. Dies trägt insbesondere bei komplexen korrigierten Herzvitien zu einem besseren Verständnis der außergewöhnlichen Herz- und Gefäßmorphologie und veränderten Hämodynamik bei. Erste Ergebnisse deuten auf Korrelationen bestimmter postoperativer geometrischer Eigenschaften und dem Auftreten von Flussverwirbelungen und Gefäßdilatationen hin. Im weiteren Verlauf müssen größere Patientengruppen untersucht werden, um aus den bisherigen Erfahrungen interventionsbedürftige Pathologien anhand ihrer

Flussmuster rechtzeitig zu erkennen und um diese Beobachtungen hinsichtlich ihrer klinischen Relevanz zunehmend in die Routinediagnostik einbringen zu können. Mit dieser Methode wird ein neues Kapitel in der kardiovaskulären MR-Diagnostik aufgeschlagen. Die grenzenlose Kartierung des Blutflusses an jedem topografischen Punkt und zu jedem Zeitpunkt des Herzzyklus gewinnt nicht nur in der klinischen Kardiologie an Bedeutung, sondern wird auch Einfluss auf künftige optimierte Operationstechniken, auf neue Erkenntnisse der Herzphysiologie und Pathophysiologie haben.

Danksagung:

Ganz besonderen Dank für die Unterstützung in diesem Projekt gilt Herrn PD Dr. M. Markl (Röntgen-

diagnostik/MR-Physik), der weltweit erstmalig die 4D-Sequenz entwickelt und in Freiburg etabliert hat sowie Herrn PD Dr. R. Arnold (Abt. Angeborene Herzfehler/Pädiatrische Kardiologie), der als unermüdlicher Ideengeber hauptverantwortlich für die Patientenbetreuung und -organisation ist.

► Dr. med. Julia Geiger
Universitätsklinikum Freiburg
Abt. Röntgendiagnostik
Hugstetter Straße 55
D-79106 FREIBURG