

# **Diplomarbeit**

## **QISS-MRA und andere flussgestützte MRA-Sequenzen bei 3 Tesla im Vergleich zu kontrastgestützten MRA/MRI- Sequenzen zur Darstellung und Quantifizierung der Aorta thoracalis nach erfolgter Therapie**

eingereicht von

**Tamara Sophia Sand**

zur Erlangung des akademischen Grades

**Doktor(in) der gesamten Heilkunde  
(Dr. med. univ.)**

an der

**Medizinischen Universität Graz**

ausgeführt am

**Universitätsklinikum für Radiologie**

Klinische Abteilung für Neuro-, vaskuläre und  
interventionelle Radiologie

unter der Anleitung von

Ass.-Prof. Dr. med. univ. Manuela Aschauer

Univ.-FÄ Dr. med. univ. Ingeborg Keeling

Graz, am 17.05.2023

## **Eidesstattliche Erklärung**

*Ich erkläre ehrenwörtlich, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig und ohne fremde Hilfe verfasst habe, andere als die angegebenen Quellen nicht verwendet habe und die den benutzten Quellen wörtlich oder inhaltlich entnommenen Stellen als solche kenntlich gemacht habe.*

Graz, am 17.05.2023

Tamara Sand eh.

## **Danksagungen**

An dieser Stelle möchte ich mich herzlich bei allen bedanken, die mich bei der Durchführung der Studie und damit bei der Vorbereitung dieser Diplomarbeit unterstützt und während meiner gesamten Studienzeit begleitet haben.

Der Dank gilt vor allem meiner Betreuerin, Frau Ass.-Prof. Dr. med. univ. Manuela Aschauer, und meiner Zweitbetreuerin, Frau Univ.-FÄ Dr. med. univ. Ingeborg Keeling. Ebenfalls richtet sich der Dank an meine Eltern, die mich zu jeder Zeit nicht nur finanziell, sondern auch mental und emotional durch meine Studienzeit begleitet haben. Ich bin sehr dankbar für die Möglichkeit dieses Studiums und werde immer in schöner Erinnerung zurückblicken können!

Auch an meinen Freund und meine Freunde, die ich in der Studienzeit kennenlernen durfte oder bereits zuvor kannte, geht ein großes Dankeschön für eine schöne Zeit, die wir zusammen verbracht haben und uns gegenseitig unterstützt haben.

# Inhaltsverzeichnis

EIDESSTATTLICHE ERKLÄRUNG .....	I
DANKSAGUNGEN .....	II
INHALTSVERZEICHNIS .....	III
ABKÜRZUNGEN UND DEREN ERKLÄRUNG.....	V
ABBILDUNGSVERZEICHNIS .....	VII
TABELLENVERZEICHNIS.....	XX
ZUSAMMENFASSUNG .....	XXI
ABSTRACT .....	XXIII
ANGABEN VON BEREITS ERFOLGTEN VERÖFFENTLICHUNGEN .....	XXV
1 EINLEITUNG.....	1
1.1 HINTERGRUND DER DIPLOMARBEIT .....	1
1.2 BEDEUTUNG UND RELEVANZ DER KERNFRAGE .....	2
1.3 ANATOMIE DER AORTA .....	3
1.4 AORTENERKRANKUNGEN .....	4
1.4.1 AORTENDISSEKTION .....	4
1.4.1.1 DEFINITION UND SYMPTOMATIK .....	4
1.4.1.2 URSACHEN UND RISIKOFAKTOREN.....	4
1.4.1.3 EPIDEMIOLOGIE.....	5
1.4.1.4 KLASSIFIKATIONEN.....	6
1.4.1.5 BILDGEBUNG .....	7
1.4.1.6 THERAPIE.....	9
1.5.1 AORTENANEURYSMA, AORTENEKTASIE .....	11
1.5.1.1 DEFINITION UND SYMPTOMATIK.....	11
1.5.1.2 URSACHEN UND RISIKOFAKTOREN .....	12
1.5.1.3 EPIDEMIOLOGIE .....	13
1.5.1.4 KLASSIFIKATION.....	13
1.5.1.5 BILDGEBUNG .....	13
1.5.1.6 THERAPIE .....	15
1.6.3 INTRAMURALES HÄMATOM, PENETRIERENDES AORTENULKUS .....	16
1.6.3.1 DEFINITION UND SYMPTOMATIK .....	16
1.6.3.2 URSACHEN UND RISIKOFAKTOREN.....	16
1.6.3.3 EPIDEMIOLOGIE.....	17
1.6.3.4 KLASSIFIKATION .....	17
1.6.3.5 BILDGEBUNG .....	17
1.6.3.6 THERAPIE.....	18
1.7 MAGNETRESONANZTOMOGRAPHIE.....	19
1.7.1 GRUNDPRINZIP DER MAGNETRESONANZTOMOGRAPHIE .....	19

1.7.2 MR-ANGIOGRAPHIE.....	21
2 MATERIAL UND METHODEN .....	25
2.1 AUFBAU DER STUDIE .....	25
2.1.1 EIN- UND AUSSCHLUSSKRITERIEN .....	25
2.1.2 PATIENTINNENAUSWAHL .....	25
2.1.3 PATIENTINNENAUFKLÄRUNG .....	26
2.1.4 VORBEREITUNG MIT PROBANDINNEN .....	27
2.1.5 HARDWARE - SIEMENS® PRISMA FIT E11.....	28
2.1.6 SOFTWARE .....	29
2.1.6.1 SYNGO.PLAZA.....	29
2.1.6.2 CVI42.....	29
2.2 AUSWERTUNG.....	29
3 ERGEBNISSE – GRAPHISCHE UND BILDICHE DARSTELLUNGEN .....	33
3.1 QUALITATIVE UND QUANTITATIVE AUSWERTUNG DER QISS- UND SPACE-MRA IM VERGLEICH ZUR CE-MRA, VIBE-MRI UND TEILWEISE CE-CTA .....	33
3.2 QUANTITATIVE AUSWERTUNG DER 4D-FLOW-AUFNAHMEN.....	233
4 DISKUSSION:.....	287
4.1 INTERPRETATION DER ERGEBNISSE .....	287
4.2 VERGLEICH DER ERGEBNISSE UNSERER STUDIE MIT DEN .....	291
ERGEBNISSEN ANDERER PUBLIKATIONEN .....	291
4.3 LIMITATIONEN DER STUDIE.....	296
4.4 CONCLUSIO .....	297
LITERATURVERZEICHNIS .....	298
ANHANG.....	305

## **Abkürzungen und deren Erklärung**

4D-Flow – Vier-dimensionale Flussmessung

CE-MRA – kontrastgestützte Magnetresonanz-Angiographie

CE-MRI – kontrastgestütztes Magnetresonanz-Imaging

CE-CTA – kontrastgestützte computertomographische Angiographie

cor. – coronal

DICOM – Digital Imaging and Communications in Medicine

E. – Ebene

front. – frontal

Gd – Gadolinium

l. – links

m. – mittig

MPR – Multiplanare Reformation

MR – Magnetresonanz

MRA – Magnetresonanz-Angiographie

MRI – Magnetresonanz-Imaging

MRT – Magnetresonanz-Tomographie

o. – oben

PAU – Penetrierendes Aortenulcus

PC-MRA – Phasenkontrastangiographie

PACS – Picture Archiving and Communications System

Prob. – Probandin

Pat. – Patientin/Patient

QISS – Quiescent-interval single shot

r. – rechts

Rekonst. – Rekonstruktion

sag. – sagittal

SPACE – Sampling Perfection with Application optimized

Contrasts by using different flip angle Evolutions

TR – Repetitionszeit

tra. – transversal

u. – unten

VIBE – Volumetric interpolated breath-hold examination

4D-Flow spezifische Abkürzungen:

E – Energy-Loss

RPM – Relative Pressure Measurement

WSS – Wall Shear Stress

## Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: links: Darstellung der Anatomie der Aorta .....	3
Abbildung 2: rechts: Darstellung des Wandaufbaus von Arterie und Vene und Histologie. 3	
Abbildung 3: Darstellung der DeBakey und Stanford Klassifikation .....	6
Abbildung 4: Grafik zu den untersuchten Pathologien der PatientInnen der Studie.....	26
Abbildung 5: MIP-3D-Rekonst. der QISS-MRA-Bildgebung (sagittale Ansicht) .....	34
Abbildung 6: MIP-3D-Rekonst. der SPACE-MRA-Bildgebung (sagittale Ansicht).....	34
Abbildung 7: MIP-3D-Rekonst. der QISS-MRA-Bildgebung (Ansicht von schräg sagittal- frontal) .....	35
Abbildung 8: MIP-3D-Rekonst. der SPACE-MRA-Bildgebung (Ansicht von schräg sagittal-frontal) .....	35
Abbildung 9: MPR-Rekonst. QISS-MRA, Aorta asc., Prob. 1 .....	36
Abbildung 10: MPR-Rekonst. SPACE-MRA, Aorta asc., Prob. 1 .....	36
Abbildung 11: Durchmesser Aorta asc., QISS-MRA (l.) und SPACE-MRA (r.) (MPR- Rekonst.: transversal), Prob. 1 .....	37
Abbildung 12: MPR-Rekonst., QISS-MRA, vor Abgang der Supraaortalen, Prob. 1 .....	37
Abbildung 13: MPR-Rekonst., SPACE-MRA, vor Abgang der Supraaortalen, Prob. 1 ....	38
Abbildung 14: Durchmesser Aorta asc. vor Abgang der Supraaortalen, QISS-MRA (l.) und SPACE-MRA (r.) (MPR-Rekonst.: transversal), Prob. 1 .....	38
Abbildung 15: supraaortale Gefäße in der Transversalebene (MPR-Rekonst.), QISS-MRA (l.) und SPACE-MRA (r.), Prob. 1 .....	39
Abbildung 16: MPR-Rekonst., QISS-MRA, nach Abgang der Supraaortalen, Prob. 1 .....	39
Abbildung 17: MPR-Rekonst., SPACE-MRA, nach Abgang der Supraaort., Prob. 1 .....	40
Abbildung 18: Durchmesser Arcus aortae, nach Abgang der Supraaortalen, QISS-MRA (l.) und SPACE-MRA (r.) (MPR-Rekonst.: coronal), Prob. 1 .....	40
Abbildung 19: MPR-Rekonst., QISS-MRA, Aorta descendens, Prob. 1 .....	41
Abbildung 20: MPR-Rekonst., SPACE-MRA, Aorta descendens, Prob. 1 .....	41
Abbildung 21: Durchmesser Aorta desc., QISS-MRA (l.) und SPACE-MRA (r.) (MPR- Rekonst.: transversal), Prob. 1 .....	42
Abbildung 22: MPR-Rekonst., QISS-MRA, Thorakoabdominaler Übergang, Prob. 1 .....	42
Abbildung 23: MPR-Rekonst., SPACE-MRA, Thorakoabdominaler Übergang, Prob. 1 ..	43
Abbildung 24: Durchmesser Aorta desc., thorakoabdominaler Übergang, QISS-MRA (l.) und SPACE-MRA (r.) (MPR-Rekonst.: transversal), Prob. 1 .....	43
Abbildung 25: MPR-Rekonst., QISS-MRA, distale Aorta desc., Prob. 1 .....	44
Abbildung 26: MPR-Rekonst., SPACE-MRA, distale Aorta desc., Prob. 1 .....	44
Abbildung 27: Durchmesser distale Aorta desc., QISS-MRA (l.) und SPACE-MRA (r.) (MPR-Rekonst.: transversal), Prob. 1 .....	45
Abbildung 28: MIP-3D-Rekonst. der QISS-MRA-Bildgebung (sagittale Ansicht), Prob. 2 .....	46
Abbildung 29: MIP-3D-Rekonstruktion des SPACE-Sequenz (schräg sagittal-coronale Ansicht), Prob. 2 .....	46
Abbildung 30: MPR-Rekonst. QISS-MRA, Aorta asc., Prob. 2 .....	47
Abbildung 31: MPR-Rekonst. SPACE-MRA, Aorta asc., Prob. 2 .....	47
Abbildung 32: Durchmesser Aorta asc., QISS-MRA (l.) und SPACE-MRA (r.) (MPR- Rekonst.: transversal), Prob. 2 .....	48
Abbildung 33: MPR-Rekonst., QISS-MRA, vor Abgang der Supraaortalen, Prob. 2 .....	48
Abbildung 34: MPR-Rekonst., SPACE-MRA, vor Abgang der Supraaortalen, Prob. 2 ....	49
Abbildung 35: Durchmesser Aorta asc. vor Abgang der Supraaortalen, QISS-MRA (l.) und SPACE-MRA (r.) (MPR-Rekonst.: transversal), Prob. 2 .....	49

Abbildung 36: supraaortale Gefäße in der Transversalebene (MPR-Rekonst.), QISS-MRA (l.) und SPACE-MRA (r.), Prob. 2 .....	50
Abbildung 37: MPR-Rekonst., QISS-MRA, nach Abgang der Supraaortalen, Prob. 2 .....	50
Abbildung 38: MPR-Rekonst., SPACE-MRA, nach Abgang der Supraaortalen, Prob. 2 ..	51
Abbildung 39: Durchmesser Arcus aortae, nach Abgang der Supraaortalen, QISS-MRA (l.) und SPACE-MRA (r.) (MPR-Rekonst.: coronal), Prob. 2 .....	51
Abbildung 40: MPR-Rekonst., QISS-MRA, Aorta descendens, Prob. 2 .....	52
Abbildung 41: MPR-Rekonst., SPACE-MRA, Aorta descendens, Prob. 2 .....	52
Abbildung 42: Durchmesser Aorta desc., QISS-MRA (l.) und SPACE-MRA (r.) (MPR-Rekonst.: transversal), Prob. 2 .....	53
Abbildung 43: MPR-Rekonst., QISS-MRA, Thorakoabdominaler Übergang, Prob. 2 .....	53
Abbildung 44: MPR-Rekonst., SPACE-MRA, Thorakoabdominaler Übergang, Prob. 2 ..	54
Abbildung 45: Durchmesser Aorta desc., thorakoabdominaler Übergang, QISS-MRA (l.) und SPACE-MRA (r.) (MPR-Rekonst.: transversal), Prob. 2 .....	54
Abbildung 46: MPR-Rekonst., SPACE-MRA, distale Aorta desc., Prob. 2 .....	55
Abbildung 47: Durchmesser Aorta desc., distale Aorta desc., SPACE-MRA .....	55
Abbildung 48: MIP-3D-Rekonst. der QISS-MRA-Bildgebung (sagittale und schräg coronal-sagittale Ansicht), Prob. 3 .....	56
Abbildung 49: MIP-3D-Rekonst. der SPACE-MRA-Bildgebung (sagittale und schräg sagittal-coronale Ansicht), Prob. 3 .....	56
Abbildung 50: MPR-Rekonst. QISS-MRA (oben) und SPACE-MRA (unten), Aorta asc., Prob. 3 .....	57
Abbildung 51: Durchmesser Aorta asc., QISS-MRA (l.) und SPACE-MRA (r.) (MPR-Rekonst.: transversal), Prob. 3 .....	58
Abbildung 52: MPR-Rekonst., QISS-MRA (oben) und SPACE-MRA (unten), vor Abgang der Supraaortalen, Prob. 3 .....	59
Abbildung 53: Durchmesser Aorta asc., vor Abgang der Supraaortalen, QISS-MRA (l.) und SPACE-MRA (r.) (MPR-Rekonst.: transversal), Prob. 3 .....	60
Abbildung 54: Supraaortale Gefäße in der Transversalebene (MPR-Rekonst.), QISS-MRA (l.) und SPACE-MRA (r.), Prob. 3 .....	60
Abbildung 55: MPR-Rekonst., QISS-MRA (oben) und SPACE-MRA (unten), nach Abgang der Supraaortalen, Prob. 3 .....	61
Abbildung 56: Durchmesser Arcus aortae, nach Abgang der Supraaortalen, QISS-MRA (l.) und SPACE-MRA (r.) (MPR-Rekonst.: coronal), Prob. 3 .....	61
Abbildung 57: MPR-Rekonst., QISS-MRA (oben) und SPACE-MRA (unten), Aorta descendens, Prob. 3 .....	62
Abbildung 58: Durchmesser Aorta desc., QISS-MRA (l.) und SPACE-MRA (r.) (MPR-Rekonst.: transversal), Prob. 3 .....	63
Abbildung 59: MPR-Rekonst., QISS-MRA (oben) und SPACE-MRA (unten), Thorakoabdominaler Übergang, Prob. 3 .....	63
Abbildung 60: Durchmesser Aorta desc., thorakoabdominaler Übergang, QISS-MRA (l.) und SPACE-MRA (r.) (MPR-Rekonst.: transversal), Prob. 3 .....	64
Abbildung 61: MPR-Rekonst., QISS-MRA (oben) und SPACE-MRA (unten), distale Aorta desc., Prob. 3 .....	65
Abbildung 62: Durchmesser distale Aorta desc., QISS-MRA (l.) und SPACE-MRA (r.) (MPR-Rekonst.: transversal), Prob. 3 .....	65
Abbildung 63: MIP-3D-Rekonst., SPACE-MRA (l.-o.), CE-MRA (r.-o.), VIBE-MRI (l.-u.), CE-CTA (r.-u.), Pat. 1 .....	67
Abbildung 64: MPR-Rekonstruktion, SPACE-MRA, Engstelle der infrarenalen Aorta desc., Pat. 1 .....	67

Abbildung 65: MPR-Rekonstruktion, CE-MRA, Engstelle der infrarenalen Aorta desc., Pat. 1 .....	68
Abbildung 66: MPR-Rekonstruktion, VIBE-MRI, Engstelle der infrarenalen Aorta desc., Pat. 1 .....	68
Abbildung 67: MPR-Rekonstruktion, CE-CTA, Engstelle der infrarenalen Aorta desc., Pat. 1 .....	68
Abbildung 68: MPR-Rekonstruktion, SPACE-MRA, Aorta ascendens, Pat. 1 .....	69
Abbildung 69: MPR-Rekonstruktion, CE-MRA, Aorta ascendens, Pat. 1 .....	69
Abbildung 70: MPR-Rekonstruktion, VIBE-MRI, Aorta ascendens, Pat. 1 .....	70
Abbildung 71: MPR-Rekonstruktion, CE-CTA, Aorta ascendens, Pat. 1 .....	70
Abbildung 72: Durchmesser Aorta asc., SPACE-MRA (l.-o.), CE-MRA (r.-o.), VIBE-MRI (l.-u.), CE-CTA (r.-u.) (MPR-Rekonstruktion: transversal), Pat. 1 .....	71
Abbildung 73: MPR-Rekonstruktion, SPACE-MRA, vor Abgang der Supraaortalen, Pat. 1 .....	72
Abbildung 74: MPR-Rekonstruktion, CE-MRA, vor Abgang der Supraaortalen, Pat. 1....	72
Abbildung 75: MPR-Rekonstruktion, VIBE-MRI, vor Abgang der Supraaortalen, Pat. 1.	73
Abbildung 76: MPR-Rekonstruktion, CE-CTA, vor Abgang der Supraaortalen, Pat. 1....	73
Abbildung 77: Durchmesser Aorta asc., vor Abgang der Supraaortalen, SPACE-MRA (l.-o.), CE-MRA (r.-o.), VIBE-MRI (l.-u.), CE-CTA (r.-u.) (MPR-Rekonstruktion: schräg-transversal), Pat. 1 .....	74
Abbildung 78: supraaortale Gefäße in der Transversalebene (MPR-Rekonst.), SPACE-MRA (l.-o.), CE-MRA (r.-o.), VIBE-MRI (l.-u.), CE-CTA (r.-u.), Pat. 1 .....	75
Abbildung 79: MPR-Rekonst., SPACE-MRA, nach Abgang der Supraaortalen, Pat. 1 ....	76
Abbildung 80: MPR-Rekonst., CE-MRA, nach Abgang der Supraaortalen, Pat. 1 .....	76
Abbildung 81: MPR-Rekonst., VIBE-MRI, nach Abgang der Supraaortalen, Pat. 1 .....	76
Abbildung 82: MPR-Rekonst., CE-CTA, nach Abgang der Supraaortalen, Pat. 1 .....	77
Abbildung 83: Durchmesser Arcus aortae, nach Abgang der Supraaortalen, SPACE-MRA (l.-o.), CE-MRA (r.-o.), VIBE-MRI (l.-u.), CE-CTA (r.-u.), (MPR-Rekonst.: coronal), Pat. 1 .....	78
Abbildung 84: MPR-Rekonstruktion, SPACE-MRA, Aorta desc., Pat. 1 .....	79
Abbildung 85: MPR-Rekonstruktion, CE-MRA, Aorta desc., Pat. 1 .....	79
Abbildung 86: MPR-Rekonstruktion, VIBE-MRI, Aorta desc., Pat. 1 .....	80
Abbildung 87: MPR-Rekonstruktion, CE-CTA, Aorta desc., Pat. 1 .....	80
Abbildung 88: Durchmesser Aorta desc., SPACE-MRA (l.-o.), CE-MRA (r.-o.), VIBE-MRI (l.-u.), CE-CTA (r.-u.), (MPR-Rekonst.: transversal), Pat. 1 .....	81
Abbildung 89: Durchmesser infrarenale Aorta desc., Engstelle, SPACE-MRA (l.-o.), CE-MRA (r.-o.), VIBE-MRI (l.-u.), CE-CTA (r.-u.), (MPR-Rekonst.: coronal), Pat. 1 .....	82
Abbildung 90: MIP-3D-Rekonst., QISS-MRA, SPACE-MRA, CE-MRA, CE-CTA (von links nach rechts), Pat. 2 (VIBE-MRI-3D-Rekonst. fehlt aufgrund zu schlechter Qualität) .....	83
Abbildung 91: MPR-Rekonstruktion, QISS-MRA, Pathologie (Pfeil), Pat. 2 .....	84
Abbildung 92: MPR-Rekonstruktion, SPACE-MRA, Pathologie (Pfeil), Pat. 2 .....	84
Abbildung 93: MPR-Rekonstruktion, CE-MRA, Pathologie (Pfeil), Pat. 2 .....	85
Abbildung 94: MPR-Rekonstruktionen, VIBE-MRI, Pathologie (Pfeil), Pat. 2 .....	85
Abbildung 95: MPR-Rekonstruktionen, CE-CTA, Pathologie (Pfeil), Pat. 2 .....	86
Abbildung 96: MPR-Rekonstruktion, QISS-MRA, Aorta ascendens, Pat. 2 .....	87
Abbildung 97: MPR-Rekonstruktion, SPACE-MRA, Aorta ascendens, Pat. 2 links: corE., mittig: sag. E., rechts: tra. E. ....	87
Abbildung 98: MPR-Rekonstruktion, CE-MRA, Aorta ascendens, Pat. 2 .....	87
Abbildung 99: MPR-Rekonstruktion, VIBE-MRI, Aorta ascendens, Pat. 2 .....	88

Abbildung 100: MPR-Rekonstruktion, CE-CTA, Aorta ascendens, Pat. 2.....	88
Abbildung 101: Durchmesser Aorta asc., QISS-MRA (l.-o.), SPACE-MRA (m.-o.), CE-MRA (r.-o.), VIBE-MRI (l.-u.), CE-CTA (r.-u.), (MPR-Rekonst.: transversal), Pat. 2.....	89
Abbildung 102: MPR-Rekonstruktion, QISS-MRA, Aorta ascendens, vor Abgang der Supraaortalen, Pat. 2.....	90
Abbildung 103: MPR-Rekonstruktion, SPACE-MRA, Aorta ascendens, vor Abgang der Supraaortalen, Pat. 2.....	90
Abbildung 104: MPR-Rekonstruktion, CE-MRA, Aorta ascendens, vor Abgang der Supraaortalen, Pat. 2.....	90
Abbildung 105: MPR-Rekonstruktion, VIBE-MRI, Aorta ascendens, vor Abgang der Supraaortalen, Pat. 2.....	91
Abbildung 106: MPR-Rekonstruktion, CE-CTA, Aorta ascendens, vor Abgang der Supraaortalen, Pat. 2.....	91
Abbildung 107: Durchmesser Aorta asc., vor Abgang der Supraaortalen, QISS-MRA (l.-o.), SPACE-MRA (m.-o.), CE-MRA (r.-o.), VIBE-MRI (l.-u.), CE-CTA (r.-u.), (MPR-Rekonst.: schräg-transversal), Pat. 2.....	92
Abbildung 108: Supraaortale Gefäße in der Transversalebene (MPR-Rekonst.), QISS-MRA (l.-o.), SPACE-MRA (m.-o.), CE-MRA (r.-o.), VIBE-MRI (l.-u.), CE-CTA (r.-u.), Pat. 2.....	93
Abbildung 109: MPR-Rekonstruktion, QISS-MRA, Arcus aortae, nach Abgang der Supraaortalen, Pat. 2.....	94
Abbildung 110: MPR-Rekonstruktion, SPACE-MRA, Arcus aortae, nach Abgang der Supraaortalen, Pat. 2.....	94
Abbildung 111: MPR-Rekonstruktion, CE-MRA, Arcus aortae, nach Abgang der Supraaortalen, Pat. 2.....	94
Abbildung 112: MPR-Rekonstruktion, VIBE-MRI, Arcus aortae, nach Abgang der Supraaortalen, Pat. 2.....	95
Abbildung 113: MPR-Rekonstruktion, CE-CTA, Arcus aortae, nach Abgang der Supraaortalen, Pat. 2.....	95
Abbildung 114: Durchmesser Arcus aortae, nach Abgang der Supraaortalen, QISS-MRA (l.-o.), SPACE-MRA (m.-o.), CE-MRA (r.-o.), VIBE-MRI (l.-u.), CE-CTA (r.-u.), (MPR-Rekonst.: coronal), Pat. 2.....	96
Abbildung 115: MPR-Rekonstruktion, QISS-MRA, Arcus aortae, Beginn der Pathologie, Pat. 2.....	97
Abbildung 116: MPR-Rekonstruktion, SPACE-MRA, Arcus aortae, Beginn der Pathologie, Pat. 2.....	97
Abbildung 117: MPR-Rekonstruktion, CE-MRA, Arcus aortae, Beginn der Pathologie, Pat. 2.....	97
Abbildung 118: MPR-Rekonstruktion, CE-CTA, Arcus aortae, Beginn der Pathologie, Pat. 2.....	98
Abbildung 119: Durchmesser Arcus aortae, Beginn der Pathologie, QISS-MRA (l.-o.), SPACE-MRA (r.-o.), CE-MRA (l.-u.), CE-CTA (r.-u.), (MPR-Rekonst.: coronal), Pat. 2.....	99
Abbildung 120: MPR-Rekonstruktion, QISS-MRA, Aorta desc., Pat. 2.....	100
Abbildung 121: MPR-Rekonstruktion, SPACE-MRA, Aorta desc., Pat. 2.....	100
Abbildung 122: MPR-Rekonstruktion, CE-MRA, Aorta desc., Pat. 2.....	100
Abbildung 123: MPR-Rekonstruktion, VIBE-MRI, Aorta desc., Pat. 2.....	101
Abbildung 124: MPR-Rekonstruktion, CE-CTA, Aorta desc., Pat. 2.....	101
Abbildung 125: Durchmesser Aorta desc., QISS-MRA (l.-o.), SPACE-MRA (m.-o.), CE-MRA (r.-o.), VIBE-MRI (l.-u.), CE-CTA (r.-u.), (MPR-Rekonst.: transversal), Pat. 2....	102

Abbildung 126: MPR-Rekonstruktion, QISS-MRA, Aorta desc., mittlerer Abschnitt der Pathologie, Pat. 2 .....	103
Abbildung 127: MPR-Rekonstruktion, SPACE-MRA, Aorta desc., mittlerer Abschnitt der Pathologie, Pat. 2 .....	103
Abbildung 128: MPR-Rekonstruktion, CE-MRA, Aorta desc., mittlerer Abschnitt der Pathologie, Pat. 2 .....	104
Abbildung 129: MPR-Rekonstruktion, VIBE-MRI, Aorta desc., mittlerer Abschnitt der Pathologie, Pat. 2 .....	104
Abbildung 130: MPR-Rekonstruktion, CE-CTA, Aorta desc., mittlerer Abschnitt der Pathologie, Pat. 2 .....	104
Abbildung 131: Durchmesser Aorta desc., mittlerer Abschnitt der Pathologie, QISS-MRA (l.-o.), SPACE-MRA (m.-o.), CE-MRA (r.-o.), VIBE-MRI (l.-u.), CE-CTA (r.-u.), (MPR-Rekonst.: transversal), Pat. 2 .....	105
Abbildung 132: MPR-Rekonstruktion, QISS-MRA, Aorta desc., distaler Abschnitt der Pathologie, Pat. 2 .....	106
Abbildung 133: MPR-Rekonstruktion, SPACE-MRA, Aorta desc., distaler Abschnitt der Pathologie, Pat. 2 .....	106
Abbildung 134: MPR-Rekonstruktion, CE-MRA, Aorta desc., distaler Abschnitt der Pathologie, Pat. 2 .....	107
Abbildung 135: MPR-Rekonstruktion, VIBE-MRI, Aorta desc., distaler Abschnitt der Pathologie, Pat. 2 .....	107
Abbildung 136: MPR-Rekonstruktion, CE-CTA, Aorta desc. (o.), Arteriae iliacae communes, distaler Abschnitt der Pathologie, Pat. 2 .....	108
Abbildung 137: MPR-Rekonstruktion, QISS-MRA, Arcus aortae, Entry/Re-Entry ins falsche Lumen, Pat. 2 .....	109
Abbildung 138: MPR-Rekonstruktion, SPACE-MRA, Arcus aortae, Entry/Re-Entry ins falsche Lumen, Pat. 2 .....	109
Abbildung 139: MPR-Rekonstruktion, CE-MRA, Arcus aortae, Entry/Re-Entry ins falsche Lumen, Pat. 2 .....	110
Abbildung 140: MPR-Rekonstruktion, VIBE-MRI, Arcus aortae, Entry/Re-Entry ins falsche Lumen, Pat. 2 .....	110
Abbildung 141: MPR-Rekonstruktion, CE-CTA, Arcus aortae, Entry/Re-Entry ins falsche Lumen, Pat. 2 .....	111
Abbildung 142: MIP-3D-Rekonst., QISS-MRA (l.-o.), SPACE-MRA (m.-o. (proximal) + r.-o. (distal)), CE-MRA (l.-u. (schräg sag-cor) + r.-u. (sag)), Pat. 3 .....	113
Abbildung 143: MPR-Rekonstruktion, QISS-MRA, Proximale Pathologie, Pat. 3 .....	114
Abbildung 144: MPR-Rekonstruktion, SPACE-MRA, Proximale Pathologie, Pat. 3 .....	114
Abbildung 145: MPR-Rekonstruktion, CE-MRA, Proximale Pathologie, Pat. 3 .....	114
Abbildung 146: MPR-Rekonstruktion, VIBE-MRI, Proximale Pathologie, Pat. 3 .....	115
Abbildung 147: MPR-Rekonstruktion, QISS-MRA, Distale Pathologie, Pat. 3 .....	115
Abbildung 148: MPR-Rekonstruktion, SPACE-MRA, Distale Pathologie, Pat. 3 .....	116
Abbildung 149: MPR-Rekonstruktion, CE-MRA, Distale Pathologie, Pat. 3 .....	116
Abbildung 150: MPR-Rekonstruktion, VIBE-MRI, Distale Pathologie, Pat. 3 .....	116
Abbildung 151: MPR-Rekonstruktion, QISS-MRA, Aorta ascendens, Pat. 3 .....	117
Abbildung 152: MPR-Rekonstruktion, SPACE-MRA, Aorta ascendens, Pat. 3 .....	117
Abbildung 153: MPR-Rekonstruktion, CE-MRA, Aorta ascendens, Pat. 3 .....	118
Abbildung 154: MPR-Rekonstruktion, VIBE-MRI, Aorta ascendens, Pat. 3 .....	118
Abbildung 155: Durchmesser Aorta asc., QISS-MRA (l.-o.), SPACE-MRA (r.-o.), CE-MRA (l.-u.), VIBE-MRI (r.-u.) (MPR-Rekonst.: transversal), Pat. 3 .....	119

Abbildung 156: MPR-Rekonstruktion, QISS-MRA, Aorta ascendens, vor Abgang der Supraaortalen, Pat. 3 .....	120
Abbildung 157: MPR-Rekonstruktion, SPACE-MRA, Aorta ascendens, vor Abgang der Supraaortalen, Pat. 3 .....	120
Abbildung 158: MPR-Rekonstruktion, CE-MRA, Aorta ascendens, vor Abgang der Supraaortalen, Pat. 3 .....	121
Abbildung 159: MPR-Rekonstruktion, VIBE-MRI, Aorta ascendens, vor Abgang der Supraaortalen, Pat. 3 .....	121
Abbildung 160: Durchmesser Aorta asc., vor Abgang der Supraaortalen, QISS-MRA (l.-o.), SPACE-MRA (r.-o.), CE-MRA (l.-u.) (MPR-Rekonst.: transversal), Pat. 3 .....	122
Abbildung 161: Supraaortale GefäÙe in der Transversalebene (MPR-Rekonst.), QISS-MRA (l.-o.), SPACE-MRA (r.-o.), CE-MRA (l.-u.), VIBE-MRI (r.-u.), Pat. 3 .....	123
Abbildung 162: MPR-Rekonstruktion, QISS-MRA, Arcus aortae, nach Abgang der Supraaortalen, Pat. 3 .....	124
Abbildung 163: MPR-Rekonstruktion, SPACE-MRA, Arcus aortae, nach Abgang der Supraaortalen, Pat. 3 .....	124
Abbildung 164: MPR-Rekonstruktion, CE-MRA, Arcus aortae, nach Abgang der Supraaortalen, Pat. 3 .....	125
Abbildung 165: MPR-Rekonstruktion, VIBE-MRI, Arcus aortae, nach Abgang der Supraaortalen, Pat. 3 .....	125
Abbildung 166: Durchmesser Arcus aortae, nach Abgang der Supraaortalen, QISS-MRA (l.-o.), SPACE-MRA (r.-o.), CE-MRA (l.-u.) (MPR-Rekonst.: transversal), Pat. 3 .....	126
Abbildung 167: MPR-Rekonstruktion, QISS-MRA, Aorta descendens, Pat. 3 .....	127
Abbildung 168: MPR-Rekonstruktion, SPACE-MRA, Aorta descendens, Pat. 3 .....	127
Abbildung 169: MPR-Rekonstruktion, CE-MRA, Aorta descendens, Pat. 3 .....	128
Abbildung 170: MPR-Rekonstruktion, VIBE-MRI, Aorta descendens, Pat. 3 .....	128
Abbildung 171: Durchmesser Aorta desc., QISS-MRA (l.-o.), SPACE-MRA (r.-o.), CE-MRA (l.-u.) (MPR-Rekonst.: transversal), Pat. 3 .....	129
Abbildung 172: MPR-Rekonstruktion, QISS-MRA, Aorta descendens, abdominelle Pathologie, Pat. 3 .....	130
Abbildung 173: MPR-Rekonstruktion, SPACE-MRA, Aorta descendens, abdominelle Pathologie, Pat. 3 .....	130
Abbildung 174: MPR-Rekonstruktion, CE-MRA, Aorta descendens, abdominelle Pathologie, Pat. 3 .....	131
Abbildung 175: MPR-Rekonstruktion, VIBE-MRI, Aorta descendens, abdominelle Pathologie, Pat. 3 .....	131
Abbildung 176: Durchmesser Aorta desc., abdominelle Pathologie, QISS-MRA (l.-o.), SPACE-MRA (r.-o.), CE-MRA (l.-u.) (MPR-Rekonst.: transversal), Pat. 3 .....	132
Abbildung 177: MPR-Rekonstruktion, QISS-MRA, Aorta descendens, abdominelle Pathologie, Entry, Pat. 3 .....	133
Abbildung 178: MPR-Rekonstruktion, SPACE-MRA, Aorta descendens, abdominelle Pathologie, Entry, Pat. 3 .....	133
Abbildung 179: MPR-Rekonstruktion, CE-MRA, Aorta descendens, abdominelle Pathologie, Entry, Pat. 3 .....	134
Abbildung 180: MPR-Rekonstruktion, VIBE-MRI, Aorta descendens, abdominelle Pathologie, Entry, Pat. 3 .....	134
Abbildung 181: MIP-3D-Rekonst., SPACE-MRA (l.), VIBE-MRI (m.), CE-CTA (r.), Pat. 4 .....	135
Abbildung 182: MIP-3D-Rekonst., CE-MRA (von links nach rechts: 1-4; Bild 1+2: 1. Phase, Bild 3: 2. Phase und Bild 4: 3. Phase), Pat. 4 .....	136

Abbildung 183: MPR-Rekonstruktion, SPACE-MRA, Pathologie, Pat. 4 .....	137
Abbildung 184: MPR-Rekonstruktion, CE-MRA, Pathologie, Pat. 4.....	138
Abbildung 185: MPR-Rekonstruktion, VIBE-MRI, Pathologie, Pat. 4.....	140
Abbildung 186: MPR-Rekonstruktion, CE-CTA, Pathologie, Pat. 4.....	141
Abbildung 187: MPR-Rekonstruktion, SPACE-MRA, Aorta asc., Pat. 4 .....	142
Abbildung 188: MPR-Rekonstruktion, CE-MRA, Aorta asc., Pat. 4.....	142
Abbildung 189: MPR-Rekonstruktion, VIBE-MRI, Aorta asc., Pat. 4.....	143
Abbildung 190: MPR-Rekonstruktion, CE-MRA, Aorta asc., Pat. 4.....	143
Abbildung 191: Durchmesser Aorta asc., SPACE-MRA (l.-o.), CE-MRA (r.-o.), VIBE- MRI (l.-u.), CE-CTA (r.-u.) (MPR-Rekonst.: transversal), Pat. 4.....	144
Abbildung 192: MPR-Rekonstruktion, SPACE-MRA, Aorta asc., vor Abgang der Supraaortalen, Pat. 4.....	145
Abbildung 193: MPR-Rekonstruktion, CE-MRA, Aorta asc., vor Abgang der Supraaortalen, Pat. 4.....	145
Abbildung 194: MPR-Rekonstruktion, VIBE-MRI, Aorta asc., vor Abgang der Supraaortalen, Pat. 4.....	146
Abbildung 195: MPR-Rekonstruktion, CE-CTA, Aorta asc., vor Abgang der Supraaortalen, Pat. 4.....	146
Abbildung 196: Durchmesser Aorta asc., vor Abgang der Supraaortalen, SPACE-MRA (l.- o.), CE-MRA (r.-o.), VIBE-MRI (l.-u.), CE-CTA (r.-u.) (MPR-Rekonst.: transversal), Pat. 4 .....	147
Abbildung 197: Supraaortale Gefäße in der Transversalebene (MPR-Rekonst.), SPACE- MRA (l.-o.), CE-MRA (r.-o.), VIBE-MRI (l.-u.), CE-CTA (r.-u.), Pat. 4.....	148
Abbildung 198: MPR-Rekonstruktion, SPACE-MRA, Arcus aortae, nach Abgang der Supraaortalen, Pat. 4.....	149
Abbildung 199: MPR-Rekonstruktion, CE-MRA, Arcus aortae, nach Abgang der Supraaortalen, Pat. 4.....	149
Abbildung 200: MPR-Rekonstruktion, VIBE-MRI, Arcus aortae, nach Abgang der Supraaortalen, Pat. 4.....	150
Abbildung 201: MPR-Rekonstruktion, CE-CTA, Arcus aortae, nach Abgang der Supraaortalen, Pat. 4.....	150
Abbildung 202: Durchmesser Arcus aortae., nach Abgang der Supraaortalen, SPACE- MRA (l.-o.), CE-MRA (r.-o.), VIBE-MRI (l.-u.), CE-CTA (r.-u.) (MPR-Rekonst.: coronal), Pat. 4.....	151
Abbildung 203: MPR-Rekonstruktion, SPACE-MRA, Aorta desc., Pat. 4 .....	152
Abbildung 204: MPR-Rekonstruktion, CE-MRA, Aorta desc., Pat. 4 .....	152
Abbildung 205: MPR-Rekonstruktion, VIBE-MRI, Aorta desc., Pat. 4.....	152
Abbildung 206: MPR-Rekonstruktion, CE-CTA, Aorta desc., Pat. 4.....	153
Abbildung 207: Durchmesser Aorta desc., SPACE-MRA (l.-o.), CE-MRA (r.-o.), VIBE- MRI (l.-u.), CE-CTA (r.-u.) (MPR-Rekonst.: coronal), Pat. 4.....	154
Abbildung 208: MPR-Rekonstruktion, SPACE-MRA, Aorta desc., mittlerer Abschnitt der Pathologie, Pat. 4.....	155
Abbildung 209: MPR-Rekonstruktion, CE-MRA, Aorta desc., mittlerer Abschnitt der Pathologie, Pat. 4.....	155
Abbildung 210: MPR-Rekonstruktion, VIBE-MRI, Aorta desc., mittlerer Abschnitt der Pathologie, Pat. 4.....	156
Abbildung 211: MPR-Rekonstruktion, CE-CTA, Aorta desc., mittlerer Abschnitt der Pathologie, Pat. 4.....	156

Abbildung 212: Durchmesser Aorta desc., mittlerer Abschnitt der Pathologie, SPACE-MRA (l.-o.), CE-MRA (r.-o.), VIBE-MRI (l.-u.), CE-CTA (r.-u.) (MPR-Rekonst.: coronal), Pat. 4.....	157
Abbildung 213: MPR-Rekonstruktion, SPACE-MRA, Aorta desc., distaler Abschnitt der Pathologie, Pat. 4.....	158
Abbildung 214: MPR-Rekonstruktion, CE-MRA, Aorta desc., distaler Abschnitt der Pathologie, Pat. 4.....	158
Abbildung 215: MPR-Rekonstruktion, VIBE-MRI, Aorta desc., distaler Abschnitt der Pathologie, Pat. 4.....	159
Abbildung 216: MPR-Rekonstruktion, CE-CTA, Aorta desc., distaler Abschnitt der Pathologie, Pat. 4.....	159
Abbildung 217: MPR-Rekonstruktion, SPACE-MRA, Entry, Pat. 4.....	160
Abbildung 218: MPR-Rekonstruktion, CE-MRA, Entry, Pat. 4.....	160
Abbildung 219: MPR-Rekonstruktion, VIBE-MRI, Entry, Pat. 4.....	161
Abbildung 220: MPR-Rekonstruktion, CE-CTA, Entry, Pat. 4.....	161
Abbildung 221: MPR-Rekonstruktion, CE-MRA, Arteriae illiacae communes, Pat. 4....	162
Abbildung 222: MPR-Rekonstruktion, VIBE-MRI, Arteriae illiacae communes, Pat. 4.	162
Abbildung 223: MIP-3D-Rekonst., SPACE-MRA (l.-o.), .....	164
Abbildung 224: MPR-Rekonstruktion, SPACE-MRA, Pathologie, Pat. 5.....	165
Abbildung 225: MPR-Rekonstruktion, CE-MRA, Pathologie, Pat. 5.....	165
Abbildung 226: MPR-Rekonstruktion, VIBE-MRI, Pathologie, Pat. 5.....	165
Abbildung 227: MPR-Rekonstruktion, CE-CTA, Pathologie, Pat. 5.....	166
Abbildung 228: MPR-Rekonstruktion, SPACE-MRA, Aorta asc., Pat. 5.....	166
Abbildung 229: MPR-Rekonstruktion, CE-MRA, Aorta asc., Pat. 5.....	167
Abbildung 230: MPR-Rekonstruktion, VIBE-MRI, Aorta asc., Pat. 5.....	167
Abbildung 231: MPR-Rekonstruktion, CE-CTA, Aorta asc., Pat. 5.....	167
Abbildung 232: Durchmesser Aorta asc., SPACE-MRA (l.-o.), CE-MRA (r.-o.), VIBE-MRI (l.-u.), CE-CTA (r.-u.) (MPR-Rekonst.: transversal), Pat. 5.....	168
Abbildung 233: MPR-Rekonstruktion, SPACE-MRA, Aorta asc., vor Abgang der Supraaortalen, Pat. 5.....	169
Abbildung 234: MPR-Rekonstruktion, CE-MRA, Aorta asc., vor Abgang der Supraaortalen, Pat. 5.....	169
Abbildung 235: MPR-Rekonstruktion, VIBE-MRI, Aorta asc., vor Abgang der Supraaortalen, Pat. 5.....	170
Abbildung 236. MPR-Rekonstruktion, CE-ctA, Aorta asc., vor Abgang der Supraaortalen, Pat. 5.....	170
Abbildung 237: Durchmesser Aorta asc., vor Abgang der Supraaortalen, SPACE-MRA (l.-o.), CE-MRA (r.-o.), VIBE-MRI (l.-u.), CE-CTA (r.-u.) (MPR-Rekonst.: transversal), Pat. 5.....	171
Abbildung 238: Supraaortale Gefäße in der Transversalebene (MPR-Rekonst.), SPACE-MRA (l.-o.), CE-MRA (r.-o.), VIBE-MRI (l.-u.), CE-CTA (r.-u.), Pat. 5.....	172
Abbildung 239: MPR-Rekonstruktion, SPACE-MRA, Arcus aortae, nach Abgang der Supraaortalen, Pat. 5.....	173
Abbildung 240: MPR-Rekonstruktion, CE-MRA, Arcus aortae, nach Abgang der Supraaortalen, Pat. 5.....	173
Abbildung 241: MPR-Rekonstruktion, VIBE-MRI, Arcus aortae, nach Abgang der Supraaortalen, Pat. 5.....	174
Abbildung 242: MPR-Rekonstruktion, CE-CTA, Arcus aortae, nach Abgang der Supraaortalen, Pat. 5.....	174

Abbildung 243: Durchmesser Aorta asc., vor Abgang der Supraaortalen, SPACE-MRA (l.-o.), CE-MRA (r.-o.), VIBE-MRI (l.-u.), CE-CTA (r.-u.) (MPR-Rekonst.: transversal), Pat. 5 .....	175
Abbildung 244: MPR-Rekonstruktion, SPACE-MRA, Aorta desc., Pat. 5 .....	176
Abbildung 245: MPR-Rekonstruktion, CE-MRA, Aorta desc., Pat. 5.....	176
Abbildung 246: MPR-Rekonstruktion, VIBE-MRI, Aorta desc., Pat. 5.....	177
Abbildung 247: MPR-Rekonstruktion, CE-CTA, Aorta desc., Pat. 5.....	177
Abbildung 248: Durchmesser Aorta asc., vor Abgang der Supraaortalen, SPACE-MRA (l.-o.), CE-MRA (r.-o.), VIBE-MRI (l.-u.), CE-CTA (r.-u.) (MPR-Rekonst.: transversal), Pat. 5 .....	178
Abbildung 249: MPR-Rekonstruktion, SPACE-MRA, Aorta desc., Pat. 5 .....	179
Abbildung 250: MPR-Rekonstruktion, CE-MRA, Aorta desc., Pat. 5.....	179
Abbildung 251: MPR-Rekonstruktion, VIBE-MRI, Aorta desc., Pat. 5.....	180
Abbildung 252: MPR-Rekonstruktion, CE-CTA, Aorta desc., Pat. 5.....	180
Abbildung 253: Durchmesser Aorta asc., vor Abgang der Supraaortalen, SPACE-MRA (l.-o.), CE-MRA (r.-o.), VIBE-MRI (l.-u.), CE-CTA (r.-u.) (MPR-Rekonst.: transversal), Pat. 5 .....	181
Abbildung 254: Durchmesser Aorta asc., vor Abgang der Supraaortalen, SPACE-MRA (l.-o.), CE-MRA (r.-o.), VIBE-MRI (l.-u.), CE-CTA (r.-u.) (MPR-Rekonst.: transversal), Pat. 5 .....	181
Abbildung 255: MIP-3D-Rekonst., SPACE-MRA (l.), CE-MRA (m. und r.), Pat. 6.....	182
Abbildung 256: MIP-3D-Rekonst., VIBE-MRI (l. und m.), CE-CTA (r.), Pat. 6.....	183
Abbildung 257: MPR-Rekonstruktion, SPACE-MRA, Pathologie, Pat. 6.....	184
Abbildung 258: MPR-Rekonstruktion, CE-MRA, Pathologie, Pat. 6.....	185
Abbildung 259: MPR-Rekonstruktion, VIBE-MRI, Pathologie, Pat. 6.....	185
Abbildung 260: MPR-Rekonstruktion, CE-CTA, Pathologie, Pat. 6.....	186
Abbildung 261: MPR-Rekonstruktion, SPACE-MRA, Aorta asc., Pat. 6 .....	186
Abbildung 262: MPR-Rekonstruktion, CE-MRA, Aorta asc., Pat. 6.....	186
Abbildung 263: MPR-Rekonstruktion, CE-MRA, Aorta asc., Pat. 6 .....	187
Abbildung 264: MPR-Rekonstruktion, CE-MRA, Aorta asc., Pat. 6.....	187
Abbildung 265: Durchmesser Aorta asc., SPACE-MRA (l.-o.), CE-MRA (r.-o.), VIBE-MRI (l.-u.), CE-CTA (r.-u.) (MPR-Rekonst.: transversal), Pat. 6.....	188
Abbildung 266: MPR-Rekonstruktion, SPACE-MRA, Aorta asc., vor Abgang der Supraaortalen, Pat. 6.....	189
Abbildung 267: MPR-Rekonstruktion, CE-MRA, Aorta asc., vor Abgang der Supraaortalen, Pat. 6.....	189
Abbildung 268: MPR-Rekonstruktion, VIBE-MRI, Aorta asc., vor Abgang der Supraaortalen, Pat. 6.....	190
Abbildung 269: MPR-Rekonstruktion, CE-CTA, Aorta asc., vor Abgang der Supraaortalen, Pat. 6.....	190
Abbildung 270: Durchmesser Aorta asc., vor Abgang der Supraaortalen, SPACE-MRA (l.-o.), CE-MRA (r.-o.), VIBE-MRI (l.-u.), CE-CTA (r.-u.) (MPR-Rekonst.: transversal), Pat. 6 .....	191
Abbildung 271: Supraaortale Gefäße in der Transversalebene (MPR-Rekonst.), SPACE-MRA (l.-o.), CE-MRA (r.-o.), VIBE-MRI (l.-u.), CE-CTA (r.-u.), Pat. 6.....	192
Abbildung 272: MPR-Rekonstruktion, SPACE-MRA, Arcus aortae, nach Abgang der Supraaortalen, Pat. 6.....	193
Abbildung 273: MPR-Rekonstruktion, CE-MRA, Arcus aortae, nach Abgang der Supraaortalen, Pat. 6.....	193
Abbildung 274: MPR-Rekonstruktion, VIBE-MRI, Arcus aortae, nach Abgang der Supraaortalen, Pat. 6.....	194
Abbildung 275: MPR-Rekonstruktion, CE-CTA, Arcus aortae, nach Abgang der Supraaortalen, Pat. 6.....	194

Abbildung 276: Durchmesser Arcus aortae, nach Abgang der Supraaortalen, SPACE-MRA (l.-o.), CE-MRA (r.-o.), VIBE-MRI (l.-u.), CE-CTA (r.-u.) (MPR-Rekonst.: coronal), Pat. 6 .....	195
Abbildung 277: MPR-Rekonstruktion, SPACE-MRA, Aorta desc., Pat. 6 .....	196
Abbildung 278: MPR-Rekonstruktion, CE-MRA, Aorta desc., Pat. 6 .....	196
Abbildung 279: MPR-Rekonstruktion, VIBE-MRI, Aorta desc., Pat. 6 .....	197
Abbildung 280: MPR-Rekonstruktion, CE-CTA, Aorta desc., Pat. 6 .....	197
Abbildung 281: Durchmesser Aorta desc., SPACE-MRA (l.-o.), CE-MRA (r.-o.), VIBE-MRI (l.-u.), CE-CTA (r.-u.) (MPR-Rekonst.: transversal), Pat. 6 .....	198
Abbildung 282: MPR-Rekonstruktion, SPACE-MRA, distale Pathologie, Pat. 6 .....	199
Abbildung 283: MPR-Rekonstruktion, CE-MRA, distale Pathologie, Pat. 6 .....	199
Abbildung 284: MPR-Rekonstruktion, VIBE-MRI, distale Pathologie, Pat. 6 .....	200
Abbildung 285: MPR-Rekonstruktion, CE-CTA, distale Pathologie, Pat. 6 .....	200
Abbildung 286: Durchmesser Aorta desc., SPACE-MRA, proximaler „Knickpunkt“ (l.), distaler „Knickpunkt“ (r.) (MPR-Rekonst.: transversal), Pat. 6 .....	201
Abbildung 287: Durchmesser Aorta desc., CE-MRA, proximaler „Knickpunkt“ (l.), distaler „Knickpunkt“ (r.) (MPR-Rekonst.: transversal), Pat. 6 .....	201
Abbildung 288: Durchmesser Aorta desc., VIBE-MRI, proximaler „Knickpunkt“ (l.), distaler „Knickpunkt“ (r.) (MPR-Rekonst.: transversal), Pat. 6 .....	202
Abbildung 289: Durchmesser Aorta desc., CE-CTA, proximaler „Knickpunkt“ (l.), distaler „Knickpunkt“ (r.) (MPR-Rekonst.: transversal), Pat. 6 .....	202
Abbildung 290: MPR-Rekonstruktion, SPACE-MRA, Engstelle, Pat. 6 .....	203
Abbildung 291: MPR-Rekonstruktion, CE-MRA, Engstelle, Pat. 6 .....	203
Abbildung 292: MPR-Rekonstruktion, VIBE-MRI, Engstelle, Pat. 6 .....	204
Abbildung 293: MPR-Rekonstruktion, CE-CTA, Engstelle, Pat. 6 .....	204
Abbildung 294: MIP-3D-Rekonst., QISS-MRA (l.), SPACE-MRA (r.), Pat. 7 .....	205
Abbildung 295: MIP-3D-Rekonst., CE-MRA (l., m., r.), Pat. 7 .....	206
Abbildung 296: MIP-3D-Rekonst., VIBE-MRI (l.), CE-CTA (r.), Pat. 7 .....	206
Abbildung 297: MPR-Rekonstruktion, QISS-MRA, Pathologie, Pat. 7 .....	207
Abbildung 298: MPR-Rekonstruktion, SPACE-MRA, Pathologie, Pat. 7 .....	207
Abbildung 299: MPR-Rekonstruktion, CE-MRA, Pathologie, Pat. 7 .....	207
Abbildung 300: MPR-Rekonstruktion, VIBE-MRI, Pathologie, Pat. 7 .....	208
Abbildung 301: MPR-Rekonstruktion, CE-CTA, Pathologie, Pat. 7 .....	208
Abbildung 302: MPR-Rekonstruktion, QISS-MRA, Aorta asc., Pat. 7 .....	209
Abbildung 303: MPR-Rekonstruktion, SPACE-MRA, Aorta asc., Pat. 7 .....	209
Abbildung 304: MPR-Rekonstruktion, CE-MRA, Aorta asc., Pat. 7 .....	209
Abbildung 305: MPR-Rekonstruktion, VIBE-MRI, Aorta asc., Pat. 7 .....	210
Abbildung 306: MPR-Rekonstruktion, CE-CTA, Aorta asc., Pat. 7 .....	210
Abbildung 307: Durchmesser Aorta asc., QISS-MRA (l.-o.), SPACE-MRA (m.-o.), CE-MRA (r.-o.), VIBE-MRI (l.-u.), CE-CTA (r.-u.), (MPR-Rekonst.: transversal), Pat. 7 ...	211
Abbildung 308: MPR-Rekonstruktion, QISS-MRA, Aorta asc., vor Abgang der Supraaortalen, Pat. 7 .....	212
Abbildung 309: MPR-Rekonstruktion, SPACE-MRA, Aorta asc., vor Abgang der Supraaortalen, Pat. 7 .....	212
Abbildung 310: MPR-Rekonstruktion, CE-MRA, Aorta asc., vor Abgang der Supraaortalen, Pat. 7 .....	212
Abbildung 311: MPR-Rekonstruktion, VIBE-MRI, Aorta asc., vor Abgang der Supraaortalen, Pat. 7 .....	213
Abbildung 312: MPR-Rekonstruktion, QISS-MRA, Aorta asc., vor Abgang der Supraaortalen, Pat. 7 .....	213

Abbildung 313: Durchmesser Aorta asc., vor Abgang der Supraaortalen QISS-MRA (l.-o.), SPACE-MRA (m.-o.), CE-MRA (r.-o.), VIBE-MRI (l.-u.), CE-CTA (r.-u.), (MPR-Rekonst.: transversal), Pat. 7 .....	214
Abbildung 314: Supraaortale GefäÙe in der Transversalebene (MPR-Rekonst.), SPACE-MRA (l.-o.), CE-MRA (r.-o.), VIBE-MRI (l.-u.), CE-CTA (r.-u.), Pat. 6.....	215
Abbildung 315: MPR-Rekonstruktion, QISS-MRA, Arcus aortae, nach Abgang der Supraaortalen, Pat. 7.....	216
Abbildung 316: MPR-Rekonstruktion, SPACE-MRA, Arcus aortae, nach Abgang der Supraaortalen, Pat. 7.....	216
Abbildung 317: MPR-Rekonstruktion, CE-MRA, Arcus aortae, nach Abgang der Supraaortalen, Pat. 7.....	216
Abbildung 318: MPR-Rekonstruktion, VIBE-MRI, Arcus aortae, nach Abgang der Supraaortalen, Pat. 7.....	217
Abbildung 319: MPR-Rekonstruktion, CE-CTA, Arcus aortae, nach Abgang der Supraaortalen, Pat. 7.....	217
Abbildung 320: Durchmesser Arcus aortae, nach Abgang der Supraaortalen QISS-MRA (l.-o.), SPACE-MRA (m.-o.), CE-MRA (r.-o.), VIBE-MRI (l.-u.), CE-CTA (r.-u.), (MPR-Rekonst.: coronal), Pat. 7 .....	218
Abbildung 321: MPR-Rekonstruktion, QISS-MRA, Aorta desc., Pat. 7 .....	219
Abbildung 322: MPR-Rekonstruktion, SPACE-MRA, Aorta desc., Pat. 7 .....	219
Abbildung 323: MPR-Rekonstruktion, CE-MRA, Aorta desc., Pat. 7.....	219
Abbildung 324: MPR-Rekonstruktion, VIBE-MRI, Aorta desc., Pat. 7.....	220
Abbildung 325: MPR-Rekonstruktion, CE-CTA, Aorta desc., Pat. 7.....	220
Abbildung 326: Durchmesser Aorta desc. QISS-MRA (l.-o.), SPACE-MRA (m.-o.), CE-MRA (r.-o.), VIBE-MRI (l.-u.), CE-CTA (r.-u.), (MPR-Rekonst.: transversal), Pat. 7....	221
Abbildung 327: MPR-Rekonstruktion, QISS-MRA, mittlerer Abschnitt der Pathologie,	222
Abbildung 328: MPR-Rekonstruktion, SPACE-MRA, mittlerer Abschnitt der Pathologie, .....	222
Abbildung 329: MPR-Rekonstruktion, CE-MRA, mittlerer Abschnitt der Pathologie, ...	222
Abbildung 330: MPR-Rekonstruktion, VIBE-MRI, mittlerer Abschnitt der Pathologie,.	223
Abbildung 331: MPR-Rekonstruktion, CE-CTA, mittlerer Abschnitt der Pathologie, ....	223
Abbildung 332: Durchmesser Aorta desc. QISS-MRA (l.-o.), SPACE-MRA (m.-o.), CE-MRA (r.-o.), VIBE-MRI (l.-u.), CE-CTA (r.-u.), (MPR-Rekonst.: transversal), Pat. 7....	224
Abbildung 333: MPR-Rekonstruktion, SPACE-MRA, distaler Abschnitt der Pathologie, .....	225
Abbildung 334: MPR-Rekonstruktion, CE-MRA, distaler Abschnitt der Pathologie, .....	226
Abbildung 335: MPR-Rekonstruktion, VIBE-MRI, distaler Abschnitt der Pathologie,...	226
Abbildung 336: MPR-Rekonstruktion, CE-CTA, distaler Abschnitt der Pathologie, .....	227
Abbildung 337: Durchmesser Aorta desc., distaler Abschnitt der Pathologie, QISS-MRA (l.-o.), SPACE-MRA (m.-o.), CE-MRA (r.-o.), VIBE-MRI (l.-u.), CE-CTA (r.-u.), (MPR-Rekonst.: transversal), Pat. 7 .....	228
Abbildung 338: MPR-Rekonstruktion, QISS-MRA, Entry, Pat. 7 .....	229
Abbildung 339: MPR-Rekonstruktion, SPACE-MRA, Entry, Pat. 7.....	229
Abbildung 340: MPR-Rekonstruktion, CE-MRA, Entry, Pat. 7.....	230
Abbildung 341: MPR-Rekonstruktion, VIBE-MRI, Entry, Pat. 7 .....	230
Abbildung 342: MPR-Rekonstruktion, CE-CTA, Entry, Pat. 7 .....	230
Abbildung 343: MPR-Rekonstruktion, QISS-MRA, Wandthrombus, Pat. 7.....	231
Abbildung 344: MPR-Rekonstruktion, SPACE-MRA, Wandthrombus, Pat. 7 .....	231
Abbildung 345: MPR-Rekonstruktion, CE-MRA, Wandthrombus, Pat. 7 .....	231
Abbildung 346: MPR-Rekonstruktion, VIBE-MRI, Wandthrombus, Pat. 7.....	232

Abbildung 347: MPR-Rekonstruktion, CE-CTA, Wandthrombus, Pat. 7 .....	232
Abbildung 348: 4D-Flow, Flow - Strömungsgeschwindigkeit und Volumenstrom, Prob. 1 .....	234
Abbildung 349: 4D-Flow, Flow (l.) und Backflow (r.), Prob. 1 .....	236
Abbildung 350: 4D-Flow, Wall Shear Stress, Prob. 1 .....	237
Abbildung 351: 4D-Flow, Blutdruckdifferenz, Prob. 1 .....	238
Abbildung 352: 4D-Flow, Energieverlust, Prob. 1 .....	239
Abbildung 353: 4D-Flow, Flow - Strömungsgeschwindigkeit und Volumenstrom, Prob. 2 .....	240
Abbildung 354: 4D-Flow, Wall Shear Stress, Prob. 2 .....	241
Abbildung 355: 4D-Flow, Blutdruckdifferenz, Prob. 2 .....	242
Abbildung 356: 4D-Flow, Energieverlust, Prob. 2 .....	243
Abbildung 357: 4D-Flow, Flow - Strömungsgeschwindigkeit und Volumenstrom, Prob. 3 .....	244
Abbildung 358: 4D-Flow, Wall Shear Stress, Prob. 2 .....	245
Abbildung 359: 4D-Flow, Blutdruckdifferenz, Prob. 3 .....	246
Abbildung 360: 4D-Flow, Energieverlust, Prob. 3 .....	247
Abbildung 361: 4D-Flow, Flow - Strömungsgeschwindigkeit und Volumenstrom, Pat. 1 .....	249
Abbildung 362: 4D-Flow, Wall Shear Stress, Pat. 1 .....	250
Abbildung 363: 4D-Flow, Blutdruckdifferenz, Pat. 1 .....	251
Abbildung 364: 4D-Flow, Energieverlust, Pat. 1 .....	252
Abbildung 365: 4D-Flow, Flow - Strömungsgeschwindigkeit und Volumenstrom, Pat. 2 .....	254
Abbildung 366: 4D-Flow, Wall Shear Stress, Pat. 2 .....	255
Abbildung 367: 4D-Flow, Blutdruckdifferenz, Pat. 2 .....	256
Abbildung 368: 4D-Flow, Energieverlust, Pat. 2 .....	257
Abbildung 369: 4D-Flow, Flow - Strömungsgeschwindigkeit und Volumenstrom, Pat. 3 .....	259
Abbildung 370: 4D-Flow, Wall Shear Stress, Pat. 3 .....	260
Abbildung 371: 4D-Flow, Blutdruckdifferenz, Pat. 3 .....	261
Abbildung 372: 4D-Flow, Energieverlust, Pat. 3 .....	262
Abbildung 373: 4D-Flow, Flow - Strömungsgeschwindigkeit und Volumenstrom, Pat. 4, Aufnahme 1 .....	265
Abbildung 374: 4D-Flow, Flow - Strömungsgeschwindigkeit und Volumenstrom, Pat. 4, Aufnahme 2 .....	265
Abbildung 375: 4D-Flow, Wall Shear Stress, Pat. 4, Aufnahme 1 .....	267
Abbildung 376: 4D-Flow, Wall Shear Stress, Pat. 4, Aufnahme 2 .....	267
Abbildung 377: 4D-Flow, Blutdruckdifferenz, Pat. 4, Aufnahme 1 .....	269
Abbildung 378: 4D-Flow, Blutdruckdifferenz, Pat. 4, Aufnahme 2 .....	269
Abbildung 379: 4D-Flow, Energieverlust, Pat. 4, Aufnahme 1 .....	270
Abbildung 380: 4D-Flow, Energieverlust, Pat. 4, Aufnahme 2 .....	271
Abbildung 381: 4D-Flow, Flow - Strömungsgeschwindigkeit und Volumenstrom, Pat. 5 .....	273
Abbildung 382: 4D-Flow, Wall Shear Stress, Pat. 5 .....	274
Abbildung 383: 4D-Flow, Blutdruckdifferenz, Pat. 5 .....	275
Abbildung 384: 4D-Flow, Energieverlust, Pat. 5 .....	276
Abbildung 385: 4D-Flow, Flow - Strömungsgeschwindigkeit und Volumenstrom, Pat. 6 .....	278
Abbildung 386: 4D-Flow, Wall Shear Stress, Pat. 6 .....	279

Abbildung 387: 4D-Flow, Blutdruckdifferenz, Pat. 6 .....	280
Abbildung 388: 4D-Flow, Energieverlust, Pat. 6 .....	281
Abbildung 389: 4D-Flow, Flow - Strömungsgeschwindigkeit und Volumenstrom, Pat. 7 .....	283
Abbildung 390: 4D-Flow, Wall Shear Stress, Pat. 7 .....	284
Abbildung 391: 4D-Flow, Blutdruckdifferenz, Pat. 7 .....	285
Abbildung 392: 4D-Flow, Energieverlust, Pat. 7 .....	286

## Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Messebenen zur Auswertung der 4D-Flow-Aufnahmen, Probandinnen.....	233
Tabelle 2: Messebenen zur Auswertung der 4D-Flow-Aufnahmen, Patientin 1.....	248
Tabelle 3: Messebenen zur Auswertung der 4D-Flow-Aufnahmen, Patientin 2.....	253
Tabelle 4: Messebenen zur Auswertung der 4D-Flow-Aufnahmen, Patientin 3.....	258
Tabelle 5: Messebenen zur Auswertung der 4D-Flow-Aufnahmen, Patient 4, Aufnahme 1 .....	263
Tabelle 6: Messebenen zur Auswertung der 4D-Flow-Aufnahmen, Patient 4, Aufnahme 2 .....	264
Tabelle 7: Messebenen zur Auswertung der 4D-Flow-Aufnahmen, Patientin 5.....	272
Tabelle 8: Messebenen zur Auswertung der 4D-Flow-Aufnahmen, Patient 6.....	277
Tabelle 9: Messebenen zur Auswertung der 4D-Flow-Aufnahmen, Patient 7.....	282

# Zusammenfassung

## Ziel:

Nach der Behandlung von Aortenerkrankungen ist die CE-MRA/-MRI eine der diagnostischen Standardmethoden für weitere Behandlungsentscheidungen. Ziel der Studie war es, die Bildqualität und die diagnostische Genauigkeit der flussgestützten MRA-Sequenzen: QISS-, 4D-Flow- und SPACE-MRA, mit denen der Standard CE-MRA/-MRI zu vergleichen.

## Methoden:

Sieben PatientInnen (57±19 Jahre, 2 Männer) wurden für die prospektive Studie ausgewählt. Im März 2021 wurden diese PatientInnen zusätzlich zur CE-MRA/-MRI mit der 4D-Flow-, SPACE- und teilweise QISS-MRA (meist im SIEMENS® PRISMA fit E11, CE-MRA/-MRI unter Verwendung eines Gd-basierten zyklischen Kontrastmittels) untersucht.

Die thorakale Aorta, manchmal auch die abdominale Aorta und die supraaortalen, mesenterischen und renalen Gefäße wurden ausgewertet. Eine Auswerterin führte die Analyse der 4D-Flussmessungen mit der Software cvi42 durch. Drei AuswerterInnen bewerteten die Bildqualität und Diagnosegenauigkeit der QISS-, 4D-Flow- und SPACE-MRA-Bilder.

## Ergebnisse:

Keine dieser flussgestützten MRA-Sequenzen kann die CE-MRA/-MRI-Sequenzen komplett ersetzen. Liegt keine Kontraindikation für die Anwendung von Kontrastmittel vor, ist die CE-MRA die erste Sequenz, die durchgeführt werden sollte.

Wenn zwei Nachbeobachtungen innerhalb kurzer Zeit gewünscht sind, können die flussgestützten MRA-Sequenzen bei der zweiten womöglich als Informationsquelle ausreichen. Die QISS-Sequenz hatte inakzeptable Inhomogenitäten und Signalverluste, auch die Akquisitionszeit dauerte bei unserer PatientInnenkohorte sehr lange. 4D-flow liefert Informationen über die Aortensegmente mit einer höheren Wandscherbelastung im Vergleich zu anderen Aortensegmenten. Diese Informationen können zusätzlich zum Durchmesser nützlich sein, um sich für eine

andere invasive Diagnostik oder Behandlung zu entscheiden. In den ersten drei Monaten der Nachbeobachtung traten keine Komplikationen auf.

**Diskussion:**

Obwohl wir keine Möglichkeit hatten, die free-breathing fast low-angle shot quiescent-interval slice-selective MR-Angiographie zu verwenden, scheint die SPACE-MRA-Sequenz die erste durchzuführende Sequenz zu sein, wenn die Verwendung von Kontrastmittel nicht empfohlen wird. Die 4D-Flow-Sequenz kann verwendet werden, um zusätzliche hämodynamische Informationen ohne invasive Diagnostikwerkzeuge, z. B. Katheterdruckmessung, zu erhalten.

## **Abstract**

### **Purpose:**

After treatment of aortic diseases, a CE-MRA/-MRI is one of the diagnostic standard methods for further treatment decisions. The purpose of the study was to compare the image quality and diagnostic accuracy of the flow related MRA-sequences: QISS-, 4D-flow- and SPACE-MRA, with the standard CE-MRA/-MRI.

### **Methods:**

Seven patients (57±19 years, 2 men) were selected for the prospective study. In March 2021, these patients were examined with 4D-flow-, SPACE- and sometimes QISS-MRA in addition to the CE-MRA/-MRI (mostly with SIEMENS® PRISMA fit E11, CE-MRA/-MRI with the use of Gd-based cyclic contrast agent).

The thoracic aorta, sometimes the abdominal aorta too and the supra-aortic, mesenteric and renal vessels were evaluated. One reader took the 4D-flow-measurements with the software cvi42. Three readers evaluated the image quality and the diagnostic accuracy of the QISS-, 4D-flow- and SPACE-MRA.

### **Results:**

None of these flow related MRA-sequences can replace the CE-MRA/-MRI-sequences in total. If there is no contraindication of contrast agent application, the CE-MRA is the first sequence that should be acquired. If a short-term follow-up is requested, the flow-related MRA-sequences add useful information. The QISS-sequence had unacceptable inhomogeneities and signal loss, also the acquisition time took too long in our patient cohort. 4D-flow offers information about the aortic segments with higher wall shear stress, compared with other aortic segments. This may be useful information in addition to the diameter to decide for another invasive diagnosis or treatment. No complications occurred in the first three months of follow-up.

### **Discussion:**

Although we had no possibility to use the free-breathing fast low-angle shot quiescent-interval slice-selective MR-Angiography, the SPACE-MRA sequence

seems to be the first sequence to choose if the use of contrast agent is not recommended.

The 4D-flow sequence can be used to get additional hemodynamic information without invasive diagnostic tools, i.e. catheter pressure measurement.

## Angaben von bereits erfolgten Veröffentlichungen

### Literatur, die zur Planung der Studie herangezogen wurde:

Salehi Ravesh M, Langguth P, Pfarr JA, Schupp J, Trentmann J, Koktzoglou I, Edelman RR, Graessner J, Greiser A, Hautemann D, Hennemuth A, Both M, Jansen O, Hövener JB, Schäfer JP. Non-contrast-enhanced magnetic resonance imaging for visualization and quantification of endovascular aortic prosthesis, their endoleaks and aneurysm sacs at 1.5 T. *Magn Reson Imaging*. 2019 Jul;60:164-172. doi: 10.1016/j.mri.2019.05.012. Epub 2019 May 7. PMID: 31075419.

Kazemtash, Majid/Marc Harth/Wojciech Derwich/Axel Thalhammer/Thomas Schmitz-Rixen/Michael Keese (2021): Quiescent-Interval Slice Selective Magnetic Resonance Angiography for Abdominal Aortic Aneurysm Treatment Planning, in: *Journal of Endovascular Therapy*, SAGE Publishing, Bd. 28, Nr. 3, S. 393–398, [online] doi:10.1177/1526602821989341.

Saini, Aman/Alex Wallace/Hassan Albadawi/Sailendra Naidu/Sadeer Alzubaidi/M. Grace Knuttinen/Anshuman Panda/Rahmi Oklu (2018): Quiescent-Interval Single-Shot Magnetic Resonance Angiography, in: *Diagnostics*, MDPI, Bd. 8, Nr. 4, S. 84, [online] doi:10.3390/diagnostics8040084.

Partovi, Sasan/Thomas Trischman/Vasileios Rafailidis/Suvranu Ganguli/Fabian Rengier/Harold Goerne/Prabhakar Rajiah/Daniel Staub/Indravadan Patel/George Laylson Da Silva Oliveira/Brian B. Ghoshhajra (2018): Multimodality imaging assessment of endoleaks post-endovascular aortic repair, in: *British Journal of Radiology*, British Institute of Radiology, S. 20180013, [online] doi:10.1259/bjr.20180013.

Beck, Leyla/Abdi-Aziz Mohamed/W. Strugnell/Harry Bartlett/Viviana Rodriguez/Christian Hamilton-Craig/Richard A. Slaughter (2018): MRI measurements of the thoracic aorta and pulmonary artery, in: *Journal of Medical Imaging and Radiation Oncology*, Wiley-Blackwell, [online] doi:10.1111/1754-9485.12637.

Van Hout, Max J P/Arthur J.H.A. Scholte/Joe F. Juffermans/Jos J.M. Westenberg/Liang Zhong/Xuhui Zhou/Simon Schalla/Michael D. Hope/Jens Bremerich/Christopher M. Kramer/Marc Dewey/Karen G. Ordovas/David A. Bluemke/Hildo J. Lamb (2020): How to Measure the Aorta Using MRI: A Practical Guide, in: *Journal of Magnetic Resonance Imaging*, Wiley-Blackwell, Bd. 52, Nr. 4, S. 971–977, [online] doi:10.1002/jmri.27183.

Jian-ping Guo/Xin Jia/Zhe Sai/Yang-yang Ge/Sen Wang/Wei Guo (2016): Thoracic Aorta Dimension Changes During Systole and Diastole: Evaluation with ECG-Gated Computed Tomography, in: *Annals of Vascular Surgery*, [online] <https://www-1sciencedirect-1com-10013b5ud00b0.han.medunigraz.at/science/article/abs/pii/S0890509616303946?via%3Dihub>.

Korepta, Lindsey M./Bernadette Aulivola (2019): Aortic Intramural Hematomas and Penetrating Aortic Ulcerations: Indication for Treatment versus Surveillance, in: *Endovascular Today Europe*, Bd. Volume 8, Number 7.

Markl, Michael/Alex Frydrychowicz/Sebastian Kozerke/Mike Hope/Oliver Wieben (2012): 4D flow MRI, in: *Journal of Magnetic Resonance Imaging*, Wiley-Blackwell, Bd. 36, Nr. 5, S. 1015–1036, [online] doi:10.1002/jmri.23632.

Soulat, Gilles/Patrick M. McCarthy/Michael Markl (2020): 4D Flow with MRI, in: *Annual Review of Biomedical Engineering*, Annual Reviews, Bd. 22, Nr. 1, S. 103–126, [online] doi:10.1146/annurev-bioeng-100219-110055.

Sierra-Galan, Lilia M./Christopher J. François (2019): Clinical Applications of MRA 4D-Flow, in: *Current Treatment Options in Cardiovascular Medicine*, Springer Science+Business Media, Bd. 21, Nr. 10, [online] doi:10.1007/s11936-019-0758-8.

Sträter, Alexandra S./Armin Huber/Jan Daniel Rudolph/Maria Berndt/Michael Rasper/Ernst J. Rummeny/Jonathan Nadjiri (2018): 4D-Flow MRI: Technique and Applications, in: *RöFo*, Thieme Medical Publishers (Germany), Bd. 190, Nr. 11, S. 1025–1035, [online] doi:10.1055/a-0647-2021.

Allen, Bradley D./Pascale Aouad/Nicholas S. Burriss/Amir Ali Rahsepar/Kelly Jarvis/Christopher J. François/Alex J. Barker/S. Chris Malaisrie/James C. Carr/Jeremy D. Collins/Michael Markl (2019): Detection and Hemodynamic Evaluation of Flap Fenestrations in Type B Aortic Dissection with 4D Flow MRI: Comparison with Conventional MRI and CT Angiography, in: *Radiology*, Radiological Society of North America, Bd. 1, Nr. 1, S. e180009, [online] doi:10.1148/ryct.2019180009.

Literatur, die unter Punkt 4 zum Vergleich der Ergebnisse herangezogen wurde:

Vergleich 1 (7):

Salehi Ravesh M, Langguth P, Pfarr JA, Schupp J, Trentmann J, Koktzoglou I, Edelman RR, Graessner J, Greiser A, Hautemann D, Hennemuth A, Both M, Jansen O, Hövener JB, Schäfer JP. Non-contrast-enhanced magnetic resonance imaging for visualization and quantification of endovascular aortic prosthesis, their endoleaks and aneurysm sacs at 1.5 T. *Magn Reson Imaging*. 2019 Jul;60:164-172. doi: 10.1016/j.mri.2019.05.012. Epub 2019 May 7. PMID: 31075419.

Vergleich 2 (29):

Edelman RR, Carr M, Koktzoglou I. Advances in non-contrast quiescent-interval slice-selective (QISS) magnetic resonance angiography. *Clin Radiol*. 2019 Jan;74(1):29-36. doi: 10.1016/j.crad.2017.12.003. Epub 2018 Jan 12. PMID: 29336780; PMCID: PMC6043418.

Vergleich 3 (30):

Kazemtash, Majid/Marc Harth/Wojciech Derwich/Axel Thalhammer/Thomas Schmitz-Rixen/Michael Keese (2021): Quiescent-Interval Slice Selective Magnetic Resonance Angiography for Abdominal Aortic Aneurysm Treatment Planning, in: *Journal of Endovascular Therapy*, SAGE Publishing, Bd. 28, Nr. 3, S. 393–398, [online] doi:10.1177/1526602821989341

Vergleich 4 (31):

Markl, Michael/Alex Frydrychowicz/Sebastian Kozerke/Mike Hope/Oliver Wieben (2012): 4D flow MRI, in: *Journal of Magnetic Resonance Imaging*, Wiley-Blackwell, Bd. 36, Nr. 5, S. 1015–1036, [online] doi:10.1002/jmri.23632.

Vergleich 5 (32):

Catapano, Federica/Giacomo Pambianchi/Giulia Cundari/João Rebelo/Francesco Cilia/Iacopo Carbone/Carlo Catalano/Marco Francone/Nicola Galea (2020): 4D flow imaging of the thoracic aorta: is there an added clinical value?, in: *Cardiovascular diagnosis and therapy*, [online] doi:10.21037/cdt-20-452.

# 1 Einleitung

## 1.1 Hintergrund der Diplomarbeit

Unter dem Begriff „Aortenerkrankungen“ werden die Aortendissektion, das (rupturierte) Aortenaneurysma, die Aortenektasie, das Aortenulkus und das intramurale Hämatom subsummiert. In dieser Studie und Diplomarbeit wurden diese unterschiedlichen Aortenerkrankungen im thorakalen Bereich und postoperativen Zustand untersucht und analysiert. Weitere Aortenerkrankungen, wie die Arteriosklerose, entzündliche oder angeborene Aortenerkrankungen, wurden in dieser Studie nicht primär untersucht (vgl. Erkrankungen der thorakalen Aorta-Innere Medizin-Georg Thieme Verlag KG o.D.; (1)).

Eine Aortendissektion ist der Fachbegriff für einen Einriss in der Wand der Aorta, bei dem es zu einer Einblutung in die Wand kommt. Die Aortenwand setzt sich aus 3 Schichten zusammen, der Intima, der Media und der Adventitia. Bei einer Dissektion kommt es zur Einblutung zwischen Intima und Adventitia, dort entsteht ein sogenanntes falsches Lumen (vgl. Michaely et al. 2015: S.256; (2)). Unter einem Aortenaneurysma versteht man eine Ausweitung des Aortenlumens an einem Abschnitt der Aorta. Die Aortenektasie ist dabei die Vorstufe des Aortenaneurysmas, die Unterscheidung erfolgt anhand des Durchmessers (vgl. Antwerpes et al. o.D.; (3)). Ein penetrierendes Aortenulkus entsteht, wenn ein atherosklerotischer Plaque rupturiert oder ulzeriert (vgl. Decker et al. o.D.; (4)). Ein intramurales Wandhämatom in der Media kann eine seltenere Ursache für eine Aortendissektion sein, es wird deshalb auch oft als Vorstufe der Aortendissektion gesehen und nach demselben Schema eingeteilt. Aber auch bei bereits erfolgter Aortendissektion kann ein intramurales Wandhämatom sichtbar sein (vgl. Communications o.D.; (5)) und (vgl. Raab 2001b; (6)).

Bezogen auf diese möglichen Krankheitsbilder, wurde das Ergebnis des herkömmlichen Protokolls einschließlich kontrastgestützter MRA-Sequenzen zur Nachkontrolle der thorakalen Aortenerkrankungen mit den Ergebnissen eines neuen für die Studie erstellten Protokolls, flussgestützte MRA-Sequenzen umfassend, verglichen.

## 1.2 Bedeutung und Relevanz der Kernfrage

Die Kernfrage lautet somit: Sind die Ergebnisse der flussgestützten MRA-Sequenzen vergleichbar und ausreichend gegenüber den Ergebnissen der kontrastgestützten MRA-Sequenzen in Bezug auf die Nachkontrolle von thorakalen Aortenerkrankungen?

Diese Kernfrage ist deshalb von Bedeutung, weil man herausfinden möchte, ob bei den sich wiederholenden Nachkontrollen der Aortenerkrankungen in manchen Fällen auf die Gabe von Kontrastmittel verzichtet werden kann oder die flussgestützten Sequenzen gute zusätzliche Informationen liefern.

Jedes Kontrastmittel kann ein Risiko für die PatientInnen darstellen. Bei dem MR-Kontrastmittel besteht der Verdacht, dass es zu allergischen Reaktionen und Gadoliniumablagerungen im Gehirn kommen kann. Man beachte aber, dass die allergischen Reaktionen nur sehr selten auftreten, die Ablagerungen des Gadoliniums im Gehirn sind asymptomatisch. Um den PatientInnen dieses Risiko zu ersparen, vor allem auch die mehrfache Exposition des Kontrastmittels, ist es das Ziel, eine apparative Nachuntersuchung der behandelten thorakalen Aortenerkrankungen ohne Kontrastmittel, ohne ionisierende Strahlung und mit verlässlichem Ergebnis zu etablieren.

Bezogen auf die QISS- und 4D-flow-Sequenz ist zu diesem Thema bereits eine Publikation (Salehi Ravesh, Mona et al. o.D.; (7)) veröffentlicht, bei dieser hat man allerdings ein 1,5 Tesla Gerät verwendet. Da es in Graz das 1,5T Gerät nur auf der Kinderklinik und in der EBA gibt und man bei Erwachsenen standardmäßig das 3T MR-Gerät verwendet, war nun die Frage, ob man mit dem 3T Gerät ähnlich gute Ergebnisse erzielen kann. In der Publikation wurden auch abdominelle und iliakale Aneurysmen untersucht, in dieser Studie und Diplomarbeit geht es aber vorrangig um die thorakalen Aortenerkrankungen. Auch der Vergleich zu anderen Bildgebungen wie zum Beispiel dem CT, sind hier nur aufgegriffen, wenn für die PatientInnen jeweils vergleichbare CT-Aufnahmen bereits durchgeführt wurden. Wenn dies nicht der Fall war, wurden keine CT-Aufnahmen explizit im Rahmen der

Studie gemacht, deshalb fällt bei manchen PatientInnen der Vergleich mit den CT-Aufnahmen weg.

Der Neuigkeitswert besteht darin, dass bisher nur kontrastgestützte MR- oder CT-Sequenzen zur Beurteilung und Nachkontrolle von thorakalen Aortenerkrankungen eingesetzt werden. Zwar bringt der Gebrauch von MR-Sequenzen im Vergleich zu CT-Sequenzen bereits den Vorteil des Verzichts auf ionisierende Strahlung, das Risiko beim Gebrauch von MR-Kontrastmittel, auch wenn dieses deutlich geringer ist als das Risiko des Jod-Kontrastmittel-Einsatzes, liegt dennoch vor. Dies könnte man nur durch den Einsatz der flussgestützten MR-Sequenzen anstatt der Kontrastgestützten umgehen. Diese Frage galt es mithilfe unserer Studie zu klären.

### 1.3 Anatomie der Aorta

Um die Beschreibungen der Aortenerkrankungen etwas zu erleichtern, hier eine Abbildung, die die Anatomie der Aorta aufzeigt.

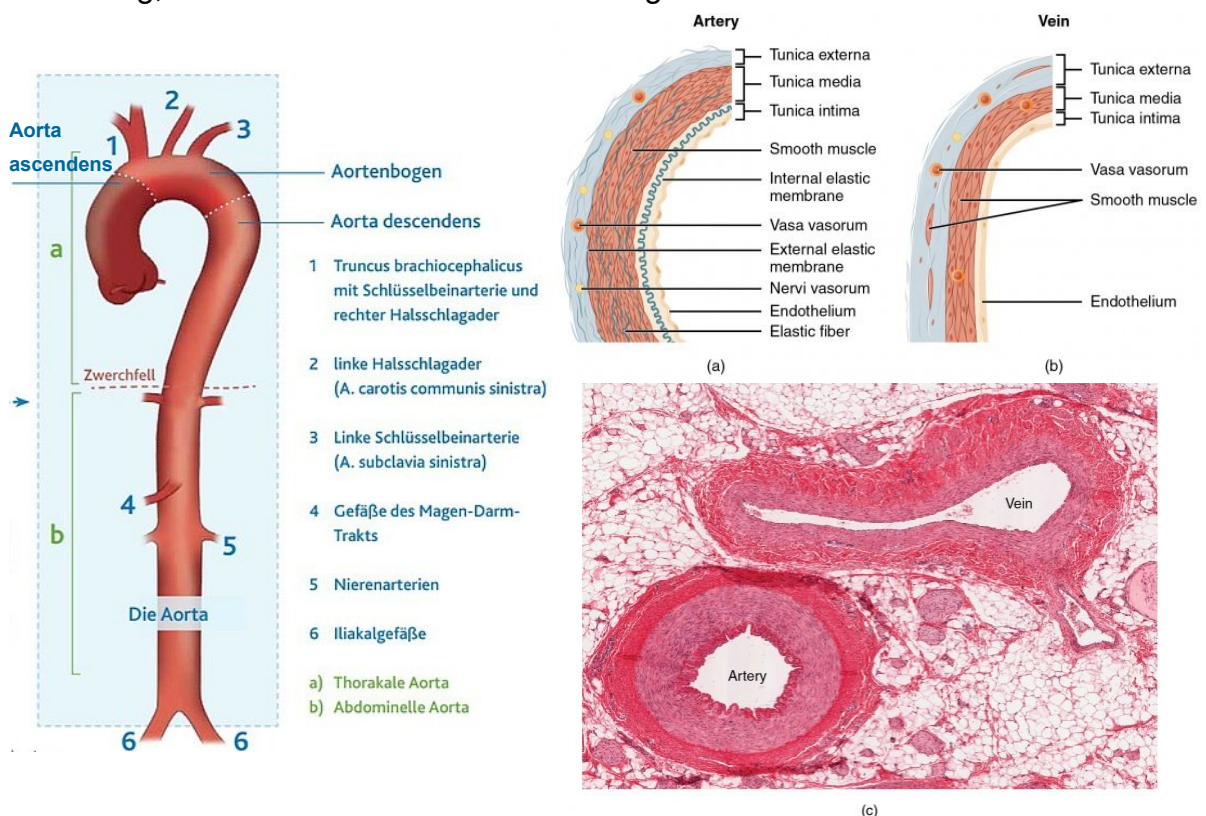


Abbildung 1: links: Darstellung der Anatomie der Aorta (Die Aorta • Funktion, Erkrankungen und Behandlungen o. D.; (8))

Abbildung 2: rechts: Darstellung des Wandaufbaus von Arterie und Vene und Histologie (Arterien o. D.; (9))

## **1.4 Aortenerkrankungen**

### **1.4.1 Aortendissektion**

#### **1.4.1.1 Definition und Symptomatik**

Die Aortendissektion ist ein Einriss in der Wand der Aorta, bei dem es zu einer Einblutung zwischen Intima und Adventitia kommt, dort entsteht das sogenannte falsche Lumen (vgl. Michaely et al. 2015: S.256; (2)).

Die Symptome der Aortendissektion sind vor allem ein typischer Vernichtungsschmerz und plötzlich einsetzende Brustschmerzen. Dieser Schmerz kann sich auch in Richtung von Nacken, Schulter, Rücken oder Bauch ausbreiten, je nach Lokalisation und Ausmaß der Dissektion. Zusätzlich kann eine Symptomatik durch Malperfusion bestimmter Organe auftreten, zum Beispiel akutes Nierenversagen oder bei einer Blutung kann ein hämorrhagischer Schock eintreten (vgl. Hombach 2009: S.271; (10)).

Eine Stanford A Dissektion geht häufig mit kardialen Symptomen einher wie zum Beispiel einer akuten Aortenklappeninsuffizienz, einer akuten Herzinsuffizienz oder einem Hämoperikard bis hin zur Perikardtamponade (vgl. Hombach 2009: S.271; (10)).

Anhand der Symptomatik kann differentialdiagnostisch auch an einen Myokardinfarkt, eine Angina pectoris, ein Aortenaneurysma oder eine gedeckte Aortenruptur gedacht werden.

Generell kann bei einem akuten Aortensyndrom eine Aortendissektion, ein Aortenulkus, ein rupturiertes Aortenaneurysma oder ein intramurales Hämatom als Ursache unterschieden werden (vgl. Michaely et al. 2015: S.259; (2)).

Die häufigsten Komplikationen des akuten Aortensyndroms sind die Aortenruptur, die Aortenklappeninsuffizienz und das Ischiämiesyndrom der abgehenden Gefäße (vgl. Operative und interventionelle Gefäßmedizin o.D.: S.568-569; (11)).

#### **1.4.1.2 Ursachen und Risikofaktoren**

Für die Ursachen einer Aortendissektion gibt es zwei verschiedene Theorien. Die häufigere der beiden Ursachen ist der primäre Einriss der Intima, der ermöglicht, dass Blut aus dem wahren Lumen in das falsche Lumen in der Media, zwischen Intima und Adventitia, fließt und sich durch den hohen arteriellen Druck auch in

Längsrichtung ausbreiten kann. Eine mögliche andere Ursache ist ein primäres Mediahämatom. Dieses Hämatom ist die Ursache dafür, dass es sekundär zu einem Einriss der Intima kommt und so noch mehr Blut aus dem wahren Lumen in das falsche Lumen gelangt. Kommt es nicht zu einem sekundären Intimaeinriss, spricht man nur von einem sogenannten intramuralen Hämatom (vgl. Michaely et al. 2015: S.256;(2)).

Zu den Risikofaktoren der Aortendissektion zählen Atherosklerose, arterielle Hypertonie, bikuspidale Aortenklappe, Aortenisthmusstenose, Bindegewebserkrankungen wie Marfan- und Ehlers-Danlos-Syndrom, zystische Medianekrose, Vaskulitis, Traumata, Drogenkonsum oder auch mögliche iatrogene Gründe im Rahmen einer Gefäßoperation oder eines endovaskulären Eingriffs (vgl. Michaely et al. 2015: S.256; (2)).

### **1.4.1.3 Epidemiologie**

Pro Jahr treten circa sechs Neuerkrankungen pro 100.000 Einwohnern auf, dabei liegt der Altersgipfel meist zwischen 50 und 70 Jahren, Ausnahme bildet allerdings das Marfan-Syndrom und andere Bindegewebserkrankungen, dabei liegt der Altersgipfel für Aortendissektionen schon im frühen Erwachsenenalter. Im Vergleich zwischen betroffenen Männern und Frauen wird deutlich, dass Männer zwei bis drei Mal häufiger von dieser Erkrankung betroffen sind (vgl. Operative und interventionelle Gefäßmedizin o. D.: S.564; (11)).

Außerdem gibt es Daten, die aufzeigen, dass eine Aortendissektion häufiger in den Wintermonaten und am Vormittag auftritt, genaue Gründe sind allerdings nicht bekannt (vgl. Michaely et al. 2015: S.257; (2)).

Betreffend die Bildgebung zeigen sich die Lokalisationen der Aortendissektion meist in der Aorta ascendens (65%), seltener in der Aorta descendens (20-25%) und noch seltener im Arcus aortae oder in der Aorta abdominalis (5-10%) (vgl. Michaely et al. 2015: S.256; (2)). In großen Kohorten werden, durch fehlende histologische Untersuchungen nach dem Tod, Aortenerkrankungen teilweise nicht entdeckt, dies wirkt sich natürlich auch wiederum auf die Prozentzahlen aus.

Die Letalität einer Aortendissektion ist hoch, vor allem beim DeBakey Typ I, laut Literatur 1-2% pro Stunde in den ersten 24h und nach zwei Wochen circa 80%. Deshalb sind vor allem die im nächsten Abschnitt beschriebenen Klassifikationen besonders wichtig, da anhand dieser die passende Therapie ausgewählt wird (vgl. Michaely et al. 2015: S.260; (2)).

#### 1.4.1.4 Klassifikationen

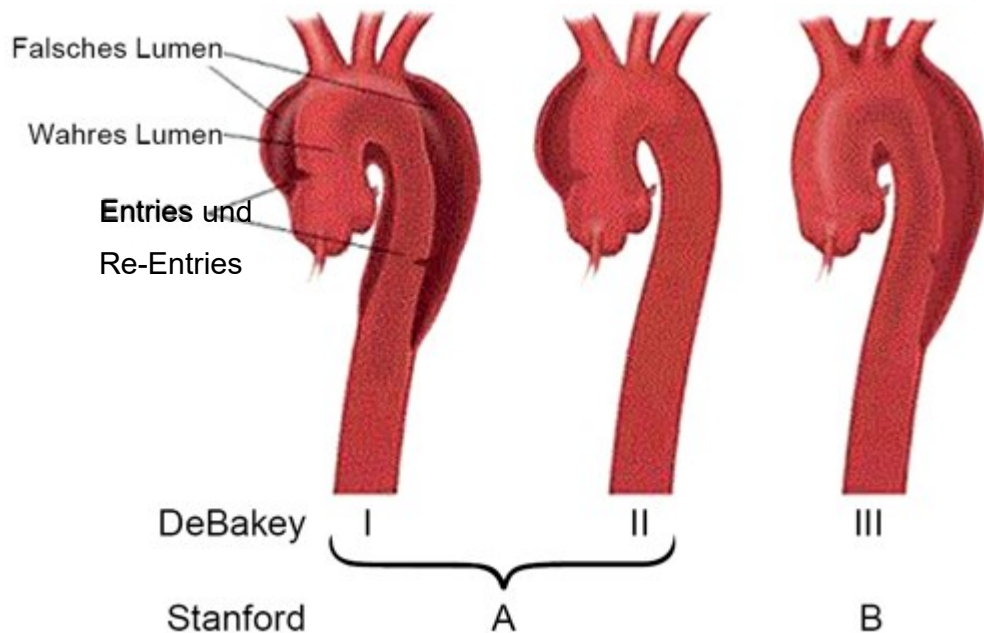


Abbildung 3: Darstellung der DeBakey und Stanford Klassifikation (Chirurgie der thorakalen Hauptschlagader – aktuelle Konzepte o. D.; (12))

Für Aortendissektionen gibt es verschiedene Klassifikationen. Die am häufigsten eingesetzte Klassifikation ist die Stanford Klassifikation. Sie wurde als Vereinfachung der DeBakey Klassifikation eingeführt und fasst DeBakey I und II zusammen. Es wird Stanford Typ A, Aorta ascendens beteiligt, von Stanford B, nur Aorta descendens betroffen, unterschieden. Anteilsmäßig ist die Stanford Typ A Dissektion, auch proximale Dissektion genannt, mit 70-75% häufiger. Die Stanford Typ B Dissektion, auch distale Dissektion genannt, macht nur circa 25-30% aus (vgl. Michaely et al. 2015: S.258; (2)).

Weniger häufig wird die DeBakey Klassifikation eingesetzt, allerdings unterscheidet sie genauer zwischen Aortendissektionen mit und ohne Beteiligung der Aorta descendens, denn diese Unterscheidung ist durchaus von klinischer Bedeutung. DeBakey Typ I beschreibt eine Dissektion, bei der Aorta ascendens und

descendens betroffen sind, Typ II eine Dissektion, die nur Aorta ascendens betrifft und Typ III, die nur Aorta descendens betrifft. Stanford A fasst DeBakey I und II vereinfacht zusammen als eine Dissektion, die zumindest die Aorta ascendens mitbetrifft. Eine genauere Aussage über die Ausbreitung der Dissektion wird allerdings nicht gemacht. Stanford Typ B und DeBakey Typ III beschreiben die gleiche Art der Aortendissektion. Anteilsmäßig ist die DeBakey Typ I Dissektion mit 60% die Häufigste, Typ III mit 25-30% die Zweithäufigste und Typ II mit 10-15% die Seltenste (vgl. Michaely et al. 2015: S.257; (2)).

Eine neuere Klassifikation der Aortendissektionen hat einen anderen Ansatz. Hierbei erfolgt die Einteilung vielmehr anhand der Veränderungen der Aorta, die mit einer Dissektion einhergehen. Diese Klassifikation wird ESC-Klassifikation genannt und umfasst 5 Klassen. Klasse 1 beschreibt eine klassische Dissektion mit Membran und Entry, Klasse 2 eine Mediaspaltung und ein intramurales Hämatom, Klasse 3 einen Einriss der Intima mit diskret bleibender Aufweitung, Klasse 4 einen Aortenulkus nachdem ein Plaque rupturiert ist und Klasse 5 eine traumatisch oder iatrogen bedingte Dissektion (vgl. Michaely et al. 2015: S.259; (2)).

Nicht in dieser Klassifikation aufgegriffen sind Dissektionen, die sich auf die supraaortalen Gefäße ausbreiten und einer speziellen Therapie und chirurgischen Technik, auch FEVAR (fenestrated endovascular repair) genannt, bedürfen (vgl. Fenestrated Endovascular Repair o.D.; (13)). Für diese Pathologien gibt es neben der Stanford-Einteilung viele weitere Ausdifferenzierungen, die in der klinischen Praxis verwendet werden können, um die Therapie zu planen.

#### **1.4.1.5 Bildgebung**

Um eine Aortendissektion klassifizieren zu können und so die möglichst beste Therapie auszuwählen, benötigt man Bildgebungen, die möglichst viele Informationen über die Art, die Ausprägung und den Verlauf einer solchen Dissektion geben.

Vor allem Befunde wie der Nachweis von Entries und Re-Entries, Länge der Dissektion, Sichtbarkeit der Dissektionsmembran, Unterscheidung zwischen wahren und falschem Lumen, Beteiligung von abgehenden Gefäßen, mangelnde Perfusion aller dargestellten Gefäßlumina und aller abgehenden Gefäße, versucht man mittels Bildgebung zu erfassen (vgl. Michaely et al. 2015: S.260; (2)).

Dissektionen können sich sowohl von proximal nach distal ausbreiten als auch von distal nach proximal. Oft existieren mehrere Entries und Re-Entries, sodass der Ursprung einer Dissektion nicht immer explizit bestimmt werden kann. Bei der Therapie gilt es deshalb, alle erkennbaren Entries abzudecken, um die Fortschreitung der Aortendissektion zu verhindern.

Für die Akutdiagnostik sind nach wie vor die EKG-getriggerte CT-Angiographie und eventuelle transthorakale/transösophageale Echokardiografie der Goldstandard. Vor allem für Nachkontrollen werden vermehrt auch CE-MR-Angiographien eingesetzt. Die Aussagekraft der MR-Angiographie ist zum Beispiel in Bezug auf ein intramurales Hämatom größer als die der CT-Angiographie (vgl. Operative und interventionelle Gefäßmedizin o.D.: S.569-570; (11)). So kann man zum Beispiel anhand einer MR-Angiographie das Alter einer Einblutung besser einschätzen (vgl. Michaely et al. 2015: S.259; (2)).

Nachteil einer MR-Angiographie hingegen kann sein, dass aufgrund der längeren Messzeit Bewegungsartefakte entstehen, die die Beurteilung erschweren, falls die PatientInnen unruhig sind (vgl. Michaely et al. 2015: S.260; (2)). Da sich die Diplomarbeitsstudie aber nur auf Nachkontrollen bezieht, spielt die Akutdiagnostik in dieser Arbeit eine nicht so große Rolle.

Radiologische Zeichen einer Aortendissektion können in der Thoraxübersichtsaufnahme eine Mediastinalverbreiterung und in der Schnittbildgebung eine Dissektionsmembran in Abschnitten der Aorta oder der abgehenden Gefäße sein. Außerdem kann ein Hämoperikard sichtbar sein.

Da es in dieser Diplomarbeit vorwiegend um den Einsatz der MR-Angiographie geht, werden im Folgenden die MRA-Sequenzen und deren Anwendungsbereiche geschildert.

Die 3D-CE-MRA dient der Darstellung von wahren und falschem Lumen, außerdem können Entrys und gegebenenfalls auch Re-Entrys erkannt werden. Man kann mithilfe der 3D-CE-MRA die Dissektion einem Stanford oder DeBakey-Typen zuordnen und die möglicherweise beteiligten abgehenden Äste beurteilen (vgl. Hombach 2009: S.272; (10)). Um eine begleitende Aortenklappeninsuffizienz oder Bewegungen der Dissektionsmembran, die das wahre Lumen komprimieren könnten, abzuklären, verwendet man die Cine-SSFP-Sequenzen (vgl. Hombach 2009: S.272; (10)).

Für die regelmäßigen Follow-ups, die für alle behandelten PatientInnen mit dieser Erkrankung notwendig sind, können oben beschriebene MRA-Sequenzen gut eingesetzt werden (vgl. Hombach 2009: S.272; (10)). Der mögliche Einsatz der flussgestützten MRA-Sequenzen für die Follow-ups wird im Kapitel 3 und 4 analysiert.

#### **1.4.1.6 Therapie**

Primär müssen PatientInnen mit einer akuten Aortendissektion stabilisiert sein und dies auch bleiben. Dafür müssen sie gegebenenfalls intubiert werden. Auch ein erweitertes Monitoring mit invasiver arterieller Blutdruckmessung und eine ZVK-Anlage können im Zuge dessen notwendig sein. Außerdem gilt es Herzfrequenz, Blutzucker und Schmerzen im Griff zu haben und Flüssigkeit über Venenzugänge zuzuführen.

Bei einer Stanford Typ A Dissektion muss zeitnah eine Implantation einer Kunststoffprothese durchgeführt werden, da ansonsten eine sehr hohe Letalität vorliegt. Vor allem bei Anzeichen einer Koronarinsuffizienz oder Aortenklappeninsuffizienz muss schnell gehandelt werden, gegebenenfalls wird der Aorta ascendens-Ersatz um einen Aortenklappenersatz erweitert (vgl. Operative und interventionelle Gefäßmedizin o. D.: S.570-571; (11)).

Eine Stanford Typ B Dissektion erfordert seltener eine offene chirurgische Operation, viel eher wird hier eine endovaskuläre Operation oder konservative Therapie durchgeführt. Nur bei sehr komplizierten Dissektionen oder unmöglichen endovaskulären Eingriffen wird auf die durchaus riskante offene Operation ausgewichen. Die thorakale endovaskuläre Aortenreparatur, abgekürzt TEVAR, wird vor allem bei PatientInnen mit erhöhtem Operationsrisiko durchgeführt, sowohl bei komplizierten als auch bei unkomplizierten Dissektionen. Dabei wird meist über einen Zugang an der Arteria femoralis ein Stentgraft eingeführt und eingesetzt, um den Dissektionsbereich abzudichten (vgl. Operative und interventionelle Gefäßmedizin o. D.: S.637; (11)). Die Arteriae femorales werden deshalb für die Planung dieser Therapie in der Bildgebung routinemäßig miterfasst.

Sollte eine operative Versorgung im Bereich des Arcus aortae bei den Abgängen der supraaortalen Gefäße notwendig sein, kann eine primäre Implantation eines Frozen-Elephant-Trunks durchgeführt werden (vgl. Torsello et al. 2018; (14)) und (vgl.

Grabenwöger et al. 2021; (15)). Bei der INSTEAD-Studie wurden bei unkomplizierter Typ-B-Dissektion die Outcomes von der besten medikamentösen Therapie (BMT) und von der Kombination aus BMT und endovaskulärer Therapie verglichen. Im Zweijahresergebnis wurde bei unkomplizierter Typ-B-Dissektion kein Vorteil der endovaskulären Therapie festgestellt. Das Remodeling trat bei endovaskulärer Therapie vermehrt ein. Unter dem Begriff Remodeling versteht man eine Heilung von Aortenabschnitten, die zuvor von einer Pathologie betroffen waren, inklusive der Thrombosierung des falschen Lumens und der Durchmesseränderungen von den verschiedenen dargestellten Gefäßlumina (vgl. Lombardi et al. 2014; (16)). Im Fünfjahresverlauf aber war eine deutlich niedrigere Progression und Letalität bei jenen erkannt worden, die sowohl die beste medikamentöse Therapie (BMT) als auch die endovaskuläre Therapie erhielten (vgl. Torsello et al. 2018; (14)). Zu den Indikationen der endovaskulären Typ-B-Dissektionstherapie gehören eine ausgeprägte Größenprogredienz der verschiedenen dargestellten Lumina (auf >5,5cm), eine gedeckte Aortenruptur, die man unter anderem anhand des Neuauftretens oder der Zunahme eines Pleuraergusses erkennen kann, Schmerzen und ein distales Ischämiesyndrom (vgl. Bartel 2006; (17)). Die gedeckte Aortenruptur kann in der MR-Aufnahme aber auch unabhängig vom Auftreten eines Pleuraergusses direkt erkannt und als solche beschrieben werden.

Bereitet die Stanford Typ B Dissektion keine Komplikationen und hat milde bis gar keine Symptome, kann auch durchaus eine konservative Therapie gewählt werden. Dies bedeutet, dass nach Stabilisierung und anderer Initialtherapie der PatientInnen vor allem eine konsequente Blutdruckeinstellung entscheidend ist. Das Mittel der Wahl sind hierfür vor allem Betablocker, gegebenenfalls Vasodilatoren, sodass ein systolischer Blutdruck von 130 und eine Herzfrequenz unter 60/min erreicht werden. Alternativ zu den Betablockern können auch Calciumantagonisten eingesetzt werden. Um die Schmerzen der Aortendissektion zu behandeln, sollte man Morphinsulfat einsetzen. Auch für die Behandlung anderer Komorbiditäten wie Diabetes mellitus oder Dyslipidämie können Life style Änderungen ausschlaggebend sein. Diese medikamentöse Therapie der Typ B-Aortendissektion sollte intensivmedizinisch mindestens 14 Tage überwacht werden (vgl. Operative und interventionelle Gefäßmedizin o. D.: S.610-611; (11)).

## **1.5.1 Aortenaneurysma, Aortenektasie**

### **1.5.1.1 Definition und Symptomatik**

Als Aortenektasie bezeichnet man einen degenerativen Elastizitätsverlust, der vorwiegend bei älteren Menschen auftritt und zu einer Dilatation des normalen Lumens führt. Der Durchmesserwert der Aorta ascendens liegt bei 3,5 cm und der der thorakalen Aorta descendens bei 3 cm. Sind diese Grenzwerte überschritten, spricht man von einer Aortenektasie, ab einer Dilatation von über 4 cm spricht man von einem Aortenaneurysma (vgl. Hombach 2009: S.268; (10)). Ein Aortenaneurysma bezeichnet ebenfalls eine Dilatation des normalen Aortenlumens, der Grenzwert liegt jedoch höher als bei der Aortenektasie. Das Aneurysma kann auch als eine Ausweitung der drei Wandschichten um mehr als 50% des Durchmessers definiert werden (vgl. Operative und interventionelle Gefäßmedizin o. D.: S.575; (11)).

Die Normalwerte des thorakalen Aortendurchmessers lauten 2,3 - 3 cm für den Aortenannulus, 3 - 3,7 cm für den Sinus valsalva und 2,5 - 3,5 cm für die proximale Aorta ascendens (vgl. Hombach 2009: S.268; (10)).

Im Falle kritischer Therapieentscheidungen können genauere Grenzwerttabellen herangezogen werden, die das Aortenlumen in Abhängigkeit von Alter und Körperoberfläche einordnen.

Die Symptomatik der Aortenektasie und der Aortenaneurysmen bleibt bei circa der Hälfte der PatientInnen aus. Wenn Symptome auftreten können diese durch Verdrängung des umliegenden Gewebes entstehen. Dazu zählt beispielsweise ein Vena cava Syndrom, bei dem es zur Kompression und Stauung der Vena cava superior kommt (vgl. Hombach 2009: S.268; (10)). Genauso kann auch eine Kompression der Luftröhre oder des Hauptbronchus auftreten. Diese geht oftmals mit Stridor, Husten, wiederauftretenden Lungenentzündungen, Speiseröhrenkompressionen, Schluckbeschwerden und Kompression des Nervus recurrens und dadurch auftretende Heiserkeit einher (vgl. Hombach 2009: S.268; (10)).

Eine andere Art der Symptomatik kann durch eine Linksherzinsuffizienz bedingt sein. Diese entsteht meist durch eine höhergradige Aortenklappeninsuffizienz,

wenn das Aneurysma eine Anulusdilatation verursacht. Ein Aneurysma kann sich auch durch wiederkehrende Thromboembolie bemerkbar machen, da ein Aneurysma ein bekannter Entstehungsort für Gerinnsel ist. Diese wiederkehrenden Embolien sind oft im Bereich der Beinarterien wiederzufinden (vgl. Hombach 2009: S.268; (10)).

Bei einer starken Ausprägung eines Aortenaneurysmas oder einer gedeckten Aortenruptur, bei der die Adventitia eine komplette Wandruptur noch verhindert und so die Blutung zwischenzeitig reduziert wird, können sehr heftige Bauch- oder auch Rückenschmerzen auftreten. Bei offener Aortenruptur versterben die PatientInnen meist vor einer Notoperation aufgrund eines hämorrhagischen Schocks.

Bei einem thorakalen Aneurysma verum beträgt das 5-Jahres-Risiko für eine Ruptur bei 4 - 5,9 cm Durchmesser 16%, liegt der Durchmesser über 6 cm, steigt das Rupturrisiko auf 31%. Da abgesehen von einer traumatisch ausgelösten Aortenruptur nur der Durchmesser des Aneurysmas ein bisher verifizierter Risikofaktor ist, gilt es bei der Messung des Durchmessers und der Länge des Aneurysmas besonders genau zu sein (vgl. Michaely et al. 2015: S.262; (2)).

Wie auch schon bei Aortendissektionen aufgezeigt, bilden Aortendissektion, Aortenulkus, Aortenaneurysma und intramurales Hämatom die Differentialdiagnosen bei einem akuten Aortensyndrom (vgl. Michaely et al. 2015: S.259; (2)).

### **1.5.1.2 Ursachen und Risikofaktoren**

Zu den Ursachen oder Risikofaktoren eines Aortenaneurysmas zählen vor allem die Atherosklerose und die arterielle Hypertonie. Die Atherosklerose macht über 80% der Ursachen aus. Aber auch ein entzündlicher Prozess der Aortenwand kann die Ursache für die Entstehung eines Aneurysmas sein. Die Mediadegeneration oder angeborene Bindegewebserkrankungen wie das Marfan- oder das Ehlers-Danlos-Syndrom führen zu einem deutlich erhöhten Risiko, an einem Aneurysma zu erkranken. Traumata oder spezielle Infektionen, wie rheumatisches Fieber, Lyme-Borreliose oder Syphilis können auch zu den Ursachen eines Aneurysmas zählen (vgl. Michaely et al. 2015: S.262; (2)).

### **1.5.1.3 Epidemiologie**

Die Inzidenz des thorakalen Aneurysma verum liegt bei 3,5 pro 100.000 Einwohnern pro Jahr und liegt damit deutlich unter der des abdominellen Aneurysmas (vgl. Michaely et al. 2015: S.262; (2)). Wenn Aneurysmen isoliert im thorakalen Bereich vorkommen, sind sie zu 50% in der Aorta ascendens, zu 10% im Arcus aortae und zu 40% in der thorakalen Aorta descendens lokalisiert (vgl. Hombach 2009: S.268 (10)).

### **1.5.1.4 Klassifikation**

Um Aortenaneurysmen zu klassifizieren, gibt es zwei Möglichkeiten. Eine Klassifikation unterscheidet zwischen Aneurysma sacciforme, ein sackförmiges Aneurysma, und Aneurysma fusiforme, ein spindelförmiges Aneurysma (vgl. Michaely et al. 2015: S.261; (2)). Diese Klassifikation bezieht sich auf die Form. Die um einiges häufiger eingesetzte Klassifikation ist die pathogenetische. Dabei werden Aneurysma verum, spurium und dissecans unterschieden. Das Aneurysma verum, auch wahres Aneurysma genannt, beschreibt, dass alle drei Wandschichten, Intima, Media und Adventitia ausgeweitet sind. Das Aneurysma spurium, auch Aneurysma falsum oder Pseudoaneurysma genannt, beschreibt einen Riss in der Intima und Media, der zu einem Hämatom in der Adventitia führt. Das Aneurysma dissecans beschreibt, wie der Name vermuten lässt, die Ausbildung eines Aneurysmas aufgrund einer Dissektion (vgl. Michaely et al. 2015: S.261; (2)).

Um die Klassifikationen in Zusammenhang zu bringen, lässt sich festhalten, dass das Aneurysma verum meist dem fusiformen Typ entspricht. Die Aussackung des Gefäßes ist dabei meist gleichmäßig. Der sakkuläre Typ hingegen ist eher beim Aneurysma spurium zu finden, dort ist nur ein Teil der Wand von der Aussackung betroffen (vgl. Hombach 2009: S.268; (10)).

### **1.5.1.5 Bildgebung**

Die Diagnostik eines Aneurysmas könnte primär mit transthorakaler oder transösophagealer Echokardiografie erfolgen. Je nach Lage des Aneurysmas kommt es dabei aber zur Überlagerung der Strukturen und somit zu schlechterer Beurteilbarkeit. Um genaue Durchmesserwerte zu erhalten, muss man bei der

Akutdiagnostik auf das Spiral-CT oder MR zurückgreifen. Bei einer Therapieindikation bringt auch die intraarterielle Angiographie wichtige Informationen, vor allem bei abdominellen Aneurysmen (vgl. Operative und interventionelle Gefäßmedizin o. D.: S.580; (11)).

Zur besseren Beurteilung von der Aorta wird Kontrastmittel eingesetzt, es sei denn es ist eine Allergie oder eine schlechte Nierenfunktion bekannt. Dann wird meist auf die MR-Angiographie ausgewichen, da dort das Kontrastmittel auch bei schlechterer Nierenfunktion anwendbar ist und zudem natürlich auch auf ionisierende Strahlung verzichtet werden kann.

Anhand der MIP, Maximum-Intensitäts-Projektion, erhält man einen guten Überblick über Länge, Ausdehnung und Größe des Aneurysmas.

Um genauer auf die MR-Angiographie einzugehen, werden im Folgenden verschiedene MR-Sequenzen und ihre Anwendungsbereiche erläutert. Die 3D-CE-MRA kann zur Darstellung der gesamten Aorta eingesetzt werden, dabei erhält man Informationen über die Ausdehnung und den Durchmesser der Aorta (vgl. Hombach 2009: S.269; (10)).

Die CINE-SSFP-Sequenz wird eingesetzt, um eine begleitende Aortenklappeninsuffizienz abzuklären und das PC-Mapping um diese, falls vorhanden, zu quantifizieren (vgl. Hombach 2009: S.269; (10)). Neben diesen Sequenzen wird auch die transthorakale und transösophageale Echokardiographie zur Diagnostik und Beurteilung einer Aortenklappeninsuffizienz eingesetzt. Mithilfe von Dark-Blood-Turbo-Spinechosequenzen und kontrastgestützten MRA-Sequenzen können weitere Informationen die Aortenwanddicke, intramurale Hämatome oder Thromben betreffend, gewonnen werden (vgl. Hombach 2009: S.270; (10)). Nach Kontrastmittelgabe kann eine T1-gewichtete Turbo-Spinechosequenz oder eine Gradientenechosequenz eingesetzt werden, um möglicherweise in der Aortenwand vorkommende Anreicherungen sichtbar zu machen, zum Beispiel im Falle einer entzündlichen Aortenerkrankung (vgl. Hombach 2009: S.270; (10)).

Als Follow-up für den Durchmesser und den Grad der mit dem Aneurysma einhergehenden Aorteninsuffizienz bei konservativer Therapie oder, um postoperativ die Prothesenfunktion zu beobachten, ist der Einsatz der MR-Angiographie weit verbreitet (vgl. Hombach 2009: S.270; (10)). Für diesen Zweck werden in der Studie die flussgestützten Sequenzen getestet.

### **1.5.1.6 Therapie**

Die Therapieentscheidung hängt von verschiedenen Faktoren ab. Im Ascendensbereich muss der Durchmesser über 5,5 cm sein, pro Jahr um mehr als 1 cm zunehmen oder eine begleitende höhergradige Aortenklappeninsuffizienz vorliegen, dass es zu einer OP-Entscheidung kommt (vgl. Hombach 2009: S.269; (10)). Dabei wird bei offener chirurgischer Therapie ein suprakoronarer Ascendensersatz durchgeführt. Bei einem suprakoronaren Ascendensersatz wird die native Aortenklappe belassen. Wenn die Aortenklappe bereits degeneriert oder insuffizient ist, ersetzt man die Aorta ascendens mit einer klappentragenden Prothese oder führt ein Aortenklappenrepair durch (vgl. Hombach 2009: S.269; (10)). Bei betroffenen supraaortalen Gefäßen kann auch bei dem Aortenaneurysma ein Frozen-Elephant-Trunk eingebaut werden. Aber auch eine endovaskuläre Therapie mittels TEVAR ist eine etablierte Therapie für Aortenaneurysmen (vgl. Erbel et al. 2014; (18)). Die Nachkontrollen dieser Therapien werden nach einem Monat begonnen. Weiterführend wird eine Kontrolle im 6. Monat nach Therapie, nach 12 Monaten und anschließend in jährlichen Abständen durchgeführt (vgl. Erbel et al. 2014; (18)).

Eine Operation sollte in bestimmten Fällen bereits früher erfolgen, zum Beispiel bei stark progredientem Durchmesser, hochgradiger Aortenklappeninsuffizienz, bikuspidaler Aortenklappe, starker Symptomatik, Bindegewebserkrankungen, wie das Marfan-Syndrom, oder anderen in der Familie vorkommenden Aortenaneurysma-Syndromen (vgl. Hombach 2009: S.269; (10)).

Bei der thorakalen Aorta descendens wird erst ab einer Durchmessererweiterung auf 6,5 cm oder auch bei einer Größenzunahme des Durchmessers von 1 cm pro Jahr eine Operation durchgeführt (vgl. Hombach 2009: S.269; (10)).

## **1.6.3 Intramurales Hämatom, penetrierendes Aortenulcus**

### **1.6.3.1 Definition und Symptomatik**

Sowohl das intramurale Hämatom als auch das penetrierende Aortenulcus stellen mögliche Vorläufer der Dissektion dar. Ein intramurales Hämatom entsteht in aller Regel durch die Ruptur von Vasa vasorum der Adventitia. Die Ruptur passiert meist aufgrund von hypertensiv bedingter Vorschädigung. Zu diesem Zeitpunkt besteht aber noch keine Verbindung zum Aortenlumen. Es kann durch das Hämatom zu einem Einriss in der Intima kommen und so zur Einblutung in das falsche Lumen, deshalb wird es auch als Ursache für eine Aortendissektion bezeichnet (vgl. Hombach 2009: S.272; (10)).

Ein penetrierendes Aortenulcus entsteht durch rupturierte oder ulzerierte atherosklerotische Plaques in der Aortenwand, die progredient verlaufen. Diese durchbrechen primär die Membrana elastica interna und können sich dann weiter in die Media und Adventitia ausbreiten. Auch hier besteht das Risiko einer Aortendissektion, eines stark progredient verlaufenden Pseudoaneurysmas oder sogar einer Aortenruptur (vgl. Hombach 2009: S.272; (10)).

Die Symptomatik betreffend ist es naheliegend, dass sowohl das intramurale Hämatom als auch das penetrierende Aortenulcus ähnliche Symptome verursachen wie die Aortendissektion, vor allem den plötzlichen starken Thoraxschmerz. Die klinische Unterscheidung ist also so gut wie unmöglich. Auch asymptomatisch kann der Krankheitsverlauf sein (vgl. Hombach 2009: S.273; (10)).

Das Risiko für eine transmurale Ruptur liegt beim symptomatischen PAU bei bis zu 40% je nach Lokalisation und Ausprägung des Ulcus, ein sogenanntes Plaque-Imaging hilft das Risiko einschätzen zu können (vgl. Operative und interventionelle Gefäßmedizin o.D.: S.606; (11)).

### **1.6.3.2 Ursachen und Risikofaktoren**

Die Risikofaktoren des intramuralen Hämatoms sind in der Regel dieselben wie die der Aortendissektion, vor allem der Bluthochdruck spielt hierbei eine große Rolle (vgl. Operative und interventionelle Gefäßmedizin o.D.: S.604; (11)). Der Hauptrisikofaktor des penetrierenden Aortenulcus ist die Atherosklerose (vgl. Operative und interventionelle Gefäßmedizin o.D.: S.567; (11)). Bei älteren PatientInnen tritt ein penetrierendes Aortenulcus meist infolge von arteriellem Hypertonus,

Hyperlipoproteinämie, Aortensklerose und chronischem Nikotinabusus auf (vgl. Operative und interventionelle Gefäßmedizin o.D.: S.604-605; (11)). Im Prinzip sind alle Faktoren, die die Media der Aorta schwächen, wie zum Beispiel zystische Fibrose, Degeneration oder idiopathische Medianekrose, Risikofaktoren dieser Erkrankungen (vgl. Operative und interventionelle Gefäßmedizin o.D.: S.602-603; (11)).

### **1.6.3.3 Epidemiologie**

Das intramurale Hämatom macht circa 10 - 25% der PatientInnen mit akutem Aortensyndrom aus. Meist sind die Betroffenen männlichen Geschlechts und über 65 Jahre alt. 60-70% der Fälle treten in der Aorta descendens auf (vgl. Communications o.D.; (19)). Auch beim penetrierenden Aortenulkus sind überwiegend Männer im Alter von über 70 Jahren, die an stark ausgeprägter Atherosklerose leiden, betroffen. Das PAU macht 2 - 7% der PatientInnen mit akutem Aortensyndrom aus. Meist treten PAUs in der Aorta descendens auf, seltener im Arcus aortae oder in der Aorta ascendens (vgl. Communications o.D.; (20)).

### **1.6.3.4 Klassifikation**

Die intramuralen Hämatome können ähnlich wie die Aortendissektion mithilfe des Stanford-Schemas eingeteilt werden. Ein intramurales Hämatom das (auch) in der Aorta ascendens lokalisiert ist, gehört zu Stanford Typ A, ein intramurales Hämatom, das nur in der Aorta descendens lokalisiert ist, gehört zu Stanford Typ B (vgl. Communications o.D.; (19)).

### **1.6.3.5 Bildgebung**

PatientInnen mit einem akutem Aortensyndrom werden ähnlich wie PatientInnen mit Verdacht auf Aortendissektion oder Aortenaneurysma mithilfe von CT-Angiographie oder seltener auch MR-Angiographie abgeklärt. Anhand der Schnittbildgebung erhält man recht schnell genaue Informationen über den Auslöser der Beschwerden, dessen Ausprägung und Schweregrad (vgl. Operative und interventionelle Gefäßmedizin o. D.: S.569-570; (11)).

Wird eine MR-Angiographie zur Therapieplanung oder für Follow-ups durchgeführt kann man dafür folgende Sequenzen nutzen (vgl. Operative und interventionelle Gefäßmedizin o. D.: S.570; (11)).

Intramurale Hämatome werden bei der 3D-MRA-Untersuchung in der nativen T1-Aufnahme meist hell dargestellt. In der 2. Phase der CE-MRA-Aufnahme kann ein intramurales Hämatom ebenso gut dargestellt werden. Das PAU kann mithilfe der kontrastgestützten MRA-Sequenz gut als eine mit Kontrastmittel gefüllte Aussackung erkannt werden (vgl. Hombach 2009: S.273; (10)).

Wenn also ein Verdacht auf ein intramurales Hämatom vorliegt, sollte man auch andere MRA-Sequenzen durchführen, wie zum Beispiel die Black-Blood-Turbospinechosequenzen, die EKG-getriggert sind. Diese zeigen eine Aortenwandverdickung deutlich auf und das Hämatom wird auf den T1-gewichteten Bildern meist signalreich dargestellt. Alternativ können auch die Cine-SSFP-Sequenzen zur Beurteilung der Aortenwand eingesetzt werden (vgl. Hombach 2009: S.273; (10)).

Um mehr hämodynamische Daten zu erhalten oder bei Nachkontrollen auf Kontrastmittel verzichten zu können, gibt es zunehmend auch flussgestützte Sequenzen, deren Anwendung und Aussagekraft erprobt wird.

### **1.6.3.6 Therapie**

Die Therapie von intramuralen Hämatomen variiert stark von deren Ausprägung. Teils ist es erforderlich die intramuralen Hämatome wie Typ-A-Dissektionen zu behandeln, da eine konservative Therapie eine schlechte Prognose bedeuten würde. Teils kommt es in bestimmten Fällen bei einem intramuralen Hämatom aber auch zu einer Heilung von Aortenabschnitten unter konservativer Therapie, dies nennt sich Remodeling. PAUs der Aorta descendens werden in aller Regel per Stentgraft minimalinvasiv therapiert (vgl. Hombach 2009: S.273; (10)).

## 1.7 Magnetresonanztomographie

### 1.7.1 Grundprinzip der Magnetresonanztomographie

Bei der Magnetresonanztomographie werden durch hochfrequente elektromagnetische Felder die Spins der Atomkerne, auch Eigendrehimpulszustände genannt, angeregt. Die Anregung der Kernspins erfolgt durch ein von meist supraleitenden Magneten erzeugtes starkes, homogenes Magnetfeld,  $B_0$ . Bei dieser Anregung wird die Orientierung der Spins relativ zu  $B_0$  verändert. Für diese Anregung benötigt man ein HF-Feld, Hochfrequenzfeld, mit einer Anregungs-, Larmor- oder Resonanzfrequenz  $f$ . Dieses wird von sogenannten HF-Spulen erzeugt, die ebenfalls die erzeugten Signale messen können. Um dieses System zur Bildgebung zu verwenden, sind aber auch Gradientenspulensysteme notwendig. Diese erzeugen zusätzliche Magnetfelder in linearer Abhängigkeit vom Ort  $x$ ,  $y$  oder  $z$  (vgl. Michaely et al. 2015: S.2; (2)).

Doch wie wird aus dem gemessenen oder empfangenen Signal ein Bild? Dafür wird die Fouriertransformation benötigt. Diese kann aus dem Gesamtsignal  $S(t)$  die einzelnen verschiedenen Frequenzen berechnen. Es entsteht ein Frequenzspektrum  $S(f)$ , dabei wird die Signalintensität  $S$  über der Frequenz  $f$  aufgetragen.

Als Ergebnis erhält man ein rekonstruiertes eindimensionales Bild, das die Orte der Spins und die Larmorfrequenzen entlang der  $x$ -Achse zeigt (vgl. Michaely et al. 2015: S.4; (2)). Um zwei- oder dreidimensionale MRT-Bilder zu erzeugen, benötigt man statt einem einzelnen zeitabhängigen Signal  $S(t)$  eine ganze Reihe an Signalen (vgl. Michaely et al. 2015: S.5; (2)).

In jeder Zeile oder Spalte des Bildes findet sich ein akquiriertes Signal. Dabei sind hohe Signalamplituden als helle Bildpunkte dargestellt. Diese dabei entstandenen Daten nennt man Rohdaten im Ortsfrequenz- oder  $k$ -Raum. Wendet man dann die zweidimensionale Fouriertransformation an, werden aus diesen Rohdaten die Bilddaten im Ortsraum erzeugt (vgl. Michaely et al. 2015: S.5; (2)).

Die Rohdaten sind als diskrete Intensitätswerte in Zeilen und Spalten angeordnet. Die Pixel, Anzahl der Bildpunkte, im Rohdatensatz nennt man auch Matrixgröße. Besonders gut geeignet sind dabei die Matrixgrößen 128x128, 256x256, 512x512. Die Fourierrekonstruktion erstellt ein Bild mit genau der gleichen Matrixgröße wie

die Rohdaten auch aufweisen. Von einer Ortsauflösung spricht man dann, wenn man den Quotienten aus dem field of view (FOV, Sichtfeld) und der Matrixgröße bildet (vgl. Michaely et al. 2015: S.5; (2)).

Dreidimensionale Bilddatensätze können auf zwei Arten aufgenommen werden, entweder schichtweise aus zweidimensionalen Roh- und Bilddaten oder aus dreidimensionalen Rohdatenvolumen. Der Datensatz besteht aus zeitabhängigen HF-Signalen, die zum Beispiel in x-Richtung akquiriert werden. Dann wird die Aufnahme in y-Richtung wiederholt bis auch diese Ebene mit Rohdaten aufgenommen wurde und zu guter Letzt wird es für die z-Richtung erneut durchgeführt, bis auch für diese Richtung alle Rohdaten vorliegen. Anschließend werden die Rohdaten mithilfe der dreidimensionalen Fouriertransformation rekonstruiert. Es entsteht so ein transversales, ein sagittales und ein coronales Schnittbild (vgl. Michaely et al. 2015: S.8; (2)).

Die Reihenfolge zur Aufnahme eines dreidimensionalen Bildes ist flexibel. Es gibt zwei verschiedene Ausleseordnungen, entweder linear zeilenweise oder zentriert (vgl. Michaely et al. 2015: S.9; (2)).

Wählt man die zentrierte Ausleseordnung, beginnt die Akquisition im k-Raum-Zentrum. Dort entscheidet sich auch der globale Bildkontrast und die Helligkeit. Die zentrierte Ausleseordnung muss nicht quadratisch erfolgen. Sie kann auch kreisförmig oder elliptisch im k-Raum-Zentrum beginnen. Die Beschreibung gilt für zwei der drei Richtungen. Die dritte noch verbleibende Richtung wird mit linearer Ausleseordnung aufgenommen (vgl. Michaely et al. 2015: S.9; (2)).

Das Signal-Rausch-Verhältnis (S/N) beschreibt die Qualität der Bildgebung und ist einer der wichtigsten Parameter, um verschiedene MRT-Systeme, Empfangsspulen oder Akquisitionstechniken zu vergleichen. Das S/N-Verhältnis ist proportional zum Volumen der akquirierten Voxel, zur Grundfeldstärke  $B_0$  und zur Wurzel aus der Gesamtauslesedauer  $T_{\text{AkqGesamt}}$  (vgl. Michaely et al. 2015: S.18; (2)).

An der Medizinischen Universität Graz werden die meisten diagnostischen MRT-Aufnahmen mit Hochleistungs-MR-Tomographen mit 3 Tesla durchgeführt. Selten greift man auf 1,5 Tesla-MR-Geräte zurück. Diese werden beispielsweise bei PatientInnen mit Herzschrittmachern eingesetzt.

## 1.7.2 MR-Angiographie

Für die MR-Angiographie können verschiedene MR-Sequenzen eingesetzt werden, dazu zählen die Time-of-flight-Angiographie, die Phasenkontrastangiographie, die kontrastverstärkte Angiographie und die nativen EKG-getriggerten MR-Angiographien (vgl. Michaely et al. 2015: S.20; (2)).

Das Prinzip der Time-of-flight Angiographie basiert darauf, dass die Gleichgewichtsmagnetisierung von unbewegten Spins im angeregten Volumen merklich geringer ist als die der bewegten, frisch einströmenden Spins.

Die longitudinale Magnetisierung von Gewebe und Blut ist jeweils hoch, es erscheint hell. Durch die Messung mit einer schnellen 3D-Gradientenecho-Sequenz wird aber von allen Spins im ausgewählten Volumen die Gleichgewichtsmagnetisierung reduziert, also erscheint es nun dunkel. Neu einströmende Spins des Blutes haben aber noch die ursprünglich hohe Magnetisierung, wodurch sie hell, hyperintens, erscheinen. Das verbleibende Signal nimmt aber ab je länger das Blut durch das angeregte Volumen fließt. Um dieser Abnahme der Signalintensität entgegenzuwirken wurde eine MOTSA-Technik entwickelt. Dabei werden überlappende Volumina akquiriert, die dann zu einem 3D-Datensatz kombiniert werden (vgl. Michaely et al. 2015: S.20; (2)).

Die Phasenkontrastangiographie, abgekürzt PC-MRA, verwendet zusätzlich geschaltete Gradientenfelder, damit für bewegte Spins geschwindigkeits- und richtungsabhängige Phaseninformationen entstehen. Es werden zwei Messungen mit unterschiedlichen Gradienten durchgeführt. Anschließend wird die Phasendifferenz berechnet, die neben dem Rauschen nur noch dort Signale enthält, wo das Blut im Gefäß in dieselbe Richtung wie der Gradient läuft. Die Geschwindigkeitscodierung VENC (velocity encoding) beschreibt die Stärke und Dauer der Gradienten. Diese muss an die Flussgeschwindigkeit des Gefäßes angepasst werden (vgl. Michaely et al. 2015: S.21; (2)).

Phasenkontrastmessungen müssen also in drei Raumrichtungen durchgeführt werden, um alle Gefäße unabhängig von deren Flussrichtung darzustellen.

Mithilfe der Phasenkontrastmessungen kann auch die Flussgeschwindigkeit quantifiziert werden.  $\Phi$  steht für die gemessene Phasenverschiebung und ist proportional zur Flussgeschwindigkeit und von der Richtung des Flusses abhängig.

Zu verschiedenen Zeitpunkten innerhalb der Herzperiode kann EKG-getriggert die Blutflussgeschwindigkeit in einem Gefäß bestimmt werden und so eine Flussgeschwindigkeits-Zeit-Kurve erzeugt werden (vgl. Michaely et al. 2015: S.22; (2)).

Vorteile gegenüber der TOF-MRA sind, dass die Dicke und Orientierung der Schichten flexibler gewählt werden kann und auch die Hintergrundunterdrückung besser funktioniert (vgl. Michaely et al. 2015: S.22; (2)).

Kontrastverstärkte Angiographien beinhalten die Verwendung von gadoliniumhaltigen MR-Kontrastmitteln. Die Verabreichung des Kontrastmittels erfolgt meist intravenös und erreicht innerhalb weniger Sekunden das Zielgebiet. Die MRT-Aufnahme erfolgt dann meist anhand einer schnellen, T1-wichtenden Gradientenechosequenz. Dabei sollte die Repetitionszeit TR möglichst kurz und der Anregungswinkel möglichst hoch gewählt werden. In der T1-Wichtung erscheint, das Gewebe und Blut ohne Kontrastmittel signalarm, sodass die Gefäße mit Kontrastmittel hyperintens dargestellt sind. In einer späteren Phase können auch die Venen, in denen das Blut und Kontrastmittel zurückströmt, kontrastiert dargestellt werden, dies nennt sich dann venöse Phase (vgl. Michaely et al. 2015: S.23; (2)).

Um arterielle und venöse Überlagerungen zu vermeiden, müssen zwei Dinge beachtet werden. Zum einen sollte das Zentrum des k-Raums zum Zeitpunkt des maximalen Signals ausgelesen werden. Zum anderen sollte die gesamte Messdauer nicht deutlich länger als das arterielle Aufnahmezeitfenster sein (vgl. Michaely et al. 2015: S.23; (2)).

Zu den nativen EKG-getriggerten Angiographien gehören die Spinecho- oder Turbo-Spinecho-Sequenzen, die den Effekt der flussinduzierten Signalauslöschung, flow void, einsetzen. Die T2-gewichteten EKG-getriggerten Turbo-Spinecho-Sequenz-Akquisitionen werden einmal in der schnellen systolischen arterielle Blutflussphase durchgeführt und einmal in der langsamen diastolischen Blutflussphase. Die Signalauslöschung bei dem hohen systolischen Blutfluss ist deutlich größer als in der Diastole. Normales Gewebe und venöse Gefäße sind bei beiden Aufnahmen circa gleich aussehend. So erscheinen im

Differenzbild die Arterien hyperintens gegenüber anderen Strukturen (vgl. Michaely et al. 2015: S.24; (2)).

Andere MR-Angiographietechniken können unterschieden werden zwischen signalreicher Gefäßdarstellung (bright blood) und signalarmer Gefäßdarstellung (black blood). Zu den bright blood Sequenzen gehören zum Beispiel die ASL- und SSFP-Sequenzen. ASL steht für Arterial Spin Labeling und SSFP für Steady-state free precession (vgl. Michaely et al. 2015: S.24; (2)).

Die QISS-Sequenz, Quiescent-Interval Single-Shot Sequenz, ist eine EKG-getriggerte flussgestützte Sequenz, die als robuste und 2-dimensionale, nicht-subtrahierte Technologie beschrieben wird. Sie gehört zu den SSFP-Sequenzen. Nach einem definierten Zeitintervall (quiescent interval) wird mithilfe der EKG-Triggenung nach schicht-selektiver Inversion akquiriert. Bildkontraste werden erzeugt durch eine in der Ebene stattfindende Sättigung, um den Hintergrund zu unterdrücken. Tracking-Sättigungsimpulse werden eingesetzt, um venöse Signale zu unterdrücken (vgl. MAGNETOM Flash o. D., Issue 491; (21)).

Die SPACE-Sequenz gehört zu den dreidimensionalen Turbo-Spin-Echo-Sequenzen, 3D-TSE. Der Unterschied zu den anderen TSE-Sequenzen liegt darin, dass die SPACE kurze, nicht-selektive Refokussierungs-Impulsfolgen verwendet. Diese bestehen aus Hochfrequenz-Impulsen, die einen hohen Flipwinkel besitzen. So werden hochauflösende, isotrope Bilder erstellt, die in mehreren Ebenen rekonstruierbar sind. Gegenüber Suszeptibilität, Strömungen und chemischen Verschiebungsartefakten ist die SPACE im Gegensatz zu den anderen TSE-Sequenzen weniger empfindlich (vgl. MRI sequences| T1 weighted mri pulse sequence| MRI Glossary| T2 vs T1 MRI o. D.: 3D TSE with variable flip angle; (22)).

Das Prinzip der 4D-flow-Sequenz beruht auf dem Prinzip der Phasenkontrast-MR-Angiographie. Dabei wird die Strömungskodierung in alle drei Raumrichtungen eingesetzt. Diese wird relativ zu den drei Raumrichtungen und entlang der Zeitachse des Herzzyklus ausgelöst. Dreidimensional und Zeit ergibt dann vierdimensional. Für die 4D-flow-Sequenz wird sowohl eine EKG- als auch eine

Atemtriggerung eingesetzt, um die Ergebnisse zu optimieren. Die bisher am meisten verwendete Sequenz in diesem Sektor ist die 2D-Cine-Phasenkontrast-Sequenz. Die 4D-flow hat aber aufgrund des Post-Processing-Verfahrens den Vorteil, dass auch retrospektiv die Analyseebenen an beliebigen Orten innerhalb des aufgenommenen Bereichs platziert werden können (vgl. Dyverfeldt 2015; (23)).

## **2 Material und Methoden**

### **2.1 Aufbau der Studie**

#### **2.1.1 Ein- und Ausschlusskriterien**

Als Einschlusskriterium wurde festgelegt, dass eine MR-Kontrolle im Rahmen der Routinekontrollen nach behandelter Aortenerkrankung vorgesehen sein soll und zumindest eine solche Nachkontrolle bereits stattgefunden hat.

Zu den Ausschlusskriterien zählen Menschen, die nicht gern und freiwillig ruhig für weitere 30min im MR-Gerät liegen möchten. Ansonsten gab es keine weiteren über die bisher routinemäßig festgelegten Ausschlusskriterien hinausgehenden, die die Teilnehmenden nicht bereits bei einer stattgehabten MR-Nachkontrolle unterschrieben haben.

#### **2.1.2 PatientInnenauswahl**

Ausgewählt wurden PatientInnen, die im LKH an der Herzchirurgie und Radiologie eine Nachkontrolle ihrer thorakalen Aortenerkrankung hatten. Wie bereits bei den Ein- und Ausschlusskriterien geschrieben kamen für die Studie nur PatientInnen mit thorakalen Aortenerkrankungen, sprich Aortendissektion, Aortenaneurysma, Aortenektasie, Aortenulkus oder intramurales Hämatom infrage. Auch die bisher durchgeführten Bildgebungen und Berichte waren ausschlaggebend für die Auswahl. Der Allgemeinzustand der PatientInnen musste für diese Studiendurchführung gut genug sein und die Aortenerkrankung durfte nicht zu komplex sein, da sonst die Beurteilung der Studienbildgebungen zusätzlich erschwert gewesen wäre.

Insgesamt wurde die Studie mit sieben PatientInnen ( $57 \pm 19$  Jahre, davon 2 Männer) prospektiv durchgeführt. Unter den Diagnosen der sieben PatientInnen befanden sich vier Typ A-Dissektionen, drei Typ B-Dissektionen und eine Aortenektasie. Zwei der Aortendissektionen (eine Typ A- und eine Typ B-Dissektion) traten dabei peripartal auf. Die Typ B-Dissektionen und die Aortenektasie befinden sich unter engmaschigen Kontrollen in konservativer Therapie. Zwei der Typ A-Dissektionen wurden mit Aortenklappen- und Aorta ascendens-Ersatz therapiert. Bei zwei Typ A-Dissektionen wurde die Aorta ascendens mit einem Aorta-ascendens-Ersatz behandelt. Drei der Typ A-Dissektionen haben sich bis in die Aorta descendens fortgesetzt. Bei zwei dieser PatientInnen wurde die weitere Therapie rein

medikamentös durchgeführt, bei der dritten der Patientin wurde der Arcus aortae und die Aorta descendens mittels Stentgraft therapiert. Bei der Patientin, bei der sich die Typ A-Dissektion nicht auf den Arcus aortae und die Aorta descendens ausgebreitet hat, liegt in der distalen Aorta descendens eine zweite Dissektion vom Typ B vor.

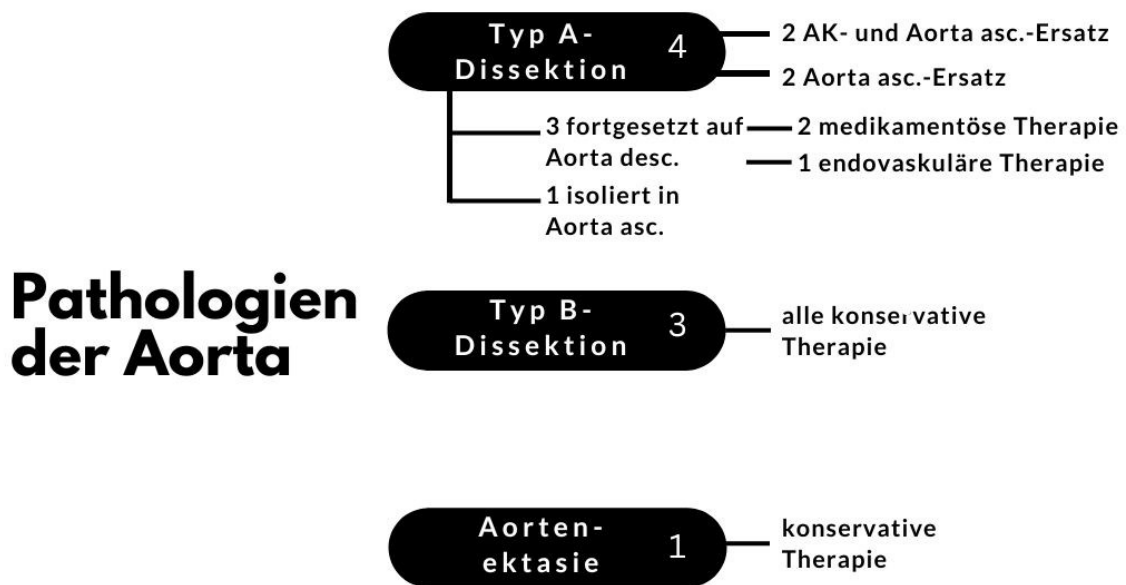


Abbildung 4: Grafik zu den untersuchten Pathologien der PatientInnen der Studie

### 2.1.3 PatientInnenaufklärung

Die Aufklärung der PatientInnen und auch der drei Probandinnen wurde meist von der Studienärztin Ass.-Prof. Dr. med. Manuela Aschauer in Begleitung von der Studentin cand. med. Tamara Sand durchgeführt. Dabei wurden die bereits zuvor bei der Ethikkommission eingereichten Aufklärungen, für PatientInnen und Probandinnen unterschiedlich, verwendet. Diese wurden wie andere Aufklärungen auch sowohl vom Patienten oder von der Patientin und von der Studienärztin Ass.-Prof. Dr. med. Manuela Aschauer unterschrieben. Die Nachkontrollen der PatientInnen wurden von der Univ.-FÄ Dr. med. Ingeborg Keeling geplant und in

den Zeitraum, in dem uns alle drei flussgestützten Sequenzen zur Verfügung standen, gelegt. Da manche Sequenzen und auch die Auswertesoftware für den 4D-Flow zeitlich begrenzt waren, mussten die Untersuchungen der PatientInnen, die für die Studie infrage kamen, in einem festgelegten Zeitraum erfolgen.

Die Aufklärungsformulare sowohl für die PatientInnen als auch für die drei Probandinnen sind im Anhang einzusehen.

#### **2.1.4 Vorbereitung mit Probandinnen**

Um bei den Untersuchungen der PatientInnen einen möglichst raschen und reibungslosen Ablauf leisten zu können, war es von großer Bedeutung, die Durchführung und Reihenfolge der Sequenzen zuvor zu testen und zu optimieren. Die QISS- und 4D-flow-Sequenz waren für die RadiologietechnologInnen neu und bedurften deshalb einer Einführung der Firma Siemens, bei der sich andere MitarbeiterInnen bereiterklärten sich für eine Testuntersuchung ins MR zu legen. Innerhalb kürzester Zeit war die Durchführung und Planung der Sequenzen von dem zuständigen Personal erlernt. So konnte trotz des festgelegten Zeitraums von 3 Monaten, in denen uns die QISS-Sequenz von der Firma Siemens bereitgestellt wurde, sowohl die Vorbereitung als auch die Studie selbst sogar mit sieben anstatt mit sechs geplanten PatientInnen durchgeführt werden.

Durch die Testläufe mit den Probandinnen, bei denen nur die Studiensequenzen und nicht die CE-MRA-Sequenzen durchgeführt wurden, konnte ein Eindruck für den zeitlichen Aufwand gewonnen werden. Auch konnte so herausgefunden werden, wie die Studiensequenzen am besten in das Standardprotokoll für die Nachkontrollen der thorakalen Aortenerkrankungen eingefügt werden sollten.

Schließlich hat sich die Studienleitung darauf geeinigt, dass die Reihenfolge SPACE, CE-MRA, QISS-MRA (wenn durchgeführt) und 4D-flow-MRA ist. Der Grund für diese Reihenfolge war auch, dass die CE-MRA möglichst früh akquiriert wird, damit verlässliche Daten zur Befundung der PatientInnen vorliegen, falls diese die Untersuchung nach einer gewissen Zeit abbrechen müssen. Eines der Hauptziele dieser Studie war es, den zeitlichen Aufwand und die Anstrengung für die PatientInnen möglichst gering zu halten. Für die Sequenzen mit Atemanhaltung wurden auch verschiedene Methoden getestet, um so die optimale und angenehmste Wahl zu treffen.

Die SPACE-Sequenz wurde vor der CE-MRA-Sequenz durchgeführt, da sie im Vergleich eine kurze Akquisitionszeit hat. Es war ebenfalls das Ziel, ein Ergebnis zu erhalten, das möglichst wenig durch Kontrastmittel verfälscht ist. Da sowohl die QISS-Sequenz als auch vor allem die 4D-flow-Sequenz vergleichsweise lange Akquisitionszeiten haben, mussten diese aus Vernunftgründen erst im Anschluss an die CE-MRA-Sequenz durchgeführt werden. Bezüglich der Durchführung der QISS-Sequenz eignete man sich darauf diese nur bei sehr stabilen PatientInnen einzusetzen, da die Qualität des Ergebnisses bereits bei den Probandinnen nicht optimal war und die Akquisition der Sequenz aufgrund der Atemanhaltung sehr anstrengend ist. Die 4D-flow-Sequenz zeigte die längste und unbeständigste Akquisitionszeit, weshalb man sie nach den Probeläufen mit den Probandinnen an das Ende der Sequenzfolge setzte.

### **2.1.5 Hardware - SIEMENS® PRISMA fit E11**

Das Siemens-MR-Gerät Prisma fit, in dem die Studien-Untersuchungen durchgeführt wurden, besitzt laut Siemens folgende Vorteile und Eigenschaften. In allen drei Achsen 80 Millitesla pro Meter mit 200 Tesla pro Meter pro Sekunde. Außerdem wird mit einer sehr guten Kühltechnik, einer reduzierten Vibration und auch niedrigerer Geräusentwicklung geworben. Das Signal-Rausch-Verhältnis und die Langzeitstabilität sollen auch besser sein im Vergleich zu anderen Geräten (vgl. MAGNETOM Prisma o.D.; (24)).

TimTX True Shape sorgt dabei für eine schnelle Parallelübertragung und Tim 4G für den reibungslosen Empfang der Daten. Außerdem soll die Auflösung höher, die Scanzeit und die Artefakte geringer sein. In der Beschreibung der Forschungsanwendungen sind ebenfalls 4D-flow und andere Flussmessungen, sowie die SPACE-Sequenz als Anwendungsmöglichkeiten aufgeführt (vgl. MAGNETOM Prisma o.D.; (24)).

## **2.1.6 Software**

### **2.1.6.1 syngo.plaza**

Die Software syngo.plaza ist von Siemens Healthineers entwickelt worden und gehört zu dem Programm PACS. Es ist zum Lesen und Auswerten der radiologischen Bildgebungen geeignet, sowohl für Routineuntersuchungen als auch für komplexe Fälle (vgl. HealthManagement.org 2022; (25)).

Diese Software war das erste „Picture Archiving and Communications System - PACS“, das Siemens auf den Markt brachte und die 2D, 3D und 4D Auswertungen ermöglichte (vgl. HealthManagement.org 2022; (25)).

Syngo.plaza wurde bei der Diplomarbeitsstudie zur Auswertung der CE-MRA-, CE-CTA-, QISS- und SPACE-Bilder verwendet.

### **2.1.6.2 cvi42**

Diese Software ist zur Darstellung, Nachbearbeitung und quantitativen Auswertung von kardiovaskulären Bildgebungen im DICOM-Format entwickelt worden. Auch andere Bildgebungen als die der 4D-flow-MR-Angiographie können damit ausgewertet werden (vgl. Help Centre – Circle Cardiovascular Imaging o.D.; (26)). Bei der Diplomarbeitsstudie wurde cvi42 allerdings nur zur Auswertung der 4D-flow-Bilder verwendet, die Bilder der anderen Sequenzen wurde mithilfe von syngo.plaza ausgewertet.

Das Programm dient dazu die Daten einer 4D-Flow-Aufnahme auszuwerten. Man erhält dabei Werte für die hämodynamischen Parameter Flussgeschwindigkeit, Druckdifferenz (an verschiedenen Lokalisationen im Gefäß), Wandscherkraft und Energieverlust.

## **2.2 Auswertung**

Da aufgrund zeitlicher Limitierung der Software cvi42 die Auswertung der 4D-flow-Aufnahmen zuerst durchgeführt wurde, ist diese nun auch als erste beschrieben. Bei den 4D-flow-Aufnahmen war es das Ziel alle Aufnahmen von Probandinnen und PatientInnen mit den gleichen Messebenen auszuwerten, sodass man am Ende die erhaltenen Werte gut miteinander vergleichen kann.

In den Aufnahmen des 4D-Flows wurden folgende Parameter erfasst:

1. Flow: Fließgeschwindigkeit des Blutes in dieser Ebene
2. WSS: Wall shear stress in der Messebene
3. RPM: Relative pressure measurement, der den Druckunterschied von dieser Messebene zu einer Vergleichsmessebene, die immer an den Beginn der Aorta ascendens gelegt wurde, angibt
4. E: Energieverlust, der den Verlust an Energie zwischen den angegebenen Messebenen X und Y (gleiche Messebene wie die Flow X und Flow Y-Ebene) angibt

Die Auswertung der 4D-flow Bilder ergibt nicht nur visuelle Ergebnisse und Informationen, sondern auch genaue Messwerte, die verglichen werden können.

Für die Probandinnen wurden gewisse Messebenen festgelegt, die für alle drei gleich waren, diese sind unter dem Punkt „Ergebnisse“ in Form einer Tabelle aufgeführt.

Auch für die PatientInnen wurden individuell je nach Erkrankung Messebenen ausgewählt, diese werden unter dem Punkt „Ergebnisse“ ebenfalls vor den jeweiligen Bildgebungen in Form einer Tabelle genannt. Bei den gleichen Erkrankungen sind die Messebenen ähnlich gelegt worden, sodass ein Vergleich der Messwerte möglich ist. Um die PatientInnen-Daten anonym zu halten, werden die PatientInnen als PatientIn 1 – 7 bezeichnet. Diese Bezeichnung bleibt auch in den späteren Kapiteln erhalten.

Zur quantitativen Auswertung gehört neben der Beurteilung der Messwertveränderungen von proximal nach distal auch die Unterscheidung zwischen physiologisch und pathologisch. Ebenso sollte beurteilt werden, ob die gemessenen Werte nachvollziehbar und erklärbar sind.

Die qualitative Auswertung der 4D-flow Bildgebung umfasst auch die Bewertung folgender Punkte:

Wie lange dauert die Akquisitionszeit und ist diese Zeitdauer zumutbar für PatientInnen mit thorakalen Aortenerkrankungen?

Treten Probleme bei der Akquisition auf, zum Beispiel aufgrund von der EKG-Triggerung?

Sind in den visuellen Ergebnissen Endoleaks, Dissektionsmembranen, wahres und falsches Lumen, Flussrichtungen im Aneurysma, Fluss durchs Endoleak, Entry oder Reentry erkennbar?

Bezüglich der QISS- und SPACE-Sequenz kann man auch eine quantitative und qualitative Auswertung unterscheiden.

Bei der quantitativen Auswertung geht es darum den Aortendurchmesser in den gleichen Ebenen wie bei den Bildern der anderen Sequenzen zu messen. Um möglichst korrekt zu sein wird der Durchmesser dabei zweimal gemessen, eine Durchmessermessung und im 90° Winkel dazu die zweite Durchmessermessung. Wenn die Pathologie gut sichtbar ist, gilt es zu prüfen, ob nicht nur der Durchmesser der Pathologie gleich dargestellt ist, wie in den anderen Sequenzbildern, sondern auch ob die Position und Höhenlokalisierung an der Aorta die gleiche ist.

Außerdem gilt es Homogenitäten beziehungsweise Inhomogenitäten zu vergleichen, ob diese an den gleichen Lokalisationen zu finden sind und sich ähnlich verhalten, auf die Ausdehnung und das Ausmaß bezogen.

Bei der qualitativen Analyse der beiden Sequenzen QISS- und SPACE-MRA sollten folgende Fragen geklärt werden:

- Ist die Pathologie der thorakalen Aorta genauso gut oder schlecht sichtbar wie in den Vergleichsbildern der CE-MRA oder CE-CTA?
- Treten die Homogenitäten oder Inhomogenitäten bei den anderen Sequenzen gleich stark ausgeprägt auf?
- Gibt es in den erhaltenen Bildern der QISS- oder SPACE-Sequenz nicht-beurteilbare Bereiche?
- Treten Artefakte, zum Beispiel durch Metall in Prothesen oder Stents ausgelöst, oder andere Arten von Artefakten auf, die die Beurteilbarkeit einschränken?
- Außerdem gilt es zu beurteilen, ob die Größenproportionen in allen Bildgebungen vergleichbar sind, oder ob es Abweichungen voneinander gibt.
- Auch die Beurteilbarkeit der Morphologie spielt bei der qualitativen Auswertung eine wichtige Rolle.
- Wie lange dauert eine Akquisition dieser Sequenzen im Vergleich zu der Akquisitionszeit der CE-MRA? Kann diese Dauer den PatientInnen mit thorakalen Aortenerkrankungen zugemutet werden?
- Treten Probleme bei der Akquisition auf, zum Beispiel durch die EKG-Triggerung?
- Können die qualitativen Ergebnisse der flussgestützten Sequenzen überzeugen und teilweise als Ersatz für die kontrastgestützte Sequenz dienen?

### **3 Ergebnisse – graphische und bildliche Darstellungen**

#### **3.1 Qualitative und Quantitative Auswertung der QISS- und SPACE-MRA im Vergleich zur CE-MRA, VIBE-MRI und teilweise CE-CTA**

Im folgenden Kapitel werden zunächst die Bildgebungen der Probandinnen dargestellt. Anhand festgelegter Messebenen wurde eine qualitative und quantitative Auswertung der Studiensequenzen, QISS-MRA und SPACE-MRA, durchgeführt.

Im Anschluss daran sind die qualitativen und quantitativen Ergebnisse der PatientInnen angeführt. Wie unter Punkt 2.2 beschrieben, wurden die Aufnahmen anhand verschiedener qualitativer Aspekte beurteilt und in der quantitativen Beurteilung wurde vor allem der Aortendurchmesser als Parameter herangezogen.

Da bei den Probandinnen nur Studiensequenzen durchgeführt wurden, lagen keine CE-MRA-, VIBE-MRI- oder CE-CTA-Aufnahmen zum Vergleich vor.

Um einen ersten Überblick zu erhalten, ist die 3D-Rekonstruktion gut geeignet. Diese sehen von Probandin 1 wie folgt aus:



Abbildung 5: MIP-3D-Rekonst. der QISS-MRA-Bildgebung (sagittale Ansicht)  
Probandin 1: Auf den ersten Blick sind die Signalauslöschungen in der Aorta descendens (Pfeil) zu erkennen



Abbildung 6: MIP-3D-Rekonst. der SPACE-MRA-Bildgebung (sagittale Ansicht)  
Probandin 1: Dorsal der Aorta ist auch der Liquor (Pfeil) gut zu erkennen, die beiden Strukturen sind in dieser 3D-Rekonstruktion aber gut abgrenzbar voneinander

Hierbei wird auf den ersten Blick bereits ein großes qualitatives Problem der QISS-MRA-Sequenz ersichtlich, die Inhomogenitäten und abschnittswise Signalverluste. In den Bereichen der Signalverluste kann weder eine fundierte Beschreibung der Aorta verfasst werden, noch könnten Pathologien und deren zeitliche Veränderungen verlässlich bewertet werden.



Abbildung 7: MIP-3D-Rekonst. der QISS-MRA-Bildgebung (Ansicht von schräg sagittal-frontal)

Probandin 1: Auch in dieser Rekonstruktion sind die Signalverluste in der Aorta descendens deutlich zu erkennen (Pfeil)



Abbildung 8: MIP-3D-Rekonst. der SPACE-MRA-Bildgebung (Ansicht von schräg sagittal-frontal)

Probandin 1: Dorsal der Aorta ist erneut der Liquor zu erkennen, aber in dieser Rekonstruktion schlechter abgrenzbar

Auch diese beiden 3D-Rekonstruktionen bestätigen die Problematik der Signalauslöschungen und Inhomogenitäten der QISS-MRA-Sequenz.

Nun werden die Ergebnisse der einzelnen Messebenen (in „“ angegeben) angeführt.

„Größter Durchmesser der Aorta ascendens“:

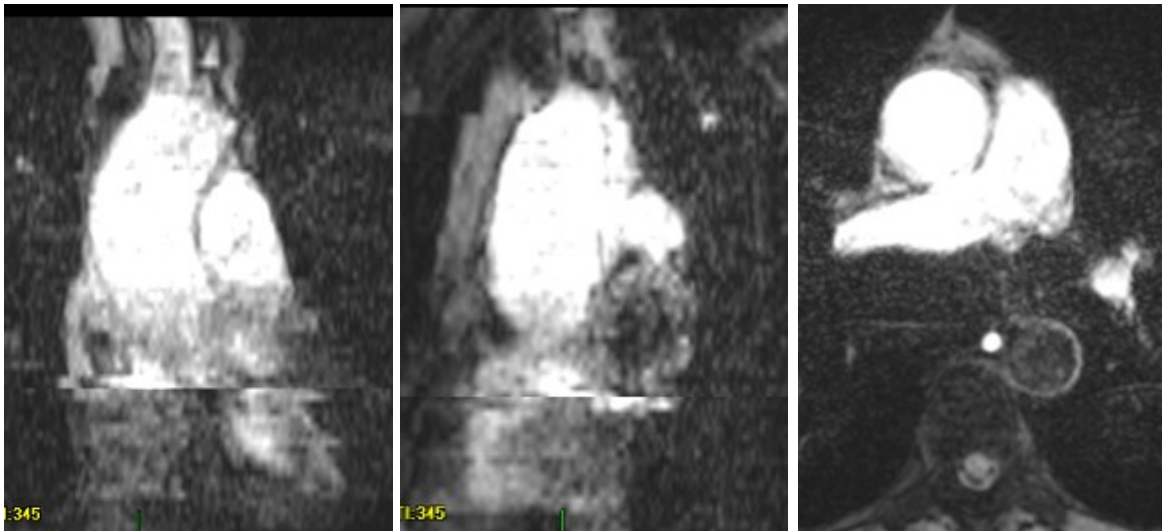


Abbildung 9: MPR-Rekonst. QISS-MRA, Aorta asc., Prob. 1

links: cor. E., mittig: sag. E., rechts: trans. E.

Die Aorta ascendens ist in diesem Fall gut kontrastiert und in allen Ebenen gut beurteilbar

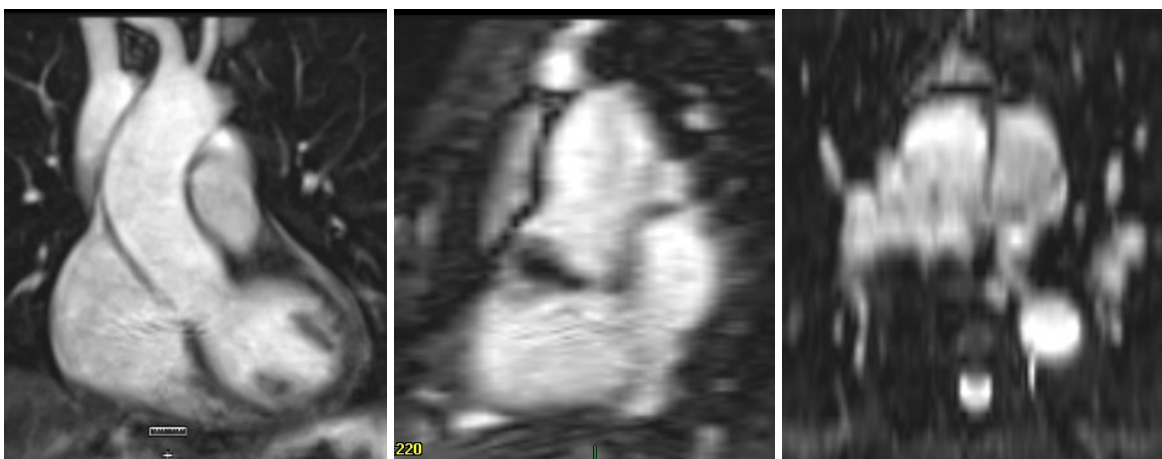


Abbildung 10: MPR-Rekonst. SPACE-MRA, Aorta asc., Prob. 1

links: cor. E., mittig: sag. E. und rechts: tra. E.

Die coronale Aufnahmeebene erscheint qualitativ deutlich besser als die anderen beiden Aufnahmeebenen, nur anhand der sagittalen und transversalen Ebene könnte keine Pathologie diagnostiziert oder ausgeschlossen werden

„Größter Durchmesser der Aorta ascendens“:

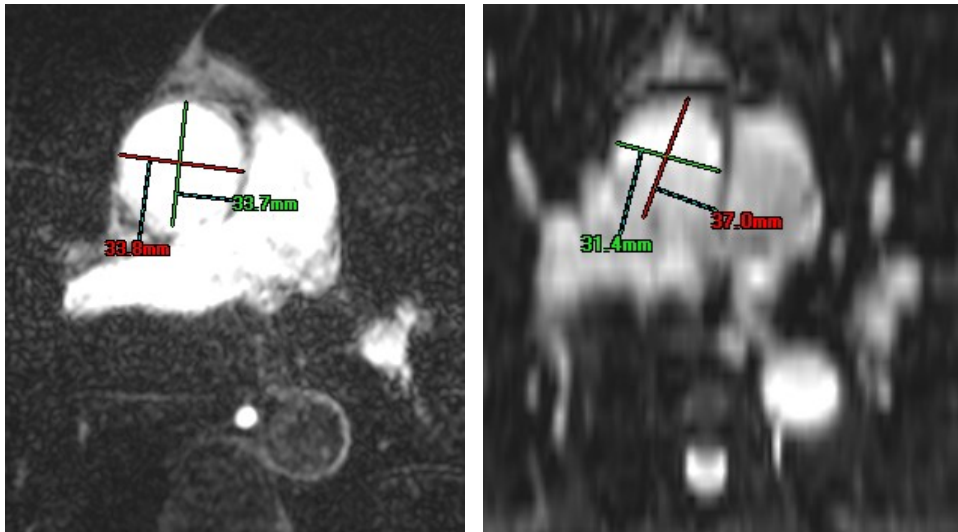


Abbildung 11: Durchmesser Aorta asc., QISS-MRA (l.) und SPACE-MRA (r.) (MPR-Rekonst.: transversal), Prob. 1

links: QISS-MRA 3,4 x 3,4cm, rechts: SPACE-MRA 3,7 x 3,1cm

Durchmessermessung in der Transversalebene der SPACE-MRA aufgrund schlechterer Qualität schwieriger, hohe Messvariabilität durch unscharfe Abgrenzbarkeit der Aortenwand

„Vor dem Abgang der Supraaortalen“:

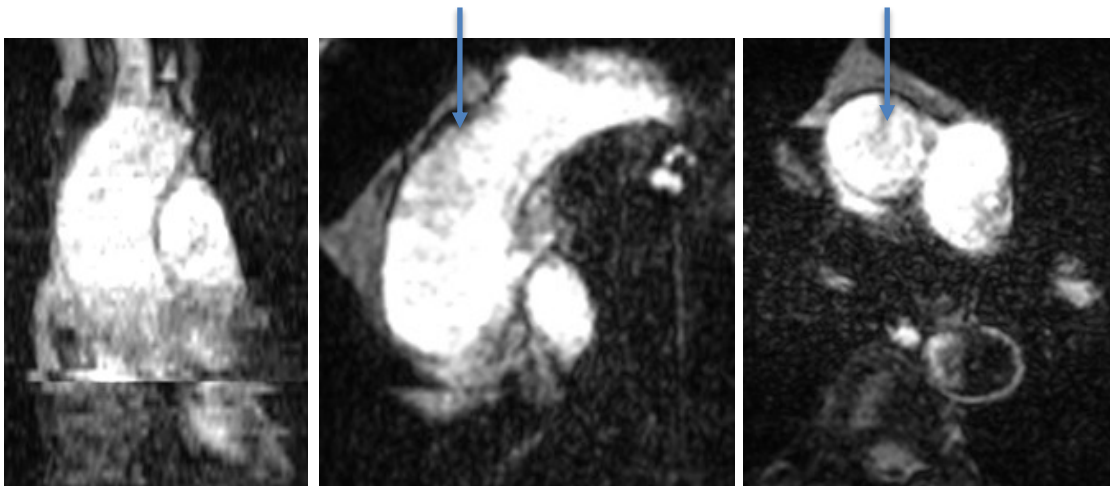


Abbildung 12: MPR-Rekonst., QISS-MRA, vor Abgang der Supraaortalen, Prob. 1

links: cor. E., mittig: schräg-sag. E., rechts: schräg-tra. E.

Inhomogenitäten (Pfeile) in den Aufnahmen der QISS-MRA, die bei Vorliegen einer Pathologie die Befundung erschweren würden

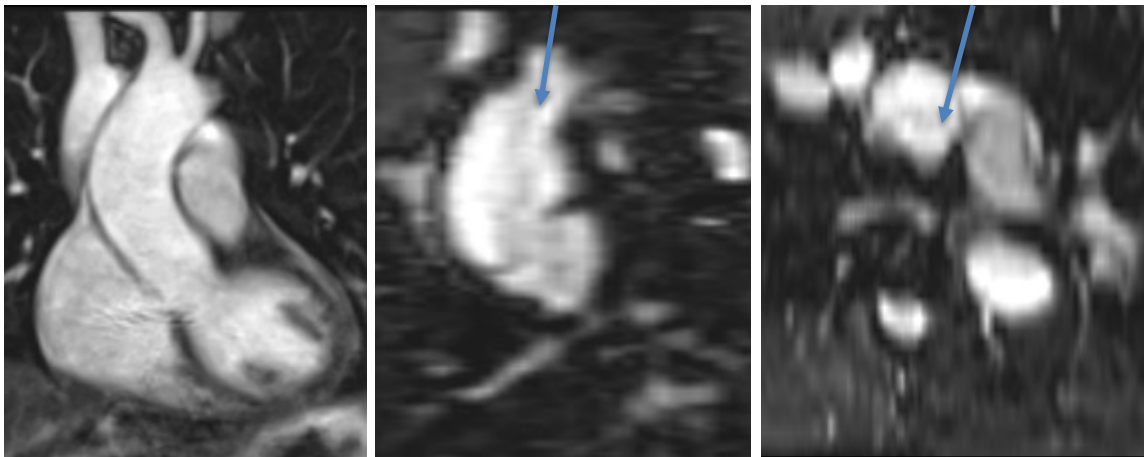


Abbildung 13: MPR-Rekonst., SPACE-MRA, vor Abgang der Supraaortalen, Prob. 1  
links: cor. E., mittig: schräg-sag. E., rechts: schräg-tra. E.

Inhomogenitäten (Pfeile), die bei Vorliegen einer Pathologie die Befundung erschweren würden, Qualität der SPACE-Aufnahme ist in der coronalen Ebene besser als in der schräg-sagittalen und schräg-transversalen Ebene

Anhand dieser Aufnahmen könnte man eine Dissektion (Pfeil) vermuten, in anderen Bildgebungen kann diese aber nicht nachgewiesen werden

Durchmesservergleich:

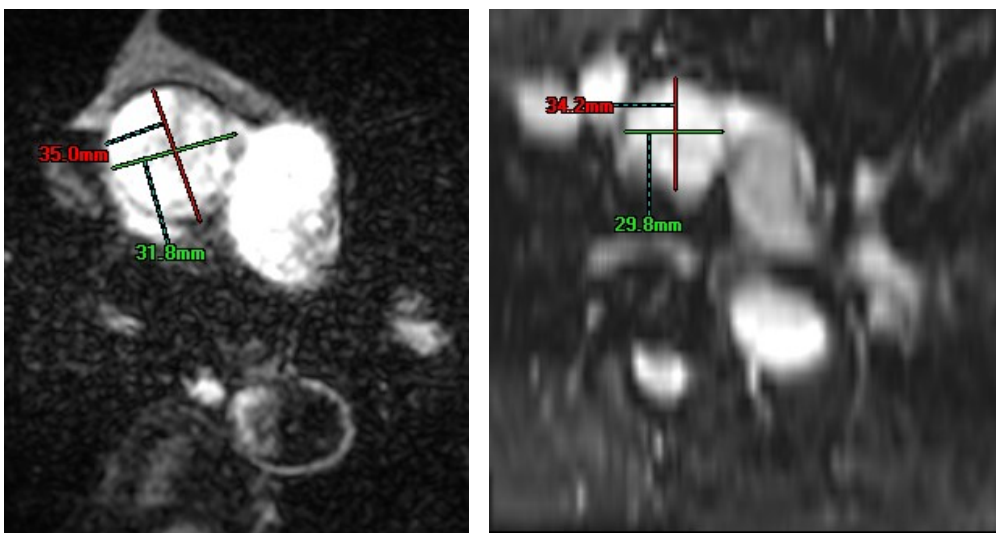


Abbildung 14: Durchmesser Aorta asc. vor Abgang der Supraaortalen, QISS-MRA (l.) und SPACE-MRA (r.) (MPR-Rekonst.: transversal), Prob. 1

links: QISS-MRA 3,5 x 3,2cm, rechts: SPACE-MRA 3,4 x 3,0cm

Starke Messvariabilität in der SPACE-MRA-Aufnahme, da schlechtere Qualität und damit schlechtere Abgrenzbarkeit der Aortenwand, Messergebnisse in beiden Sequenzen dennoch ähnlich

Die nächste Vergleichsebene, die allerdings bei PatientInnen-Bildgebungen eine wesentlich wichtigere Rolle spielt, ist die Ebene, in der die supraaortalen Gefäße beurteilt werden können. Dabei spielt hauptsächlich die Transversalebene eine Rolle.

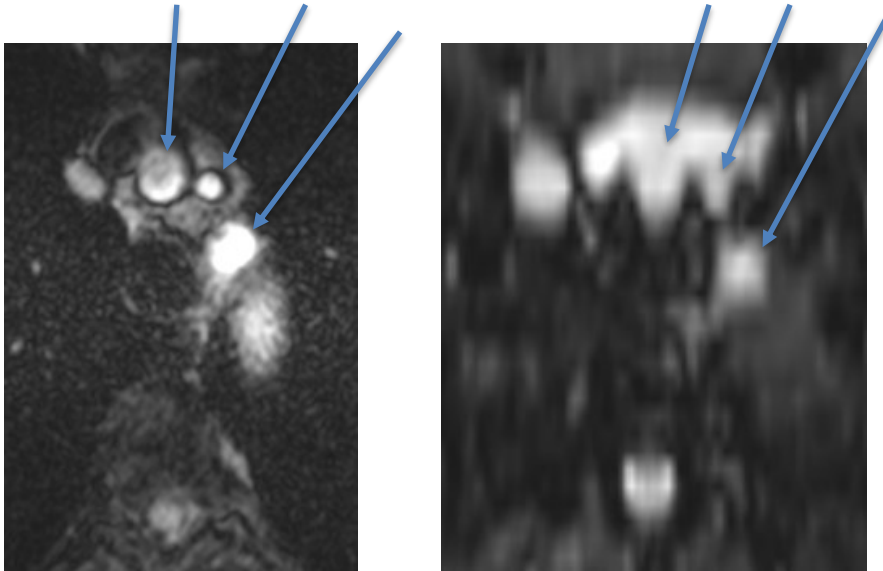


Abbildung 15: supraaortale Gefäße in der Transversalebene (MPR-Rekonst.), QISS-MRA (l.) und SPACE-MRA (r.), Prob. 1

Truncus brachiocephalicus (linker Pfeil), Arteria carotis sinistra (mittlerer Pfeil) und Arteria subclavia sinistra (rechter Pfeil) sind in den QISS-Aufnahmen schäfer abgegrenzt als in denen der SPACE-MRA

Inhomogenitäten, die fälschlicherweise in den QISS-Aufnahmen zu sehen sind, würden eine Befundung bei Vorliegen einer Pathologie entsprechend erschweren

„Nach Abgang der Supraaortalen“:

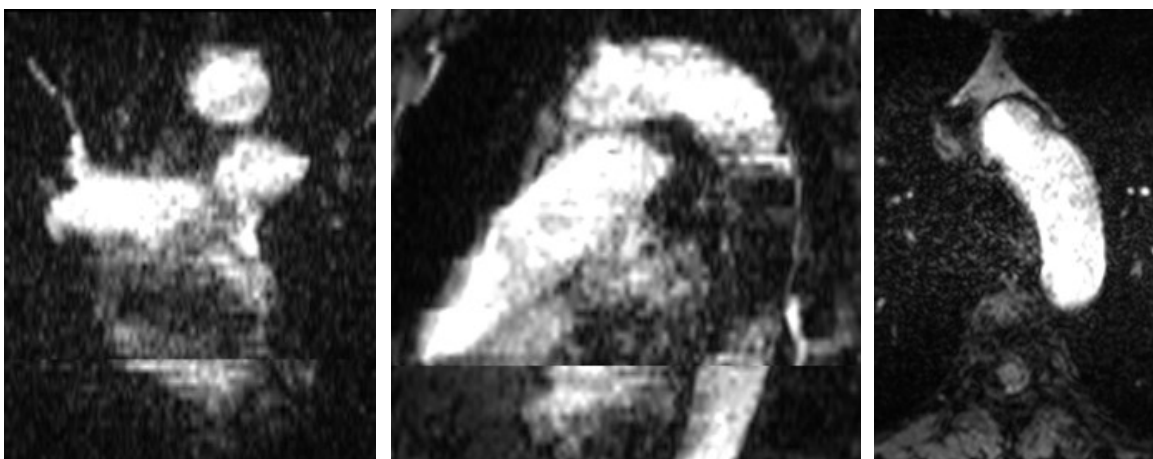


Abbildung 16: MPR-Rekonst., QISS-MRA, nach Abgang der Supraaortalen, Prob. 1  
links: cor. E., mittig: sag. E., rechts: tra. E.

Erneute Darstellung der Inhomogenitäten-Problematik, in der sagittalen Ebene ist weiter distal auch eine komplette Signalauslöschung sichtbar

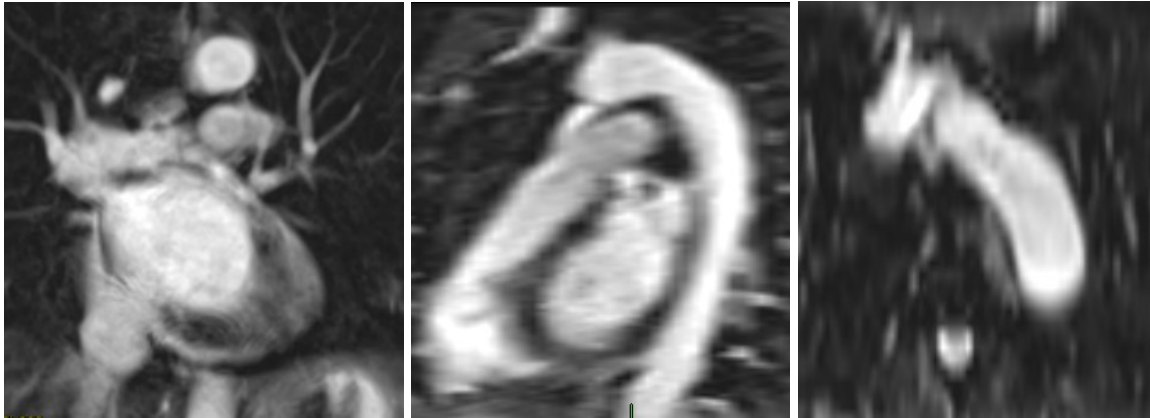


Abbildung 17: MPR-Rekonst., SPACE-MRA, nach Abgang der Supraaort., Prob. 1  
 links: cor. E., mittig: sag. E., rechts: tra. E.  
 Weder Inhomogenitäten noch Signalauslöschungen in den Aufnahmen der SPACE-MRA,  
 sodass in dieser Ebene die Beurteilung per SPACE-Bildgebung geeigneter wäre

Durchmesservergleich:

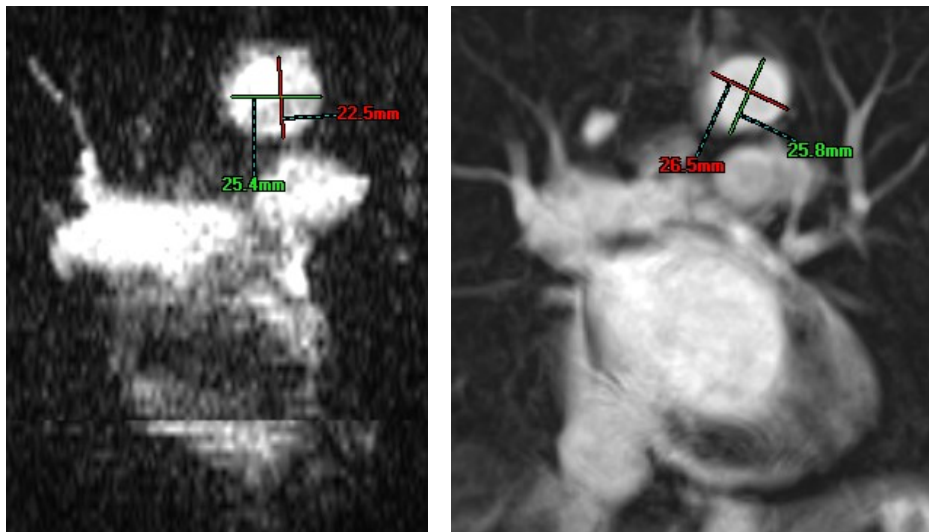


Abbildung 18: Durchmesser Arcus aortae, nach Abgang der Supraaortalen, QISS-MRA (l.)  
 und SPACE-MRA (r.) (MPR-Rekonst.: coronal), Prob. 1  
 links: QISS-MRA 2,5 x 2,3cm, rechts SPACE-MRA 2,7 x 2,6cm  
 In beiden Aufnahmen sind die Aortenwände gut abgrenzbar, sodass eine  
 Durchmesser messung gut und genau möglich ist, dennoch sind die beiden Messwerte  
 voneinander abweichend

„Größte Durchmesser der Aorta descendens“:

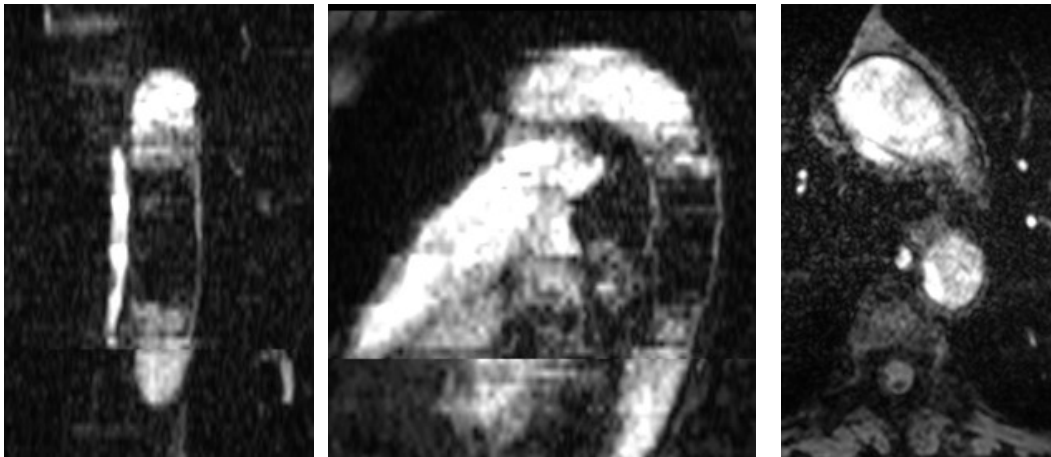


Abbildung 19: MPR-Rekonst., QISS-MRA, Aorta descendens, Prob. 1

links: cor. E., mittig: sag. E., rechts: tra. E.

Problem der Signalauslöschungen bei der QISS-Sequenz sehr deutlich erkennbar, erschwert vor allem auch die Festlegung der Ebene, in der die Aorta descendens den größten Durchmesser hat

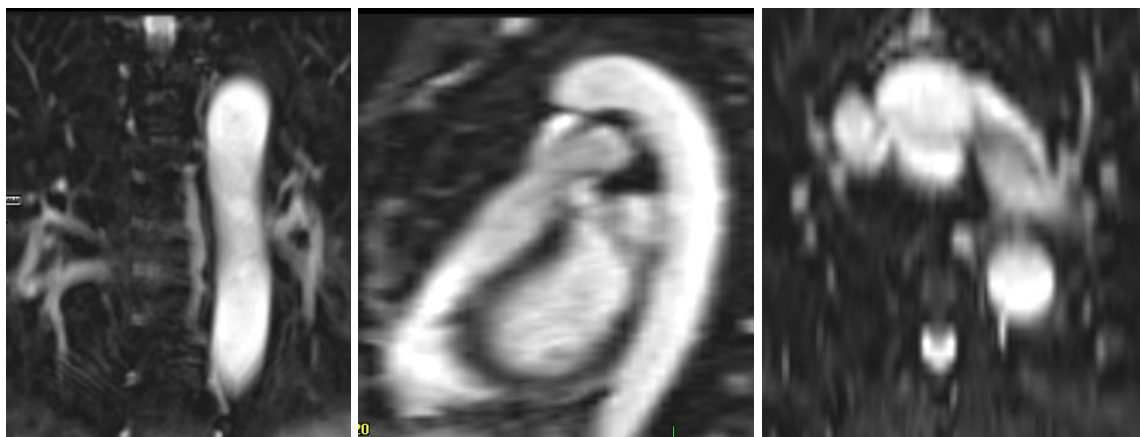


Abbildung 20: MPR-Rekonst., SPACE-MRA, Aorta descendens, Prob. 1

links: cor. E., mittig: sag. E., rechts: tra. E.

Aufnahmen der SPACE-MRA in dieser Ebene frei von Inhomogenitäten und Signalauslöschungen, sodass Qualität und Beurteilbarkeit der Aufnahmen uneingeschränkt bleiben

Durchmesservergleich:

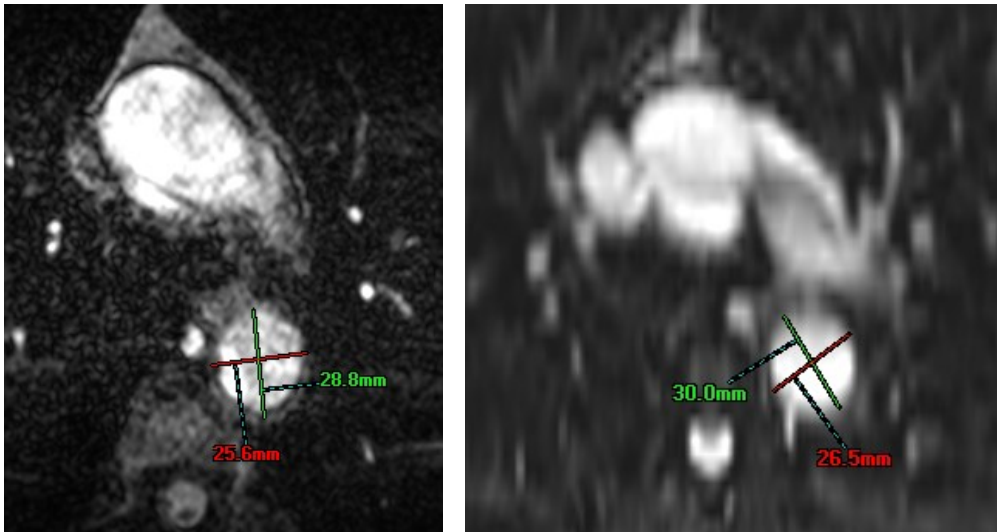


Abbildung 21: Durchmesser Aorta desc., QISS-MRA (l.) und SPACE-MRA (r.) (MPR-Rekonst.: transversal), Prob. 1

links: QISS-MRA 2,9 x 2,6cm, rechts: SPACE-MRA 3,0 x 2,7cm

Wenig voneinander abweichende Messergebnisse des Durchmessers, da gute Abgrenzbarkeit der Aortenwand in beiden MRA-Aufnahmen

„Thorakoabdominaler Übergang“:

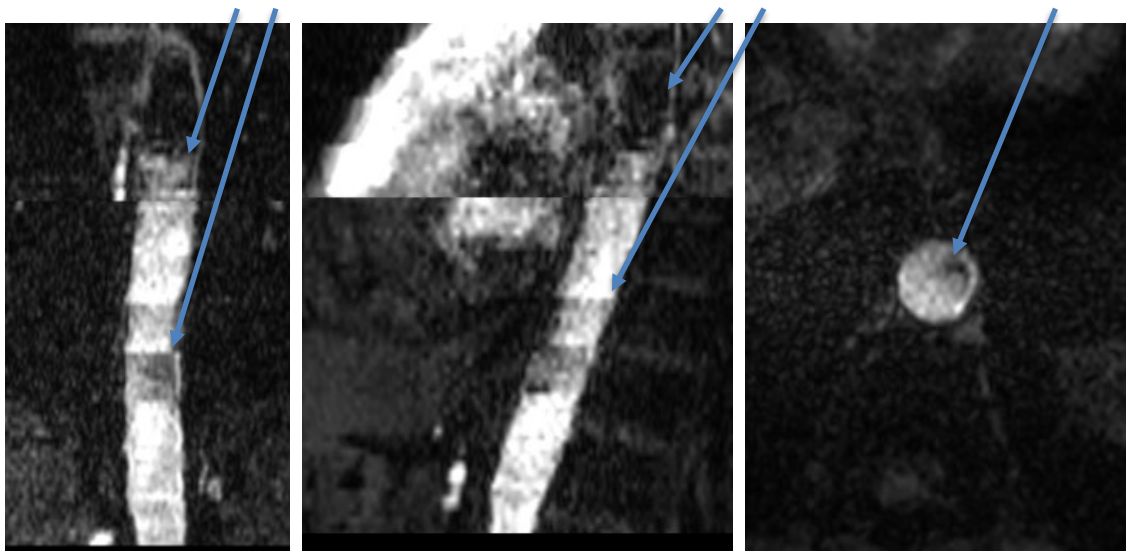


Abbildung 22: MPR-Rekonst., QISS-MRA, Thorakoabdominaler Übergang, Prob. 1

links: schräg-cor. E., mittig: sag. E., rechts: schräg-tra. E.

Inhomogenitäten und Signalauslöschung als Grundproblem der QISS-Sequenz erkennbar

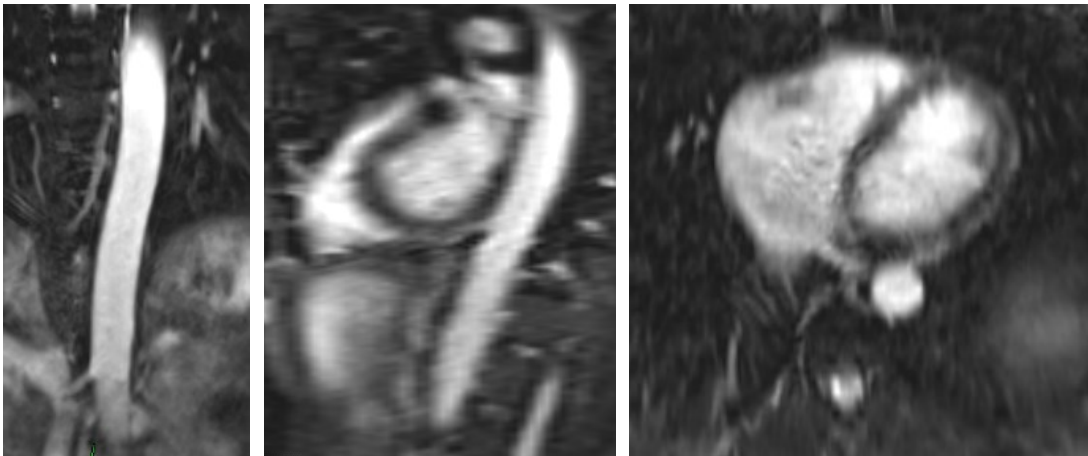


Abbildung 23: MPR-Rekonst., SPACE-MRA, Thorakoabdominaler Übergang, Prob. 1  
 links: schräg-cor. E., mittig: sag. E., rechts: schräg-tra. E.  
 Gut beurteilbare SPACE-Sequenz-Aufnahme im Vergleich zu der der QISS-Sequenz

Durchmesservergleich:

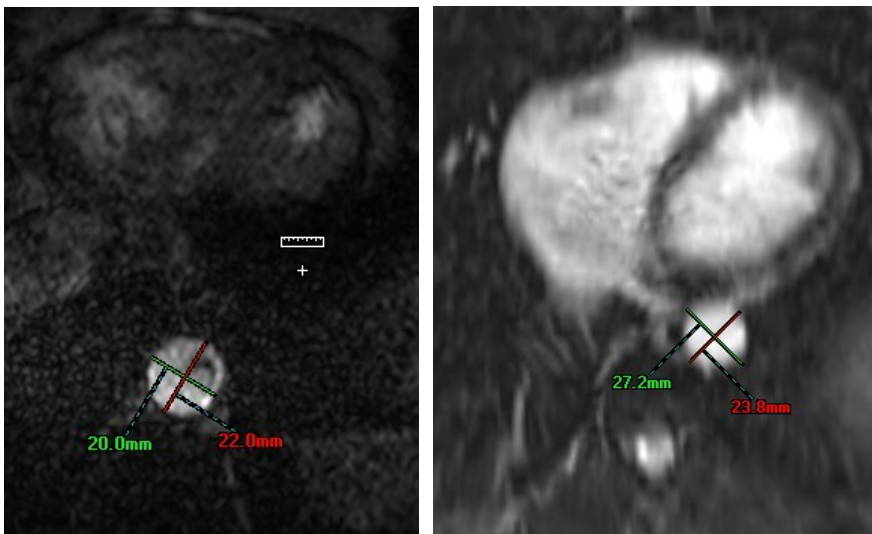


Abbildung 24: Durchmesser Aorta desc., thorakoabdominaler Übergang, QISS-MRA (l.)  
 und SPACE-MRA (r.) (MPR-Rekonst.: transversal), Prob. 1  
 links: QISS-MRA 2,2 x 2,0cm, rechts: SPACE-MRA 2,7 x 2,4cm  
 Trotz Inhomogenität in der QISS-Sequenz Aortenwand dort schärfer abgegrenzt als in der  
 SPACE-Aufnahme, somit weniger Messvariabilität bei der Durchmessermessung in der  
 QISS-MRA als in der SPACE-MRA

„Distales Ende der Aorta descendens“:

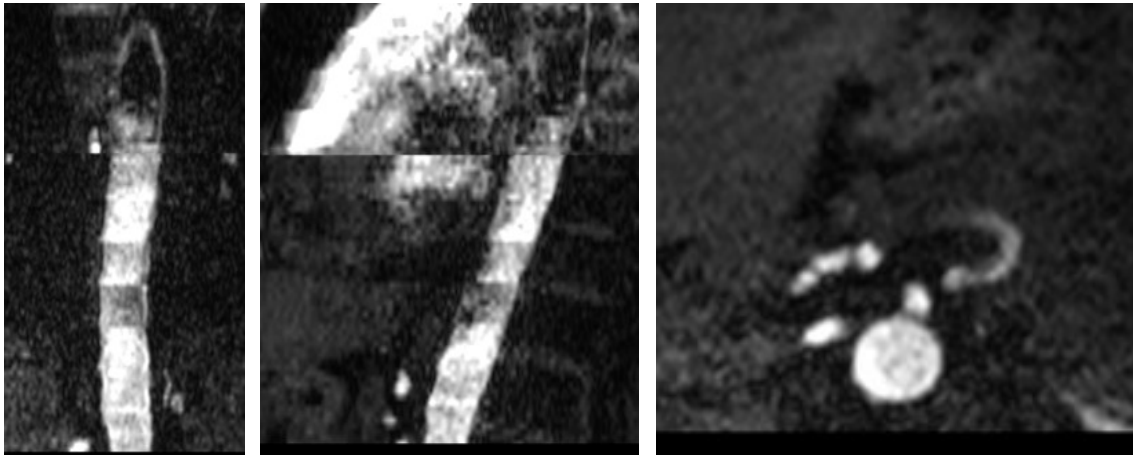


Abbildung 25: MPR-Rekonst., QISS-MRA, distale Aorta desc., Prob. 1

links: schräg-cor. E., mittig: sag. E., rechts: schräg-tra. E.

Beurteilung in dieser Messebene besser möglich, da keine Signalauslöschung oder stark ausgeprägte Inhomogenität vorliegend

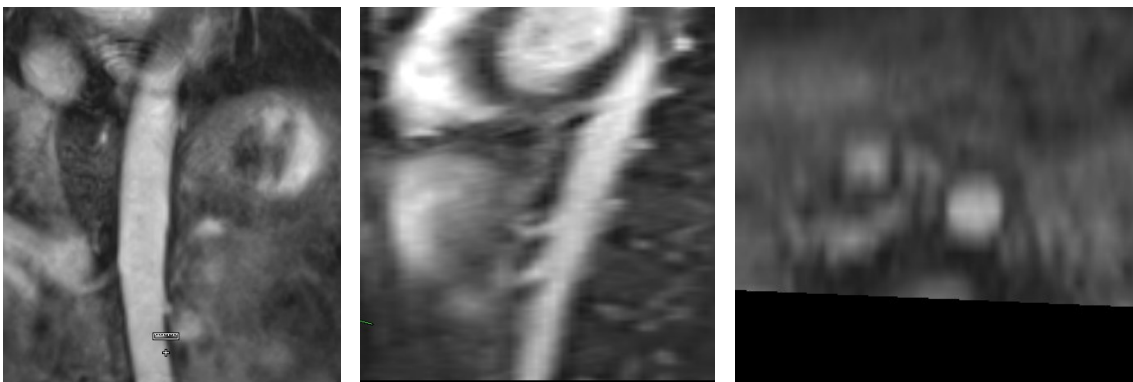


Abbildung 26: MPR-Rekonst., SPACE-MRA, distale Aorta desc., Prob. 1

links: schräg-cor. E., mittig: sag. E., rechts: schräg-tra. E.

Die SPACE-Aufnahme wurde weiter nach distal fortgeführt als die QISS-Aufnahme, somit wurde diese Messebene distaler gewählt als die Messebene der QISS-Sequenz  
Vergleichbarkeit der Ergebnisse und auch der Durchmesser daher eingeschränkt

Durchmesservergleich:

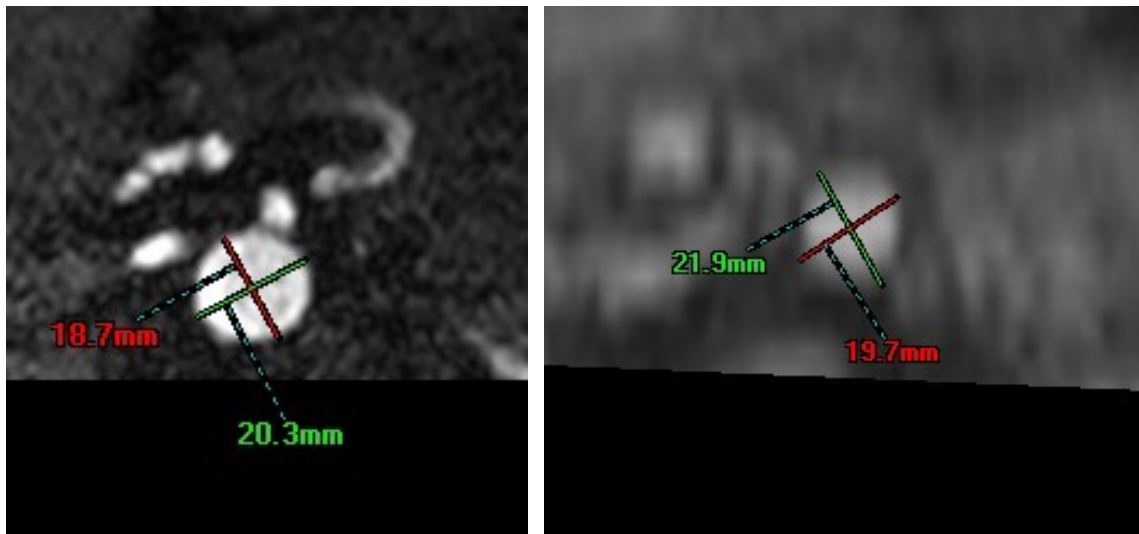


Abbildung 27: Durchmesser distale Aorta desc., QISS-MRA (l.) und SPACE-MRA (r.) (MPR-Rekonst.: transversal), Prob. 1

links: QISS-MRA 2,0 x 1,9cm, rechts: SPACE-MRA 2,2 x 2,0cm

Aortenwand in QISS-Aufnahme besser abgrenzbar zur Umgebung, da weniger Messvariabilität in dieser Messung

Messwerte aus der SPACE-MRA größer trotz distaler liegender Messebene

Auch für die zweite Probandin beginnt die Gegenüberstellung der QISS- und SPACE-Sequenz mit den 3D-Rekonstruktionen:



Abbildung 28: MIP-3D-Rekonst. der QISS-MRA-Bildgebung (sagittale Ansicht), Prob. 2  
Vergleichbar mit den QISS-3D-Rekonstruktionen der Prob. 1, Stufenbildungen und Signalauslöschungen (Pfeile), vor allem in der Aorta descendens



Abbildung 29: MIP-3D-Rekonstruktion des SPACE-Sequenz (schräg sagittal-coronale Ansicht), Prob. 2  
Keine Inhomogenitäten, Signalauslöschungen und Stufenbildungen, die die Befundung erschweren könnten

„Größter Durchmesser der Aorta ascendens“:

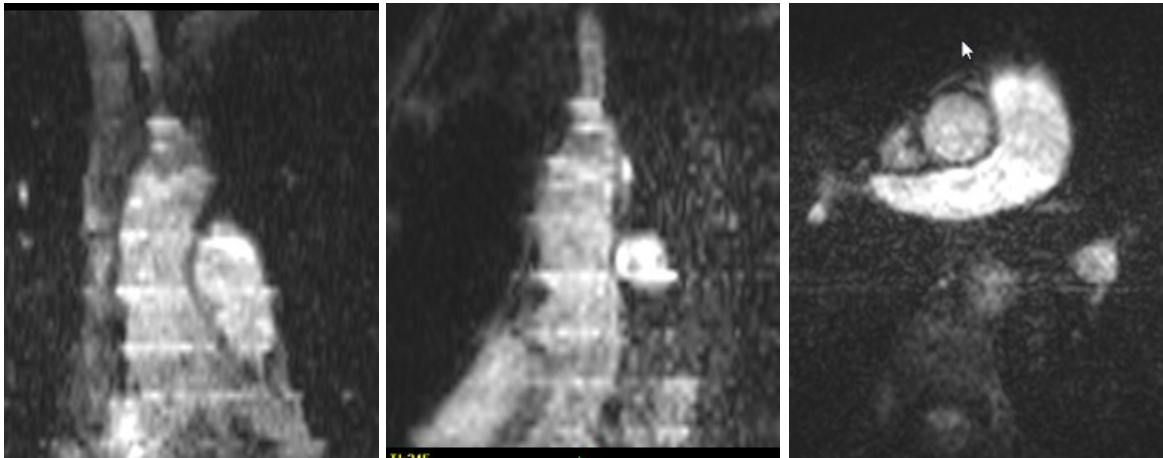


Abbildung 30: MPR-Rekonst. QISS-MRA, Aorta asc., Prob. 2

links: cor. E., mittig: sag. E., rechts: tra. E.

Aufnahmen mit Stufenbildungen und Inhomogenitäten, somit Qualitätsminderung und eingeschränkte Beurteilbarkeit

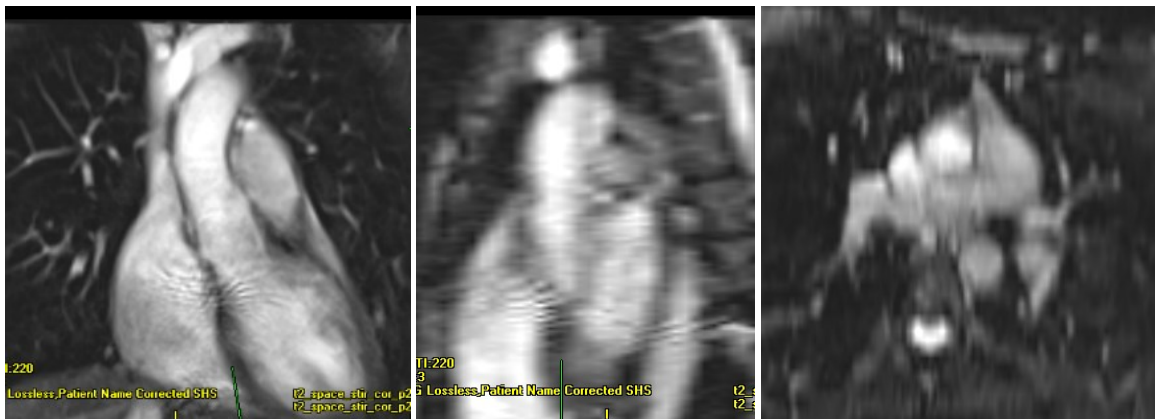


Abbildung 31: MPR-Rekonst. SPACE-MRA, Aorta asc., Prob. 2

links: cor. E., mittig: sag. E., rechts: tra. E.

SPACE-Aufnahmen bringen die gleiche Erkenntnis wie bei Prob. 1, Abnahme der Bildqualität von coronaler Ansicht zu sagittaler und transversaler Ansicht, dadurch ist vor allem die Aortenwand schlechter abgrenzbar als bei der QISS-Sequenz

Qualitative Beurteilung des Lumens ist durch das Fehlen von Inhomogenitäten oder Signalauslöschungen aber deutlich besser möglich

Durchmesservergleich:

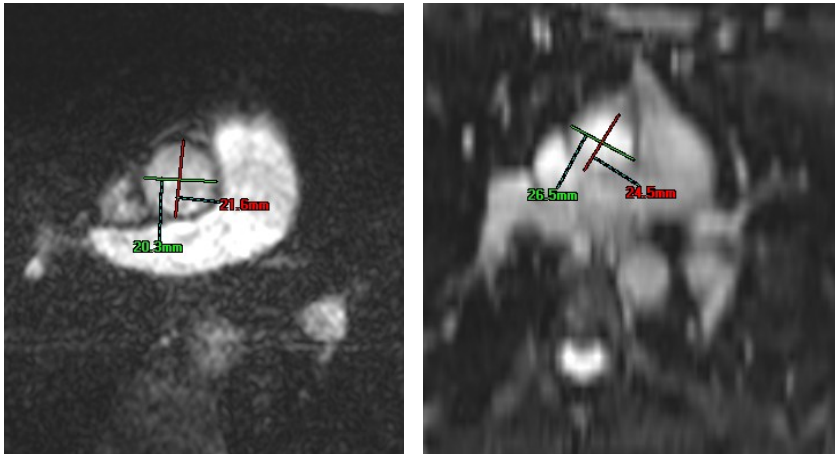


Abbildung 32: Durchmesser Aorta asc., QISS-MRA (l.) und SPACE-MRA (r.) (MPR-Rekonst.: transversal), Prob. 2

links: QISS-MRA 2,2 x 2,0cm, rechts: SPACE-MRA 2,7 x 2,5cm

Aortenwand in der QISS-Aufnahme besser abgrenzbar, deshalb geringere Variabilität der Messergebnisse in der QISS-Aufnahme

„Vor dem Abgang der Supraaortalen“:

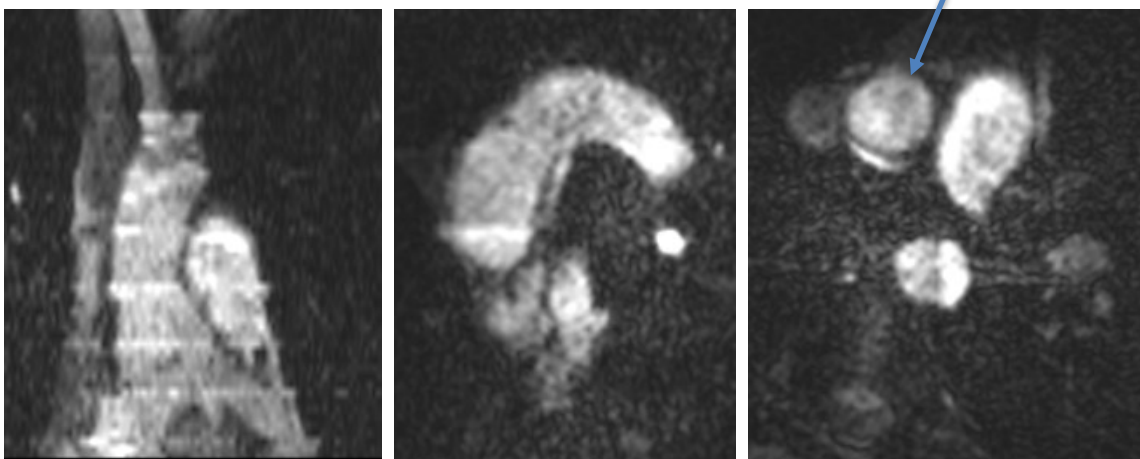


Abbildung 33: MPR-Rekonst., QISS-MRA, vor Abgang der Supraaortalen, Prob. 2

links: cor. E., mittig: schräg-sag. E., rechts: schräg-tra. E.

Stark ausgeprägte Inhomogenität in der Transversalebene (Pfeil), sodass ohne andere Aufnahmen ein Ausschluss einer Pathologie unmöglich wäre, bei bekannter Pathologie wäre die Beurteilung ebenfalls erschwert

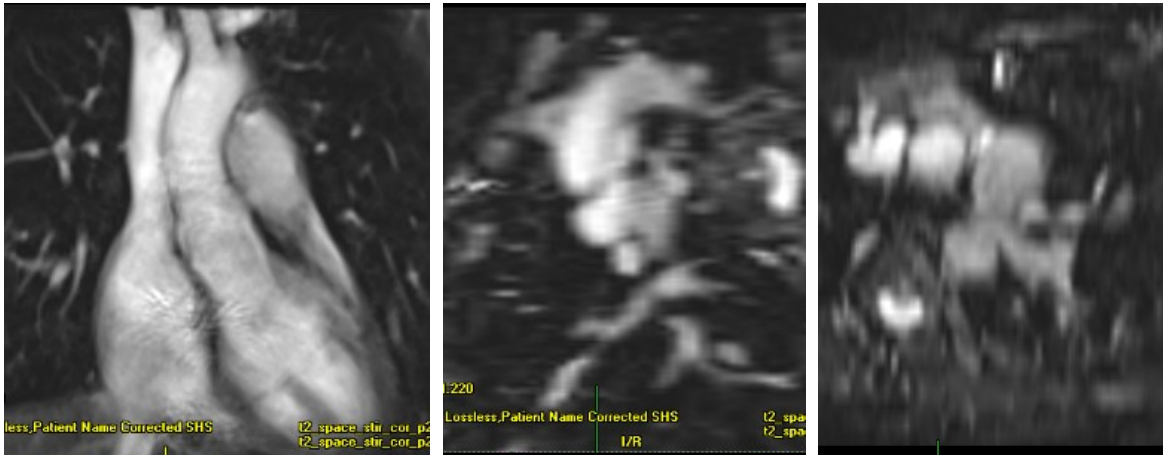


Abbildung 34: MPR-Rekonst., SPACE-MRA, vor Abgang der Supraaortalen, Prob. 2  
links: cor. E., mittig: schräg-sag. E., rechts: schräg-tra. E.

In der Transversalebene der SPACE-Aufnahme ist ebenfalls eine Inhomogenität, die die Beurteilbarkeit einschränkt

Durchmesservergleich:

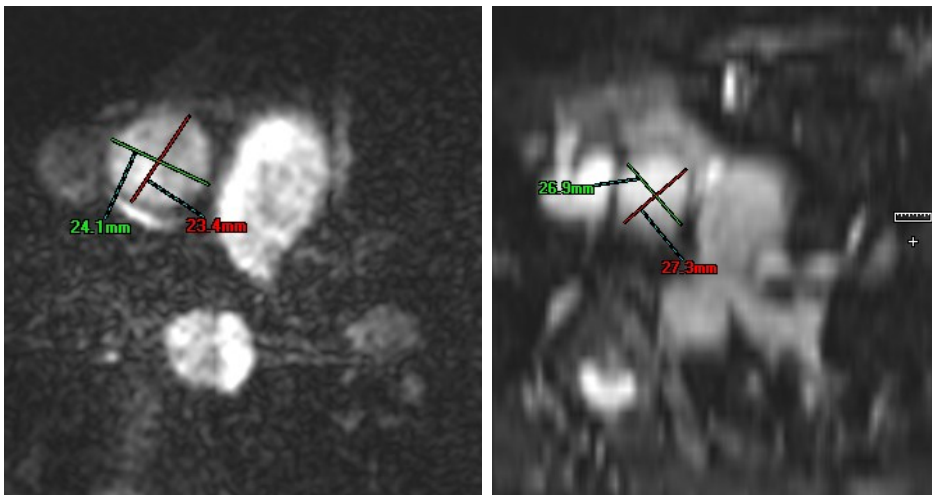


Abbildung 35: Durchmesser Aorta asc. vor Abgang der Supraaortalen, QISS-MRA (l.) und SPACE-MRA (r.) (MPR-Rekonst.: transversal), Prob. 2

links: QISS-MRA 2,4 x 2,3cm, rechts: SPACE-MRA: 2,7 x 2,7cm

Inhomogenitäten in den QISS-Aufnahmen führen zu schlecht abgrenzbarer Aortenwand, auch in der SPACE-Aufnahme ist sie schlecht abgrenzbar, da die Qualität in der Transversalebene schlechter ist als in der Coronalebene

„Supraaortale“:

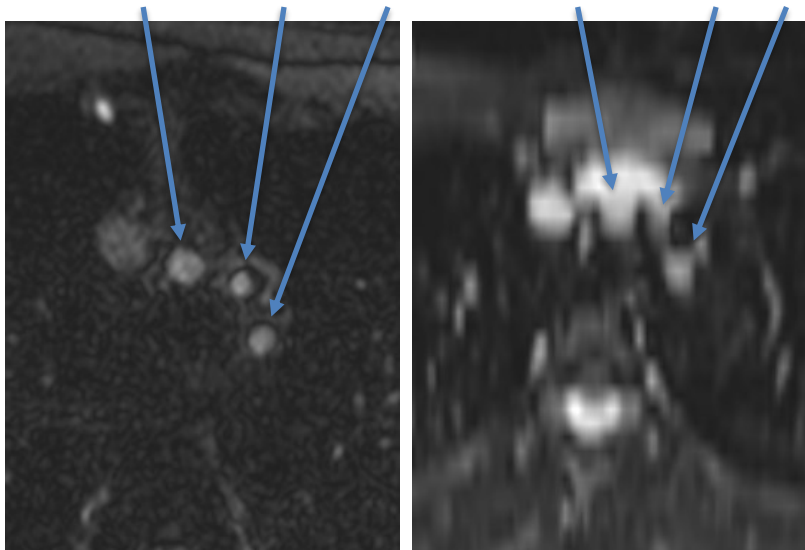


Abbildung 36: supraaortale Gefäße in der Transversalebene (MPR-Rekonst.), QISS-MRA (l.) und SPACE-MRA (r.), Prob. 2

Truncus brachiocephalicus (l. Pfeil), die Arteria carotis sinistra (m. Pfeil) und Arteria subclavia sinistra (r. Pfeil) in QISS-Bildgebung besser abgrenzbar als in der SPACE-Sequenz, vor allem die A. carotis sinistra

"Nach Abgang der Supraaortalen“:

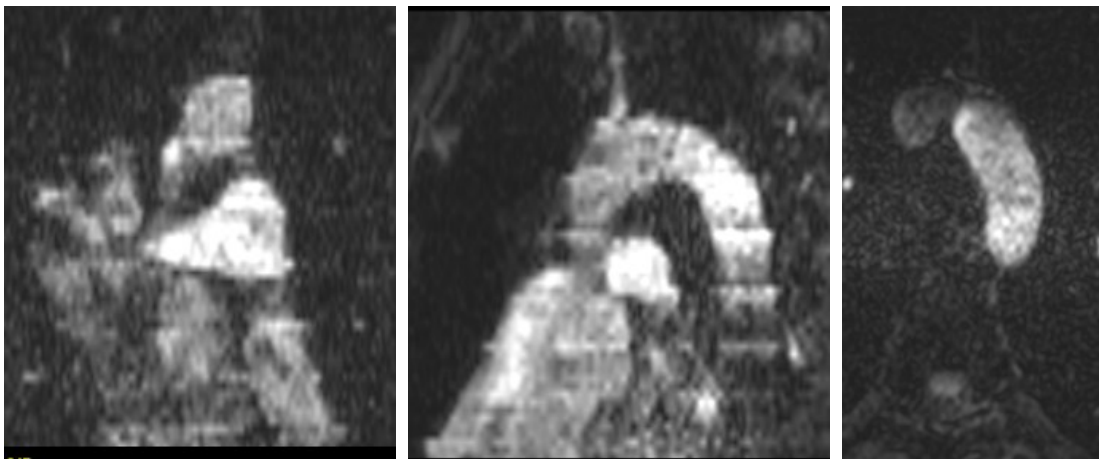


Abbildung 37: MPR-Rekonst., QISS-MRA, nach Abgang der Supraaortalen, Prob. 2  
links: cor. E., mittig: sag. E., rechts: tra. E.

Abgrenzung und Beurteilung des Aortenbogens durch Stufenbildung und Inhomogenitäten erschwert

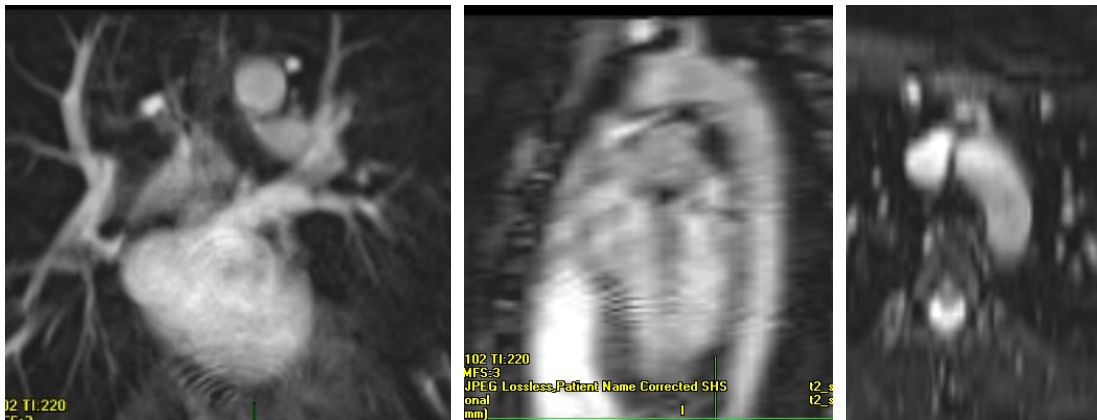


Abbildung 38: MPR-Rekonst., SPACE-MRA, nach Abgang der Supraaortalen, Prob. 2  
 links: cor. E., mittig: sag. E., rechts: tra. E.  
 Beurteilung der Aorta und Abgrenzbarkeit zu umliegenden Strukturen sehr gut möglich

Durchmesservergleich:

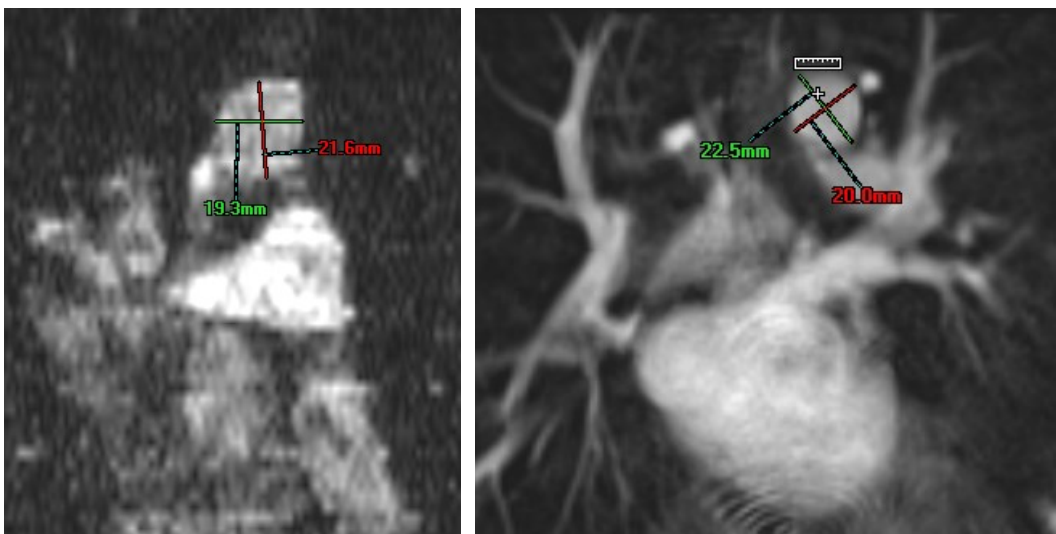


Abbildung 39: Durchmesser Arcus aortae, nach Abgang der Supraaortalen, QISS-MRA (l.)  
 und SPACE-MRA (r.) (MPR-Rekonst.: coronal), Prob. 2  
 links: QISS-MRA 2,2 x 1,9cm, rechts: SPACE-MRA 2,3 x 2,0cm  
 Messwerte aus beiden Aufnahmen wenig voneinander abweichend, da Aortenwände jeweils  
 gut und scharf abgrenzbar

„Größter Durchmesser der Aorta descendens“:

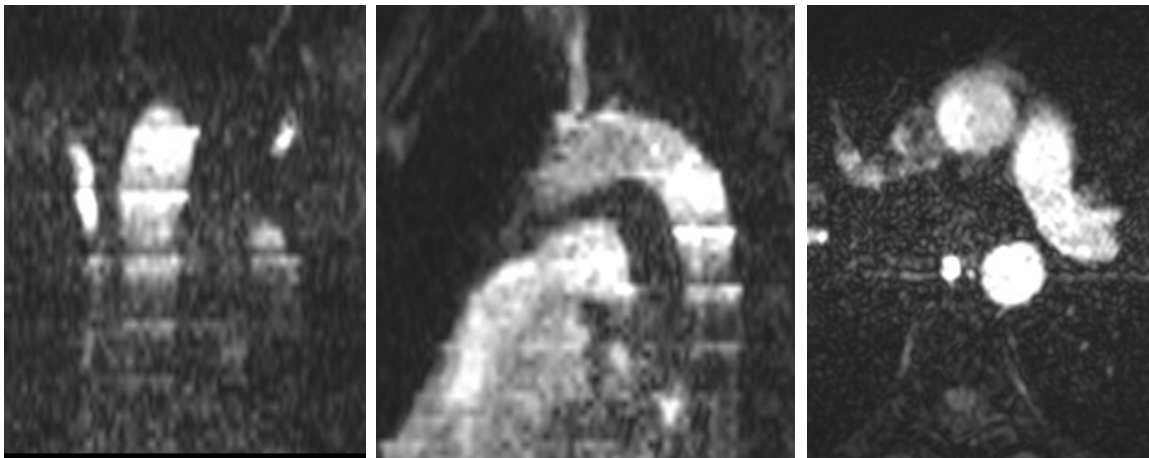


Abbildung 40: MPR-Rekonst., QISS-MRA, Aorta descendens, Prob. 2

links: cor. E., mittig: sag. E., rechts: tra. E.

Aorta descendens in Transversalebene gut abgrenzbar und frei von Inhomogenitäten  
Distal davon aber beginnt die Signalauslöschung, sodass verlässliche Bestimmung des  
größten Durchmessers der Aorta descendens nicht möglich war

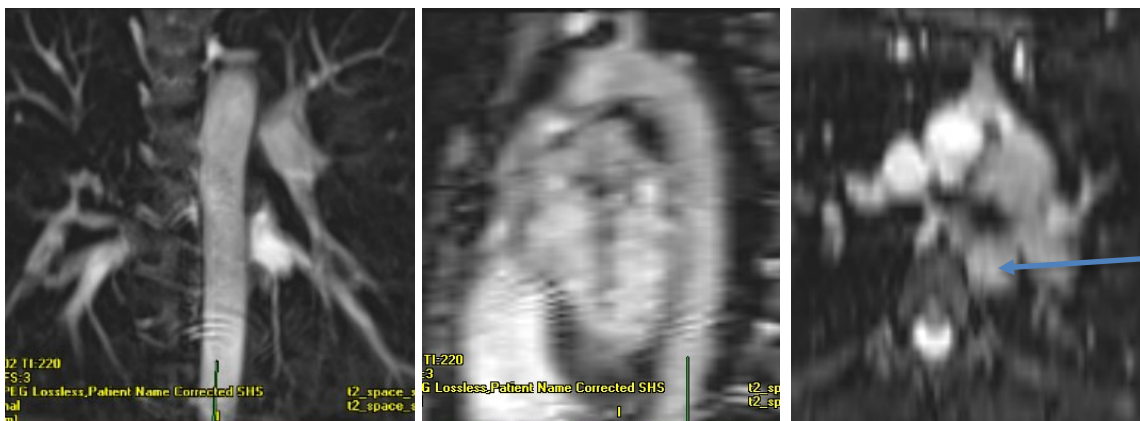


Abbildung 41: MPR-Rekonst., SPACE-MRA, Aorta descendens, Prob. 2

links: cor. E., mittig: sag. E., rechts: tra. E.

Aorta descendens in dieser SPACE-Aufnahme schlecht beurteilbar, da durch ein Artefakt  
eine Dissektionsmembran-ähnliche Struktur (Pfeil) im Lumen zu sehen ist, die sich bei den  
anderen Sequenzen nicht bestätigt

Durchmesservergleich:

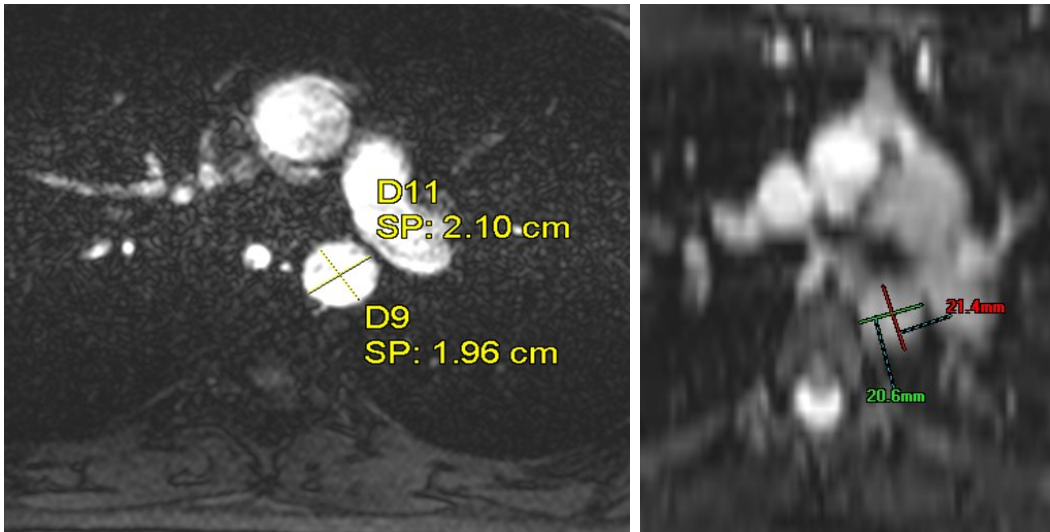


Abbildung 42: Durchmesser Aorta desc., QISS-MRA (l.) und SPACE-MRA (r.) (MPR-Rekonst.: transversal), Prob. 2

links: QISS-MRA: 2,1cm x 2,0cm, rechts: SPACE-MRA 2,1cm x 2,1cm

Gering voneinander abweichende Messwerte für den Durchmesser der Aorta descendens, aber Aortenwand deutlich unschärfer abgegrenzt in der SPACE-Aufnahme

„Thorakoabdominaler Übergang“:

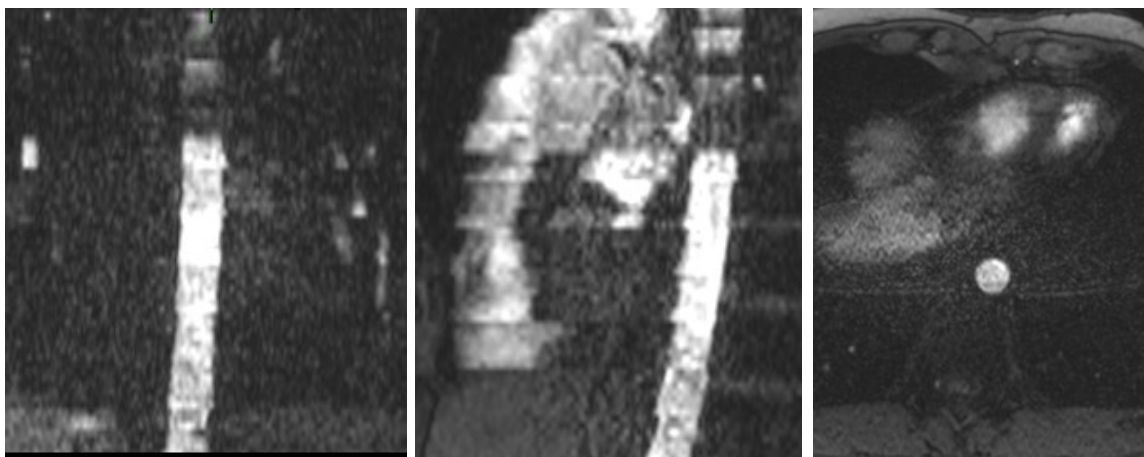


Abbildung 43: MPR-Rekonst., QISS-MRA, Thorakoabdominaler Übergang, Prob. 2

links: cor. E., mittig: sag. E., rechts: tra. E.

Qualität der Aufnahme durch Inhomogenitäten und Stufenbildungen eingeschränkt, Signalauslöschungen sind nicht vorzufinden

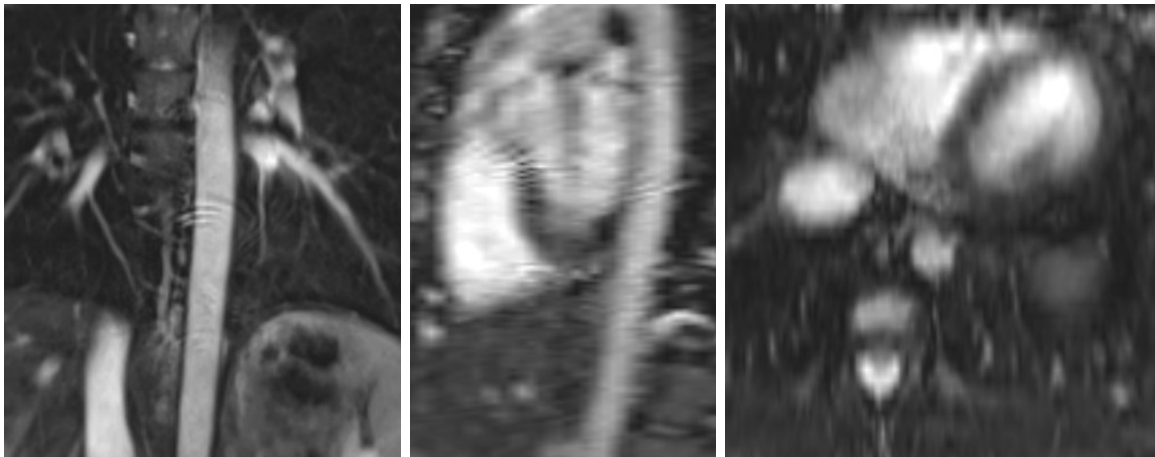


Abbildung 44: MPR-Rekonst., SPACE-MRA, Thorakoabdominaler Übergang, Prob. 2  
links: cor. E., mittig: sag. E., rechts: tra. E.

Qualität der SPACE-Aufnahme in der Transversalebene durch Inhomogenitäten eingeschränkt

Durchmesservergleich:

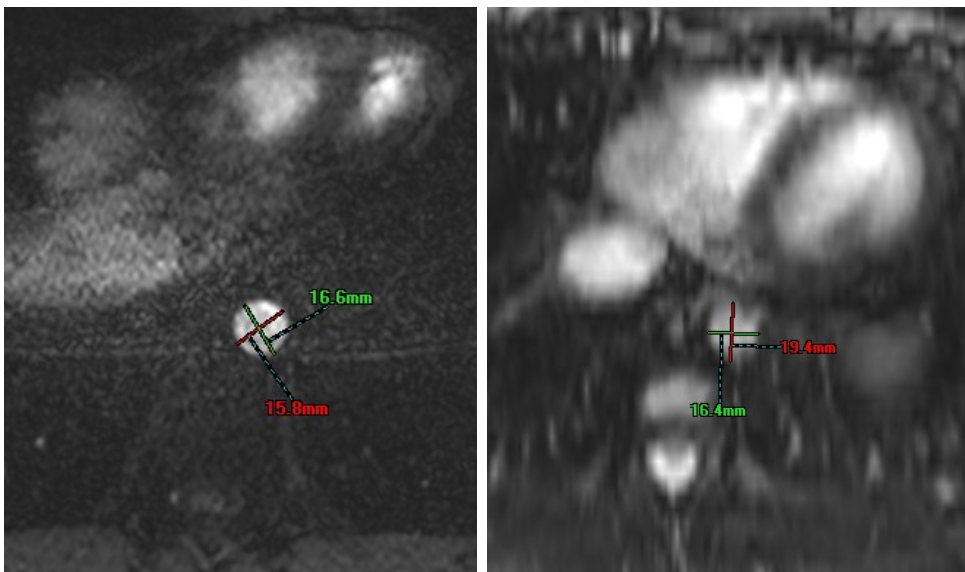


Abbildung 45: Durchmesser Aorta desc., thorakoabdominaler Übergang, QISS-MRA (l.) und SPACE-MRA (r.) (MPR-Rekonst.: transversal), Prob. 2

links: QISS-MRA: 1,7 x 1,6cm, rechts: SPACE-MRA: 1,9 x 1,6cm

In SPACE-Aufnahme starke Messvariabilität bei der Durchmessermessung der Aorta descendens, da Aortenwand nicht gut abgrenzbar zu umliegenden Strukturen

Da die SPACE-Bildgebung weiter nach distal fortgeführt wurde, konnte für diese eine weitere Messebene festgelegt werden, allerdings ohne Vergleichsmöglichkeit zur QISS-Sequenz:



Abbildung 46: MPR-Rekonst., SPACE-MRA, distale Aorta desc., Prob. 2  
links: cor. E., mittig: sag. E., rechts: tra. E.

Abdominelle Aortenabgänge nur in coronaler Ebene gut beurteilbar, vor allem schwer abzugrenzende Aorta descendens in der Transversalebene

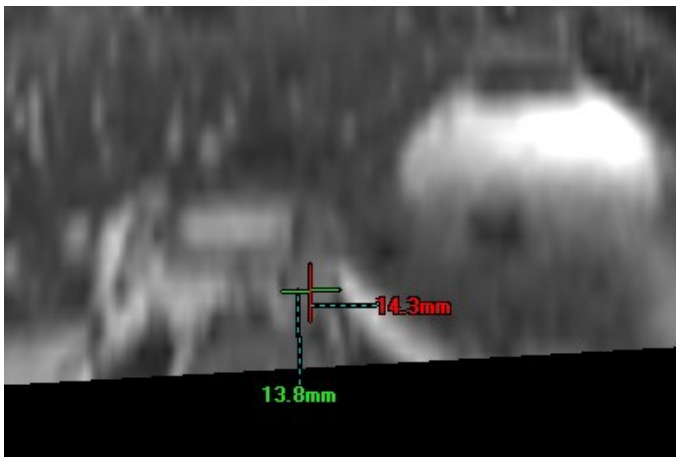


Abbildung 47: Durchmesser Aorta desc., distale Aorta desc., SPACE-MRA  
(MPR-Rekonst.: transversal), Prob. 2

SPACE-MRA: 1,4 x 1,4cm

Aorta schwer abgrenzbar in der Transversalebene, daher vermutlich hohe Messvariabilität

Auch für die dritte Probandin erfolgte eine Gegenüberstellung der Ergebnisse der QISS- und SPACE-MRA beginnend mit den 3D-Rekonstruktionen.

„3D-Rekonstruktion“:

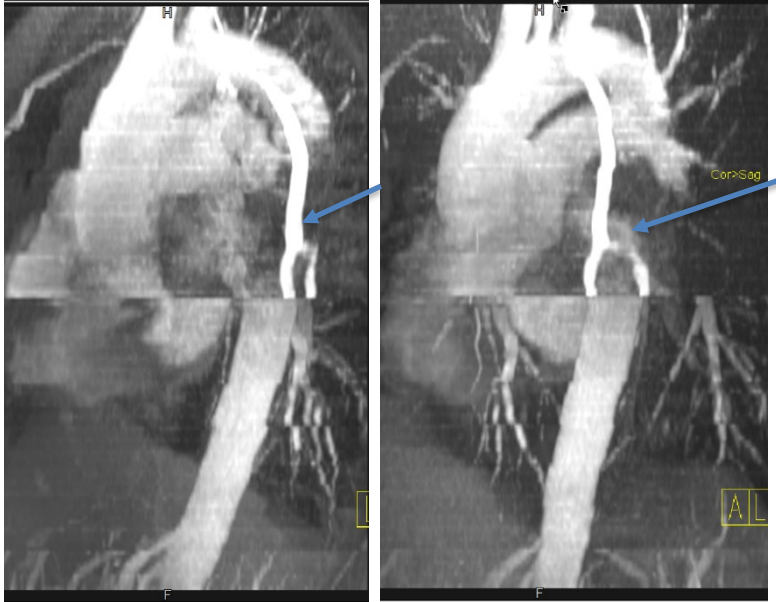


Abbildung 48: MIP-3D-Rekonst. der QISS-MRA-Bildgebung (sagittale und schräg coronal-sagittale Ansicht), Prob. 3

Komplette Signalauslöschung (Pfeil) in der thorakalen Aorta desc., im Vergleich zu der QISS-MIP-Rekonst. der Probandin 2 sehr schwach ausgeprägte Stufenbildung in distaler Aorta desc.

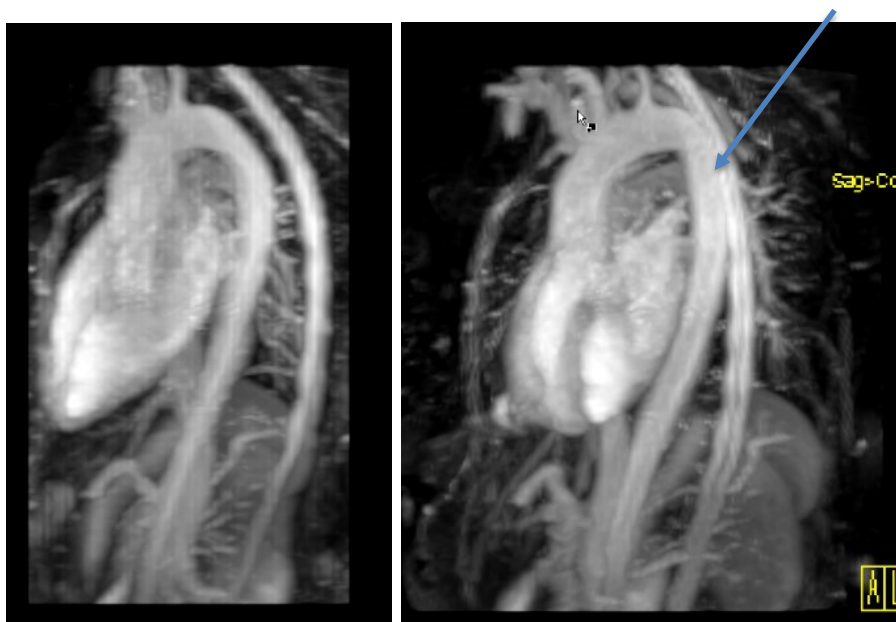


Abbildung 49: MIP-3D-Rekonst. der SPACE-MRA-Bildgebung (sagittale und schräg sagittal-coronale Ansicht), Prob. 3

Bei sagittal-coronaler Ansicht schlechtere Abgrenzbarkeit des Liquors von der Aorta desc. (Pfeil)

„Größter Durchmesser der Aorta ascendens“:

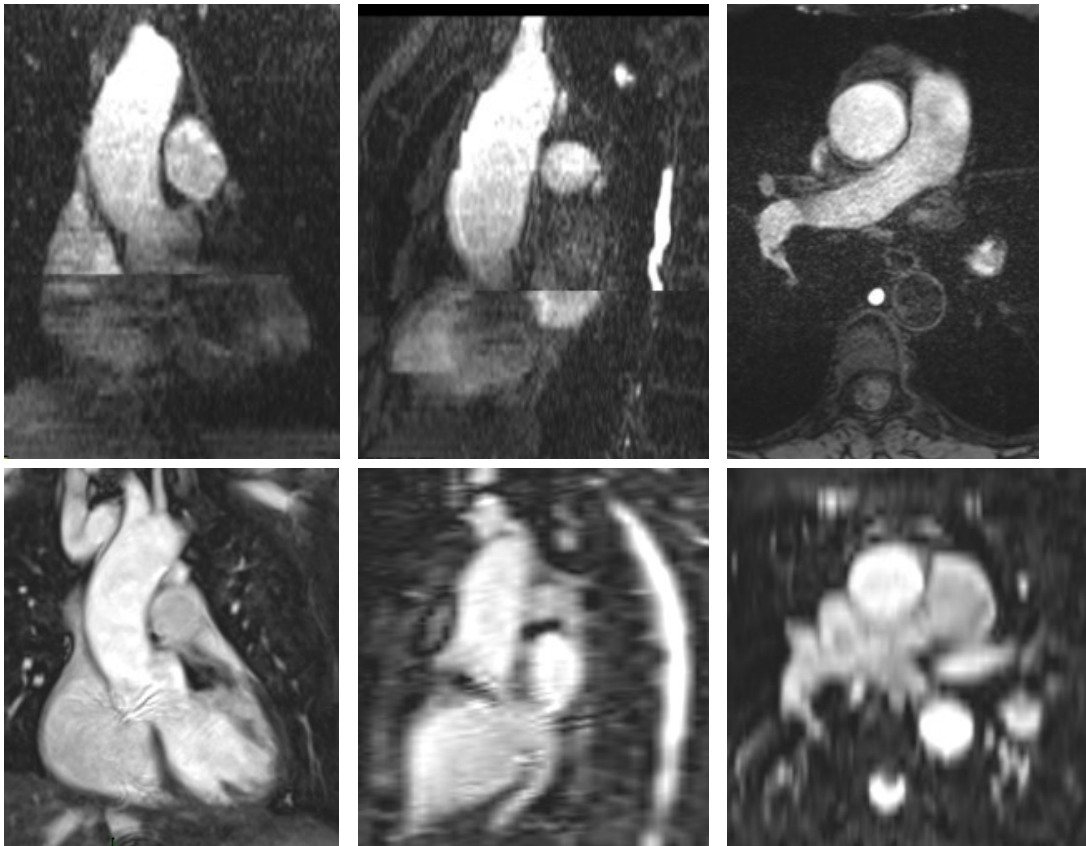


Abbildung 50: MPR-Rekonst. QISS-MRA (oben) und SPACE-MRA (unten), Aorta asc., Prob. 3

links: cor. E., mittig: sag. E., rechts: tra. E.

Alle Aufnahmen der beiden Sequenzen mit einer guten Qualität und Beurteilbarkeit, Qualitätsabfall von coronaler Ebene zu sagittaler und transversaler Ebene in den SPACE-Aufnahmen erneut deutlich

Durchmesservergleich:

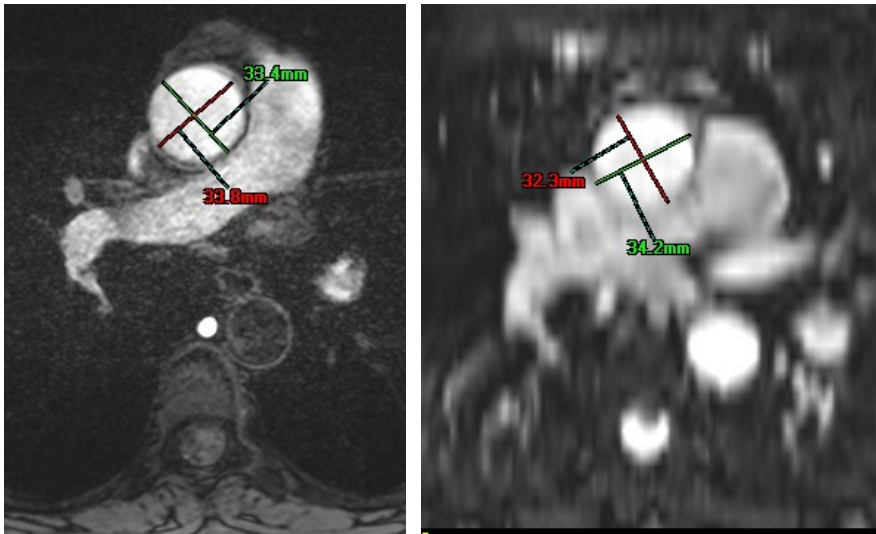


Abbildung 51: Durchmesser Aorta asc., QISS-MRA (l.) und SPACE-MRA (r.) (MPR-Rekonst.: transversal), Prob. 3

links: QISS-MRA 3,4 x 3,3cm, rechts: SPACE-MRA 3,4 x 3,2cm

Qualität und Abgrenzbarkeit der Aorta in beiden Transversalebene gut und vergleichbar, daher geringe Abweichung der Aortenmesswerte voneinander

„Vor dem Abgang der Supraaortalen“:

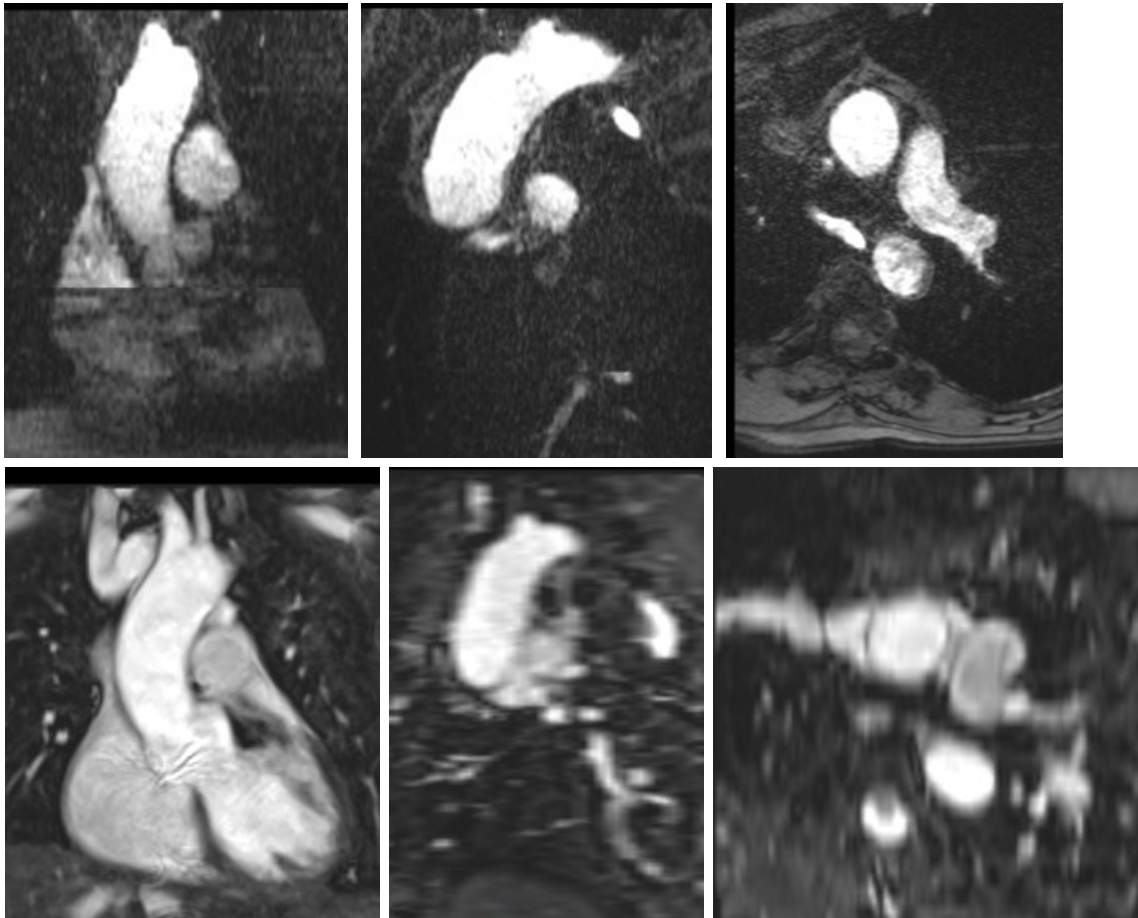


Abbildung 52: MPR-Rekonst., QISS-MRA (oben) und SPACE-MRA (unten), vor Abgang der Supraaortalen, Prob. 3

links: cor. E., mittig: schräg-sag. E., rechts: schräg-tra. E.

Wie in Abb. 49 Aufnahmen der beiden Sequenzen mit guter Qualität und Beurteilbarkeit, Qualitätsabfall zwischen den Aufnahmeebenen in der SPACE-Sequenz ohne große Auswirkungen, aber sichtbare Qualitätsänderung

Durchmesservergleich:

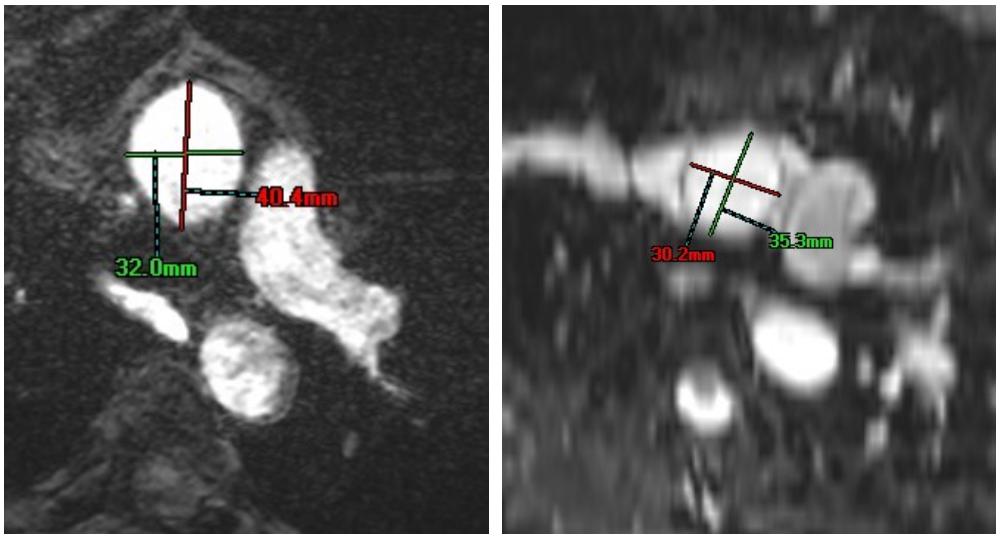


Abbildung 53: Durchmesser Aorta asc., vor Abgang der Supraaortalen, QISS-MRA (l.) und SPACE-MRA (r.) (MPR-Rekonst.: transversal), Prob. 3

links: QISS-MRA 4,0 x 3,2cm, rechts: SPACE-MRA 3,5 x 3,0cm

Deutlich schärfer abgegrenzte Aortenwand in der QISS-Aufnahme, somit geringere Messvariabilität der Durchmessermessung in der QISS-Sequenz als in der SPACE-Sequenz anzunehmen

„Supraaortale Gefäße“:

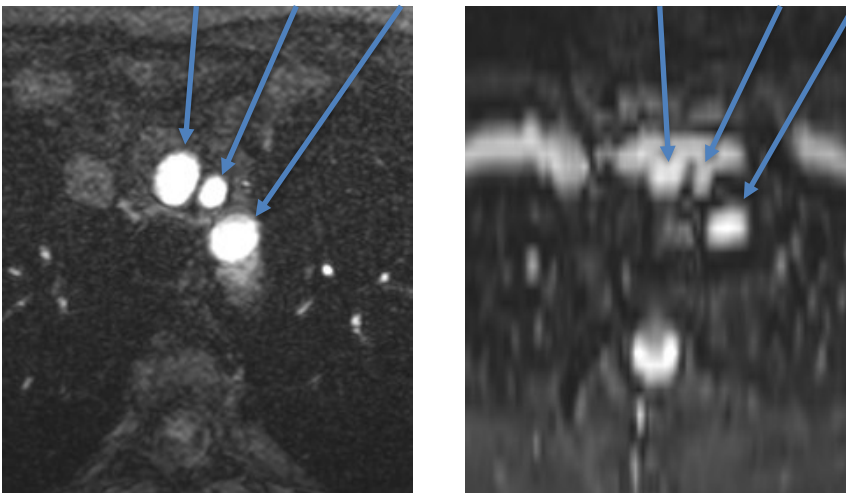


Abbildung 54: Supraaortale Gefäße in der Transversalebene (MPR-Rekonst.), QISS-MRA (l.) und SPACE-MRA (r.), Prob. 3

Supraaortale Gefäße in der QISS-Aufnahme schärfer dargestellt, Inhomogenität der QISS-Aufnahme in der Arteria subclavia sinistra (rechter Pfeil) erschwert die Beurteilung Truncus brachiocephalicus (linker Pfeil) und Arteria carotis sinistra (mittiger Pfeil) weisen in der QISS-Aufnahme keine Inhomogenitäten auf

„Nach dem Abgang der Supraaortalen“:

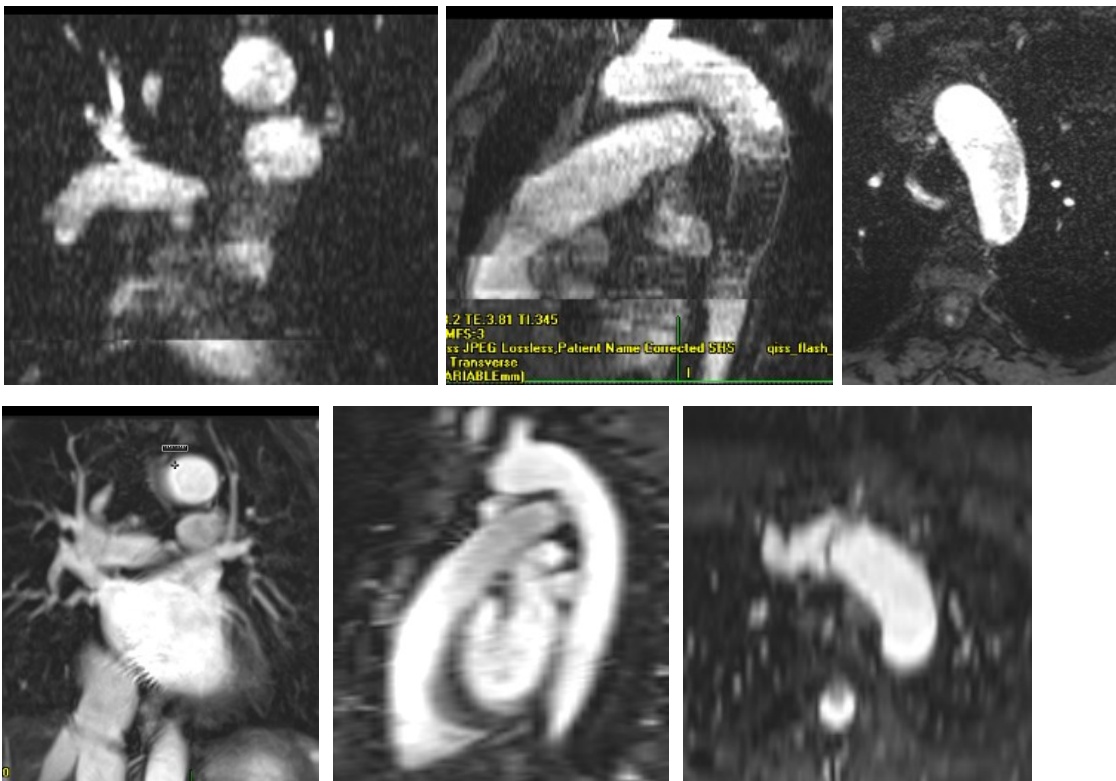


Abbildung 55: MPR-Rekonst., QISS-MRA (oben) und SPACE-MRA (unten), nach Abgang der Supraaortalen, Prob. 3

links: cor. E., mittig: sag. E., rechts: tra. E.

QISS-Sequenz mit Inhomogenitäten, SPACE-Sequenz liefert qualitativ bessere Ergebnisse

Durchmesservergleich:

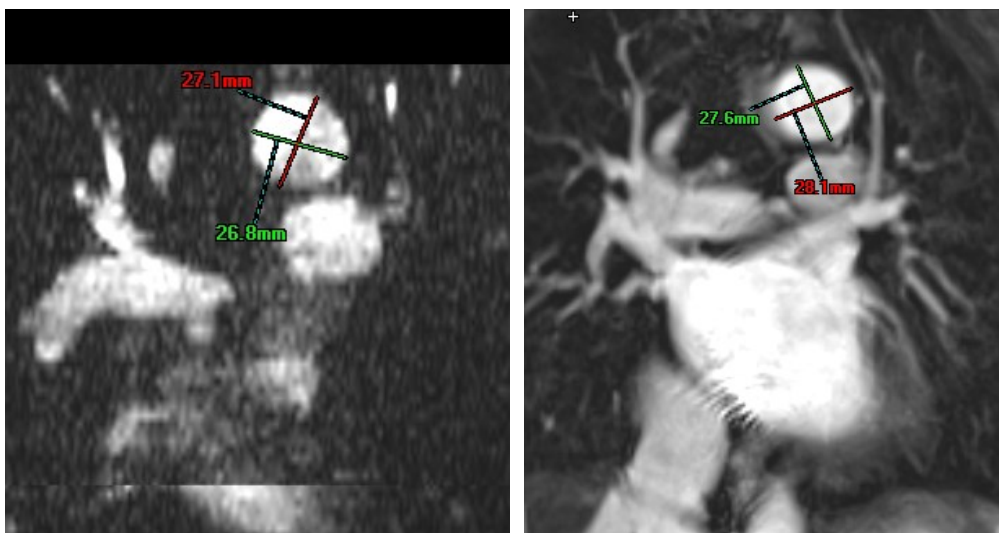


Abbildung 56: Durchmesser Arcus aortae, nach Abgang der Supraaortalen, QISS-MRA (l.) und SPACE-MRA (r.) (MPR-Rekonst.: coronal), Prob. 3

links: QISS-MRA 2,7 x 2,7cm, rechts: SPACE-MRA: 2,8 x 2,8cm

Gut abgrenzbare Aortenwand in beiden Aufnahmen, daher vergleichbare Messwerte in beiden Sequenzen

„Größter Durchmesser der Aorta descendens“:

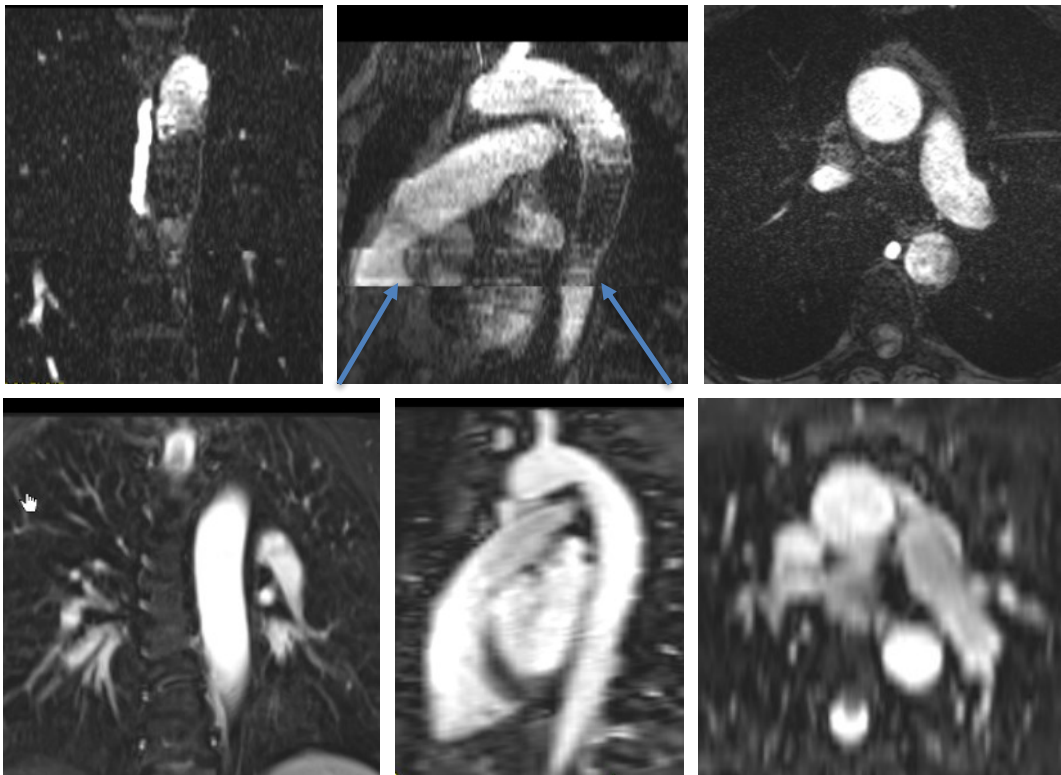


Abbildung 57: MPR-Rekonst., QISS-MRA (oben) und SPACE-MRA (unten), Aorta descendens, Prob. 3

links: cor. E., mittig: sag. E., rechts: tra. E.

Ausgeprägte Signalauslöschung der QISS-Aufnahme in der Aorta descendens

Auffällig ist, dass nur der Bereich der Aorta descendens ausgelöscht scheint, in dem die Aorta ascendens ein Signal zeigt (Pfeile)

Dies könnte vermuten lassen, dass es Probleme bei der Akquisition gibt, wenn zeitgleich verschiedene Blutflussrichtungen mit Signal dargestellt werden sollen

SPACE-Aufnahme ohne stark ausgeprägten Qualitätsabfall zwischen der Coronalebene und der Sagittal- und Transversalebene

Durchmesservergleich:

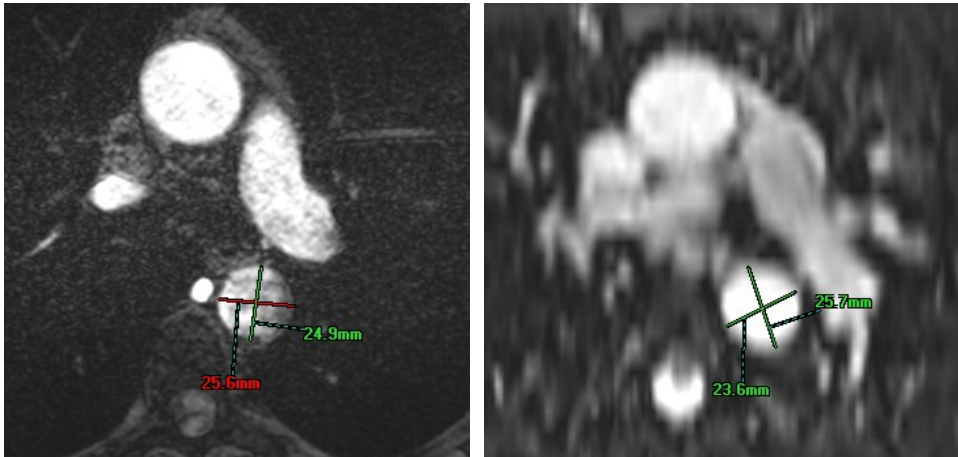


Abbildung 58: Durchmesser Aorta desc., QISS-MRA (l.) und SPACE-MRA (r.) (MPR-Rekonst.: transversal), Prob. 3

links: QISS-MRA 2,6 x 2,5cm, rechts: SPACE-MRA 2,6 x 2,4 cm

Trotz Inhomogenitäten in der QISS-Aufnahme Aortenwand gut zur Umgebung abgrenzbar, vergleichbare Messwerte in beiden Sequenzen erhalten

„Thorakoabdominaler Übergang“:

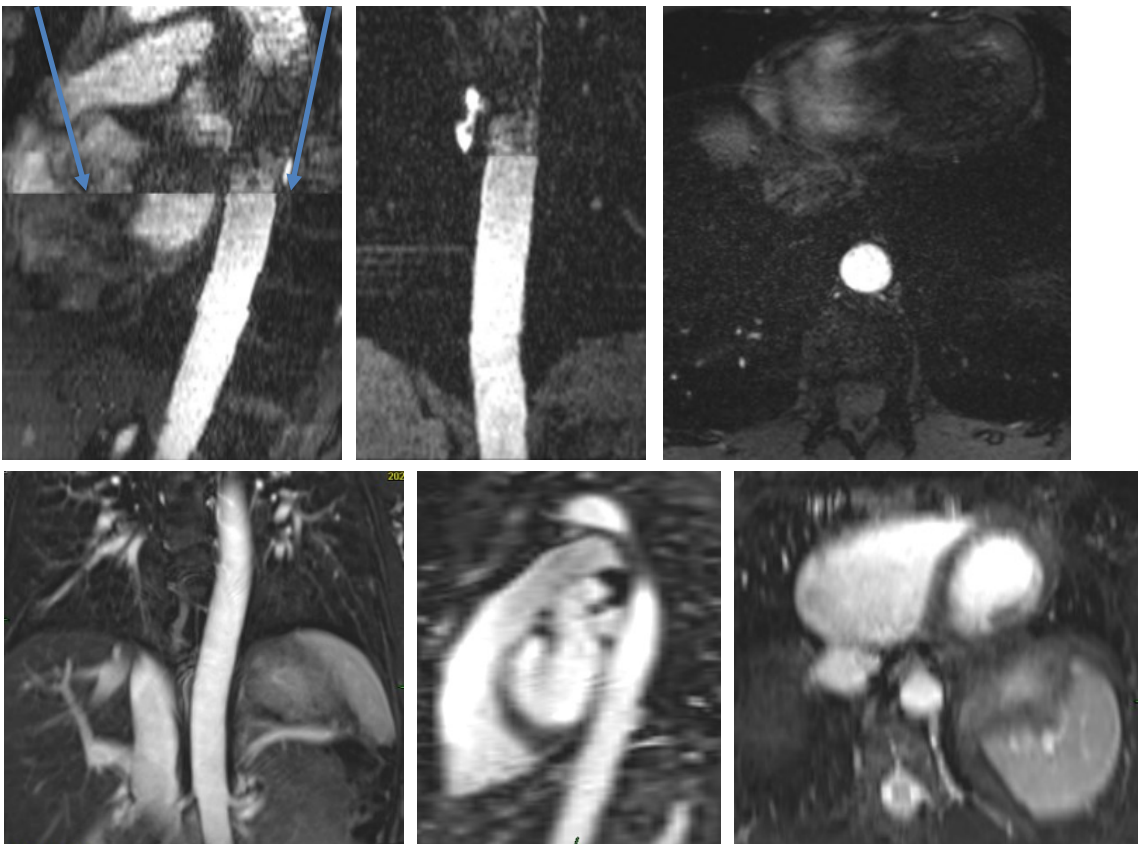


Abbildung 59: MPR-Rekonst., QISS-MRA (oben) und SPACE-MRA (unten), Thorakoabdominaler Übergang, Prob. 3

links: schräg-cor. E., mittig: sag. E., rechts: schräg-tra. E.

Weiterhin ersichtliche Linie (Pfeile) in der QISS-Aufnahme, an der die Signalauslöschung in der Aorta descendens endet, sobald das kaudale Ende der Aorta ascendens erreicht ist, die Messebene „Thorakoabdominaler Übergang“ ist wie man in der Transversalebene sieht nicht mehr von der Signalauslöschung betroffen  
 SPACE-Aufnahme ohne Qualitätseinschränkungen

Durchmesservergleich:

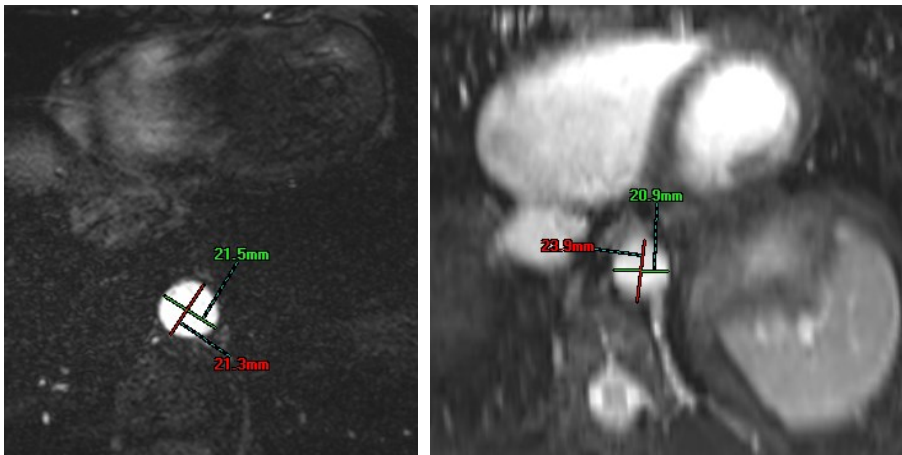
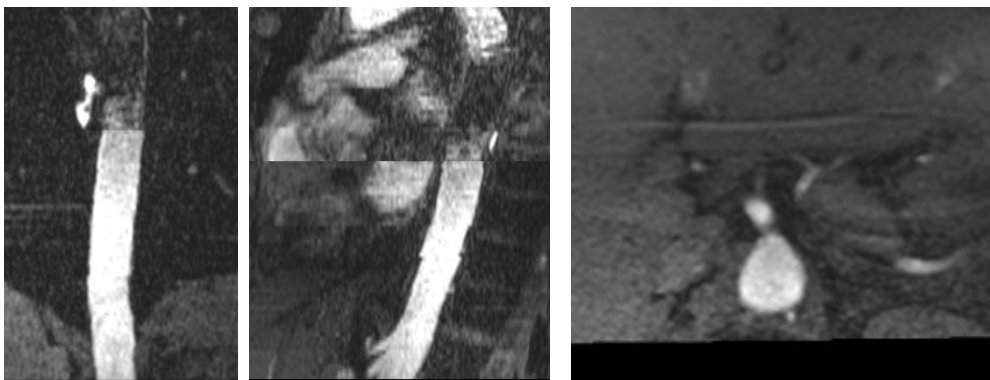


Abbildung 60: Durchmesser Aorta desc., thorakoabdominaler Übergang, QISS-MRA (l.) und SPACE-MRA (r.) (MPR-Rekonst.: transversal), Prob. 3  
 links: QISS-MRA: 2,2 x 2,1cm, rechts: SPACE-MRA: 2,4 x 2,1cm  
 Messwerte weichen nur leicht voneinander ab, Aorta descendens in der SPACE-Aufnahme aber deutlich schlechter von der Umgebung abgrenzbar als in der QISS-Aufnahme

„Distaler Abschnitt der Aorta descendens“:



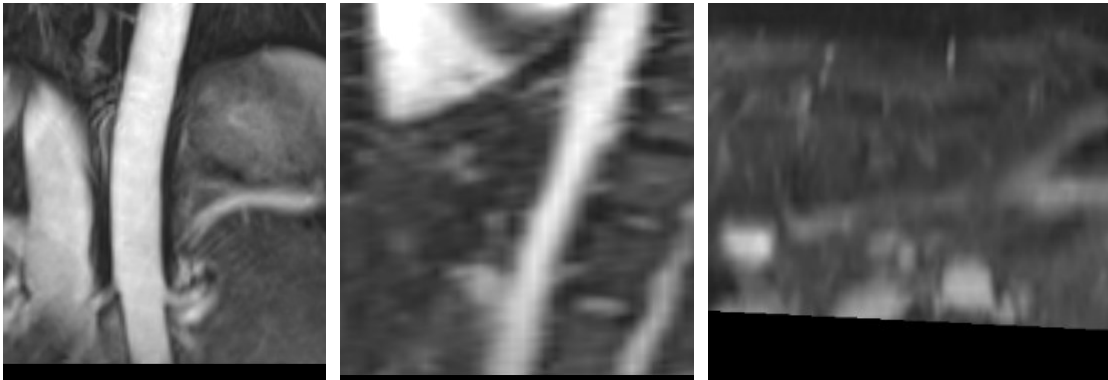


Abbildung 61: MPR-Rekonst., QISS-MRA (oben) und SPACE-MRA (unten), distale Aorta desc., Prob. 3

links: schräg-cor. E., mittig: sag. E., rechts: schräg-tra. E.

Qualität der Bildgebung vor allem in der Transversalebene bei der QISS-Sequenz deutlich besser als bei der SPACE-Sequenz, Aortenlumen in der SPACE-Aufnahme kaum abgrenzbar zu umliegendem Gewebe

Durchmesservergleich:

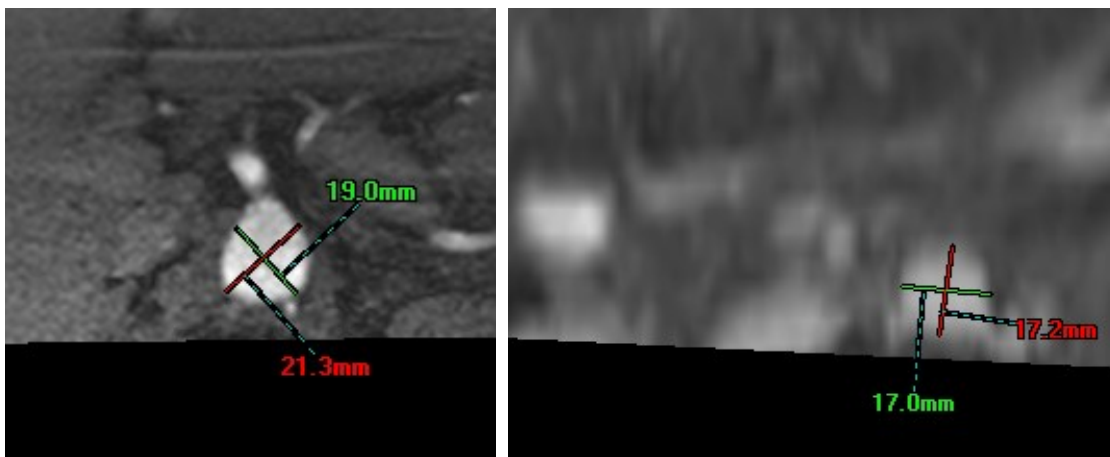


Abbildung 62: Durchmesser distale Aorta desc., QISS-MRA (l.) und SPACE-MRA (r.) (MPR-Rekonst.: transversal), Prob. 3

links: QISS-MRA: 2,1 x 1,9cm, rechts: SPACE-MRA: 1,7 x 1,7cm

Stark voneinander abweichende Durchmesserwerte, bedingt durch den starken Qualitätsunterschied der beiden Aufnahmen (siehe Beschreibung bei Abb. 61)

Lumen der Aorta in SPACE-Aufnahme kaum von umliegenden Strukturen abgrenzbar, daher vermutlich auch große Messvariabilität in dieser Messebene

Im Anschluss werden nun die für die Studie wesentlich relevanteren Ergebnisse der PatientInnen dargestellt. Verglichen werden dabei die Ergebnisse der QISS-MRA, SPACE-MRA, CE-MRA, VIBE-MRI und CE-CTA.

Die Patientin 1 erlitt während der Entbindung eine Typ B Aortendissektion, die mittlerweile verheilt ist, nur eine Engstelle im Bereich der infrarenalen Aorta descendens blieb zurück.

Da die QISS-Sequenz bei den Aufnahmen der Probandinnen keine verlässliche Qualität zeigte, wurde sie nicht bei allen PatientInnen durchgeführt. Für die Patientin 1 erfolgt somit nur der Vergleich von SPACE-MRA, CE-MRA, VIBE-MRI und CE-CTA.

Ähnlich wie bei den Probandinnen wurden bestimmte Messebenen zur Bewertung der Qualität und Beurteilbarkeit ausgewählt. Diese lauten für Patientin 1 wie folgt:

- Größter Durchmesser der Aorta ascendens
- Vor Abgang der Supraaortalen
- Nach Abgang der Supraaortalen
- Größter Durchmesser der Aorta descendens
- Entstandene Engstelle nach Heilung der Pathologie

Außerdem werden die 3D-Rekonstruktionen und die Bildgebung der supraaortalen Gefäße analysiert.

3D-Rekonstruktion:

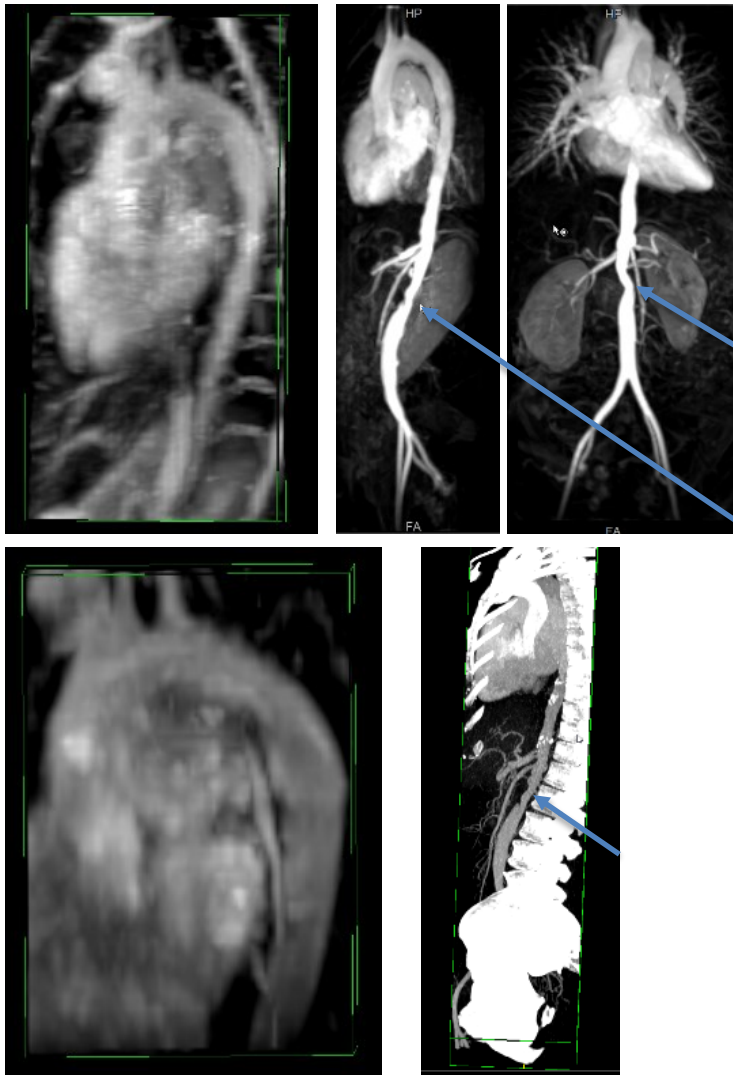


Abbildung 63: MIP-3D-Rekonst., SPACE-MRA (l.-o.), CE-MRA (r.-o.), VIBE-MRI (l.-u.), CE-CTA (r.-u.), Pat. 1

Durch 3D-Rekonstruktion entsteht direkt ein Überblick über die vorliegende Pathologie und die unterschiedlichen Qualitäten der Bildgebungen. Die in der infrarenalen Aorta descendens lokalisierte Engstelle ist in den Rekonstruktionen per Pfeil markiert.

Diese Engstelle wird in den kommenden Aufnahmen genauer dargestellt:

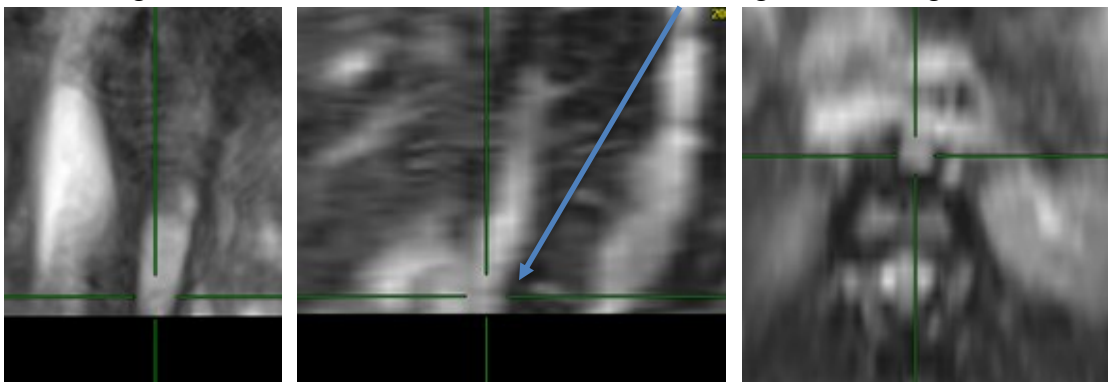


Abbildung 64: MPR-Rekonstruktion, SPACE-MRA, Engstelle der infrarenalen Aorta desc., Pat. 1  
links: cor. E., mittig: sag. E., rechts: tra. E.

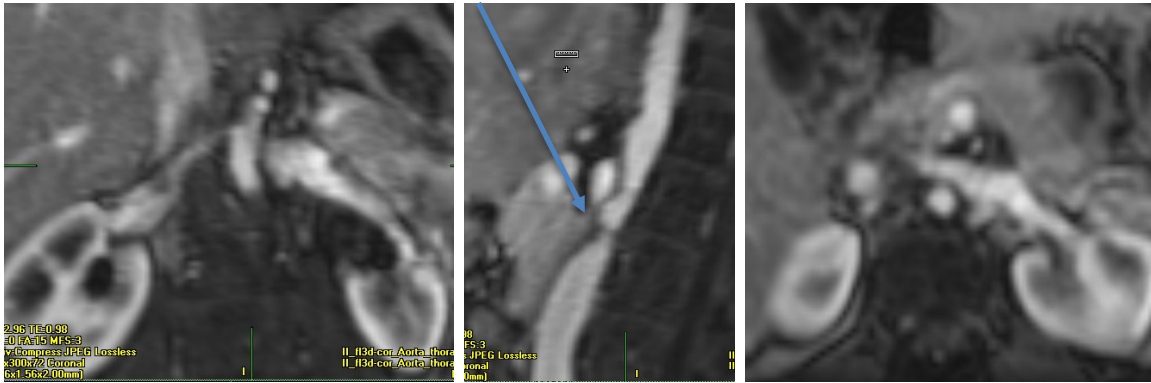


Abbildung 65: MPR-Rekonstruktion, CE-MRA, Engstelle der infrarenalen Aorta desc., Pat.

1

links: cor. E., mittig: sag. E., rechts: tra. E.

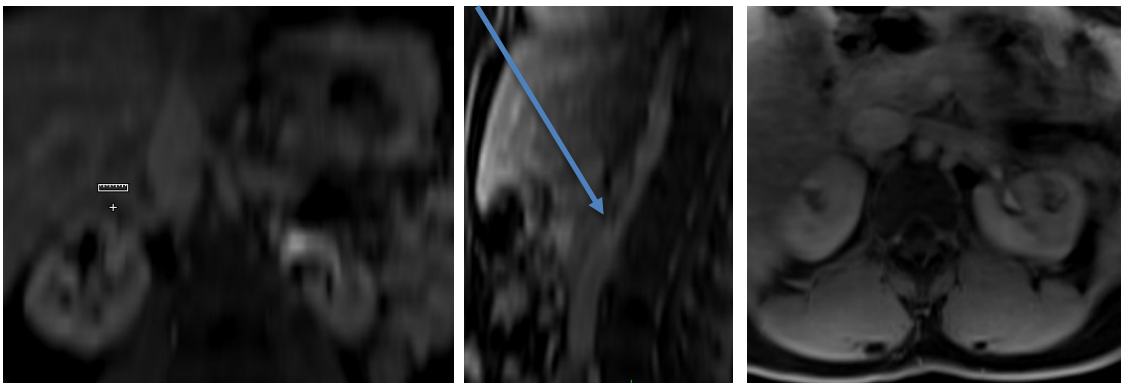


Abbildung 66: MPR-Rekonstruktion, VIBE-MRI, Engstelle der infrarenalen Aorta desc., Pat. 1

links: cor. E., mittig: sag. E., rechts: tra. E.

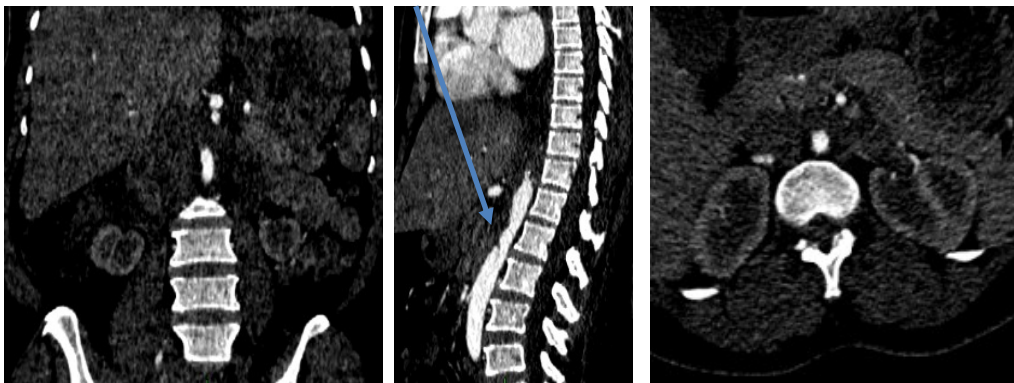


Abbildung 67: MPR-Rekonstruktion, CE-CTA, Engstelle der infrarenalen Aorta desc., Pat.

1

links: cor. E., mittig: sag. E., rechts: tra. E.

Die mit den Pfeilen markierte Stelle ist die bei der Heilung der Aortendissektion entstandene Engstelle der Aorta descendens. Die Problematik einer Engstelle in der Aorta liegt darin, dass die Versorgung der kaudal der Engstelle liegenden Organe deutlich beeinträchtigt sein kann. Am besten ist die Engstelle in der CE-MRA-Bildgebung erkennbar, die Qualität und Beurteilbarkeit der SPACE-MRA-Aufnahme ist deutlich eingeschränkt.

„Größte Durchmesser der Aorta ascendens“:

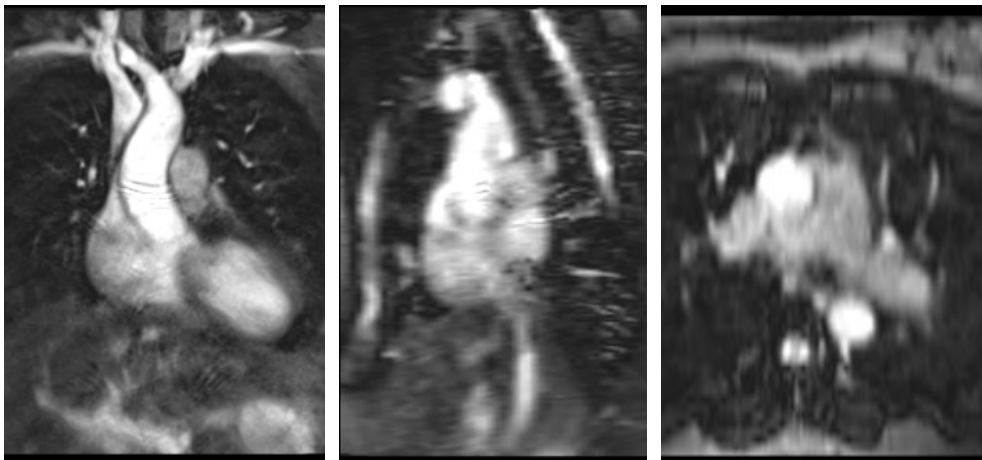


Abbildung 68: MPR-Rekonstruktion, SPACE-MRA, Aorta ascendens, Pat. 1  
links: cor. E., mittig: sag. E., rechts: tra. E.

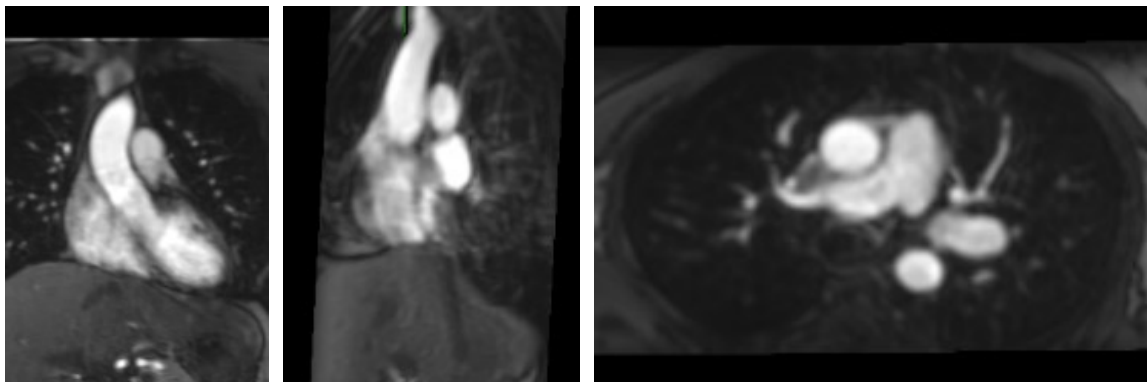


Abbildung 69: MPR-Rekonstruktion, CE-MRA, Aorta ascendens, Pat. 1  
links: cor. E., mittig: sag. E., rechts: tra. E.

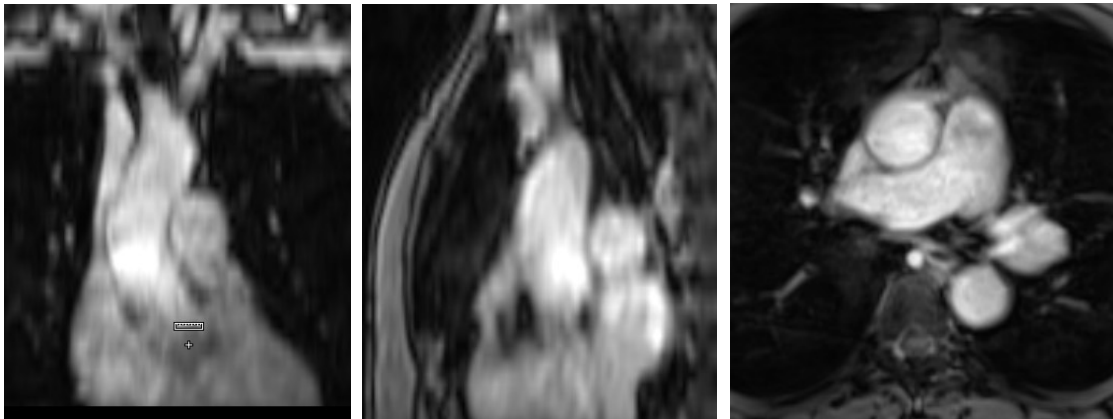


Abbildung 70: MPR-Rekonstruktion, VIBE-MRI, Aorta ascendens, Pat. 1  
links: cor. E., mittig: sag. E., rechts: tra. E.



Abbildung 71: MPR-Rekonstruktion, CE-CTA, Aorta ascendens, Pat. 1  
links: cor. E., mittig: sag. E., rechts: tra. E.

In dieser Messebene sind die Bildgebungen der vier verschiedenen Sequenzen in ihrer Qualität vergleichbar und alle zur Befundung gut geeignet.

Durchmesservergleich:

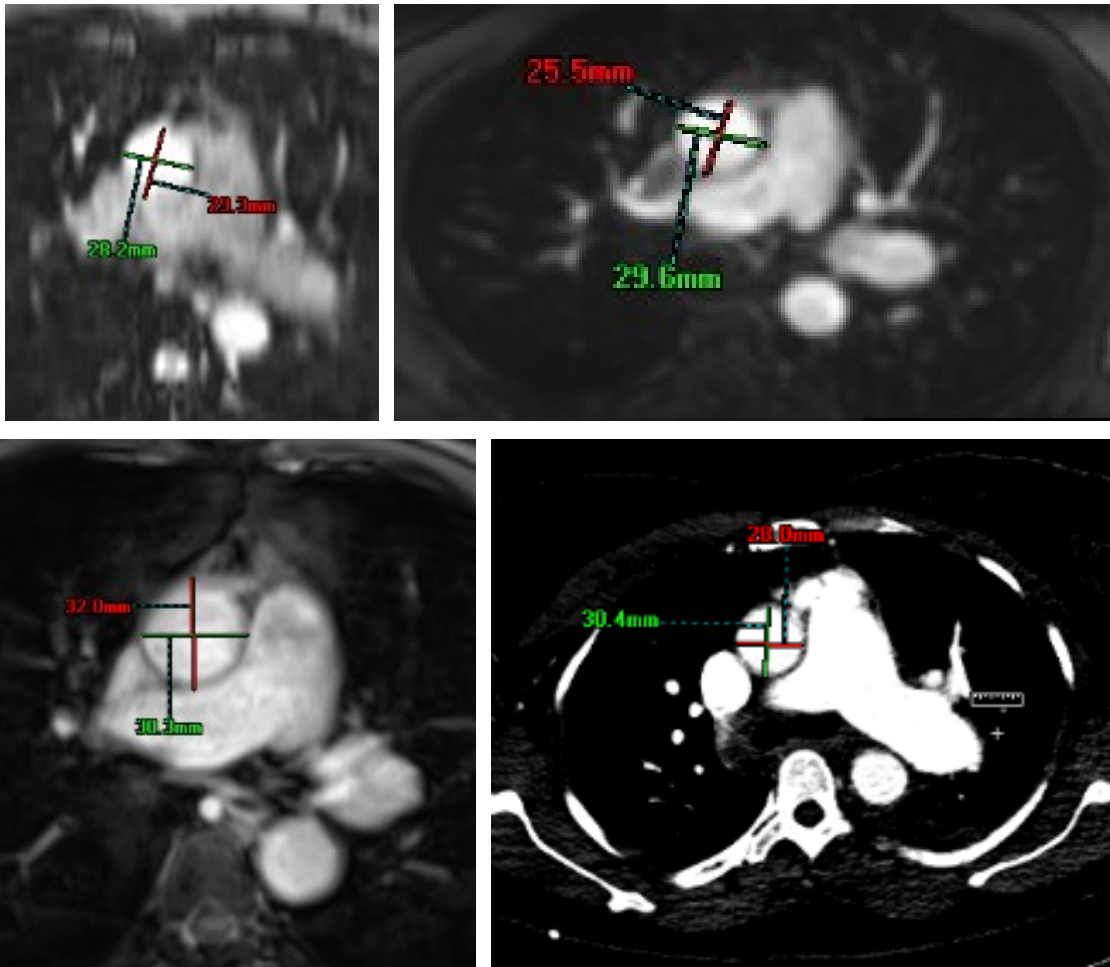


Abbildung 72: Durchmesser Aorta asc., SPACE-MRA (l.-o.), CE-MRA (r.-o.), VIBE-MRI (l.-u.), CE-CTA (r.-u.) (MPR-Rekonstruktion: transversal), Pat. 1  
SPACE-MRA (l.-o.): 2,9 x 2,8cm CE-MRA (r.-o.): 3,0 x 2,6cm  
VIBE-MRI (l.-u.): 3,2 x 3,0cm CE-CTA (r.-u.): 3,0 x 2,8cm

Mit Ausnahme eines Messwertes (2,6cm) der CE-MRA weichen die Durchmesserergebnisse nur geringgradig voneinander ab, das bestätigt die gute Qualität aller vier Bildgebungen.

„Vor dem Abgang der Supraaortalen“:

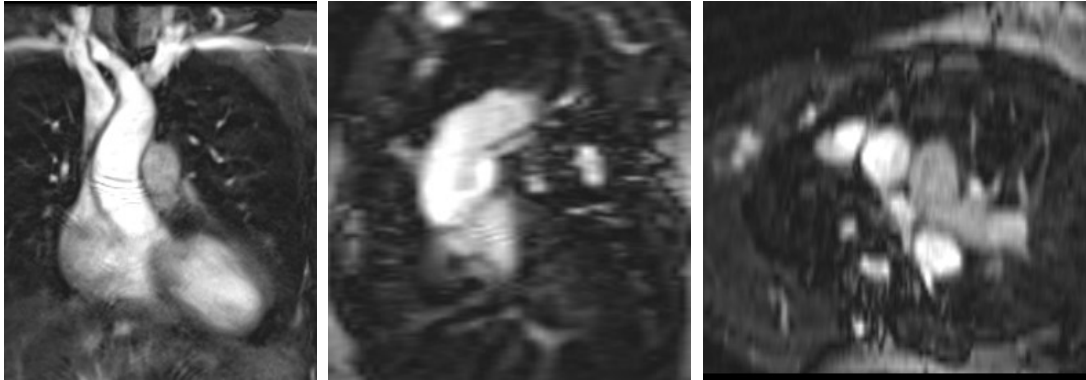


Abbildung 73: MPR-Rekonstruktion, SPACE-MRA, vor Abgang der Supraaortalen, Pat. 1  
links: cor. E., mittig: schräg-sag. E., rechts: schräg-tra. E.

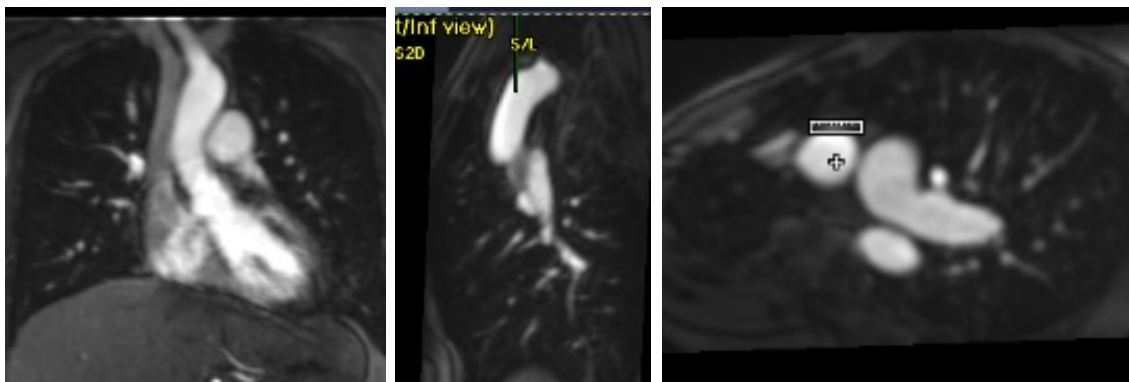


Abbildung 74: MPR-Rekonstruktion, CE-MRA, vor Abgang der Supraaortalen, Pat. 1  
links: cor. E., mittig: schräg-sag. E., rechts: schräg-tra. E.

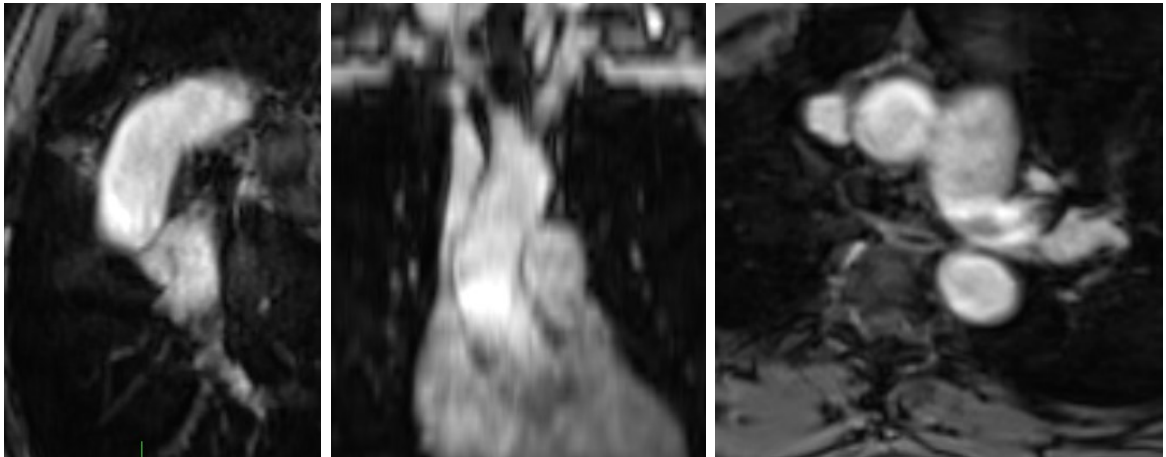


Abbildung 75: MPR-Rekonstruktion, VIBE-MRI, vor Abgang der Supraaortalen, Pat. 1  
links: cor. E., mittig: schräg-sag. E., rechts: schräg-tra. E.

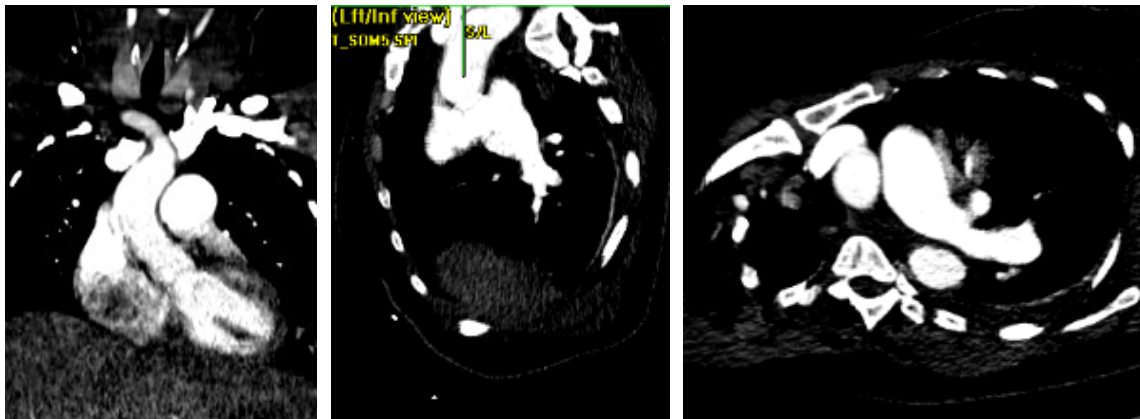


Abbildung 76: MPR-Rekonstruktion, CE-CTA, vor Abgang der Supraaortalen, Pat. 1  
links: cor. E., mittig: schräg-sag. E., rechts: schräg-tra. E.

Während die CE-MRA und CE-CTA frei von Inhomogenitäten sind, verschlechtern eben diese die Qualität der SPACE-MRA- und VIBE-MRI-Aufnahmen. Bei Betrachtung der SPACE-MRA-Bilder ist eine Pathologie nicht gänzlich ausschließbar, da sie sich in den anderen Sequenzen aber nicht bestätigt, wird sie als Inhomogenität und somit als Qualitätseinschränkung eingeordnet.

Durchmesservergleich:

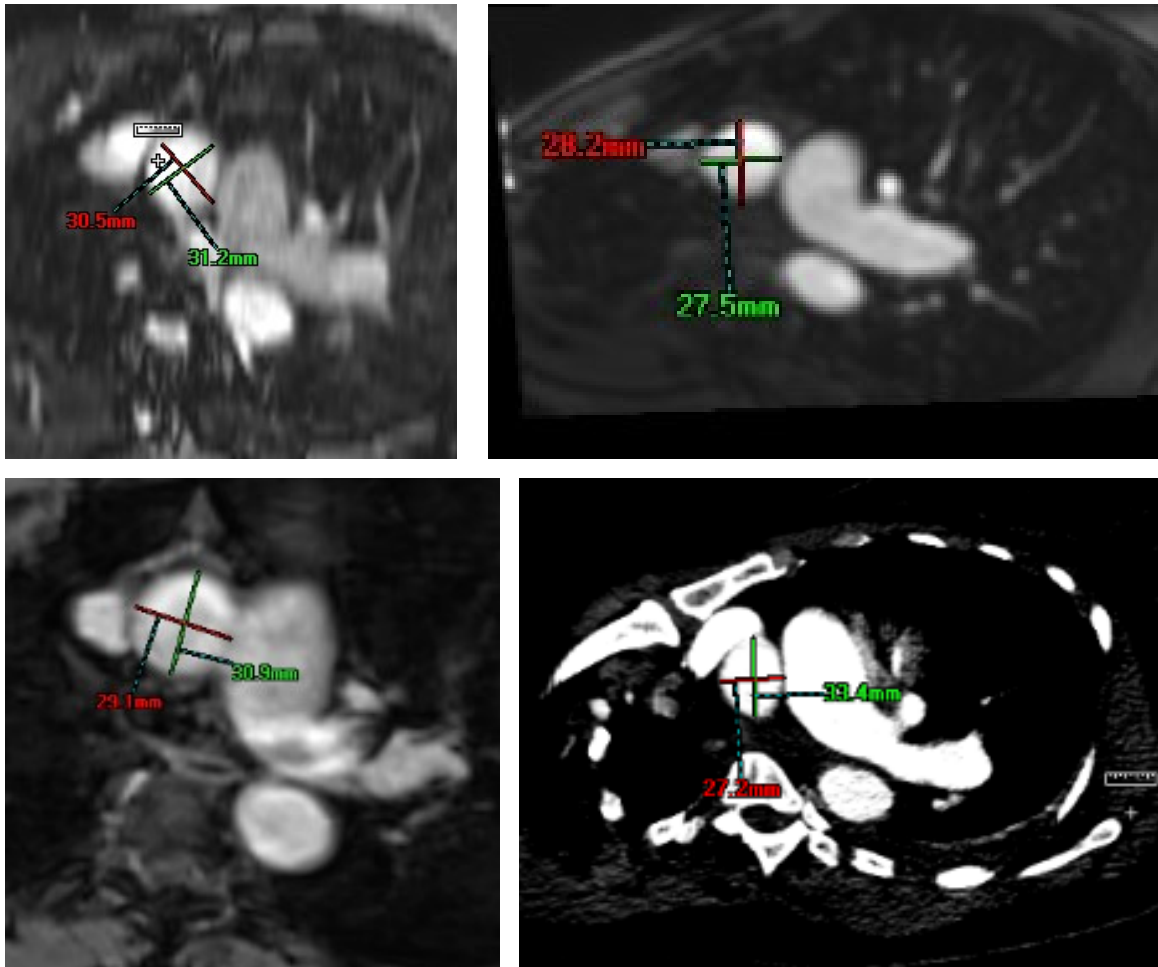


Abbildung 77: Durchmesser Aorta asc., vor Abgang der Supraaortalen, SPACE-MRA (l.-o.), CE-MRA (r.-o.), VIBE-MRI (l.-u.), CE-CTA (r.-u.) (MPR-Rekonstruktion: schräg-transversal), Pat. 1

SPACE-MRA (l.-o.): 3,1 x 3,1cm CE-MRA (r.-o.): 2,8 x 2,8cm

VIBE-MRI (l.-u.): 3,1 x 2,9cm CE-CTA (r.-u.): 3,3 x 2,7cm

Trotz dessen, dass in allen Sequenzen die Aortenwände scharf abgrenzbar sind, weichen die gemessenen Durchmesser voneinander ab. Lediglich die Messwerte aus der SPACE-MRA- und VIBE-MRI-Aufnahme weichen kaum voneinander ab.

„Supraaortale Gefäße“:

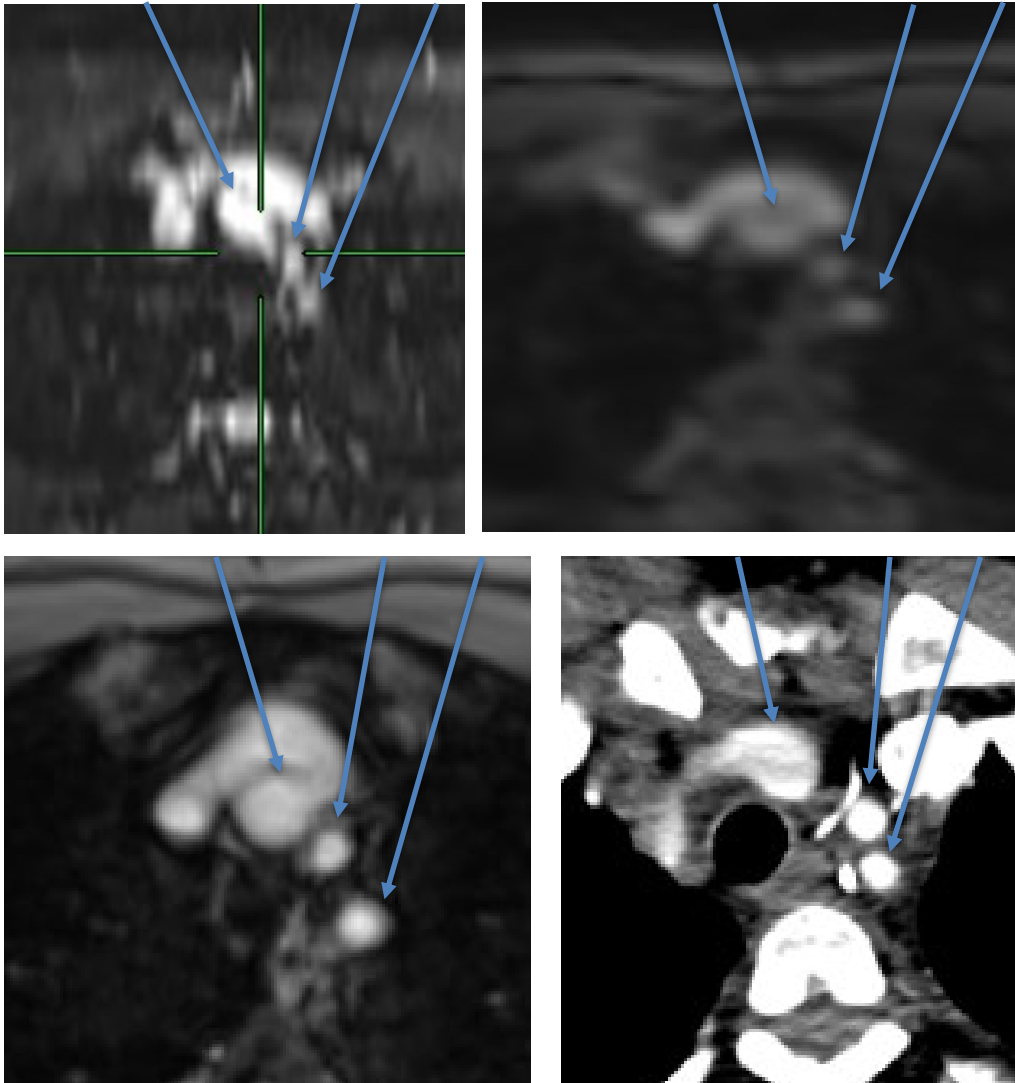


Abbildung 78: supraaortale Gefäße in der Transversalebene (MPR-Rekonst.), SPACE-MRA (l.-o.), CE-MRA (r.-o.), VIBE-MRI (l.-u.), CE-CTA (r.-u.), Pat. 1  
Truncus brachiocephalicus (l. Pfeil), Arteria carotis sinistra (m. Pfeil) und Arteria subclavia sinistra (r. Pfeil)

Am besten erkennbar und abgrenzbar sind die supraaortalen Gefäße in der VIBE-MRI und CE-CTA-Bildgebung. Die Inhomogenität im Truncus brachiocephalicus in der CE-CTA-Aufnahme aber schränkt die Beurteilbarkeit ein.

„Nach dem Abgang der Supraaortalen“:

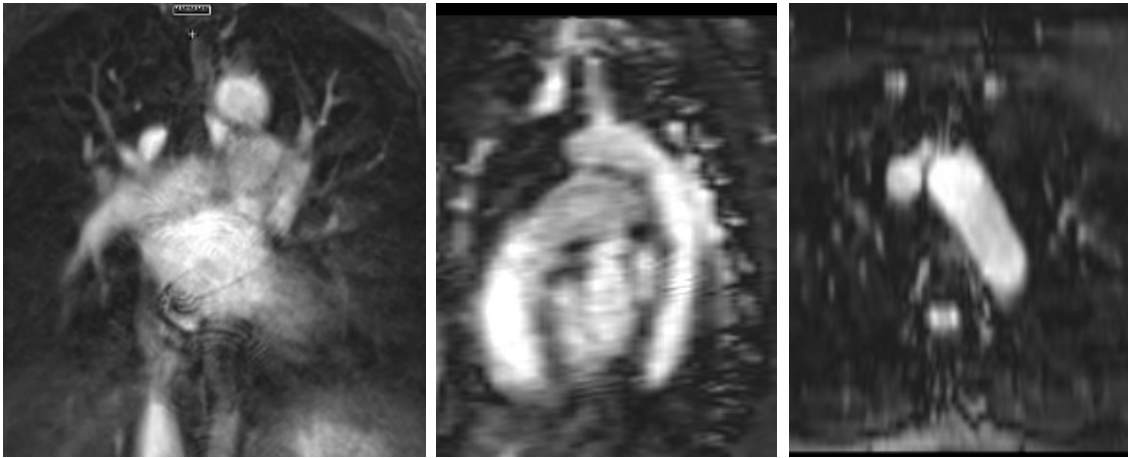


Abbildung 79: MPR-Rekonst., SPACE-MRA, nach Abgang der Supraaortalen, Pat. 1  
links: cor. E., mittig: sag. E., rechts: tra. E.

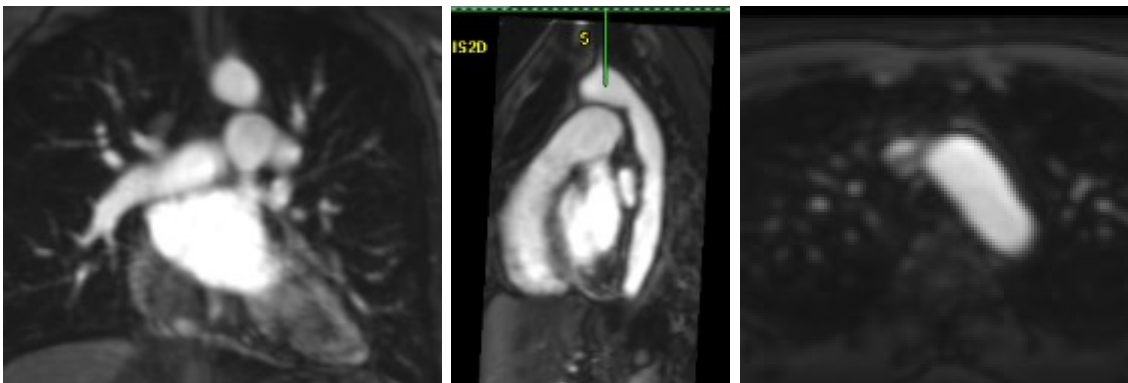


Abbildung 80: MPR-Rekonst., CE-MRA, nach Abgang der Supraaortalen, Pat. 1  
links: cor. E., mittig: sag. E., rechts: tra. E.

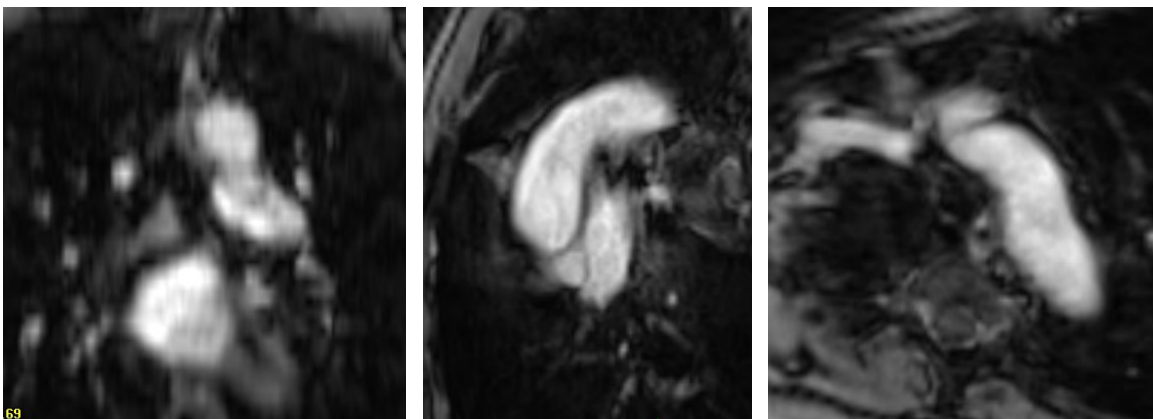


Abbildung 81: MPR-Rekonst., VIBE-MRI, nach Abgang der Supraaortalen, Pat. 1  
links: cor. E., mittig: sag. E., rechts: tra. E.

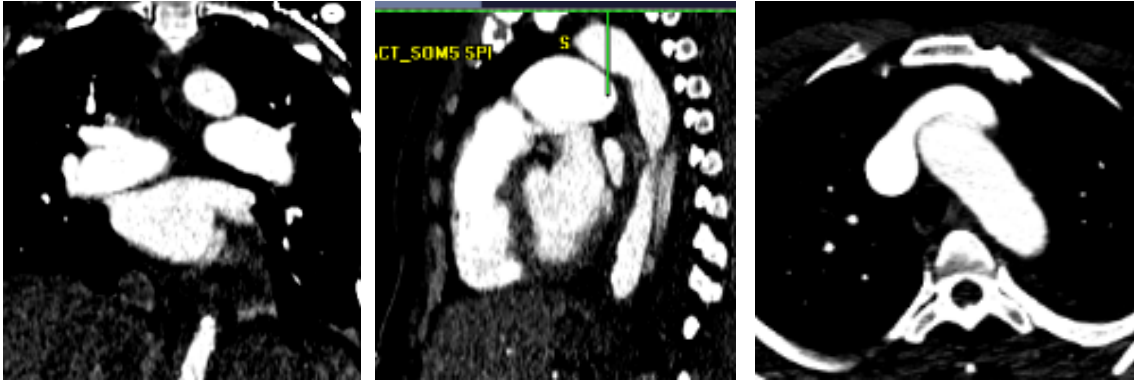


Abbildung 82: MPR-Rekonst., CE-CTA, nach Abgang der Supraaortalen, Pat. 1  
links: cor. E., mittig: sag. E., rechts: tra. E.

Die VIBE-MRI und SPACE-MRA reichen aufgrund schlechterer Qualität nicht allein zur Befundung aus. Bei der SPACE-MRA ist dies vor allem durch die Inhomogenitäten bedingt.

Durchmesservergleich:

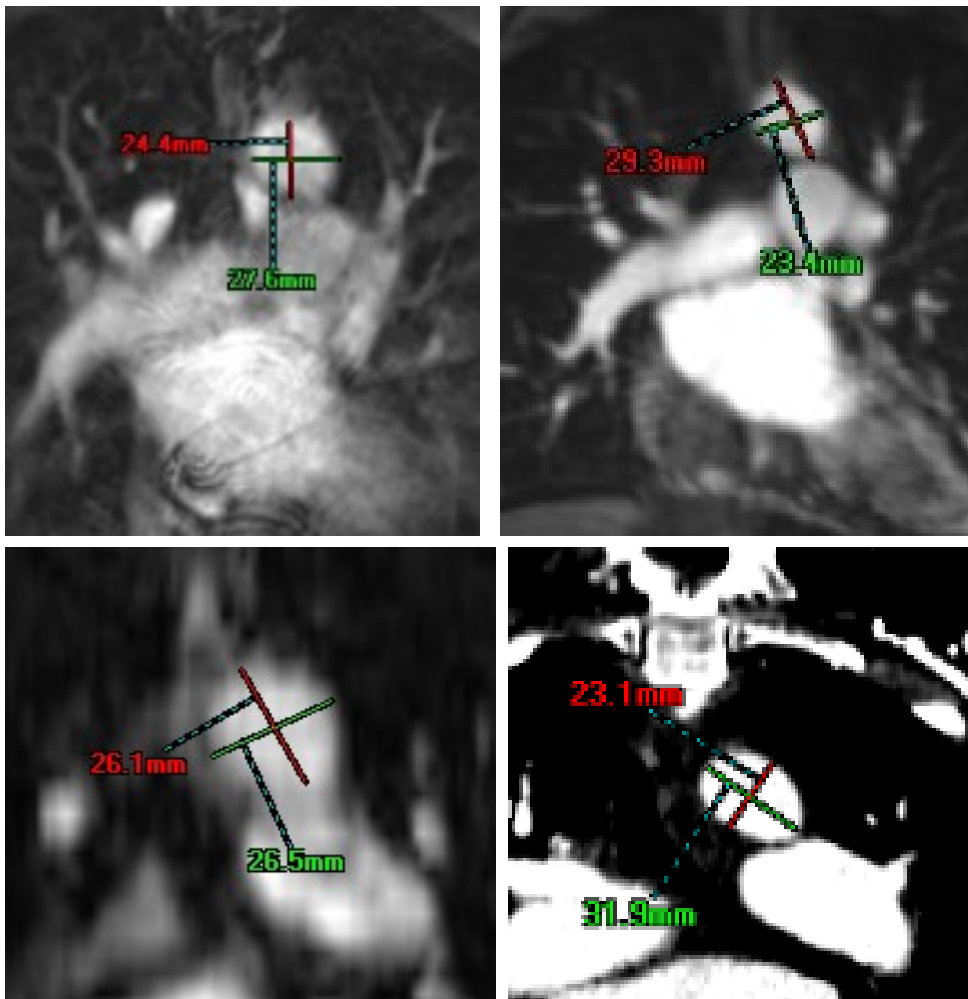


Abbildung 83: Durchmesser Arcus aortae, nach Abgang der Supraaortalen, SPACE-MRA (l.-o.), CE-MRA (r.-o.), VIBE-MRI (l.-u.), CE-CTA (r.-u.), (MPR-Rekonst.: coronal), Pat. 1

SPACE-MRA (l.-o.): 2,8 x 2,4cm CE-MRA (r.-o.): 2,9 x 2,3cm

VIBE-MRI (l.-u.): 2,7 x 2,6cm CE-CTA (r.-u.): 3,2 x 2,3cm

Hierbei sticht durch die unscharfe Aortenwand vor allem die VIBE-MRI-Aufnahme und damit auch die Abweichung zu den Messwerten der anderen Sequenzen heraus.

„Größter Durchmesser der Aorta descendens“:

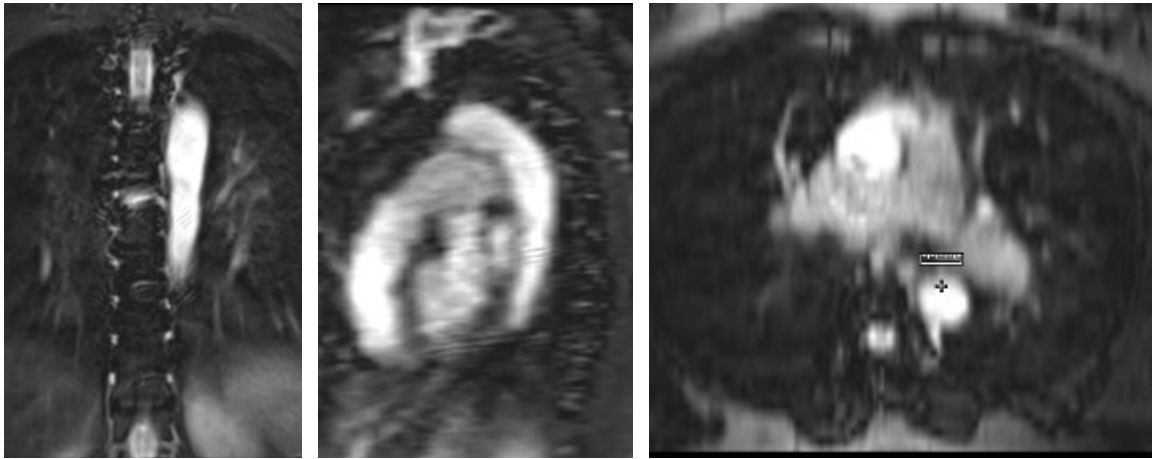


Abbildung 84: MPR-Rekonstruktion, SPACE-MRA, Aorta desc., Pat. 1  
links: cor. E., mittig: sag. E., rechts: tra. E.

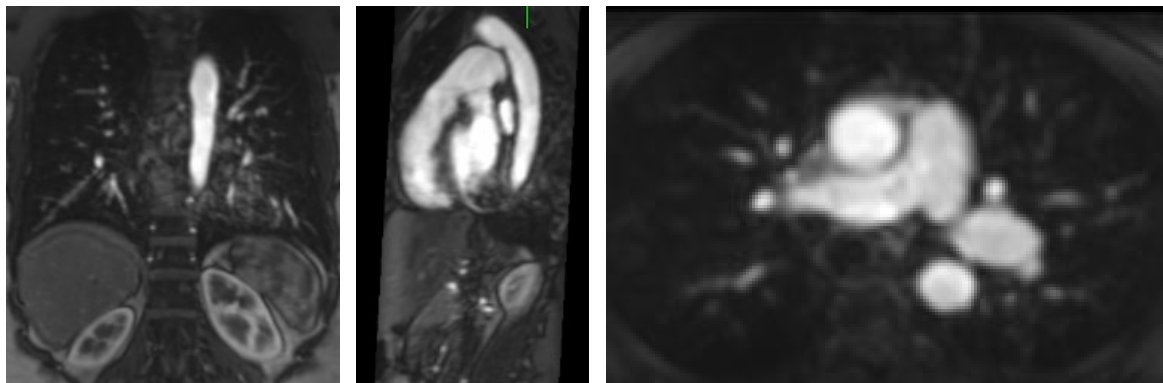


Abbildung 85: MPR-Rekonstruktion, CE-MRA, Aorta desc., Pat. 1  
links: cor. E., mittig: sag. E., rechts: tra. E.

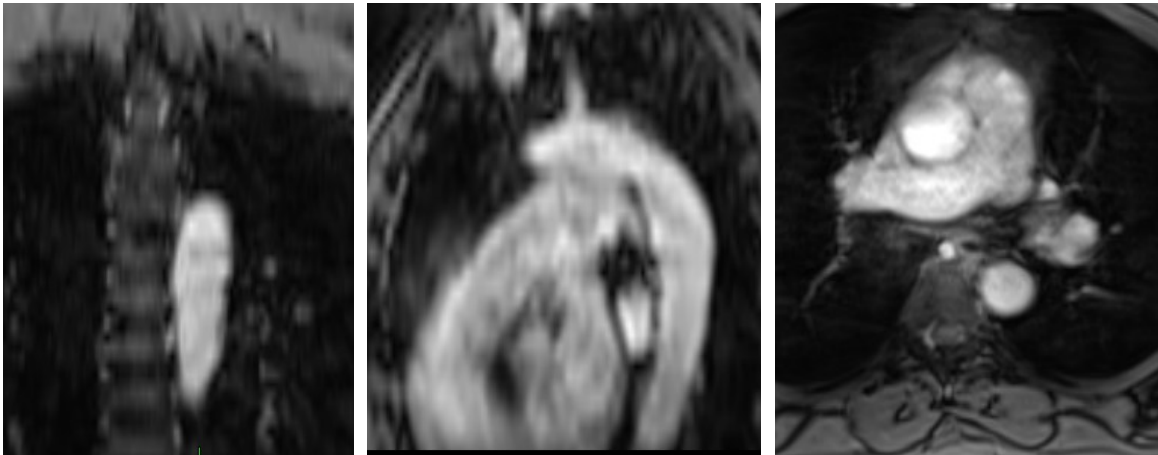


Abbildung 86: MPR-Rekonstruktion, VIBE-MRI, Aorta desc., Pat. 1  
links: cor. E., mittig: sag. E., rechts: tra. E.

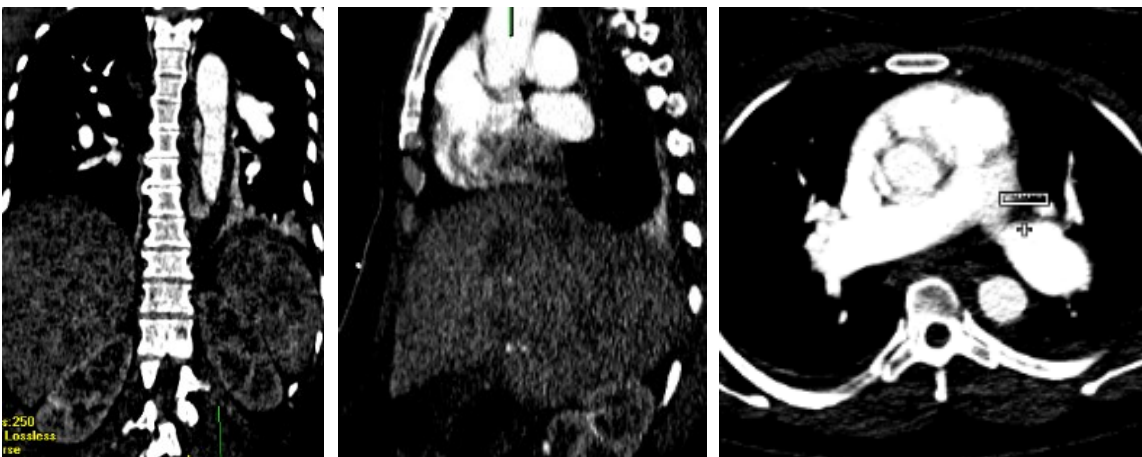


Abbildung 87: MPR-Rekonstruktion, CE-CTA, Aorta desc., Pat. 1  
links: cor. E., mittig: sag. E., rechts: tra. E.

Die Beurteilbarkeit der Aorta descendens ist in allen Aufnahmen der vier verschiedenen Sequenzen gut.

Durchmesservergleich:

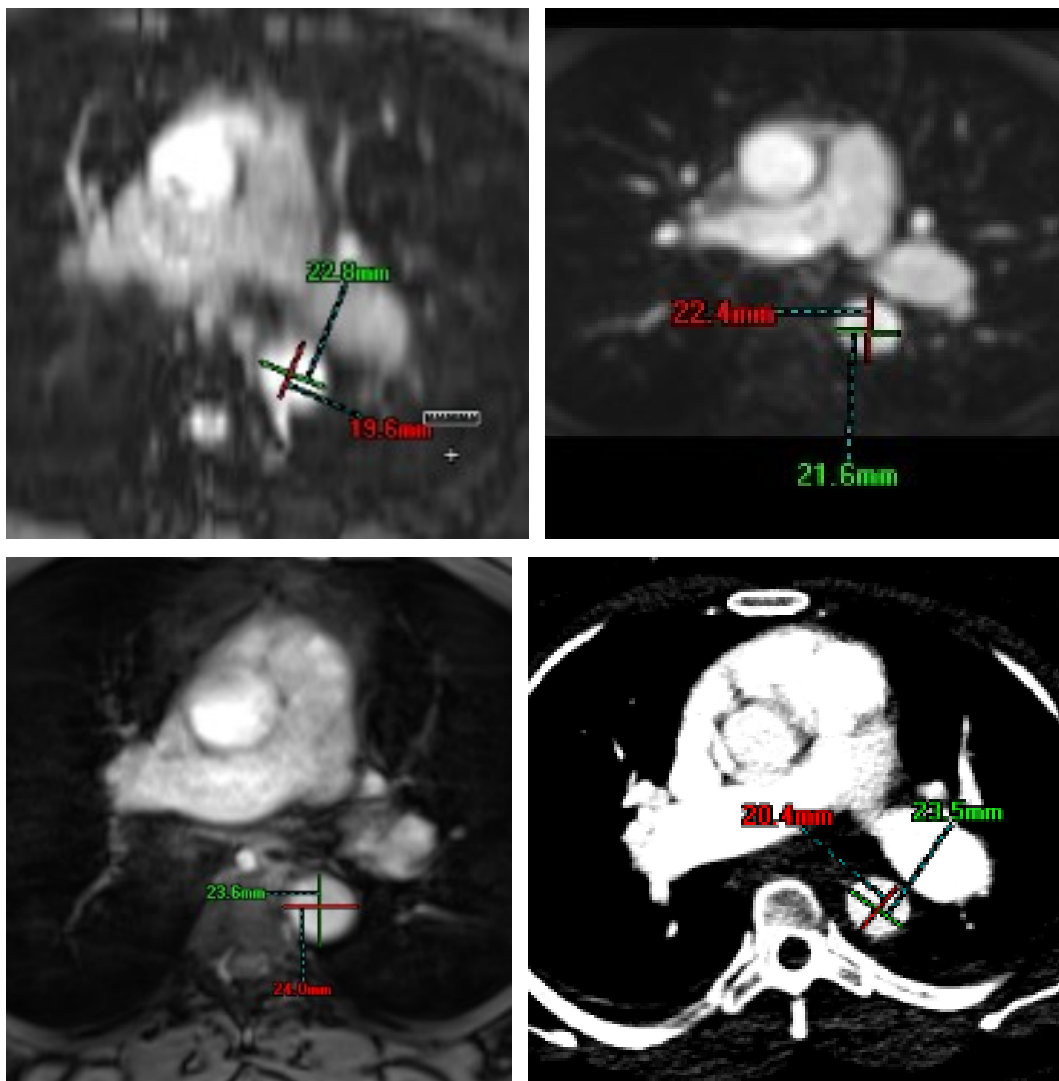


Abbildung 88: Durchmesser Aorta desc., SPACE-MRA (l.-o.), CE-MRA (r.-o.), VIBE-MRI (l.-u.), CE-CTA (r.-u.), (MPR-Rekonst.: transversal), Pat. 1  
SPACE-MRA (l.-o.): 2,3 x 2,0cm, CE-MRA (r.-o.): 2,2 x 2,2cm  
VIBE-MRI (l.-u.): 2,4 x 2,4cm, CE-CTA (r.-u.): 2,2 x 2,0cm

Relativ nah beieinanderliegend sind die Messergebnisse der SPACE-MRA und CE-CTA. Die Messwerte der VIBE-MRI weichen leicht nach oben hin ab. Der zweite Messwert der CE-MRA weicht auch leicht nach oben ab.

„Engstelle der infrarenalen Aorta descendens“ – Durchmesser:

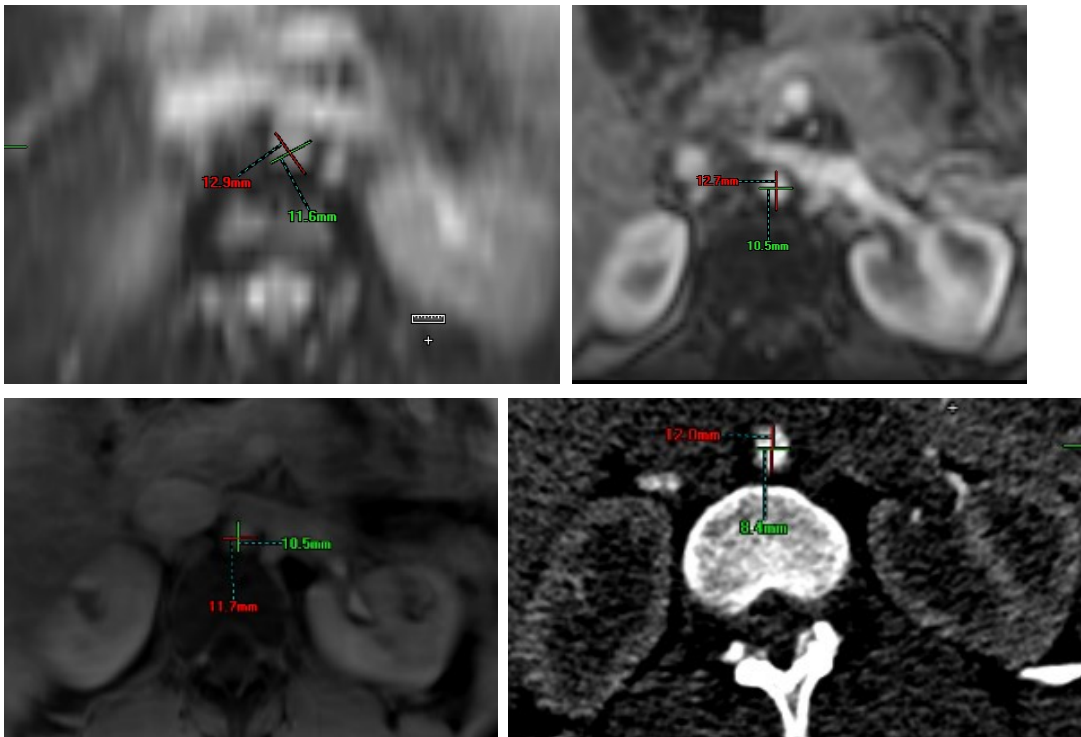


Abbildung 89: Durchmesser infrarenale Aorta desc., Engstelle, SPACE-MRA (l.-o.), CE-MRA (r.-o.), VIBE-MRI (l.-u.), CE-CTA (r.-u.), (MPR-Rekonst.: coronal), Pat. 1  
SPACE-MRA (l.-o.): 1,3 x 1,2cm, CE-MRA (r.-o.): 1,3 x 1,1cm  
VIBE-MRI (l.-u.): 1,2 x 1,1cm CE-CTA (r.-u.): 1,2 x 0,8cm

Die Messwerte für die Engstelle, die postpathologisch entstanden ist, weichen bei der SPACE-MRA, CE-MRA und VIBE-MRI nur geringgradig voneinander ab, trotz dessen, dass die Aorta descendens in der SPACE-MRA und VIBE-MRI nur schlecht zur Umgebung abgrenzbar ist. Stark von den anderen Messwerten abweichend ist die Messung von 0,8cm in der CE-CTA-Aufnahme.

Die Patientin 2 erlitt ebenfalls bei der Entbindung eine Typ B-Aortendissektion, die allerdings nicht ausgeheilt ist und deshalb regelmäßig nachkontrolliert werden muss. Bei ihr konnten die Ergebnisse der QISS-MRA, SPACE-MRA, CE-MRA, VIBE-MRI und CE-CTA verglichen werden.

Für die Patientin 2 wurden zur Durchmessermessung und zum Qualitätsvergleich folgende Messebenen festgelegt:

- Größter Durchmesser der Aorta ascendens
- Vor Abgang der Supraaortalen
- Nach Abgang der Supraaortalen
- Größter Durchmesser der Aorta descendens
- Proximaler Beginn der Pathologie
- Mittlerer Abschnitt der Pathologie
- Distales Ende der Pathologie

Neben diesen Messebenen werden auch die 3D-Rekonstruktion sowie die Bildgebung der Supraaortalen und die Darstellung der gesamten Pathologie beziehungsweise des Entrys zur Beurteilung herangezogen.

3D-Rekonstruktion:

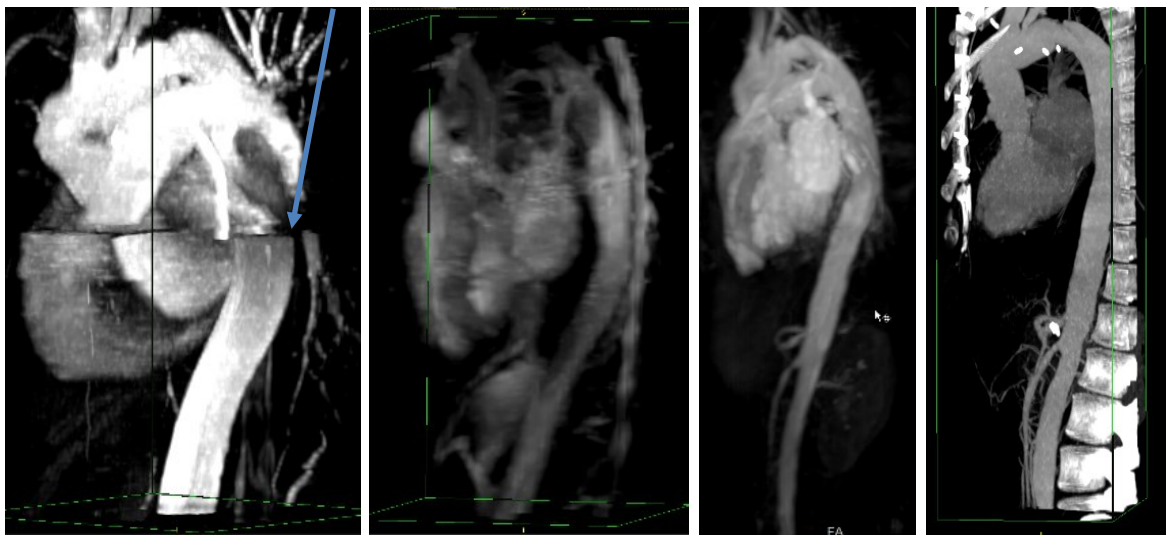


Abbildung 90: MIP-3D-Rekonst., QISS-MRA, SPACE-MRA, CE-MRA, CE-CTA (von links nach rechts), Pat. 2 (VIBE-MRI-3D-Rekonst. fehlt aufgrund zu schlechter Qualität)

Die Aortendissektion kann in diesen 3D-Rekonstruktionen nur schwer erkannt werden. In der QISS-Aufnahme kann man in der Aorta descendens und im Übergang von Arcus aorta zu Aorta descendens eine Dissektionsmembran erahnen, in der CE-MRA- und CE-CTA-3D-Rekonstruktion sieht man die Dissektionsmembran nur am Übergang vom Arcus aortae zur Aorta descendens. In der SPACE-MRA-Aufnahme ist keine Dissektionsmembran erkennbar in der 3D-Rekonstruktion.

In der QISS-3D-Rekonstruktion fällt, wie bei den Probandinnen-Aufnahmen auch, die Linie im Bereich der Aorta descendens auf (Pfeil), an der die komplette Signalauslöschung an eben dieser Linie wieder endet.

Darstellung der Pathologie:

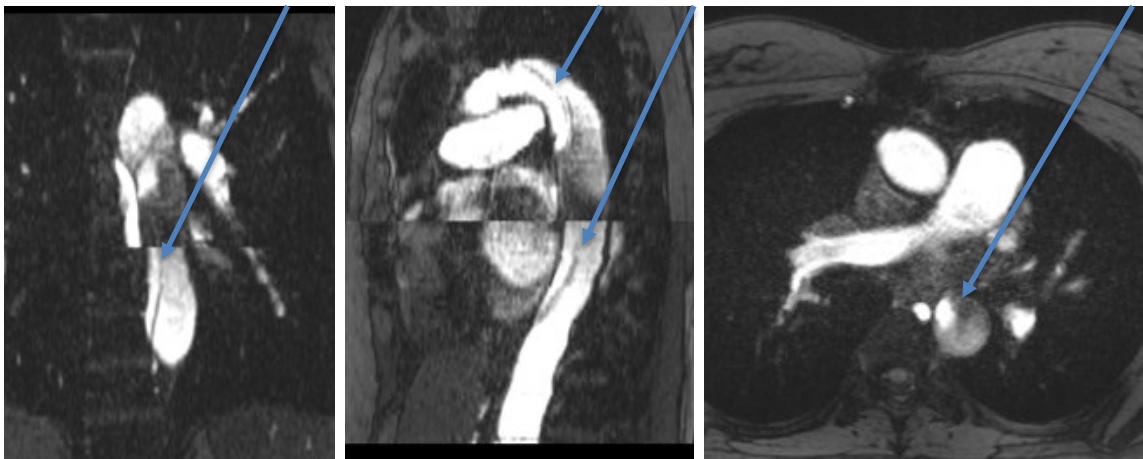


Abbildung 91: MPR-Rekonstruktion, QISS-MRA, Pathologie (Pfeil), Pat. 2  
links: cor. E., mittig: sag. E., rechts: tra. E.

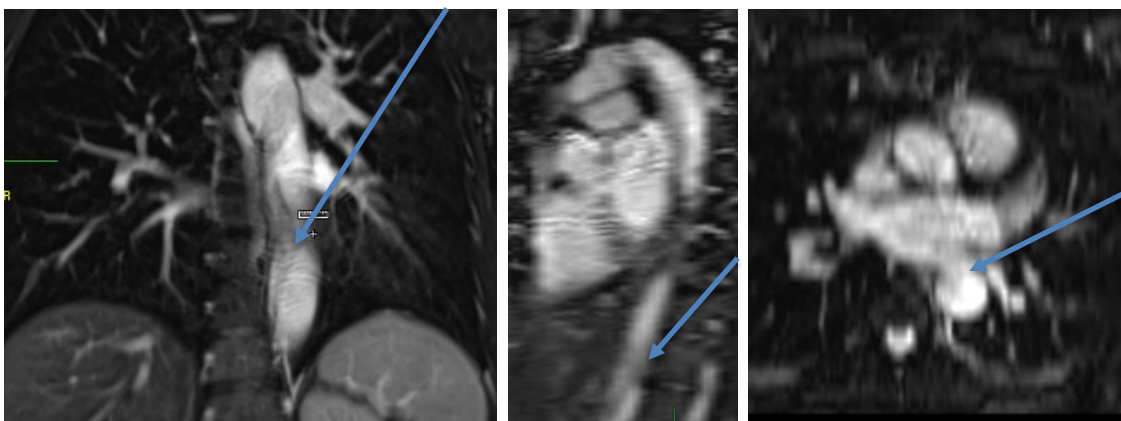


Abbildung 92: MPR-Rekonstruktion, SPACE-MRA, Pathologie (Pfeil), Pat. 2  
links: cor. E., mittig: sag. E., rechts: tra. E.

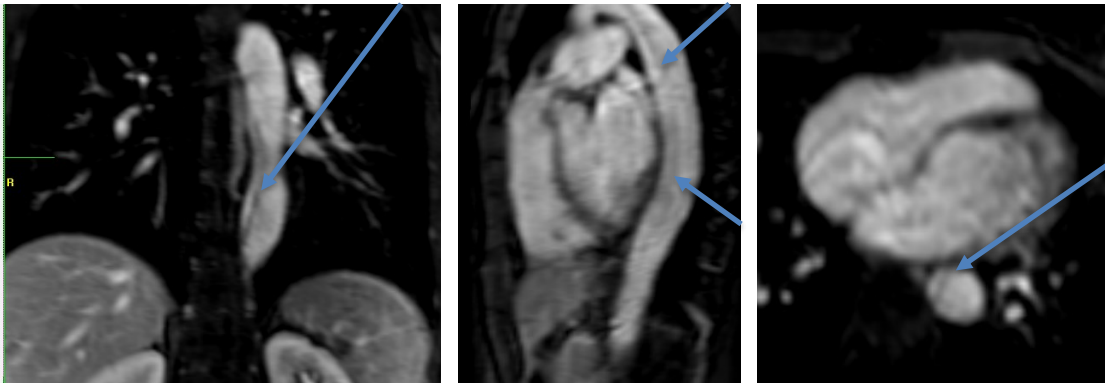


Abbildung 93: MPR-Rekonstruktion, CE-MRA, Pathologie (Pfeil), Pat. 2  
links: cor. E., mittig: sag. E., rechts: tra. E.

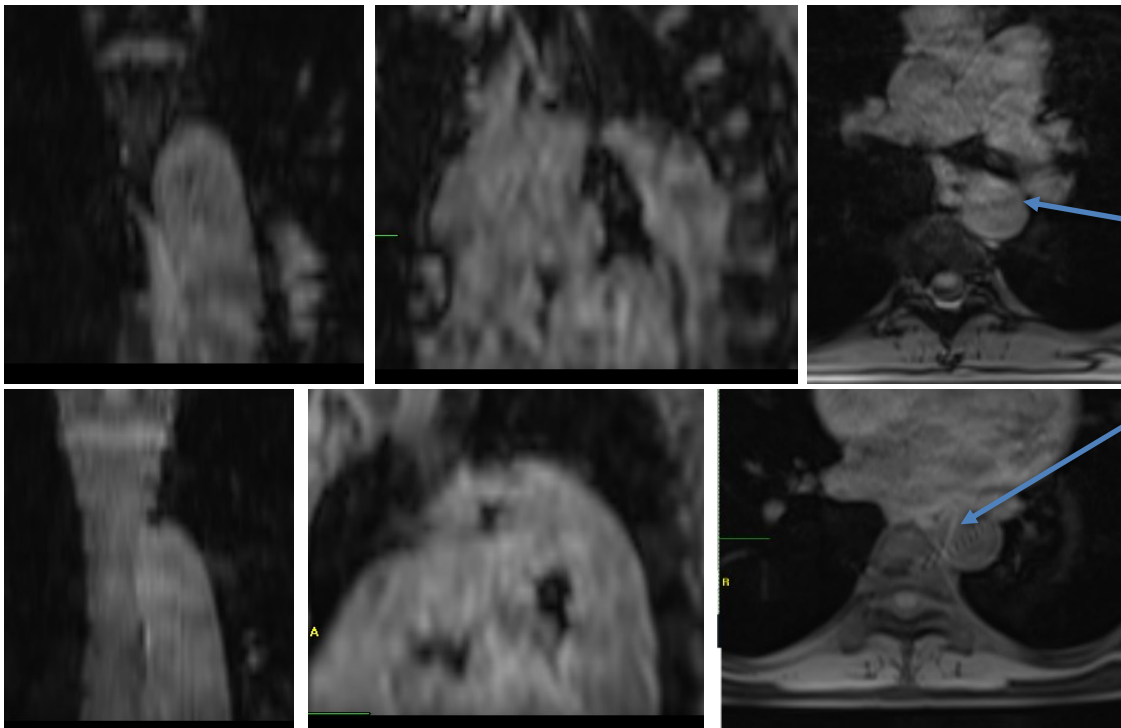


Abbildung 94: MPR-Rekonstruktionen, VIBE-MRI, Pathologie (Pfeil), Pat. 2  
links: cor. E., mittig: sag. E., rechts: tra. E.

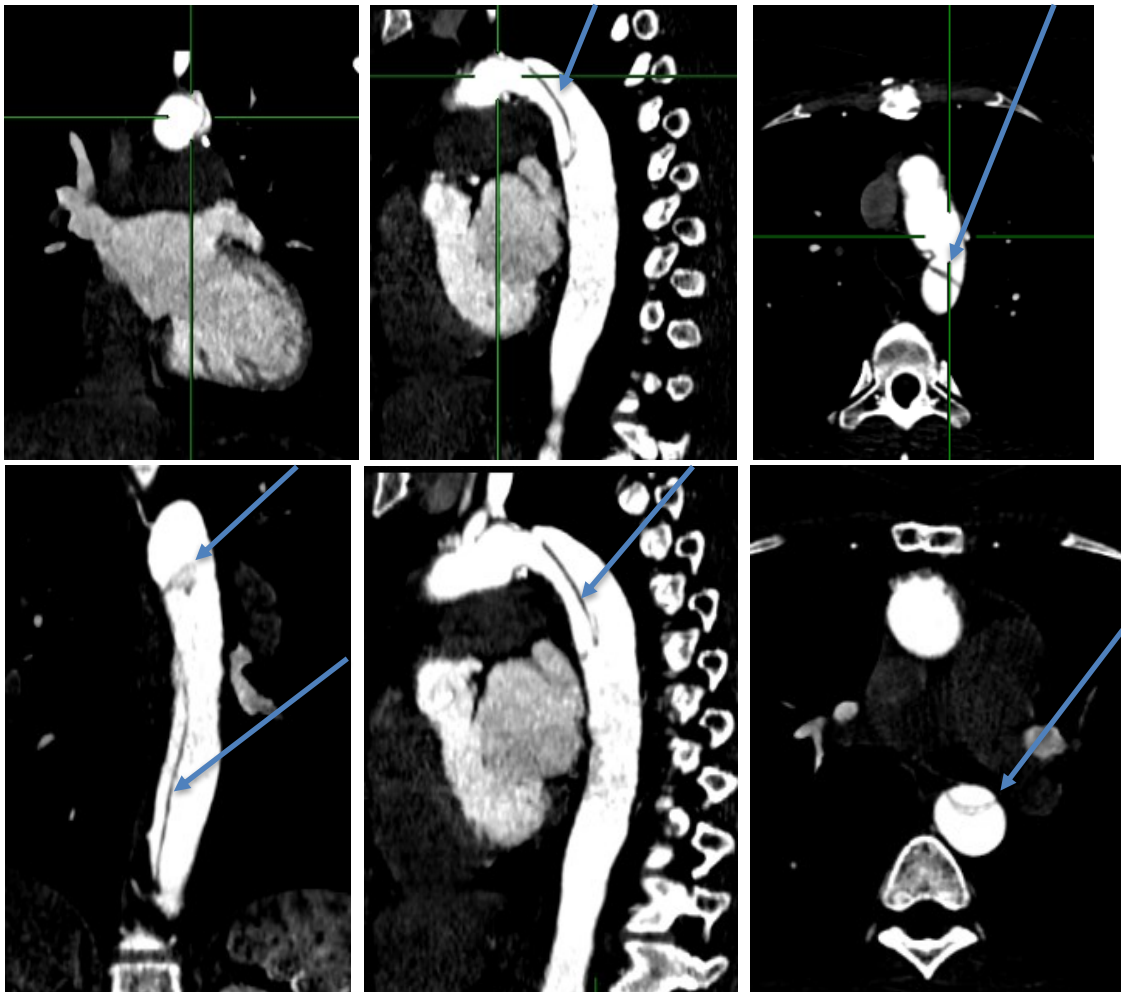


Abbildung 95: MPR-Rekonstruktionen, CE-CTA, Pathologie (Pfeil), Pat. 2  
links: cor. E., mittig: sag. E., rechts: tra. E.

In den QISS-Aufnahmen ist weiterhin die Problematik der Signalauslöschungen vorhanden, die Dissektionsmembran kann dennoch in allen drei Ebenen gut erkannt werden. Dies gilt auch für die SPACE-MRA-, CE-MRA- und CE-CTA-Aufnahmen. Bei den VIBE-MRI-Aufnahmen kann die Dissektionsmembran nur in der Transversalebene erkannt werden.

„Größter Durchmesser der Aorta ascendens“:

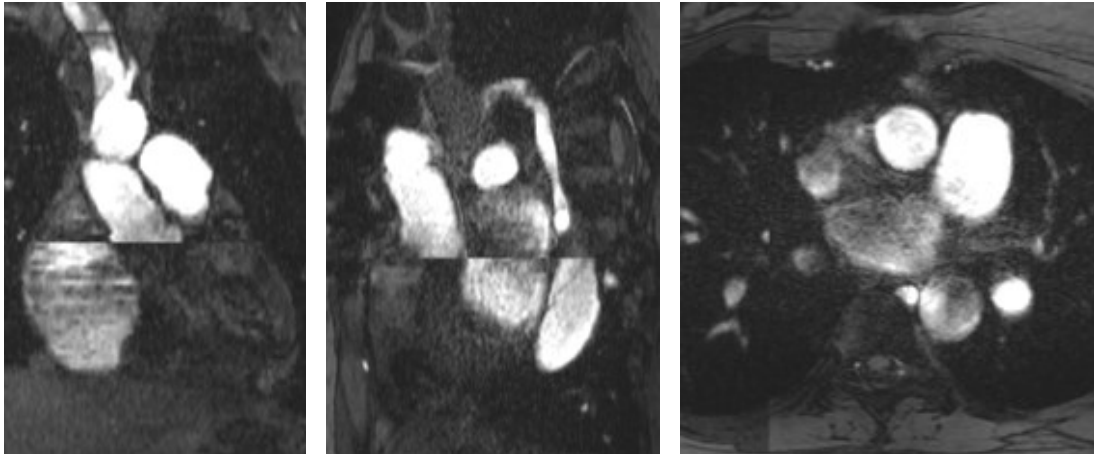


Abbildung 96: MPR-Rekonstruktion, QISS-MRA, Aorta ascendens, Pat. 2  
links: cor. E., mittig: sag. E., rechts: tra. E.

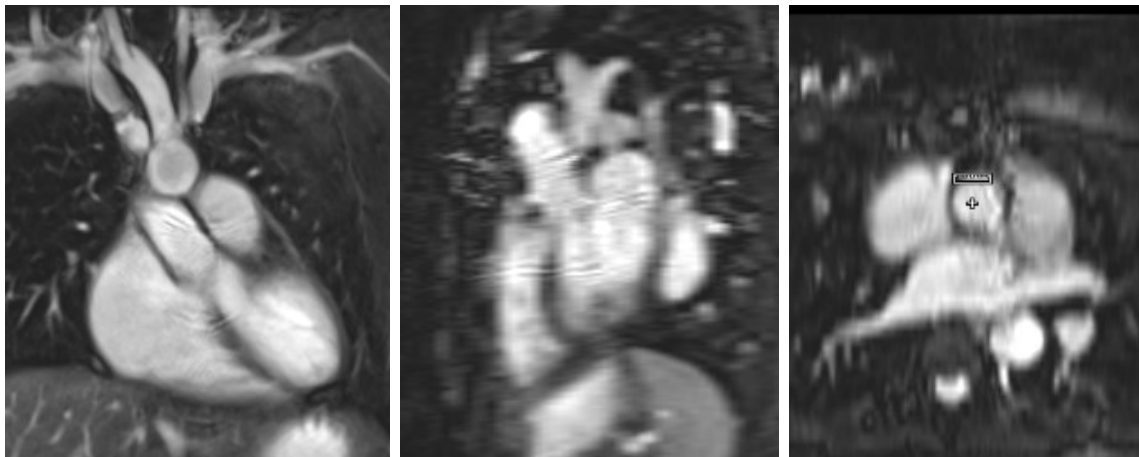


Abbildung 97: MPR-Rekonstruktion, SPACE-MRA, Aorta ascendens, Pat. 2 links: cor. E.,  
mittig: sag. E., rechts: tra. E.

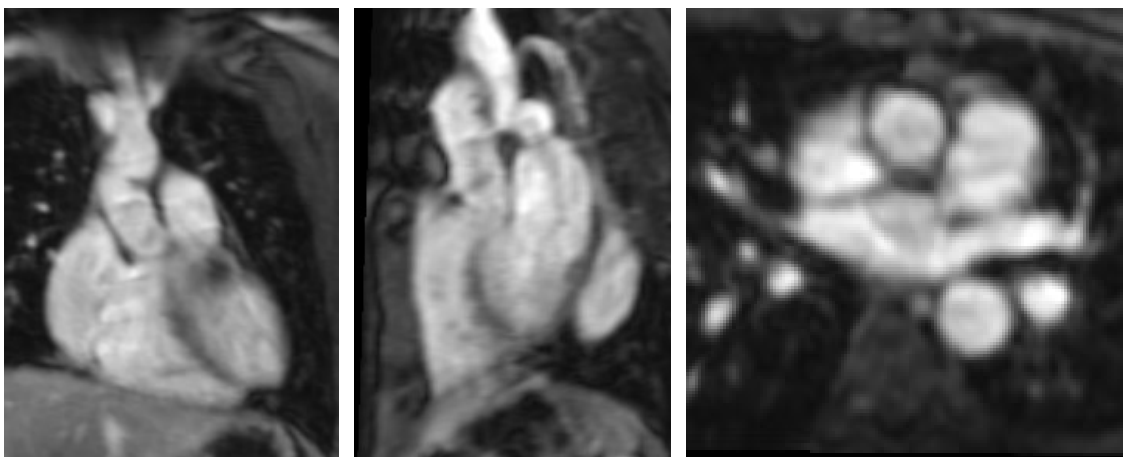


Abbildung 98: MPR-Rekonstruktion, CE-MRA, Aorta ascendens, Pat. 2  
links: cor. E., mittig: sag. E., rechts: tra. E.

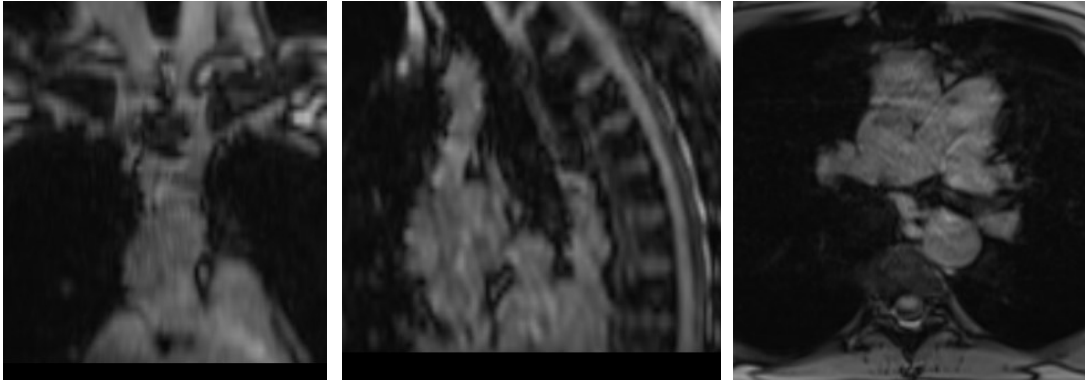


Abbildung 99: MPR-Rekonstruktion, VIBE-MRI, Aorta ascendens, Pat. 2  
links: cor. E., mittig: sag. E., rechts: tra. E.



Abbildung 100: MPR-Rekonstruktion, CE-CTA, Aorta ascendens, Pat. 2  
links: corE., mittig: sag. E., rechts: tra. E.

Die QISS-MRA und SPACE-MRA sind von ähnlichen minimalen Inhomogenitäten geprägt wie die CE-MRA. Dies macht deren Qualitäten also vergleichbar. Die VIBE-MRI hingegen liefert für diese Patientin und Ebene qualitativ schlecht und kaum beurteilbare Aufnahmen.

Durchmesservergleich:

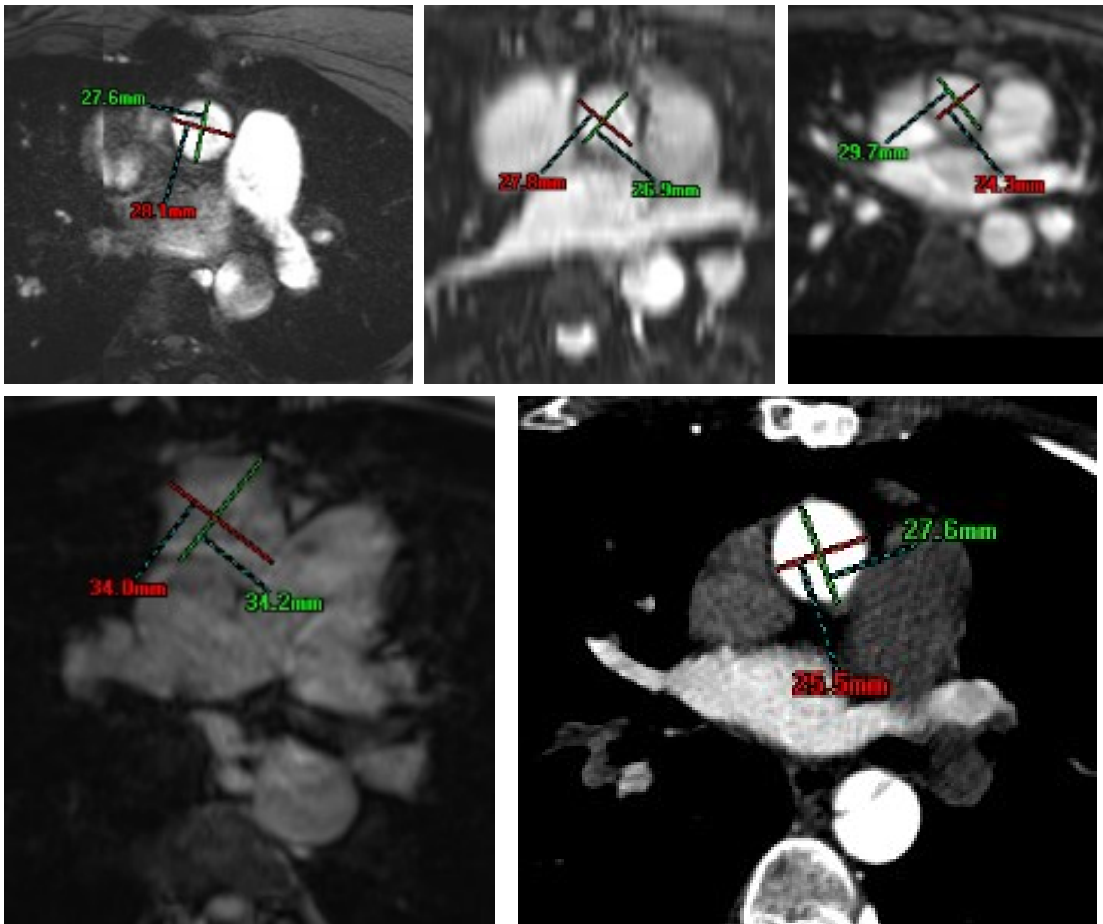


Abbildung 101: Durchmesser Aorta asc., QISS-MRA (l.-o.), SPACE-MRA (m.-o.), CE-MRA (r.-o.), VIBE-MRI (l.-u.), CE-CTA (r.-u.), (MPR-Rekonst.: transversal), Pat. 2  
QISS-MRA (l.-o.): 2,8 x 2,8cm, SPACE-MRA (m.-o.): 2,7 x 2,7cm, CE-MRA (r.-o.): 3,0 x 2,4cm, VIBE-MRI (l.-u.): 3,4 x 3,4cm, CE-CTA (r.-u.): 2,8cm x 2,6cm

Auffällig hierbei sind die deutlich größeren Durchmesserwerte der VIBE-MRI, die womöglich durch die schlechte Abgrenzbarkeit zum Nachbargewebe bedingt sind. Die Messwerte der anderen Sequenzen hingegen weichen nicht stark voneinander ab. Die Aortenwand ist dort immer gut abgegrenzt dargestellt. Lediglich der kleinere der beiden Messwerte weicht bei der CE-MRA etwas nach unten ab.

„Vor dem Abgang der Supraaortalen“:

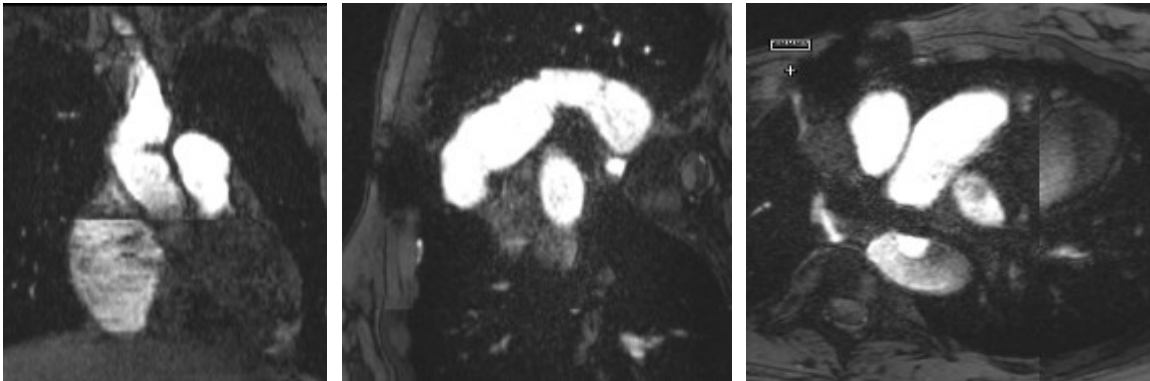


Abbildung 102: MPR-Rekonstruktion, QISS-MRA, Aorta ascendens, vor Abgang der Supraaortalen, Pat. 2

links: cor. E., mittig: schräg-sag. E., rechts: schräg-tra. E.

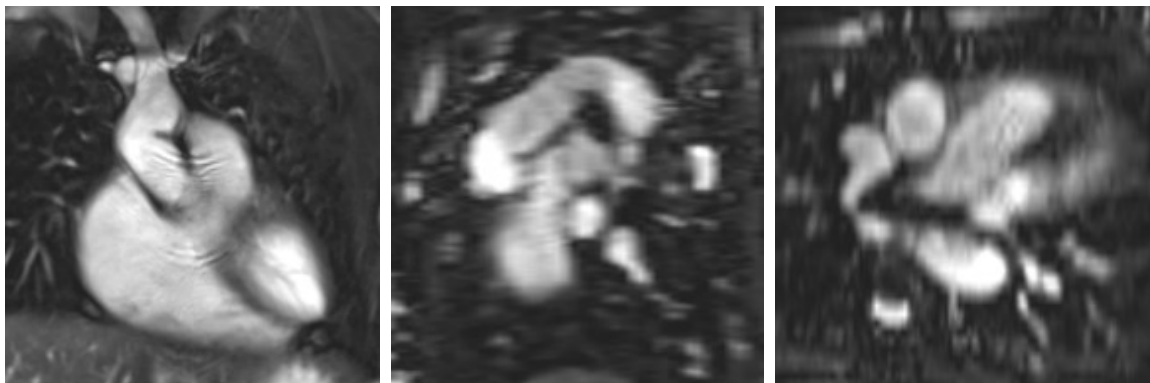


Abbildung 103: MPR-Rekonstruktion, SPACE-MRA, Aorta ascendens, vor Abgang der Supraaortalen, Pat. 2

links: cor. E., mittig: schräg-sag. E., rechts: schräg-tra. E.

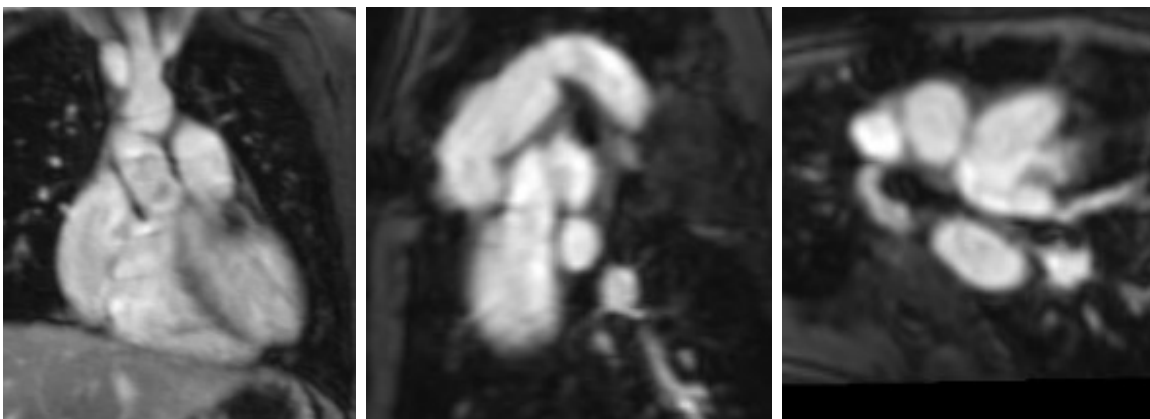


Abbildung 104: MPR-Rekonstruktion, CE-MRA, Aorta ascendens, vor Abgang der Supraaortalen, Pat. 2

links: cor. E., mittig: schräg-sag. E., rechts: schräg-tra. E.

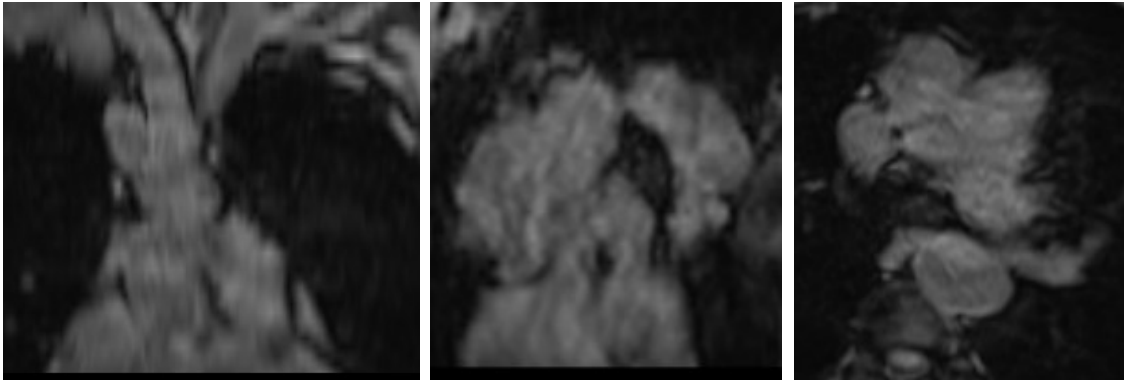


Abbildung 105: MPR-Rekonstruktion, VIBE-MRI, Aorta ascendens, vor Abgang der Supraaortalen, Pat. 2

links: cor. E., mittig: schräg-sag. E., rechts: schräg-tra. E.

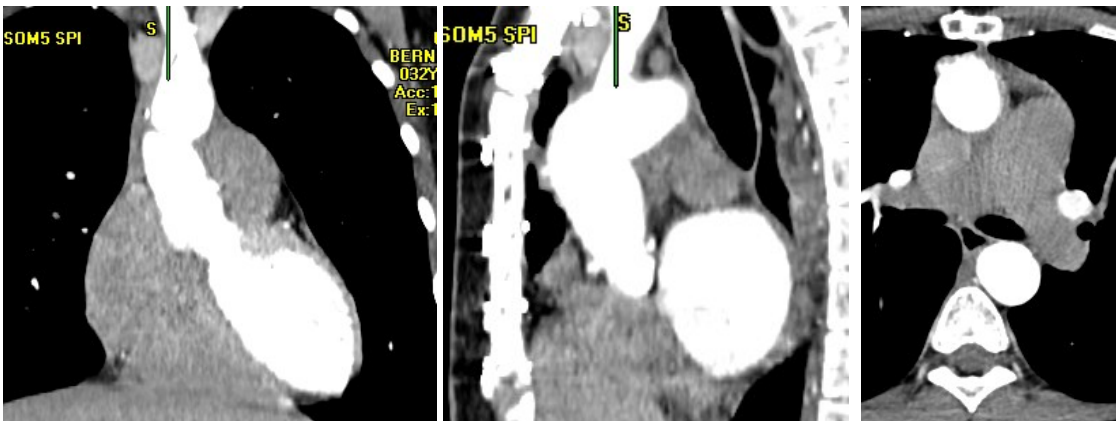


Abbildung 106: MPR-Rekonstruktion, CE-CTA, Aorta ascendens, vor Abgang der Supraaortalen, Pat. 2

links: cor. E., mittig: schräg-sag. E., rechts: schräg-tra. E.

Die SPACE-MRA und VIBE-MRI liefern keine qualitativ hochwertigen Ergebnisse, vor allem in der SPACE-Sequenz liegen in dieser Messebene ausgeprägte Inhomogenitäten vor, die die Beurteilbarkeit stark einschränken.

Durchmesservergleich:

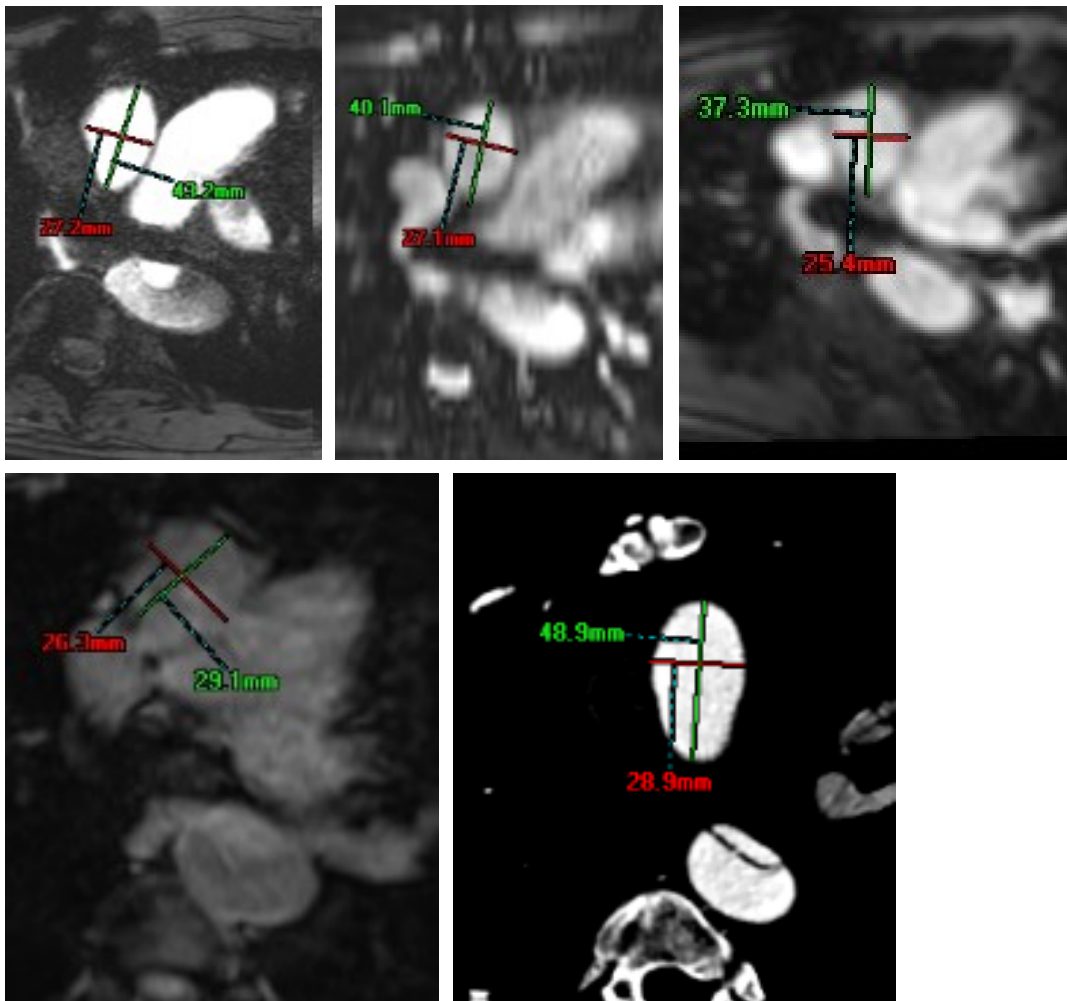


Abbildung 107: Durchmesser Aorta asc., vor Abgang der Supraaortalen, QISS-MRA (l.-o.), SPACE-MRA (m.-o.), CE-MRA (r.-o.), VIBE-MRI (l.-u.), CE-CTA (r.-u.), (MPR-Rekonst.: schräg-transversal), Pat. 2

QISS-MRA (l.-o.): 4,3 x 2,7cm, SPACE-MRA (m.-o.): 4,0 x 2,7cm, CE-MRA (r.-o.): 3,7 x 2,5 cm, VIBE-MRI (l.-u.): 2,9 x 2,6cm, CE-CTA (r.-u.): 4,9 x 2,9cm

Die Messwerte der QISS-MRA, SPACE-MRA und CE-MRA liegen relativ nah beieinander. Stark abweichend sind jeweils der größere der beiden Messwerte bei der VIBE-MRI- und der CE-CTA-Aufnahme.

Supraaortale Gefäße (wichtige Messebene zur Beurteilung der Ausbreitung der Pathologie auf abgehende Gefäße):

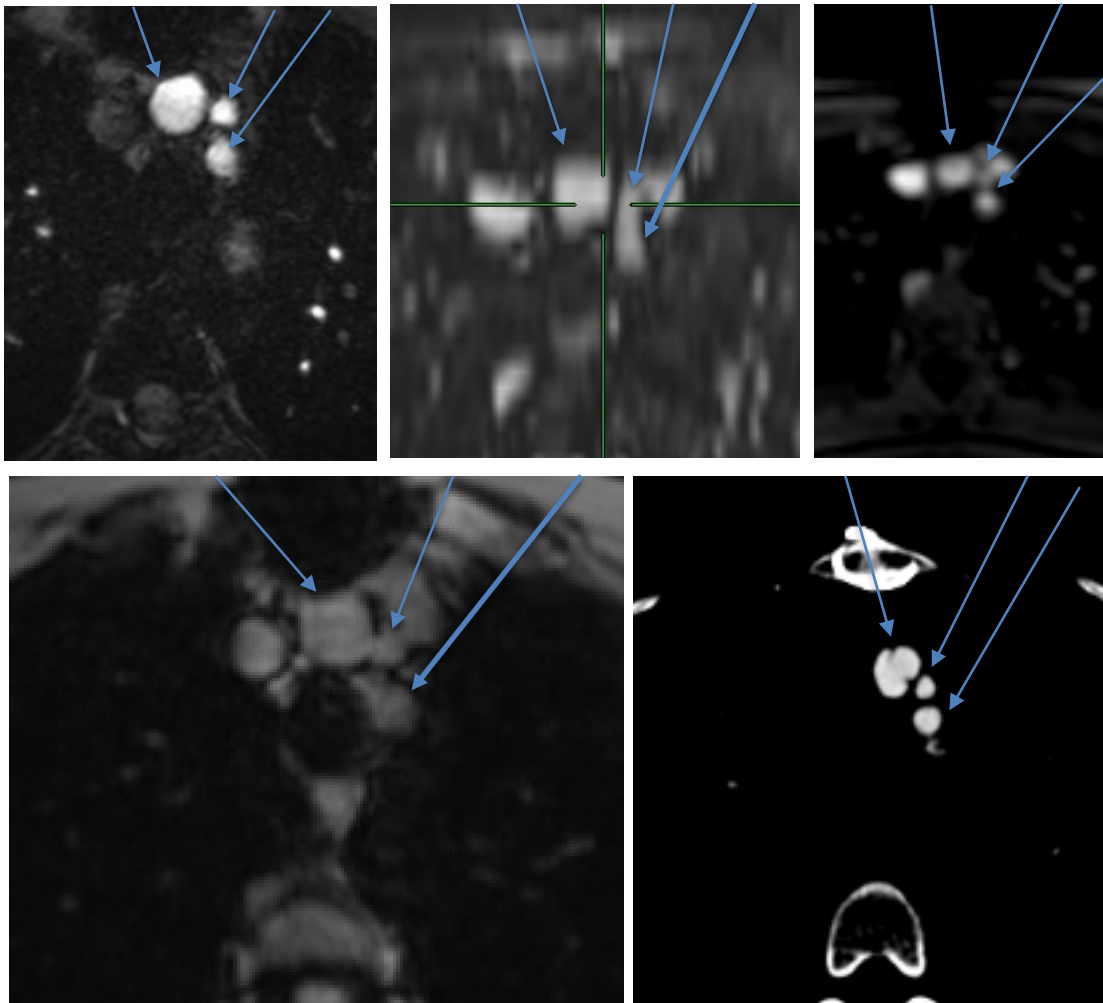


Abbildung 108: Supraaortale Gefäße in der Transversalebene (MPR-Rekonst.), QISS-MRA (l.-o.), SPACE-MRA (m.-o.), CE-MRA (r.-o.), VIBE-MRI (l.-u.), CE-CTA (r.-u.), Pat. 2 Truncus brachiocephalicus (l. Pfeil), Arteria carotis sinistra (m. Pfeil), Arteria subclavia sinistra (r. Pfeil)

Die supraaortalen Gefäße sind in der QISS-MRA- und CE-CTA-Aufnahme am besten zur Umgebung abgrenzbar. Schlecht abgegrenzt wiederum sind sie in der SPACE-MRA- und CE-MRA-Aufnahme. Die CE-CTA-Aufnahme würde eine Dissektionsmembran im Truncus brachiocephalicus vermuten lassen. Da die Aortenpathologie laut 3D-Rekonstruktion erst im Bereich des Übergangs von Arcus aortae zu Aorta descendens beginnt und in den anderen Aufnahmen der Supraaortalen keine Dissektionsmembran im Truncus brachiocephalicus zu erkennen ist, geht man von einem Artefakt in der CE-CTA-Aufnahme aus.

„Nach dem Abgang der Supraaortalen“:

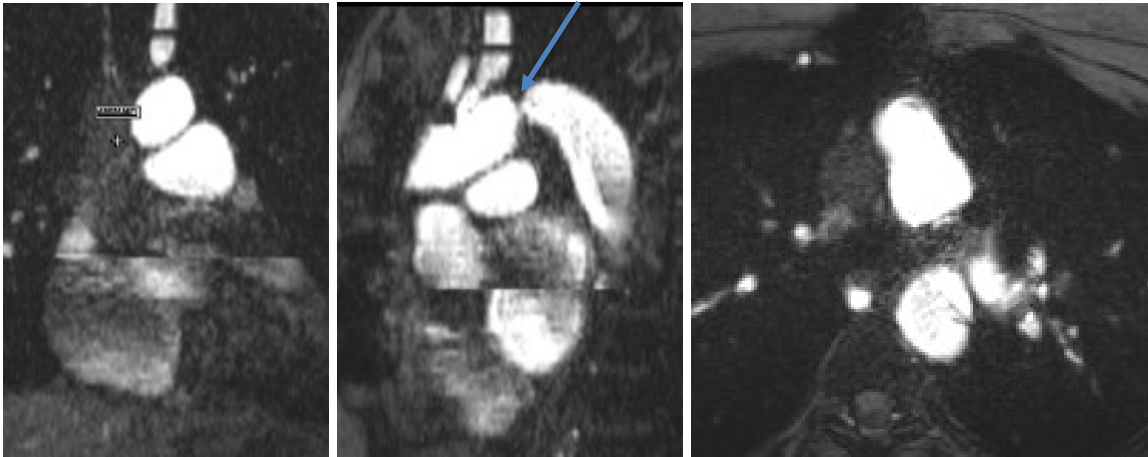


Abbildung 109: MPR-Rekonstruktion, QISS-MRA, Arcus aortae, nach Abgang der Supraaortalen, Pat. 2

links: cor. E., mittig: sag. E., rechts: tra. E.

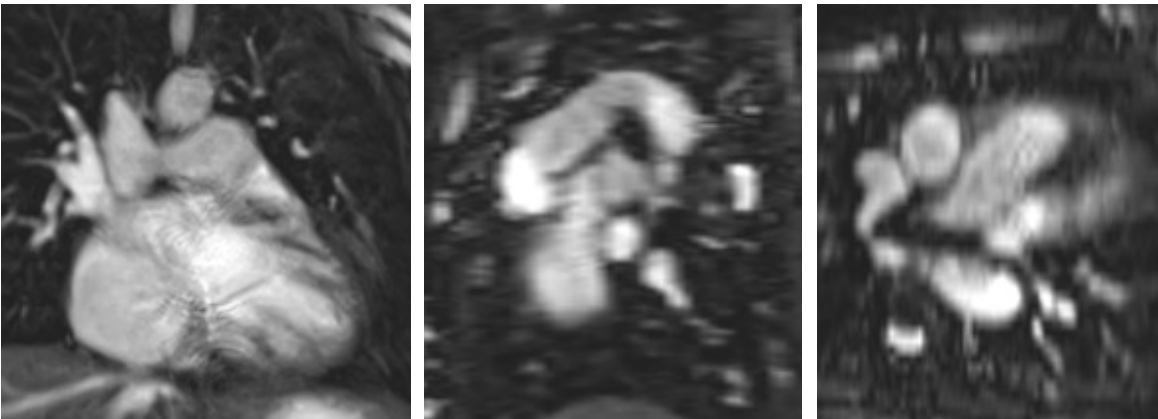


Abbildung 110: MPR-Rekonstruktion, SPACE-MRA, Arcus aortae, nach Abgang der Supraaortalen, Pat. 2

links: cor. E., mittig: sag. E., rechts: tra. E.

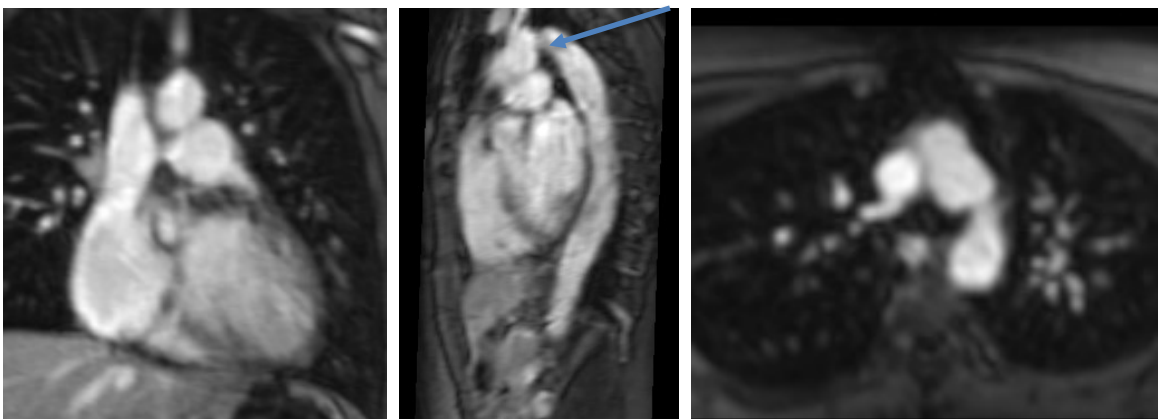


Abbildung 111: MPR-Rekonstruktion, CE-MRA, Arcus aortae, nach Abgang der Supraaortalen, Pat. 2

links: cor. E., mittig: sag. E., rechts: tra. E.

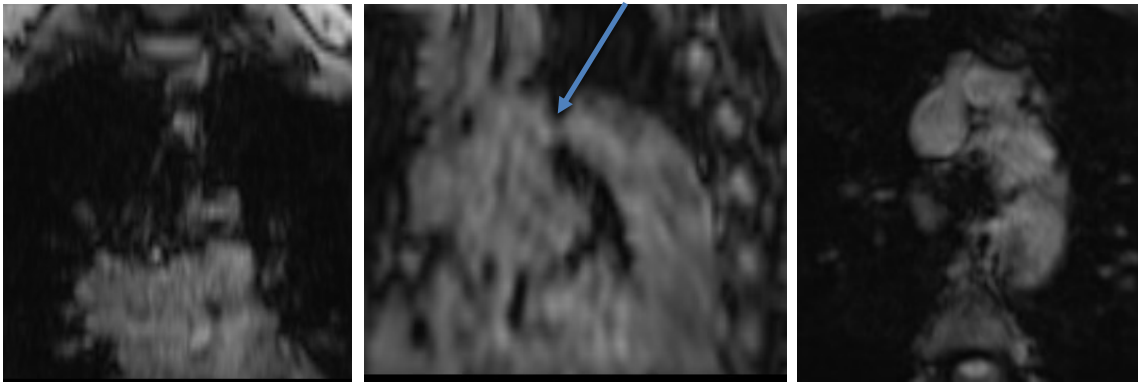


Abbildung 112: MPR-Rekonstruktion, VIBE-MRI, Arcus aortae, nach Abgang der Supraaortalen, Pat. 2

links: cor. E., mittig: sag. E., rechts: tra. E.

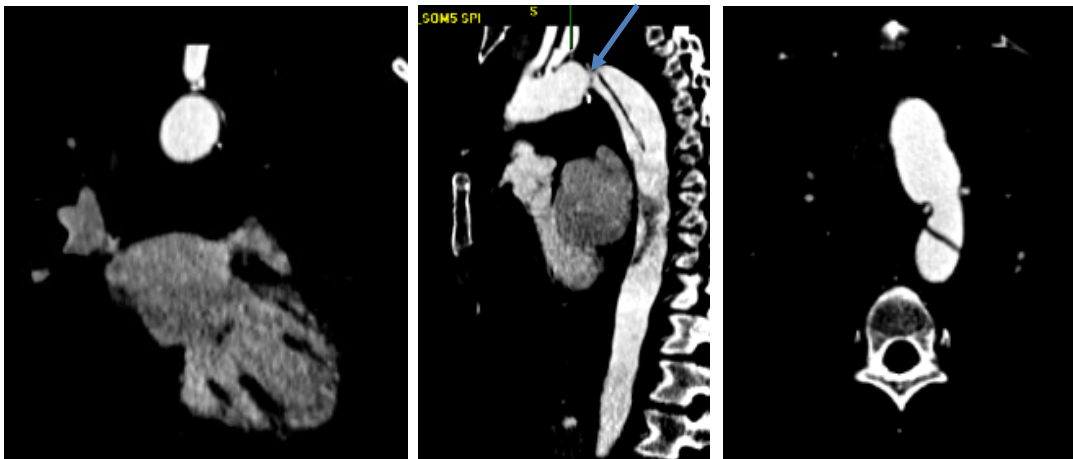


Abbildung 113: MPR-Rekonstruktion, CE-CTA, Arcus aortae, nach Abgang der Supraaortalen, Pat. 2

links: cor. E., mittig: sag. E., rechts: tra. E.

In der Messebene „nach Abgang der Supraaortalen“ ist in keiner der Aufnahmen eine Dissektionsmembran erkennbar (siehe coronale Ebene). Auffallend in diesen Aufnahmen ist die Engstelle im Arcus aortae nach Abgang der Supraaortalen (Pfeil), diese erkennt man bei der QISS-MRA-, CE-MRA-, VIBE-MRI- und CE-CTA-Bildgebung.

Durchmesservergleich:

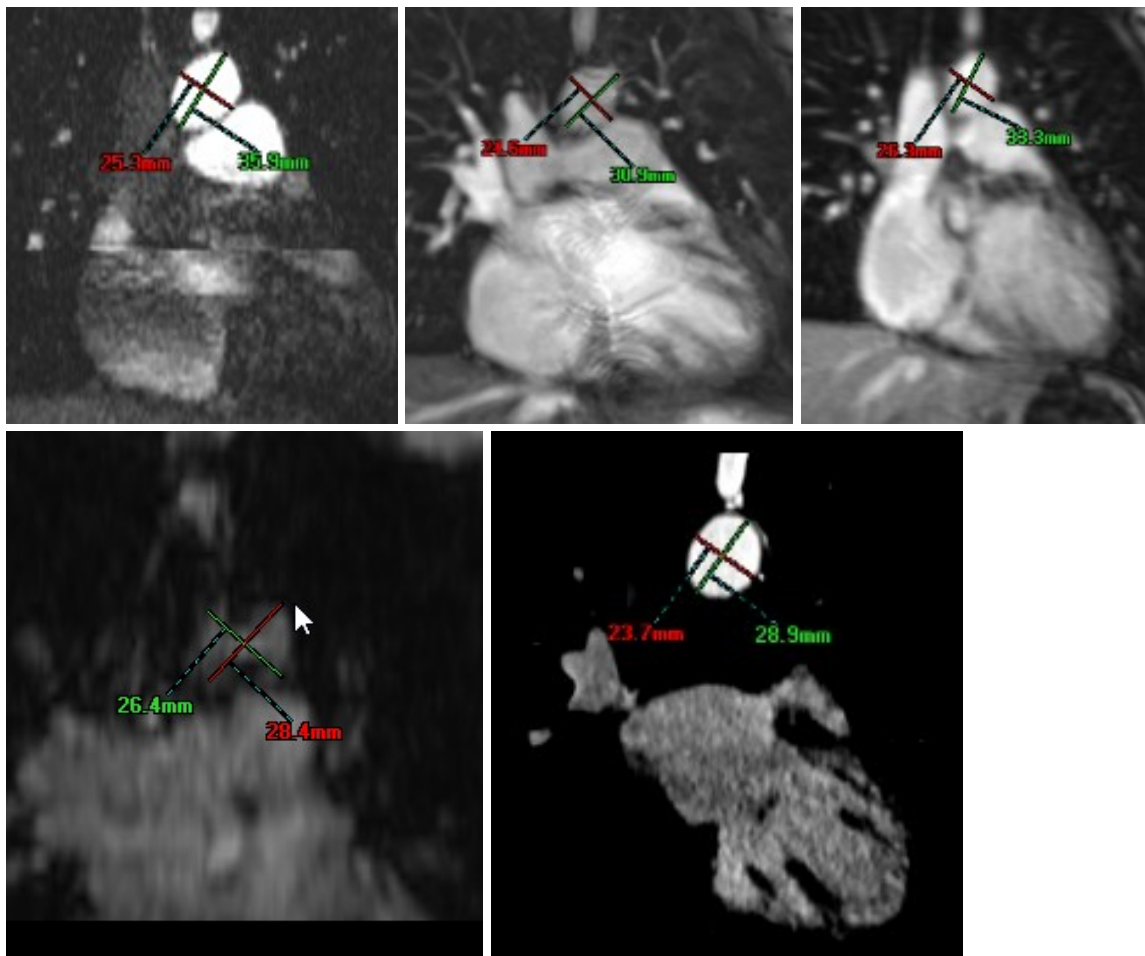


Abbildung 114: Durchmesser Arcus aortae, nach Abgang der Supraaortalen, QISS-MRA (l.-o.), SPACE-MRA (m.-o.), CE-MRA (r.-o.), VIBE-MRI (l.-u.), CE-CTA (r.-u.), (MPR-Rekonst.: coronal), Pat. 2

QISS-MRA (l.-o.): 3,6 x 2,5cm, SPACE-MRA (m.-o.): 3,1 x 2,5cm, CE-MRA (r.-o.): 3,3 x 2,6cm, VIBE-MRI (l.-u.): 2,8 x 2,6cm, CE-CTA (r.-u.): 2,9 x 2,4cm

Der größere der beiden Messwerte variiert zwischen 3,6 und 2,9cm, bei dem anderen Messwert liegen die Ergebnisse näher aneinander, sie variieren zwischen 2,4 und 2,6cm. Die Aortenwand ist in jeder Aufnahme, außer in der VIBE-MRI-Aufnahme, scharf zur Umgebung abgegrenzt.

Beginn der Pathologie, mit auftretender Dissektionsmembran im Aortenlumen:

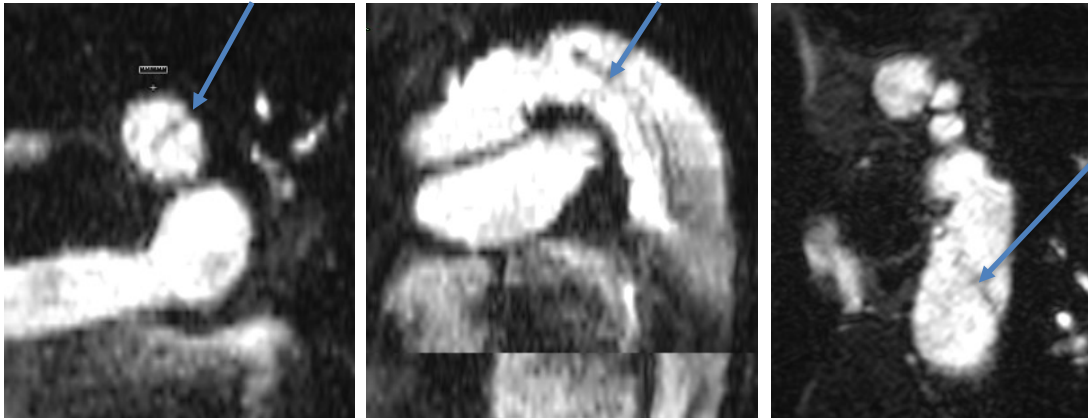


Abbildung 115: MPR-Rekonstruktion, QISS-MRA, Arcus aortae, Beginn der Pathologie, Pat. 2

links: schräg-cor. E., mittig: sag. E., rechts: schräg-tra. E.

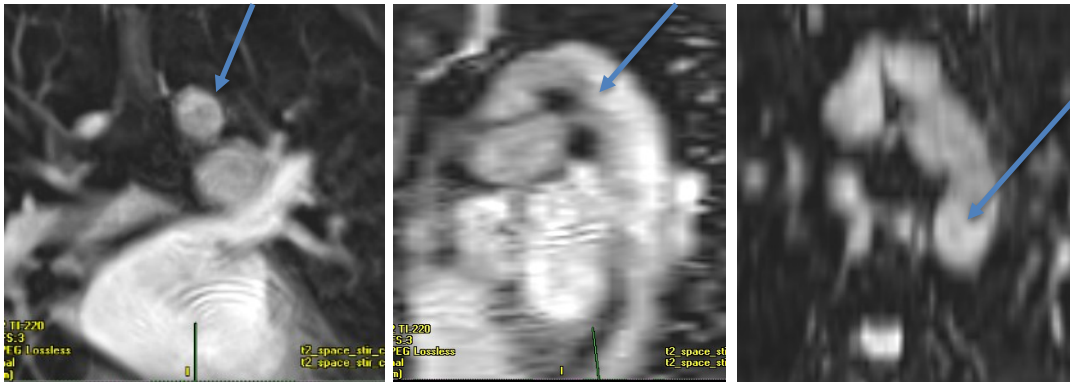


Abbildung 116: MPR-Rekonstruktion, SPACE-MRA, Arcus aortae, Beginn der Pathologie, Pat. 2

links: schräg-cor. E., mittig: sag. E., rechts: schräg-tra. E.

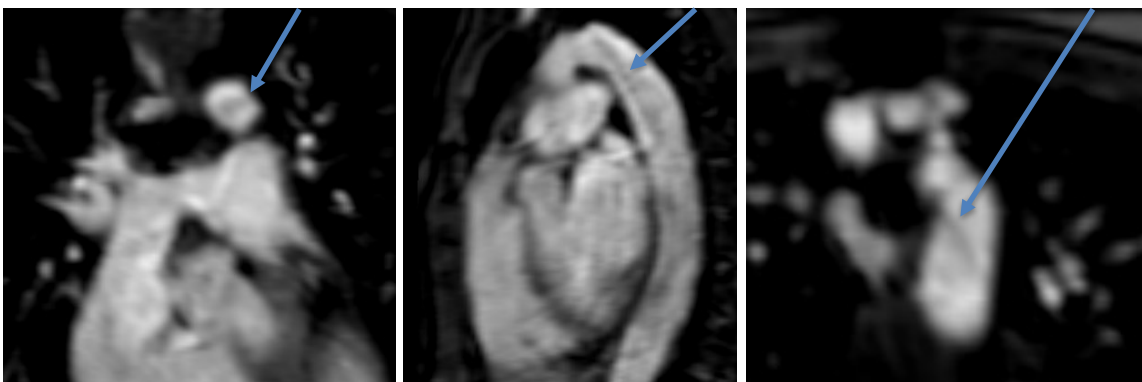


Abbildung 117: MPR-Rekonstruktion, CE-MRA, Arcus aortae, Beginn der Pathologie, Pat. 2

links: schräg-cor. E., mittig: sag. E., rechts: schräg-tra. E.

Da in der VIBE-MRI-Aufnahme der Beginn der Pathologie aufgrund der schlechten Qualität nicht erkennbar ist, wurde in diesem Fall auf einen Vergleich mit der VIBE-MRI verzichtet.

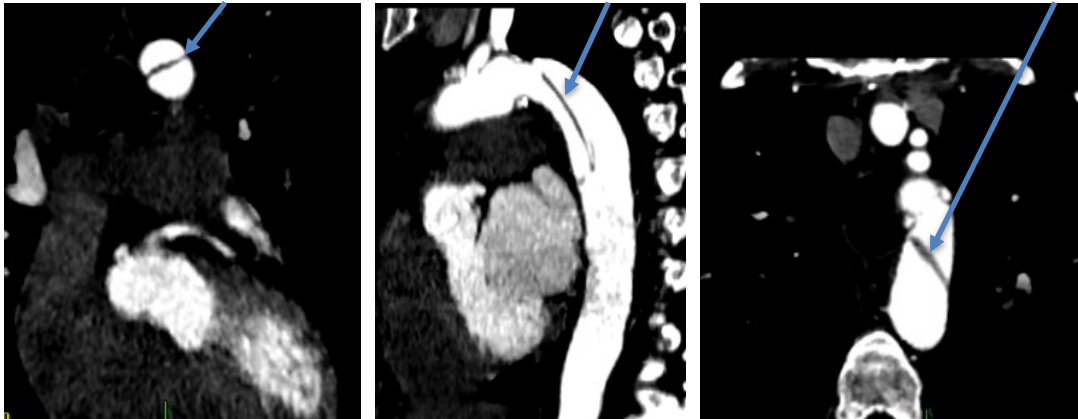


Abbildung 118: MPR-Rekonstruktion, CE-CTA, Arcus aortae, Beginn der Pathologie, Pat. 2  
links: schräg-cor. E., mittig: sag. E., rechts: schräg-tra. E.

Bei dieser Ebene ist vor allem die qualitative Beurteilung wichtig. Vor allem sollte man überprüfen, ob die Dissektionsmembran in allen Sequenzen erkannt werden kann. In den Aufnahmen von allen 4 Sequenzen kann die Dissektionsmembran (Pfeil) erkannt werden, am schwersten allerdings ist es bei der SPACE-Sequenz. Dort ist die Dissektionsmembran schlecht vom restlichen Aortenlumen abgrenzbar. Ähnliches gilt für die Aufnahmen mit der CE-MRA-Sequenz, dort ist die Dissektionsmembran zwar besser erkennbar, aber im Vergleich zur QISS-MRA und CE-CTA ist die Abgrenzbarkeit der Membran auch bei der CE-MRA schlecht.

Durchmesservergleich:

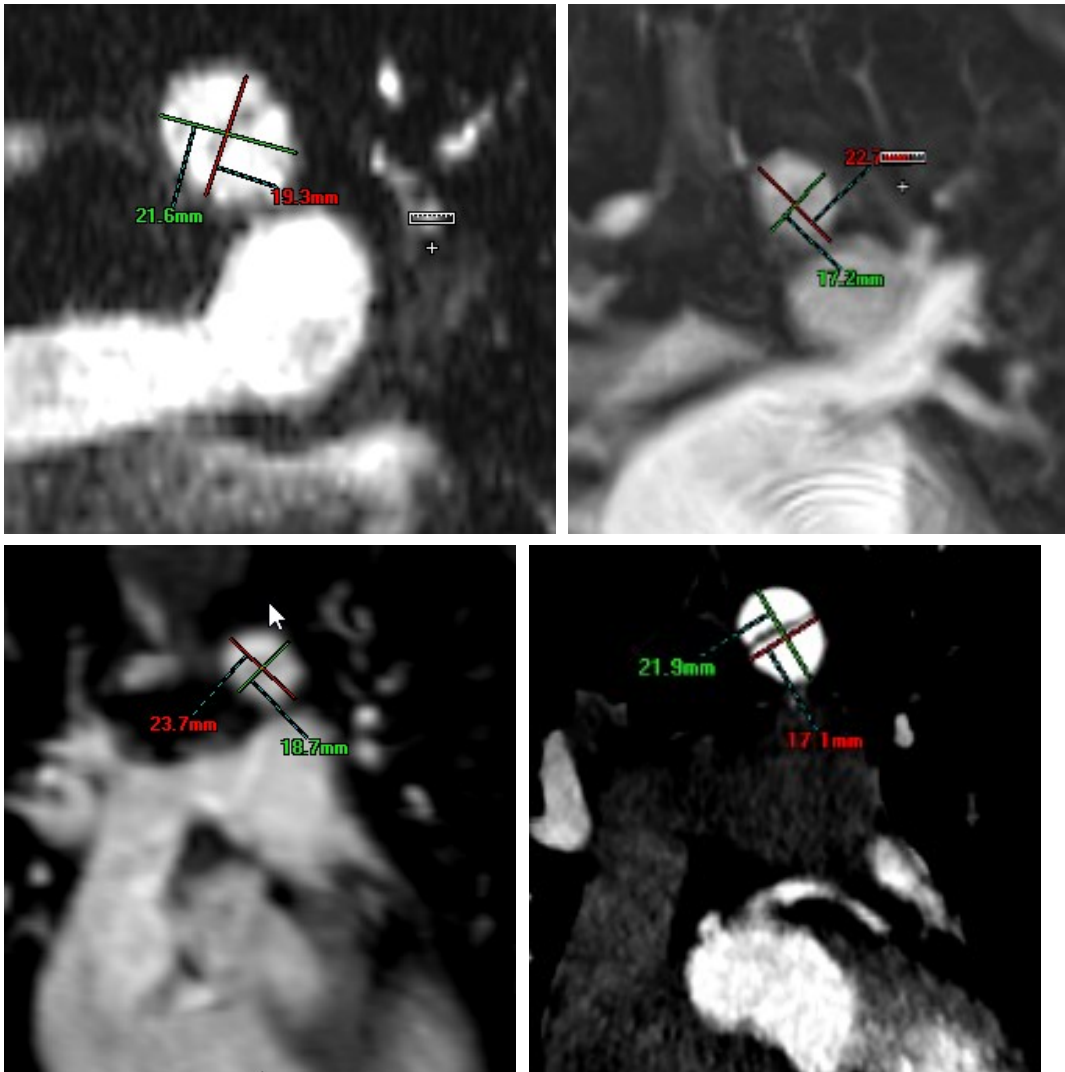


Abbildung 119: Durchmesser Arcus aortae, Beginn der Pathologie, QISS-MRA (l.-o.), SPACE-MRA (r.-o.), CE-MRA (l.-u.), CE-CTA (r.-u.), (MPR-Rekonst.: coronal), Pat. 2  
QISS-MRA (l.-o.): 2,2 x 1,9cm, SPACE-MRA (r.-o.): 2,3 x 1,7cm  
CE-MRA (l.-u.): 2,4 x 1,9cm, CE-CTA (r.-u.): 2,2 x 1,7cm

Der Durchmesservergleich ist zwar für diese Ebene weniger wichtig, dennoch ist aufgrund der guten Qualität in allen Sequenzen eine Durchmessermessung gut möglich gewesen, sodass auch die Ergebnisse der Messungen für alle Sequenzen ähnlich sind.

„Größter Durchmesser Aorta descendens“:

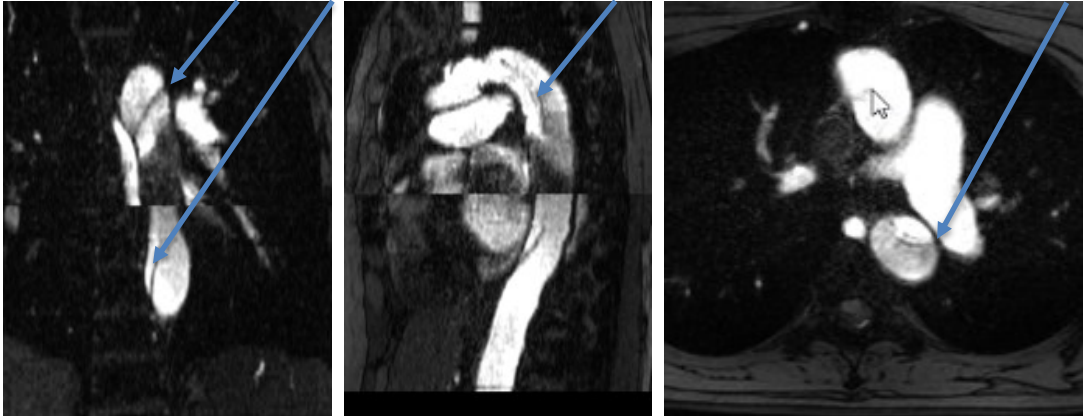


Abbildung 120: MPR-Rekonstruktion, QISS-MRA, Aorta desc., Pat. 2  
links: cor. E., mittig: sag. E., rechts: tra. E.

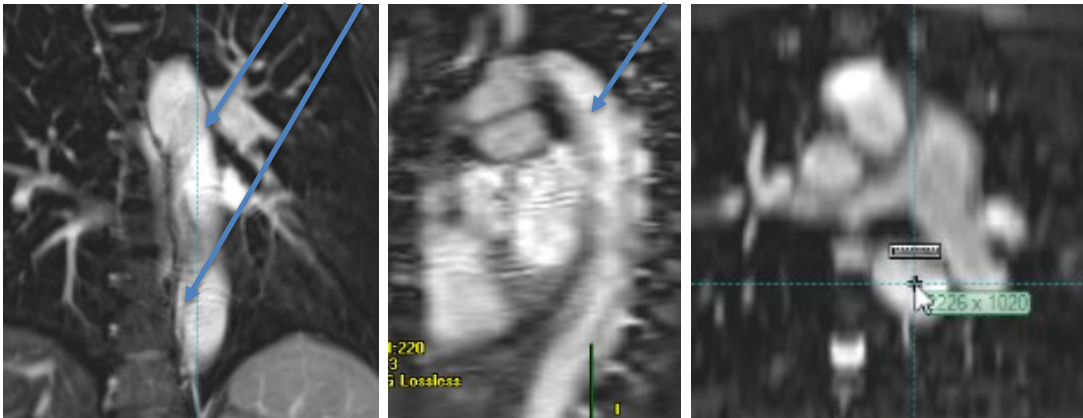


Abbildung 121: MPR-Rekonstruktion, SPACE-MRA, Aorta desc., Pat. 2  
links: cor. E., mittig: sag. E., rechts: tra. E.

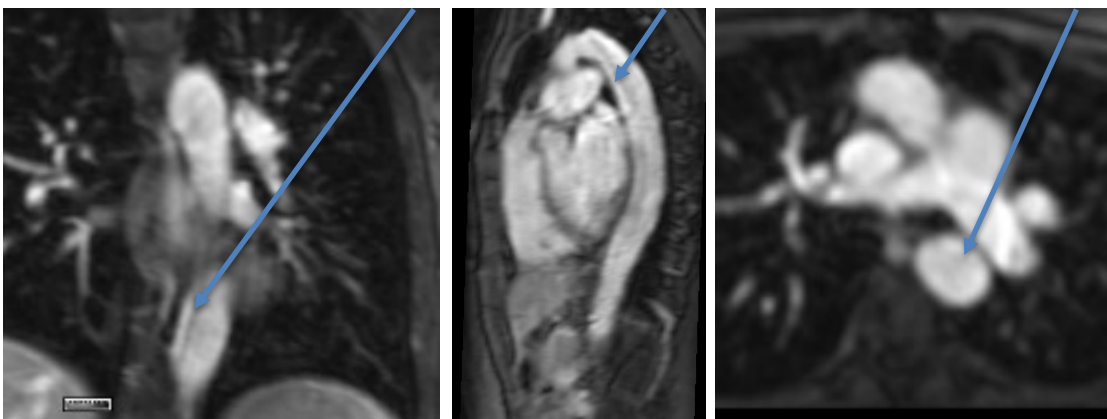


Abbildung 122: MPR-Rekonstruktion, CE-MRA, Aorta desc., Pat. 2  
links: cor. E., mittig: sag. E., rechts: tra. E.

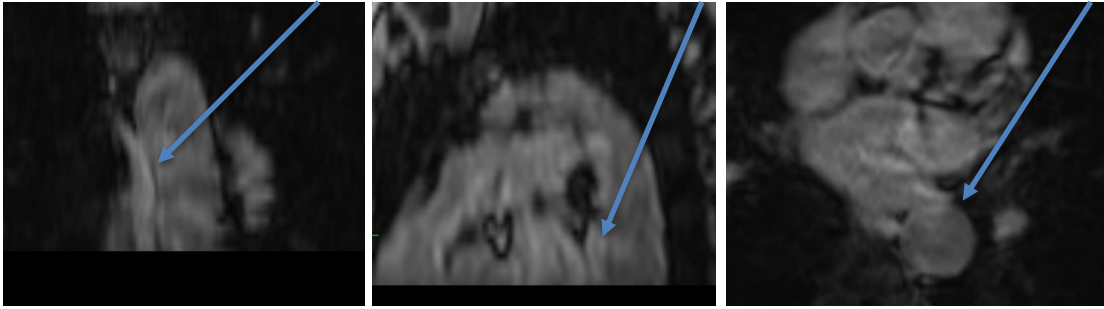


Abbildung 123: MPR-Rekonstruktion, VIBE-MRI, Aorta desc., Pat. 2  
links: cor. E., mittig: sag. E., rechts: tra. E.

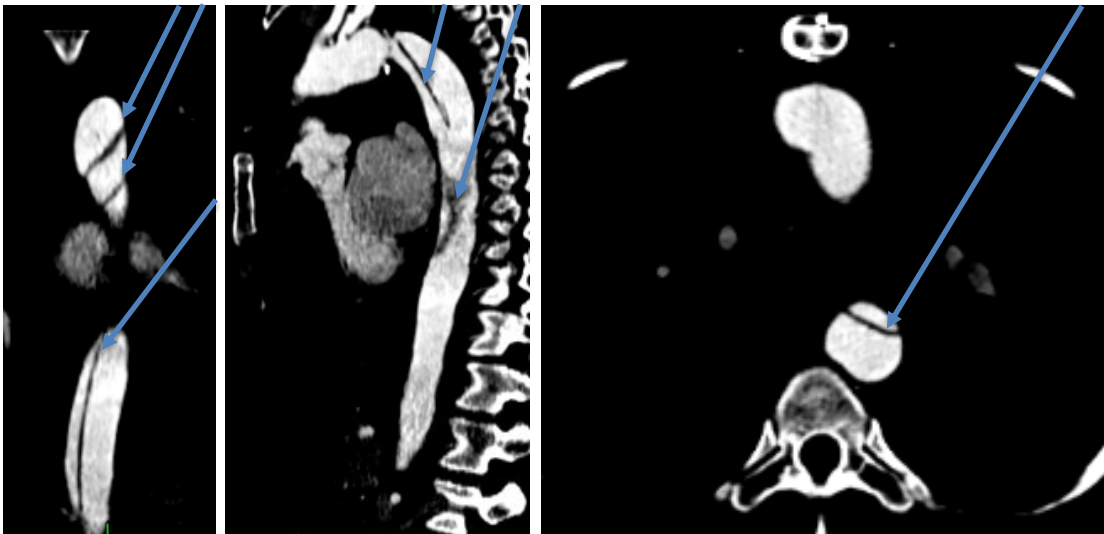


Abbildung 124: MPR-Rekonstruktion, CE-CTA, Aorta desc., Pat. 2  
links: cor. E., mittig: sag. E., rechts: tra. E.

Auch in dieser Ebene gilt es die Sichtbarkeit der Dissektionsmembran und die Beurteilbarkeit von wahrem und falschem Lumen zu vergleichen. In den Sequenzen QISS-MRA, SPACE-MRA, CE-MRA und CE-CTA ist sowohl in der Coronal- als auch in der Sagittal- und Transversalebene die Membran gut erkennbar, am schwierigsten davon jedoch in der SPACE-MRA- und CE-MRA-Bildgebung. Die VIBE-MRI zeigt die Dissektionsmembran kaum, man kann sie nur mithilfe der anderen Bildgebungen erahnen.

Durchmesservergleich:

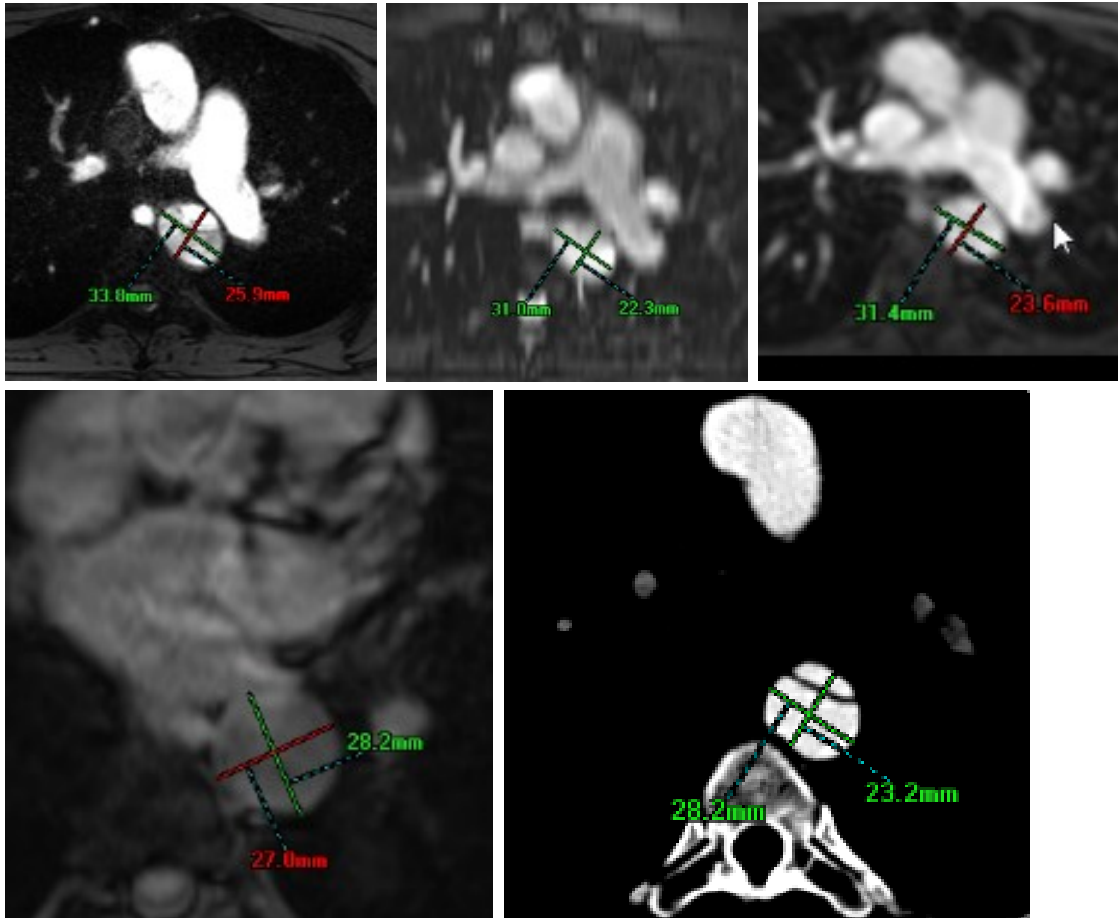


Abbildung 125: Durchmesser Aorta desc., QISS-MRA (l.-o.), SPACE-MRA (m.-o.), CE-MRA (r.-o.), VIBE-MRI (l.-u.), CE-CTA (r.-u.), (MPR-Rekonst.: transversal), Pat. 2  
QISS-MRA (l.-o.): 3,4 x 2,6cm, SPACE-MRA (m.-o.): 3,1 x 2,2cm, CE-MRA (r.-o.): 3,1 x 2,4cm, VIBE-MRI (l.-u.): 2,8 x 2,7cm, CE-CTA (r.-u.): 2,8 x 2,3cm

Für diese Ebene fallen vor allem die Durchmessermessungen der VIBE-MRI und der CE-CTA auf, da die Werte im Vergleich zu den anderen Messungen niedrig sind. Die Messergebnisse der QISS-, SPACE-, und CE-MRA sind ähnlich.

„Mittlerer Abschnitt der Pathologie“:

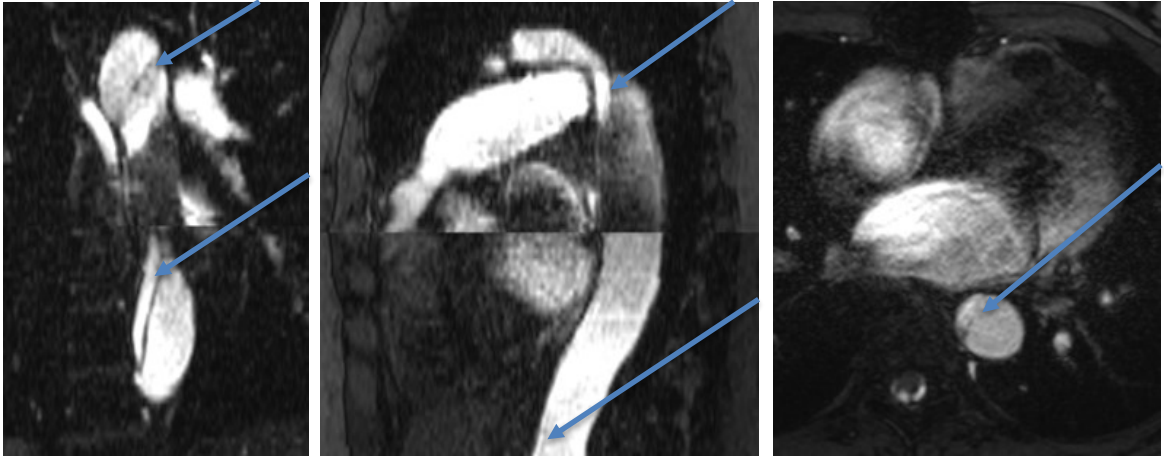


Abbildung 126: MPR-Rekonstruktion, QISS-MRA, Aorta desc., mittlerer Abschnitt der Pathologie, Pat. 2

links: cor. E., mittig: sag. E., rechts: tra. E.

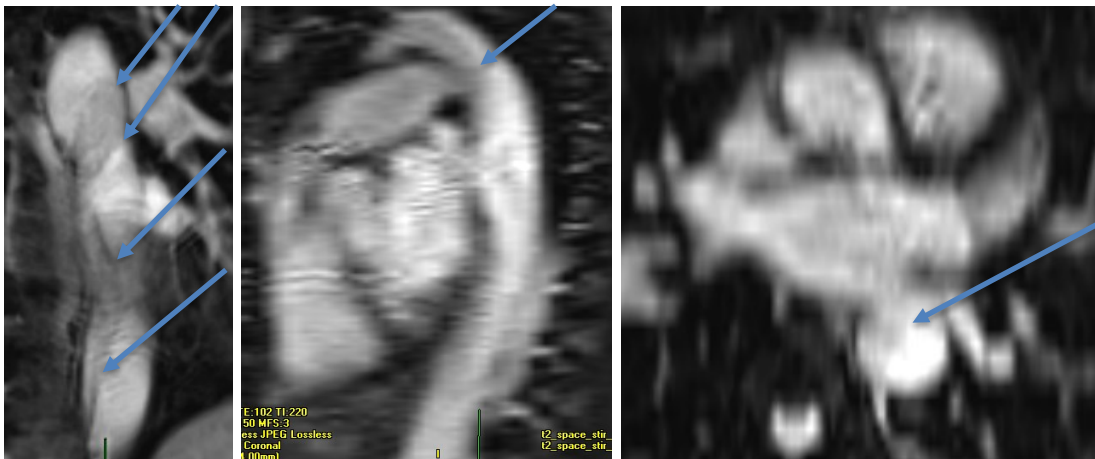


Abbildung 127: MPR-Rekonstruktion, SPACE-MRA, Aorta desc., mittlerer Abschnitt der Pathologie, Pat. 2

links: cor. E., mittig: sag. E., rechts: tra. E.

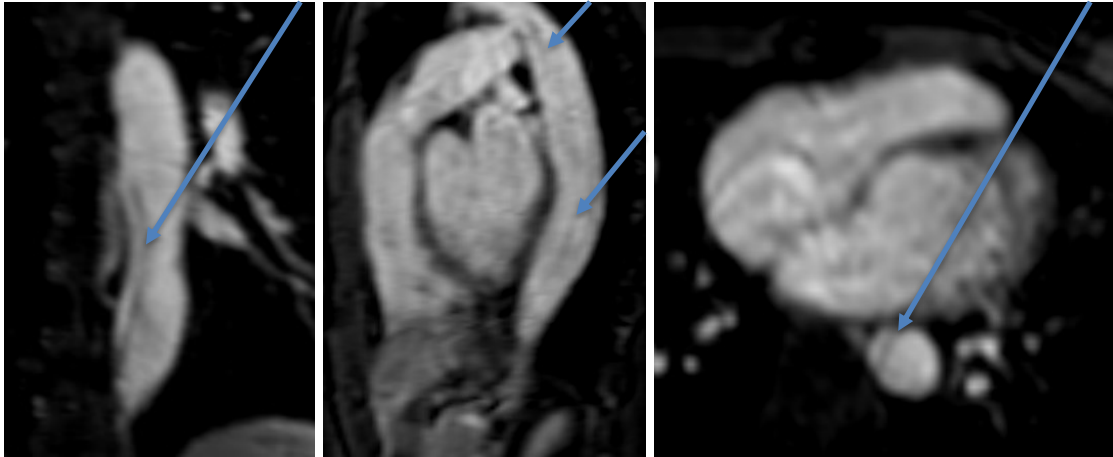


Abbildung 128: MPR-Rekonstruktion, CE-MRA, Aorta desc., mittlerer Abschnitt der Pathologie, Pat. 2  
links: cor. E., mittig: sag. E., rechts: tra. E.

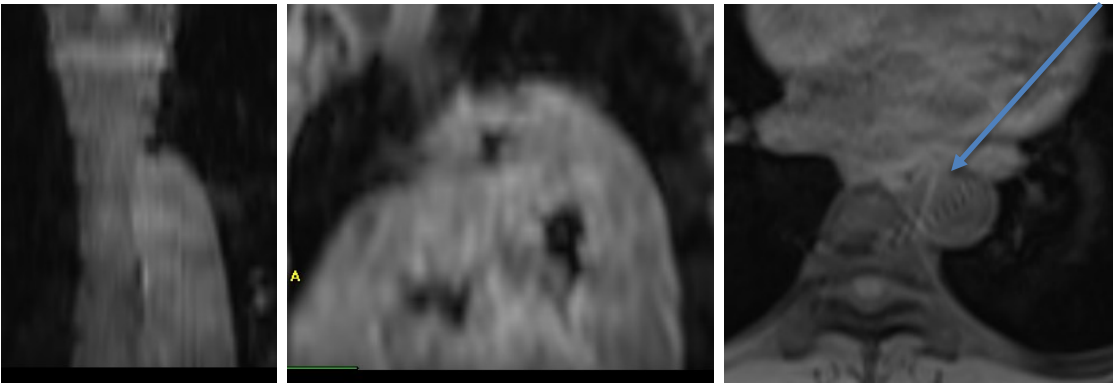


Abbildung 129: MPR-Rekonstruktion, VIBE-MRI, Aorta desc., mittlerer Abschnitt der Pathologie, Pat. 2  
links: cor. E., mittig: sag. E., rechts: tra. E.

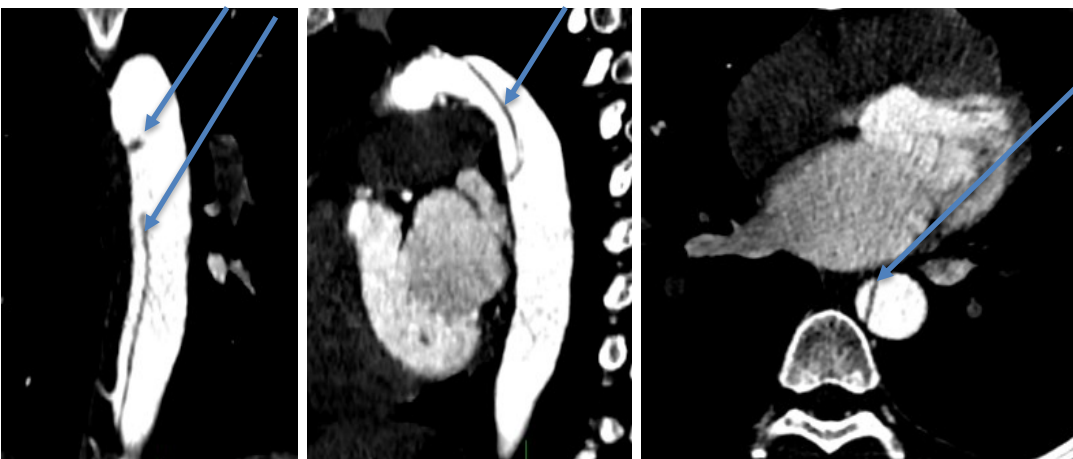


Abbildung 130: MPR-Rekonstruktion, CE-CTA, Aorta desc., mittlerer Abschnitt der Pathologie, Pat. 2  
links: cor. E., mittig: sag. E., rechts: tra. E.

Die Problematik der Signalauslöschungen in der QISS-Sequenz zeigt sich auch in diesen Aufnahmen deutlich. Die beurteilte Messebene aber liegt distal der Signalauslöschung, sodass in der Transversalebene die Dissektionsmembran sehr gut erkennbar ist. In den Aufnahmen der QISS-MRA, SPACE-MRA, CE-MRA und CE-CTA ist die Dissektionsmembran in der Coronal-, Sagittal- und Transversalebene gut dargestellt (Pfeile), in den VIBE-MRI-Aufnahmen aber ist die Pathologie nur in der Transversalebene erkennbar.

Durchmesservergleich:

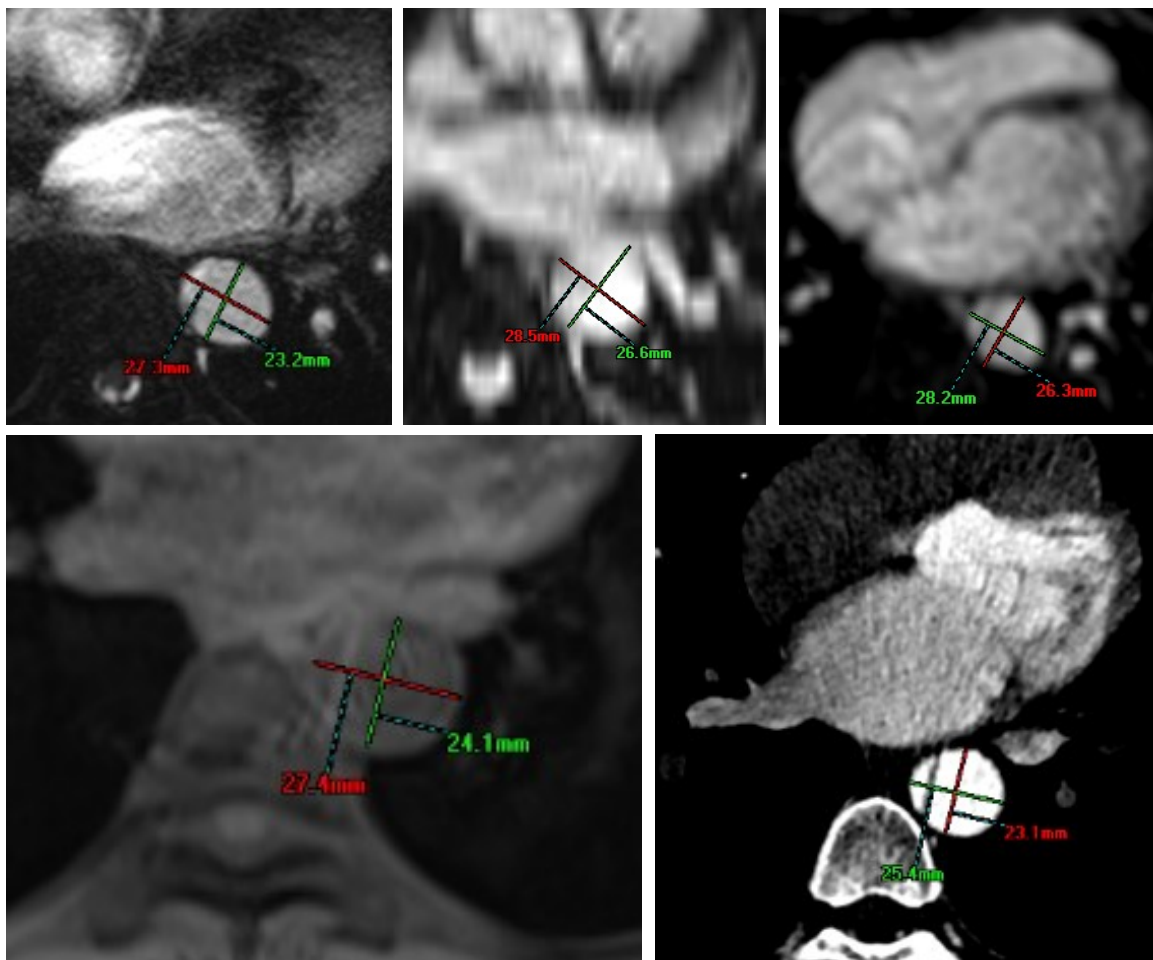


Abbildung 131: Durchmesser Aorta desc., mittlerer Abschnitt der Pathologie, QISS-MRA (l.-o.), SPACE-MRA (m.-o.), CE-MRA (r.-o.), VIBE-MRI (l.-u.), CE-CTA (r.-u.), (MPR-Rekonst.: transversal), Pat. 2

QISS-MRA (l.-o.): 2,7 x 2,3cm, SPACE-MRA (m.-o.): 2,9 x 2,7cm, CE-MRA (r.o.): 2,8 x 2,6cm, VIBE-MRI (l.-u.): 2,7 x 2,4cm, CE-CTA (r.-u.): 2,5 x 2,3cm

Die größeren der gemessenen Durchmesser stimmen in den verschiedenen Sequenzen gut überein. Insgesamt weichen vor allem die Messwerte der SPACE- und CE-MRA bzw. die der QISS-MRA, VIBE-MRI und CE-CTA wenig voneinander ab.

„Distaler Abschnitt der Pathologie“:

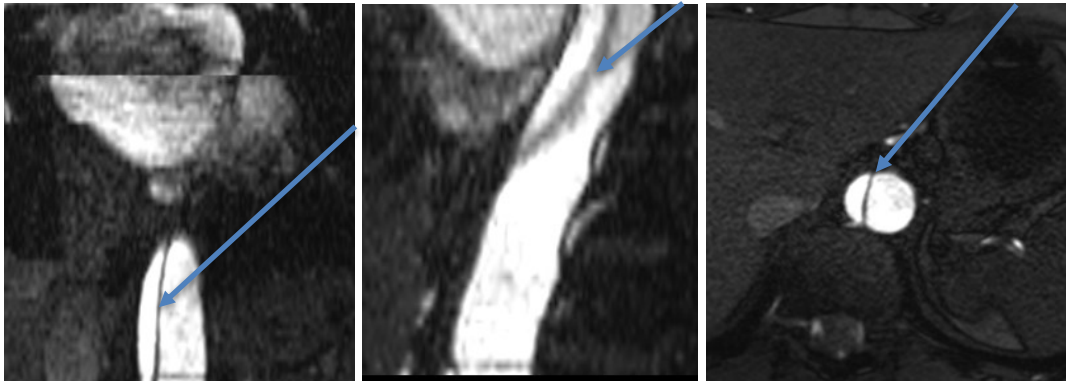


Abbildung 132: MPR-Rekonstruktion, QISS-MRA, Aorta desc., distaler Abschnitt der Pathologie, Pat. 2

links: cor. E., mittig: sag. E., rechts: tra. E.



Abbildung 133: MPR-Rekonstruktion, SPACE-MRA, Aorta desc., distaler Abschnitt der Pathologie, Pat. 2

links: cor. E., mittig: sag. E., rechts: tra. E.

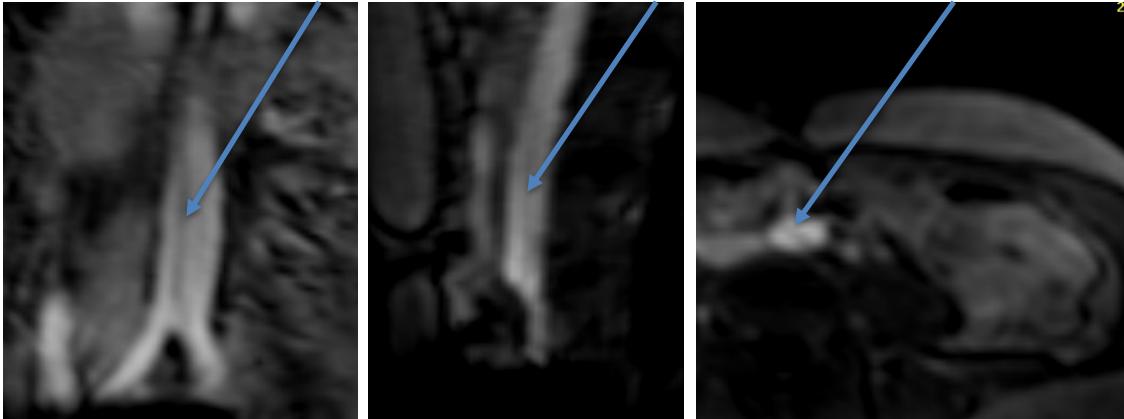


Abbildung 134: MPR-Rekonstruktion, CE-MRA, Aorta desc., distaler Abschnitt der Pathologie, Pat. 2

links: cor. E., mittig: sag. E., rechts: tra. E.

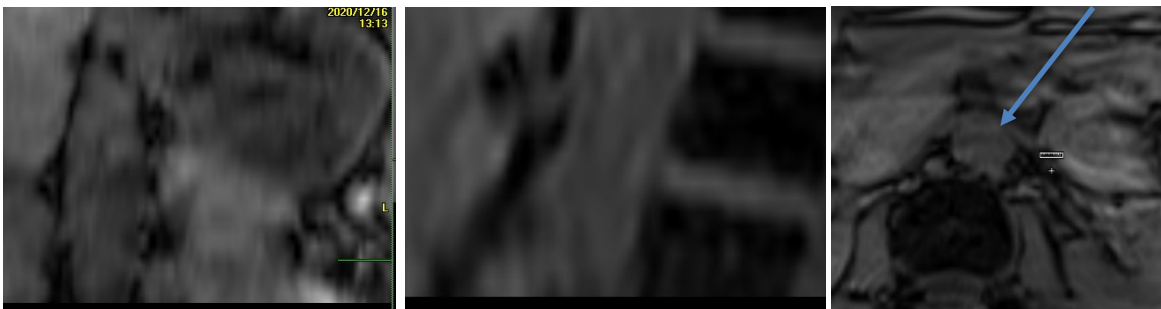


Abbildung 135: MPR-Rekonstruktion, VIBE-MRI, Aorta desc., distaler Abschnitt der Pathologie, Pat. 2

links: cor. E., mittig: sag. E., rechts: tra. E.

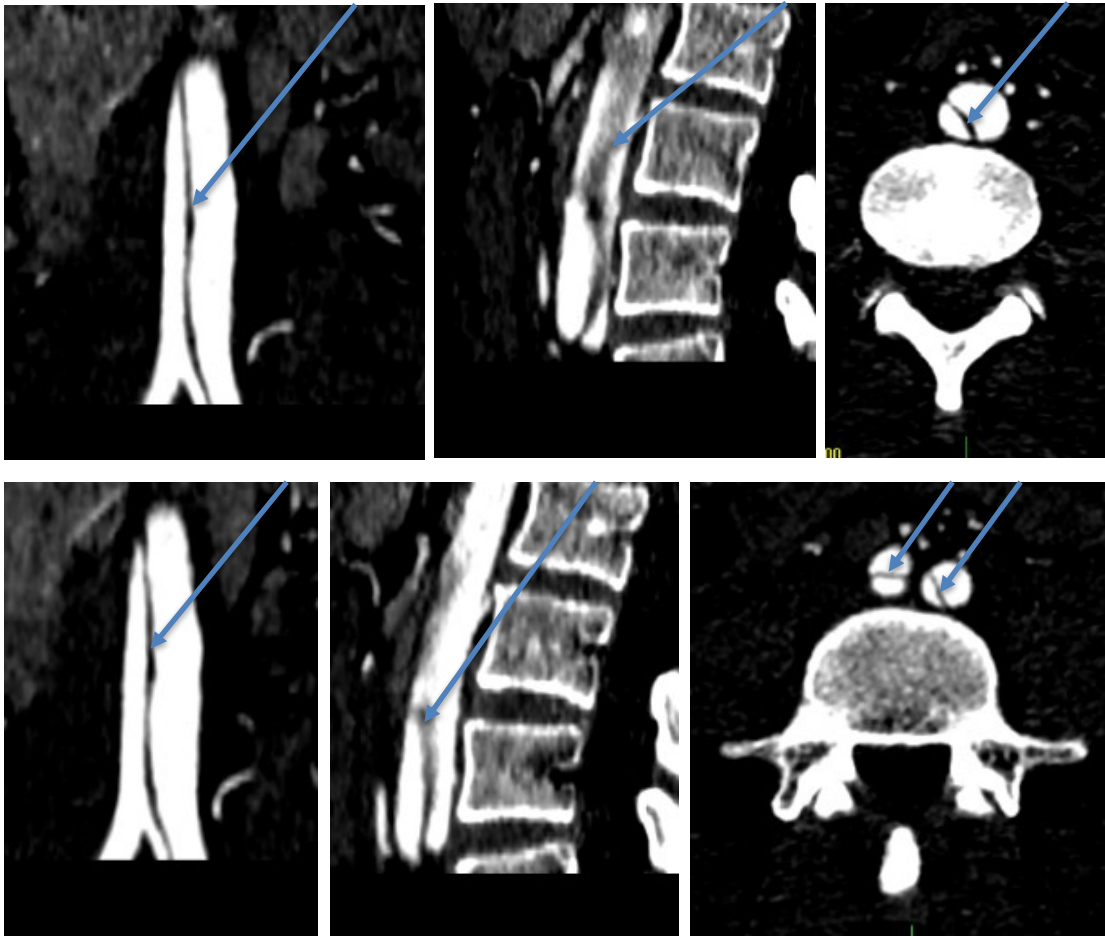


Abbildung 136: MPR-Rekonstruktion, CE-CTA, Aorta desc. (o.), Arteriae iliacae communes, distaler Abschnitt der Pathologie, Pat. 2  
links: cor. E., mittig: sag. E., rechts: tra. E.

Die Messebene „distaler Abschnitt der Pathologie“ ist aufgrund unterschiedlicher Aufnahme Fenster nicht in jeder Sequenz auf der gleichen Höhe gelegen. Somit ist der Vergleich der Durchmesserwerte für diese Aufnahmeebene nicht zielführend. Die Qualität der Aufnahmen und die Darstellung der Dissektionsmembran kann dennoch beurteilt werden. Die Dissektionsmembran ist vor allem in der QISS-MRA, CE-MRA und CE-CTA gut erkennbar. In der Aufnahme der SPACE-Sequenz kann sie in der Coronal- und Transversalebene beurteilt werden, in der VIBE-MRI-Aufnahme kann die Dissektionsmembran nur in der Transversalebene, also im Querschnitt der Aorta descendens dargestellt werden.

Da das Aufnahme Fenster der CE-CTA weiter nach distal fortgeführt wurde als das der anderen Aufnahmen, konnten in dieser Bildgebung auch die Arteriae iliacae communes beurteilt werden. In diesem Fall konnte eine Fortführung der Aortendissektion Typ B auf die Iliakalarterien diagnostiziert werden.

„Entry/Re-Entry“:

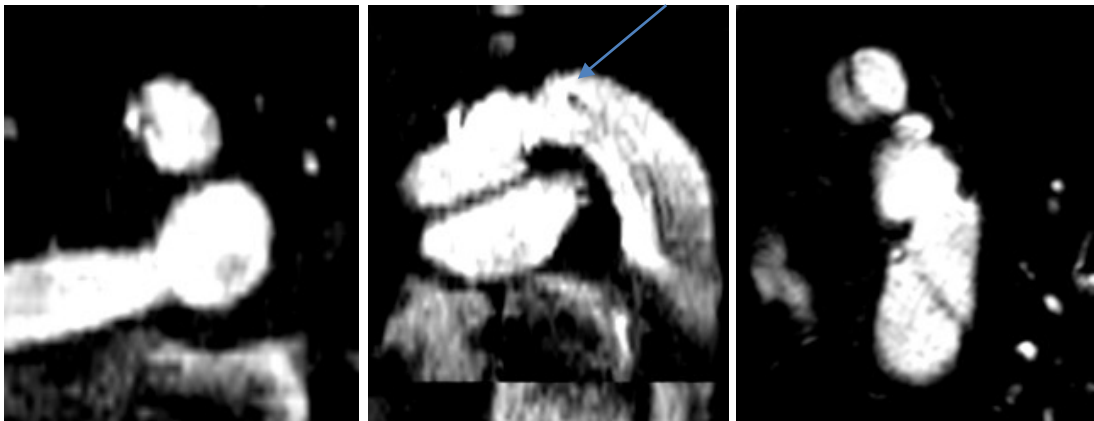


Abbildung 137: MPR-Rekonstruktion, QISS-MRA, Arcus aortae, Entry/Re-Entry ins falsche Lumen, Pat. 2

links: cor. E., mittig: sag. E., rechts: tra. E.

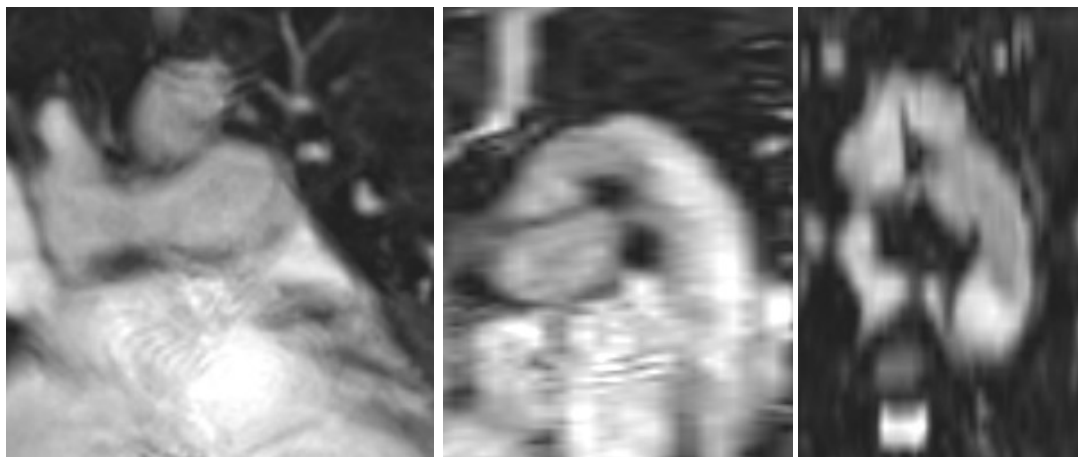


Abbildung 138: MPR-Rekonstruktion, SPACE-MRA, Arcus aortae, Entry/Re-Entry ins falsche Lumen, Pat. 2

links: cor. E., mittig: sag. E., rechts: tra. E.

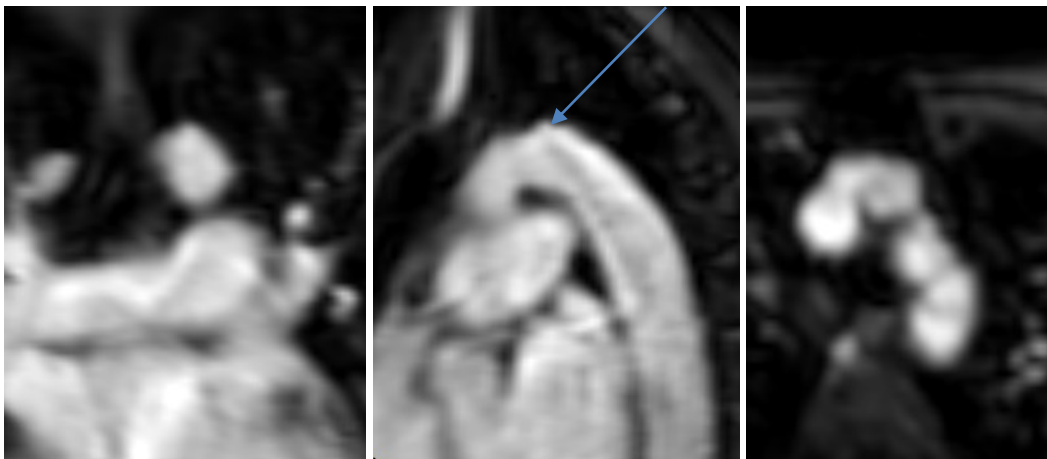
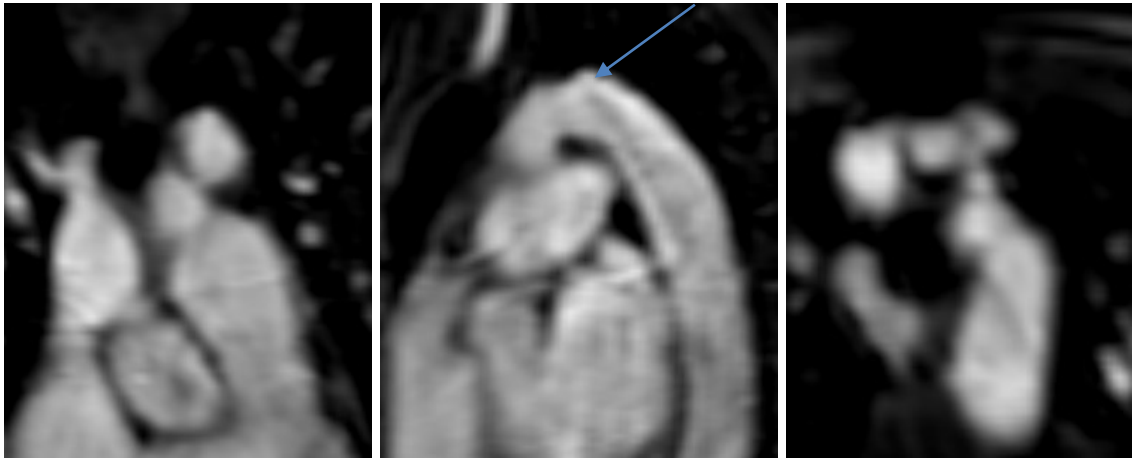


Abbildung 139: MPR-Rekonstruktion, CE-MRA, Arcus aortae, Entry/Re-Entry ins falsche Lumen, Pat. 2

links: cor. E., mittig: sag. E., rechts: tra. E.

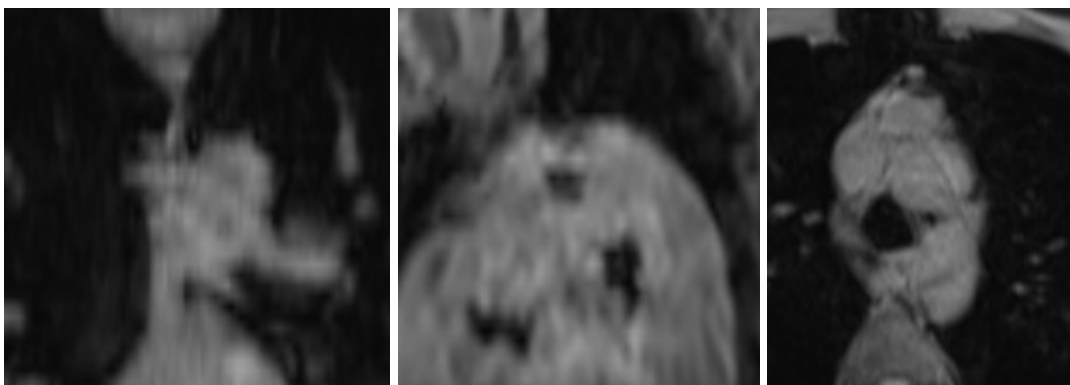


Abbildung 140: MPR-Rekonstruktion, VIBE-MRI, Arcus aortae, Entry/Re-Entry ins falsche Lumen, Pat. 2

links: cor. E., mittig: sag. E., rechts: tra. E.

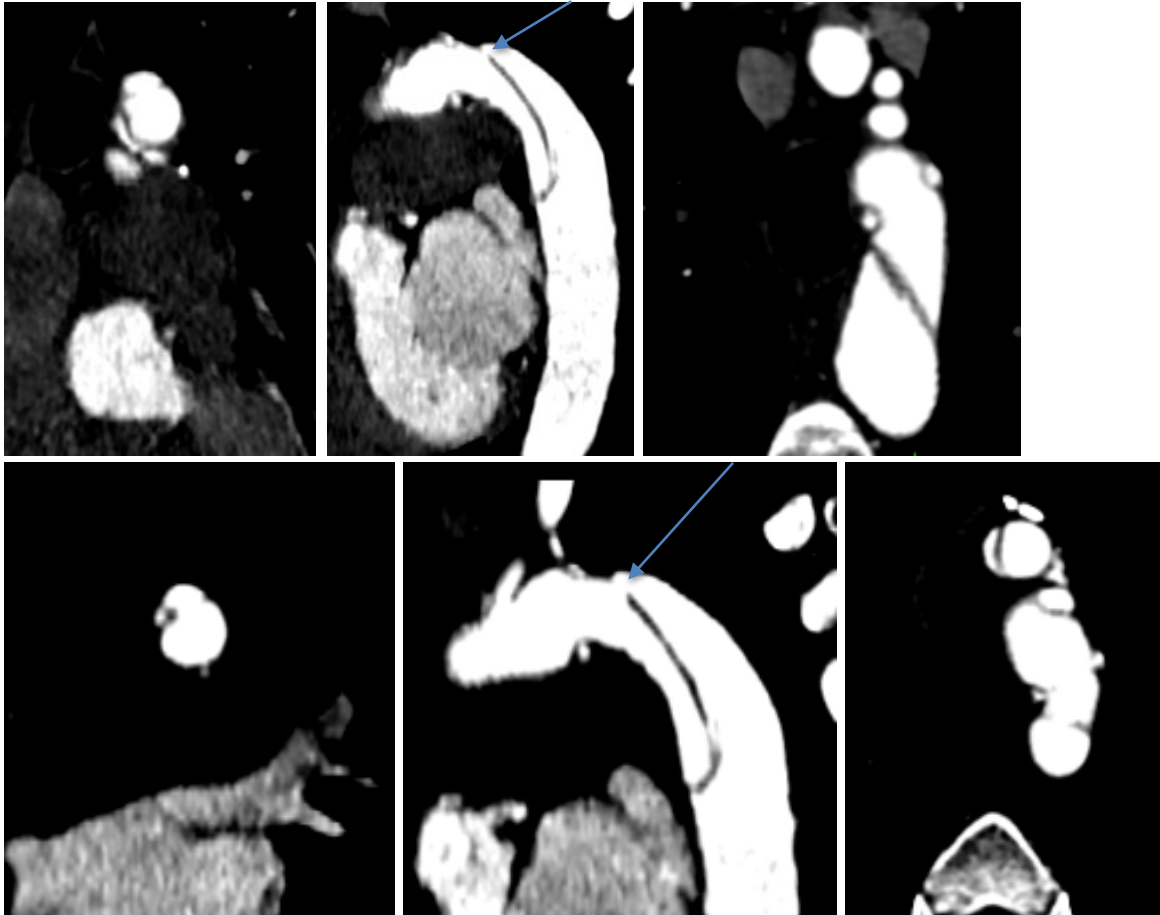


Abbildung 141: MPR-Rekonstruktion, CE-CTA, Arcus aortae, Entry/Re-Entry ins falsche Lumen, Pat. 2

links: cor. E., mittig: sag. E., rechts: tra. E.

Die Entries/Re-Entries sind in der QISS-MRA-, CE-MRA- und CE-CTA-Aufnahme sichtbar und mit Pfeilen markiert. In der SPACE-Sequenz könnte man ein Entry nur erahnen, wenn man anhand anderer Sequenzen weiß, wo dieses liegt. Die SPACE-Sequenz reicht zur Beurteilung der Entries/Re-Entries nicht alleinig aus. In den Aufnahmen der VIBE-MRI ist die Dissektionsmembran nicht erkennbar, somit ist auch ein Entry/Re-Entry vom wahren ins falsche Lumen nicht dargestellt.

Die dritte Patientin erlitt ebenfalls eine Aortendissektion. Zum einen eine Typ A Aortendissektion isoliert in der Aorta ascendens, die mit einem Ersatz der Aortenklappe und der Aorta ascendens behandelt wurde, und zum anderen eine Typ B Aortendissektion, die in der distalen Aorta descendens beginnt. Bei dieser Patientin können die Sequenzen QISS-MRA, SPACE-MRA, CE-MRA und VIBE-MRI verglichen werden.

Folgende Messebenen wurden zu Analyse der Bildgebungen ausgewählt:

- Größter Durchmesser der Aorta ascendens
- Vor Abgang der Supraaortalen
- Nach Abgang der Supraaortalen
- Größter Durchmesser der Aorta descendens
- Abdominelle Pathologie

Zusätzlich wurden zur Beurteilung der Qualität die 3D-Rekonstruktion, die Bildgebung der Supraaortalen, die Darstellung der beiden Pathologien (proximal und distal) sowie die Beurteilbarkeit von möglicherweise vorliegenden Entries und Re-Entries eingesetzt.

„3D-Rekonstruktion“:



Abbildung 142: MIP-3D-Rekonst., QISS-MRA (l.-o.), SPACE-MRA (m.-o. (proximal) + r.-o. (distal)), CE-MRA (l.-u. (schräg sag-cor) + r.-u. (sag)), Pat. 3  
(MIP-3D-Rekonst. der VIBE-MRI fehlt aufgrund von mangelnder Qualität)

In den 3D-Rekonstruktionen der SPACE-MRA und CE-MRA ist die distale Typ B Aortendissektion gut erkennbar (Pfeil). Die Qualität der QISS-MRA-3D-Rekonstruktion ist deutlich schlechter im Vergleich zu der der SPACE-MRA und CE-MRA. Sie ist außerdem nur auf die Aorta ascendens und den Aortenbogen begrenzt.

„Darstellung der proximalen Pathologie“:

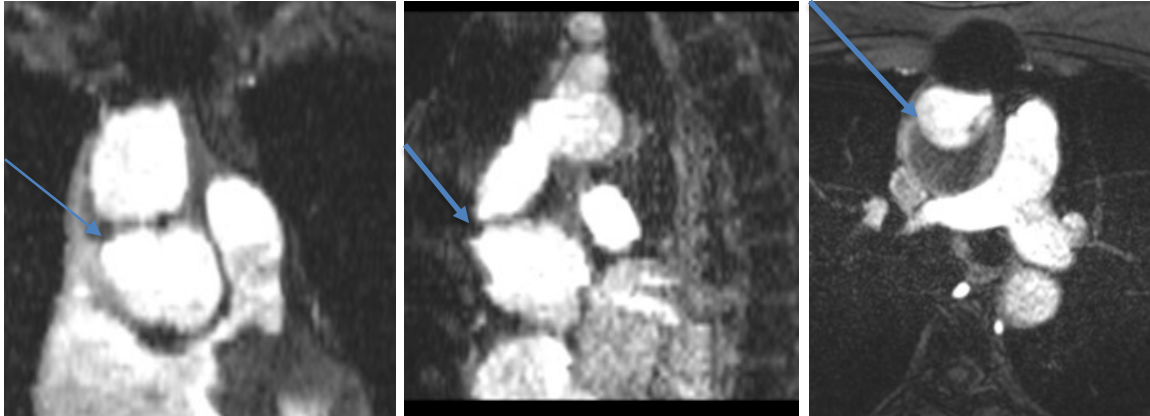


Abbildung 143: MPR-Rekonstruktion, QISS-MRA, Proximale Pathologie, Pat. 3  
links: cor. E., mittig: sag. E., rechts: tra. E.

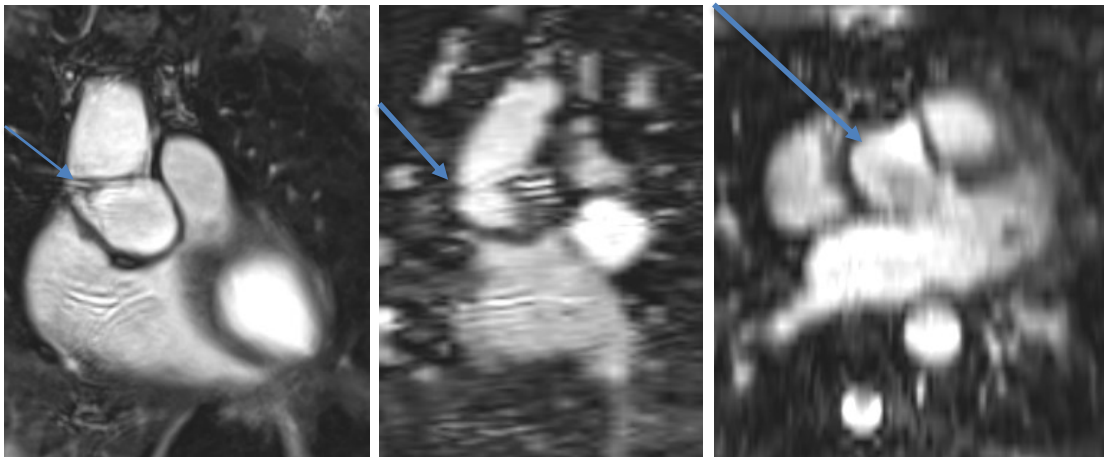


Abbildung 144: MPR-Rekonstruktion, SPACE-MRA, Proximale Pathologie, Pat. 3  
links: cor. E., mittig: sag. E., rechts: tra. E.

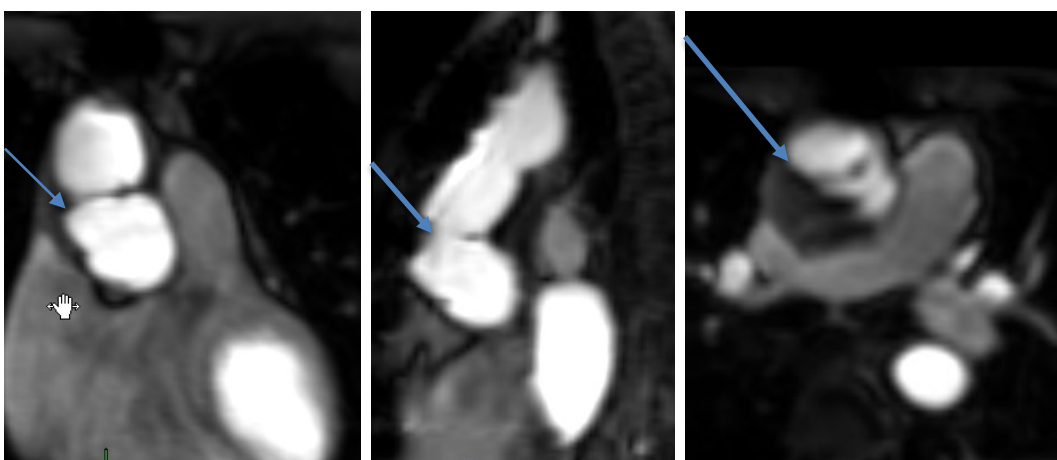


Abbildung 145: MPR-Rekonstruktion, CE-MRA, Proximale Pathologie, Pat. 3  
links: cor. E., mittig: sag. E., rechts: tra. E.

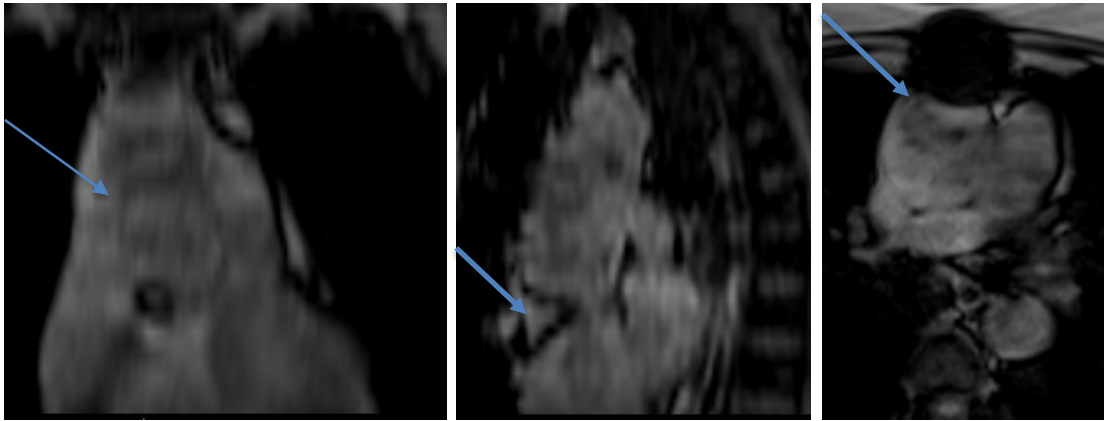


Abbildung 146: MPR-Rekonstruktion, VIBE-MRI, Proximale Pathologie, Pat. 3  
links: cor. E., mittig: sag. E., rechts: tra. E.

In allen vier Aufnahmen kann der Ersatz der Aortenklappe und der Aorta ascendens erkannt werden (siehe Pfeile), in der VIBE-MRI-Bildgebung ist es jedoch am schwierigsten zu erkennen.

„Darstellung der distalen Pathologie“:

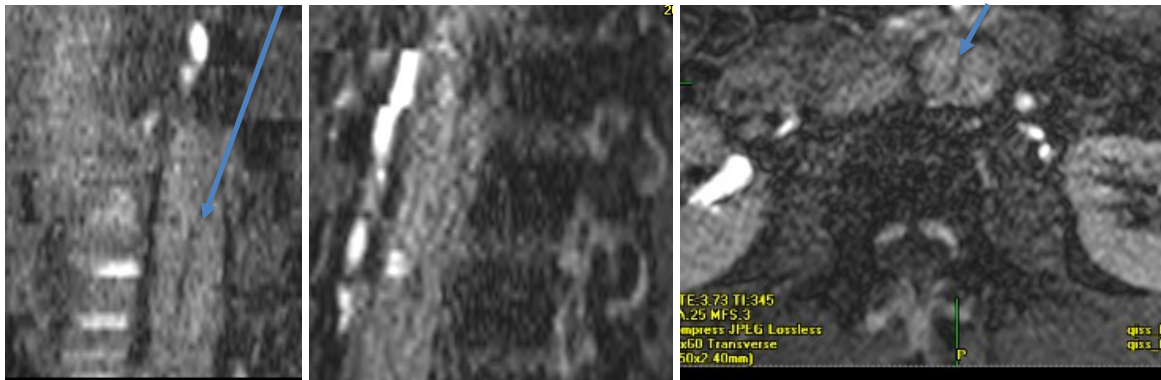


Abbildung 147: MPR-Rekonstruktion, QISS-MRA, Distale Pathologie, Pat. 3  
links: cor. E., mittig: sag. E., rechts: tra. E.

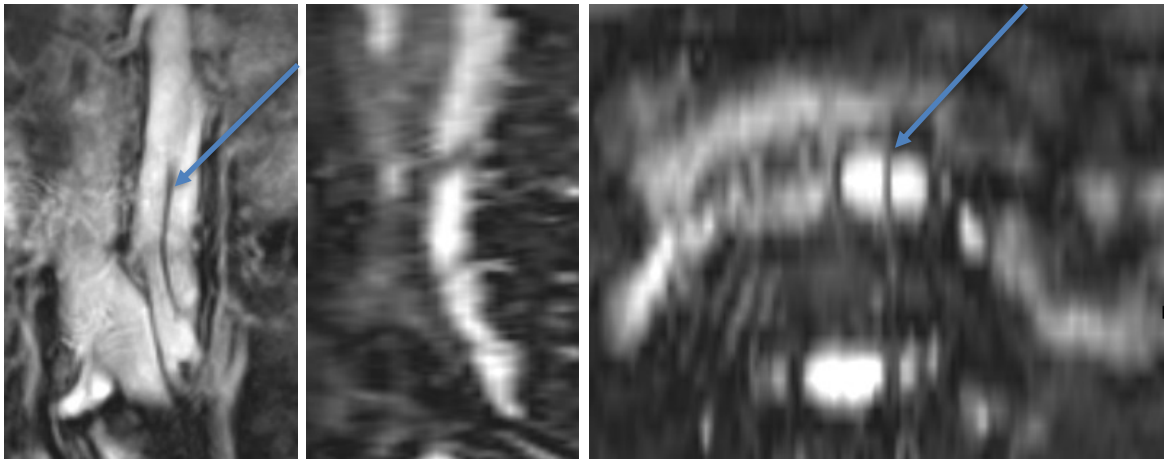


Abbildung 148: MPR-Rekonstruktion, SPACE-MRA, Distale Pathologie, Pat. 3  
links: cor. E., mittig: sag. E., rechts: tra. E.

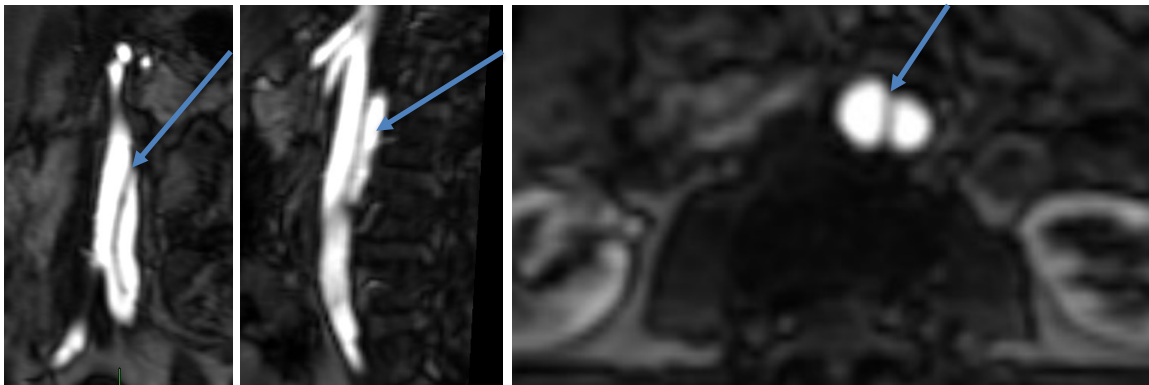


Abbildung 149: MPR-Rekonstruktion, CE-MRA, Distale Pathologie, Pat. 3  
links: cor. E., mittig: sag. E., rechts: tra. E.



Abbildung 150: MPR-Rekonstruktion, VIBE-MRI, Distale Pathologie, Pat. 3  
links: cor. E., mittig: sag. E., rechts: tra. E.

Die Stufenbildung und Signalauslöschungen in der QISS-Sequenz machen eine Beurteilung der Aorta so gut wie unmöglich, die Dissektionsmembran allerdings ist in der Transversalebene sichtbar (Pfeil). Besser erkennbar ist die Dissektion aber in der SPACE-MRA- und CE-MRA-Aufnahme. Dort kann die Membran in allen drei Ebenen erkannt werden. In der VIBE-MRI-Aufnahme hingegen ist keine Dissektion sichtbar.

„Größter Durchmesser der Aorta ascendens“:

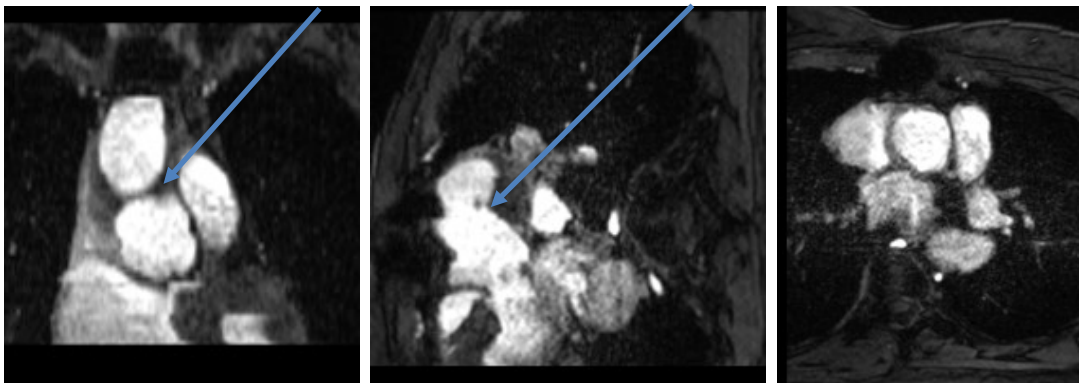


Abbildung 151: MPR-Rekonstruktion, QISS-MRA, Aorta ascendens, Pat. 3  
links: cor. E., mittig: sag. E., rechts: tra. E.

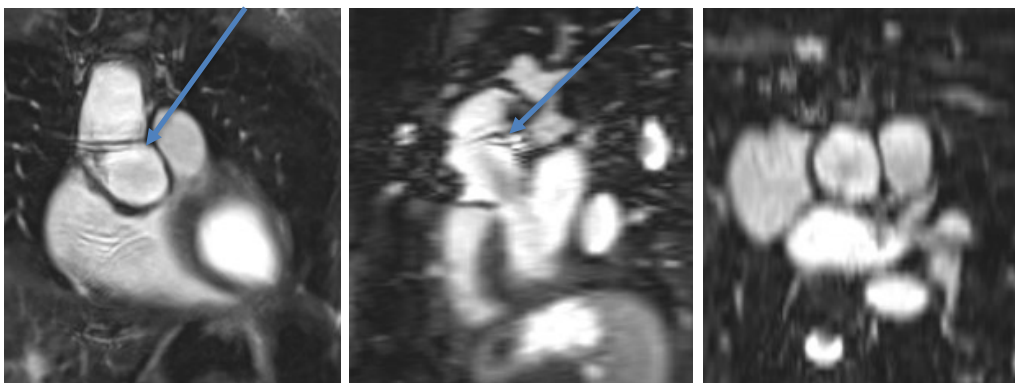


Abbildung 152: MPR-Rekonstruktion, SPACE-MRA, Aorta ascendens, Pat. 3  
links: cor. E., mittig: sag. E., rechts: tra. E.

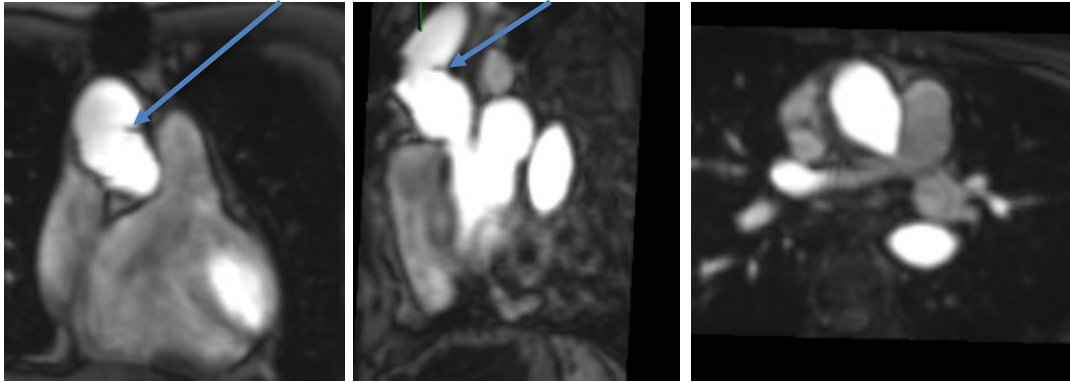


Abbildung 153: MPR-Rekonstruktion, CE-MRA, Aorta ascendens, Pat. 3  
links: cor. E., mittig: sag. E., rechts: tra. E.

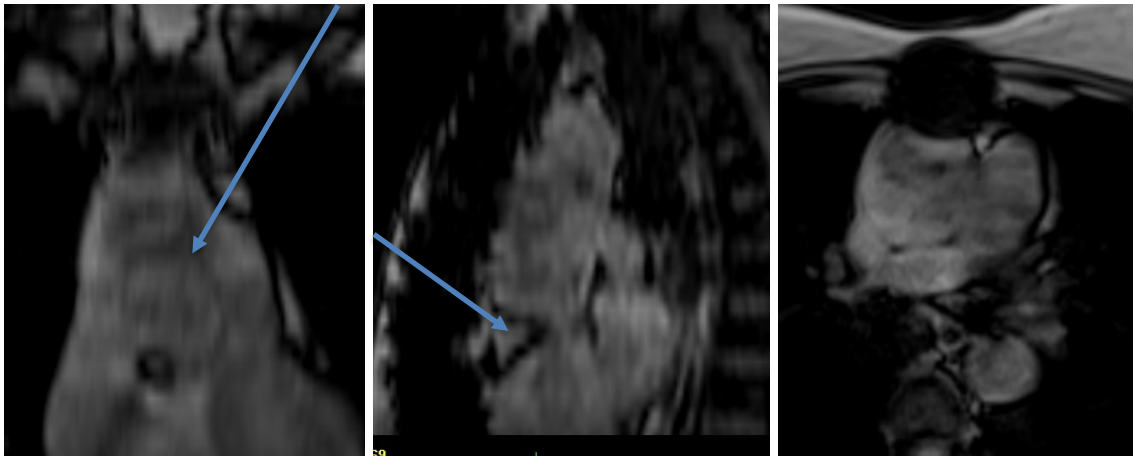


Abbildung 154: MPR-Rekonstruktion, VIBE-MRI, Aorta ascendens, Pat. 3  
links: cor. E., mittig: sag. E., rechts: tra. E.

Die Beurteilbarkeit der Aorta ist in der QISS- und CE-MRA am besten, die SPACE-MRA weist Inhomogenitäten auf, die die Beurteilung erschweren und in der VIBE-MRI ist die Aorta sehr schwer abgrenzbar vom umliegenden Gewebe. Die Signalauslöschung, die durch die ersetzte Aortenklappe entsteht, kann aber in allen Sequenzen sowohl in der coronalen als auch in der sagittalen Ebene erkannt werden (Pfeile).

Durchmesservergleich:

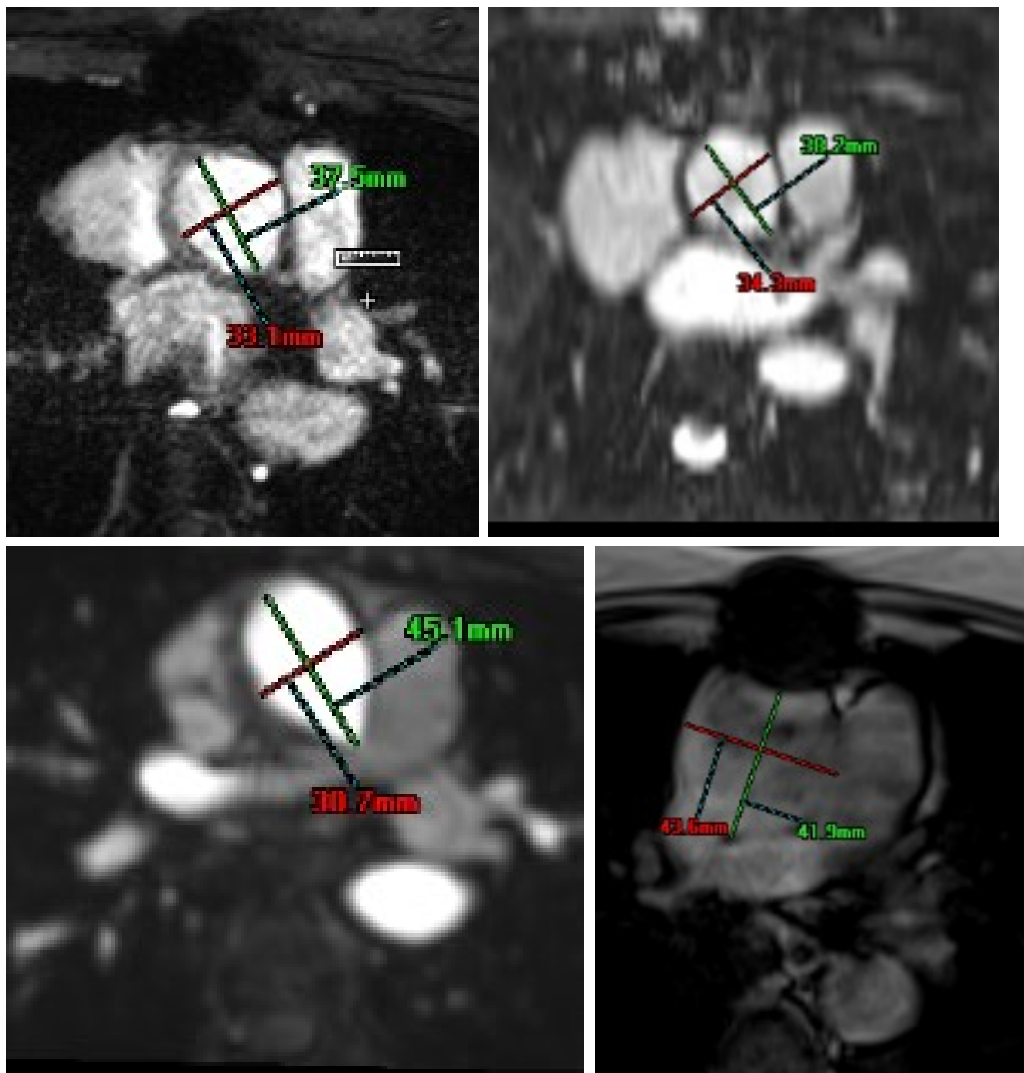


Abbildung 155: Durchmesser Aorta asc., QISS-MRA (l.-o.), SPACE-MRA (r.-o.), CE-MRA (l.-u.), VIBE-MRI (r.-u.) (MPR-Rekonst.: transversal), Pat. 3  
QISS-MRA (l.-o.): 3,8 x 3,3cm, SPACE-MRA (r.-o.): 3,8 x 3,4cm  
CE-MRA (l.-u.): 4,5 x 3,1cm, VIBE-MRI (r.-u.): 4,4 x 4,2cm

Beim Vergleich der Durchmesser fällt auf, dass die Messungen der QISS- und SPACE-MRA nah beieinander liegen, der größere der beiden Messwerte bei der CE-MRA und der VIBE-MRI ist ähnlich, der kleinere der beiden Messwerte weicht bei der CE-MRA und VIBE-MRI stark ab. In der Aufnahme der VIBE-MRI ist die Aortenwand schwer zur Umgebung abgrenzbar, dies kann die Durchmessermessung erheblich verfälschen. In der Aufnahme der CE-MRA fällt auf, dass die Querschnittsfläche der Aorta ascendens sehr oval aussieht, was die Durchmessermessung verfälscht. Die Aorta ist vermutlich mit der Transversalebene nicht im richtigen Winkel angeschnitten.

„Vor Abgang der Supraaortalen“:

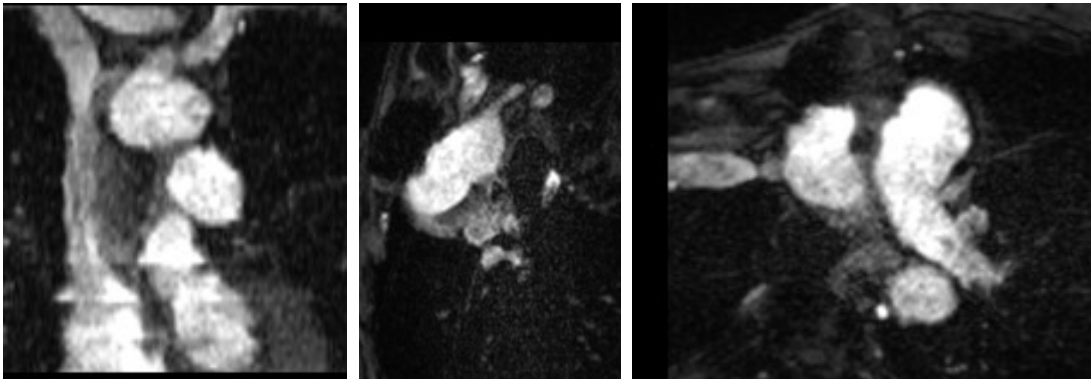


Abbildung 156: MPR-Rekonstruktion, QISS-MRA, Aorta ascendens, vor Abgang der Supraaortalen, Pat. 3

links: cor. E., mittig: schräg-sag. E., rechts: schräg-tra. E.

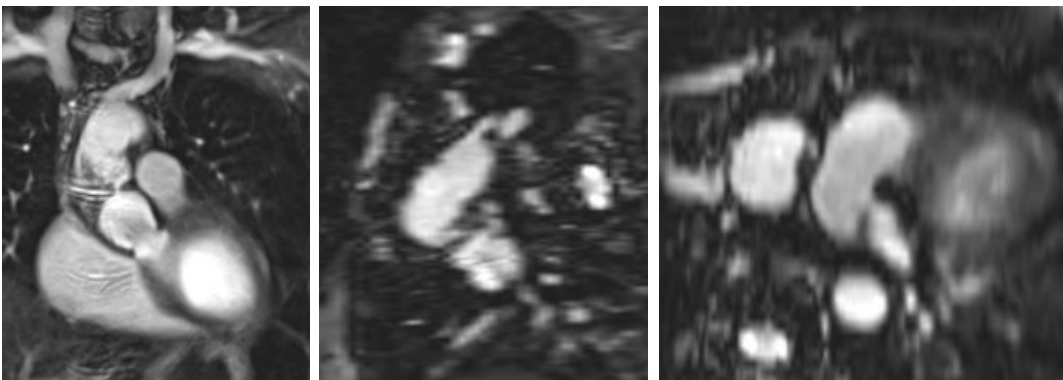


Abbildung 157: MPR-Rekonstruktion, SPACE-MRA, Aorta ascendens, vor Abgang der Supraaortalen, Pat. 3

links: cor. E., mittig: schräg-sag. E., rechts: schräg-tra. E.

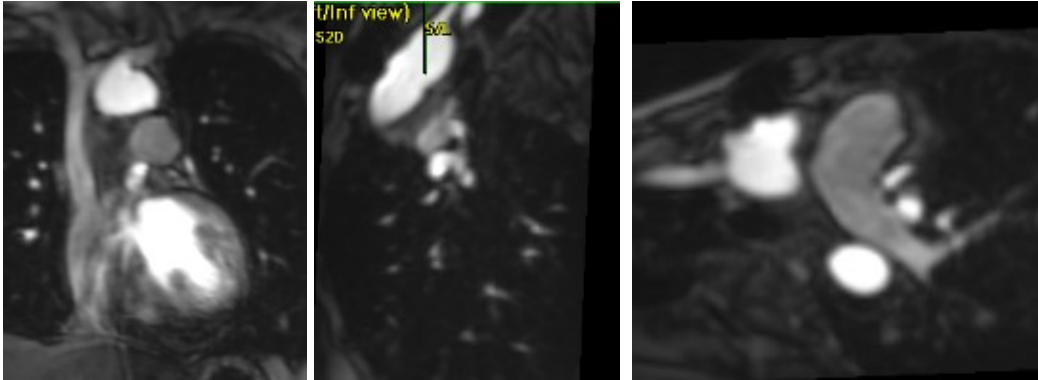


Abbildung 158: MPR-Rekonstruktion, CE-MRA, Aorta ascendens, vor Abgang der Supraaortalen, Pat. 3

links: cor. E., mittig: schräg-sag. E., rechts: schräg-tra. E.

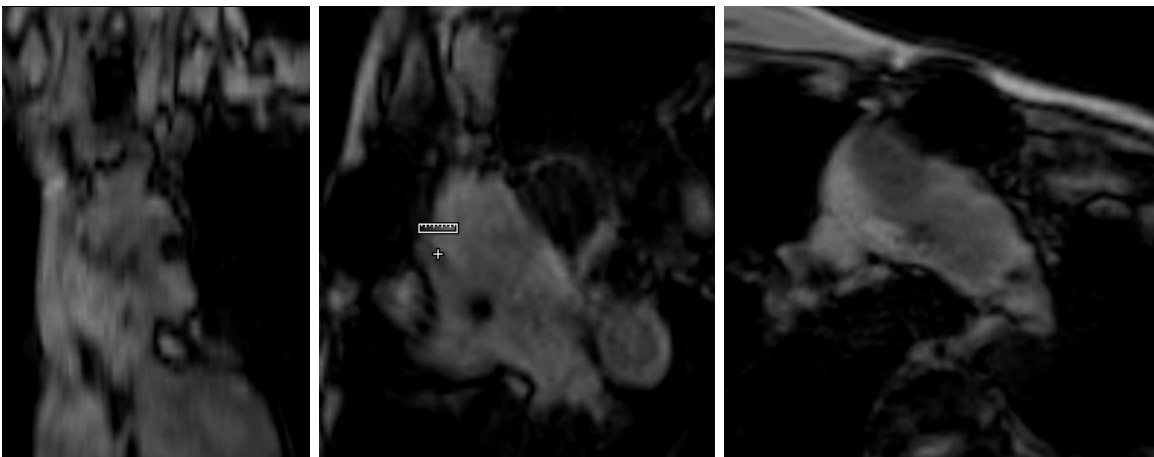


Abbildung 159: MPR-Rekonstruktion, VIBE-MRI, Aorta ascendens, vor Abgang der Supraaortalen, Pat. 3

links: cor. E., mittig: schräg-sag. E., rechts: schräg-tra. E.

Die Qualität der QISS-MRA, SPACE-MRA und CE-MRA ist auf den ersten Blick vergleichbar gut, die der VIBE-MRI hingegen ist schlechter. Die in der QISS-MRA vorliegenden Inhomogenitäten erschweren die Beurteilung der Aorta in dieser Messebene.

Durchmesservergleich:

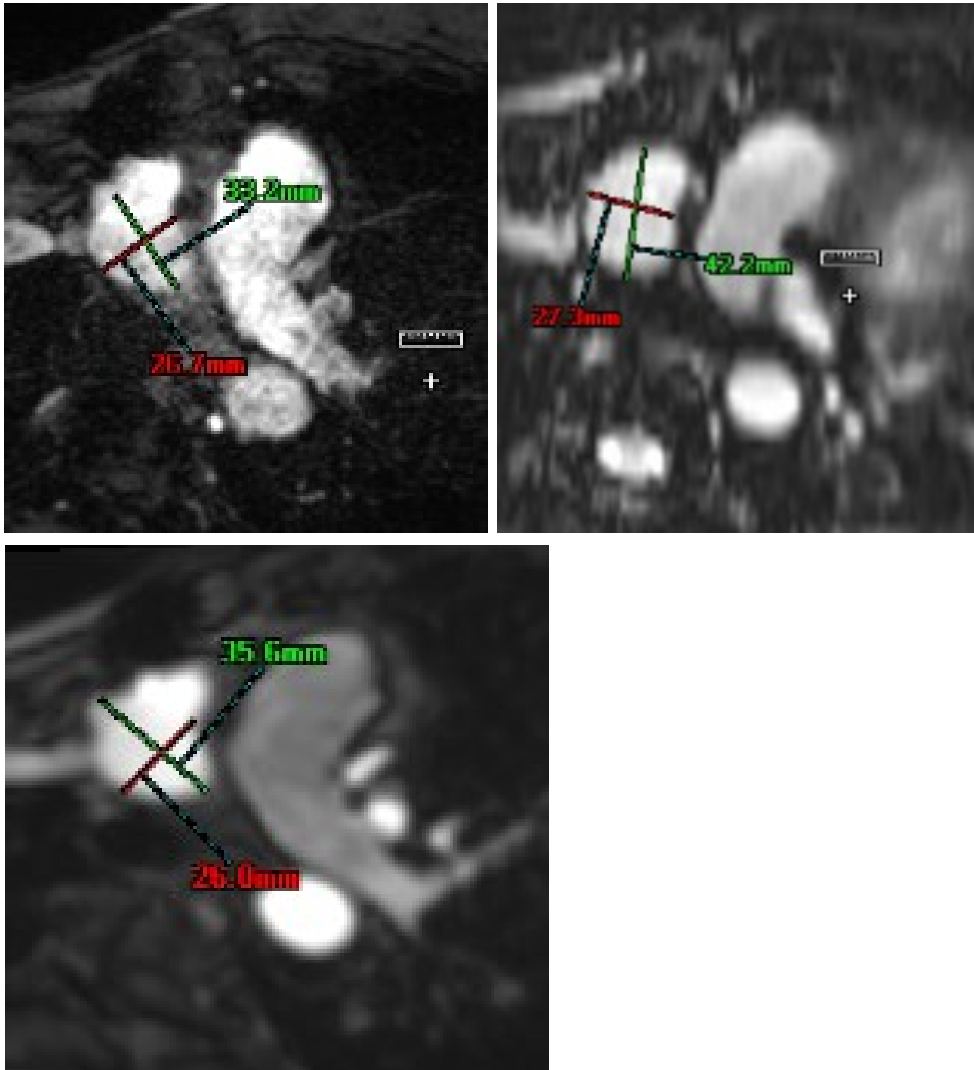


Abbildung 160: Durchmesser Aorta asc., vor Abgang der Supraaortalen, QISS-MRA (l.-o.), SPACE-MRA (r.-o.), CE-MRA (l.-u.) (MPR-Rekonst.: transversal), Pat. 3  
QISS-MRA (l.-o.): 3,3 x 2,7cm, SPACE-MRA (r.-o.): 4,2 x 2,7cm  
CE-MRA (l.-u.): 3,6 x 2,6cm

Der kleinere Wert ist bei QISS-, SPACE- und CE-MRA recht gut übereinstimmend, der größere Wert ist bei QISS- und CE-MRA ähnlicher, die SPACE-MRA-Messung weicht stark davon ab, da der Querschnitt auch nicht ganz im rechten Winkel angeschnitten wurde, sodass die Messwerte verfälscht sind. Die Durchmesser messung in der VIBE-MRI-Aufnahme wurde aufgrund von schlechter Abgrenzbarkeit der Aorta zur Umgebung ausgelassen.

„Supraaortale“:

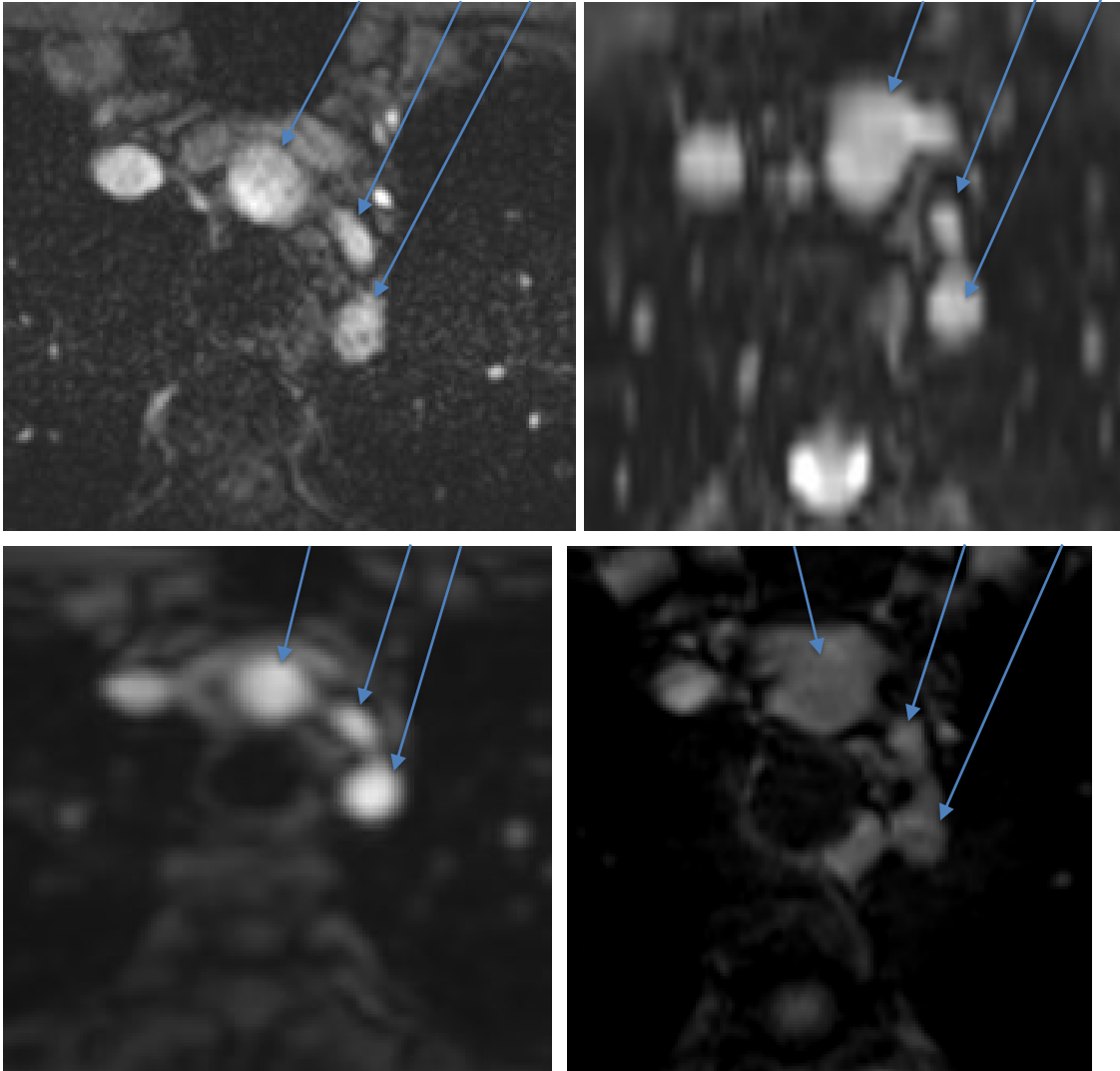


Abbildung 161: Supraaortale GefäÙe in der Transversalebene (MPR-Rekonst.), QISS-MRA (l.-o.), SPACE-MRA (r.-o.), CE-MRA (l.-u.), VIBE-MRI (r.-u.), Pat. 3  
Truncus brachiocephalicus (l. Pfeil), Arteria carotis sinistra (m. Pfeil), Arteria subclavia sinistra (r. Pfeil)

Die supraaortalen GefäÙe sind in allen vier Sequenzen gut sichtbar und abgrenzbar zum umliegenden Gewebe. Sie sind alle drei Supraaortale frei von Pathologien.

„Nach dem Abgang der Supraaortalen“:

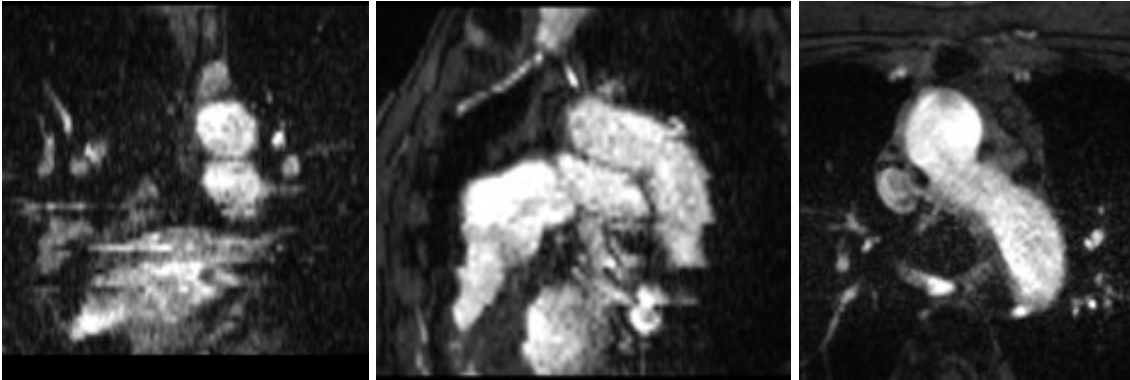


Abbildung 162: MPR-Rekonstruktion, QISS-MRA, Arcus aortae, nach Abgang der Supraaortalen, Pat. 3

links: cor. E., mittig: sag. E., rechts: tra. E.

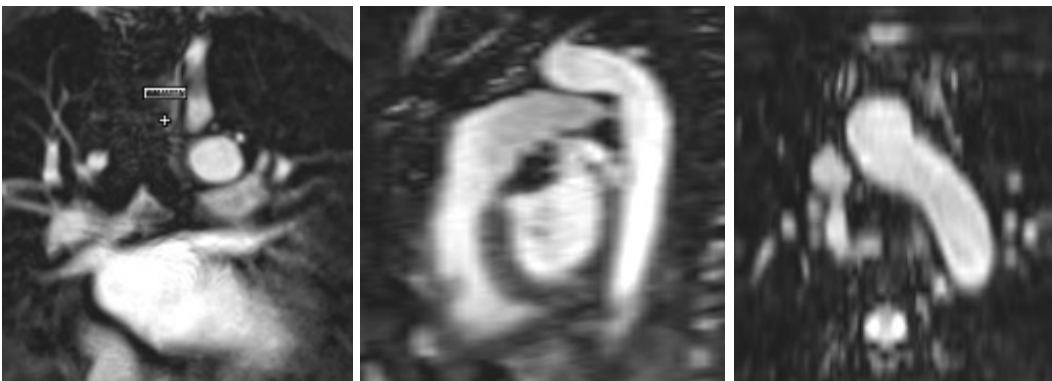


Abbildung 163: MPR-Rekonstruktion, SPACE-MRA, Arcus aortae, nach Abgang der Supraaortalen, Pat. 3

links: cor. E., mittig: sag. E., rechts: tra. E.

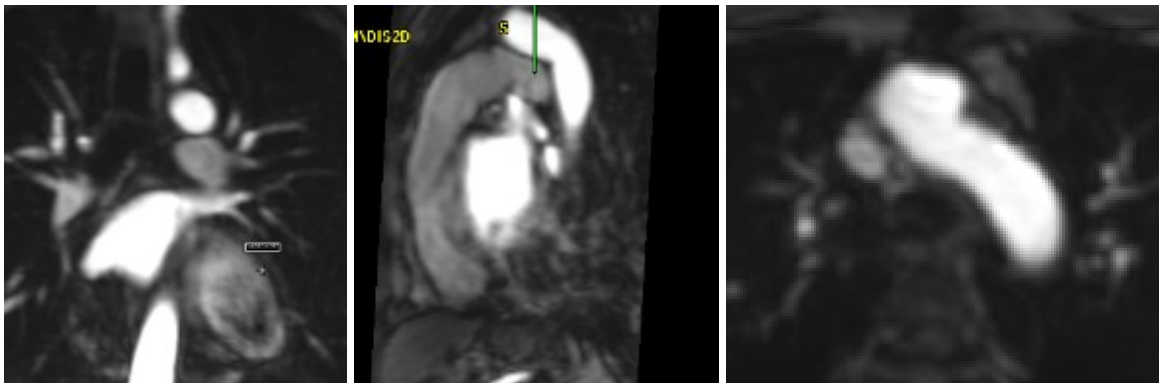


Abbildung 164: MPR-Rekonstruktion, CE-MRA, Arcus aortae, nach Abgang der Supraaortalen, Pat. 3  
links: cor. E., mittig: sag. E., rechts: tra. E.

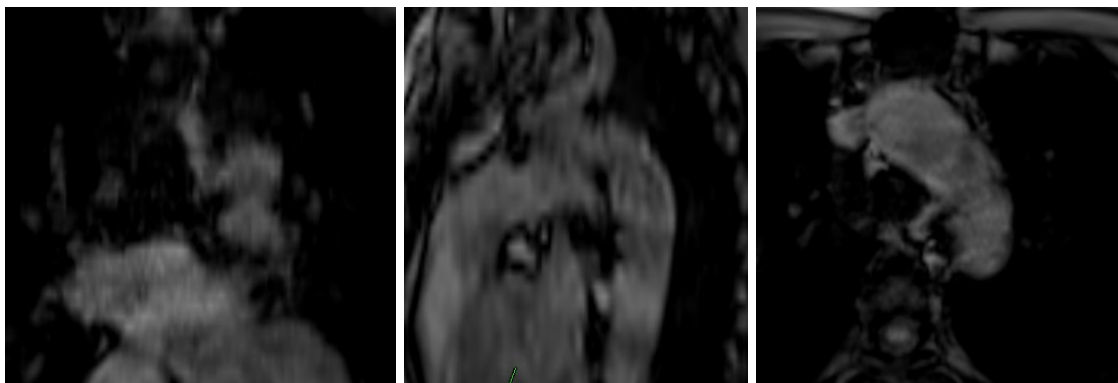


Abbildung 165: MPR-Rekonstruktion, VIBE-MRI, Arcus aortae, nach Abgang der Supraaortalen, Pat. 3  
links: cor. E., mittig: sag. E., rechts: tra. E.

Die Befundung anhand der SPACE-MRA und CE-MRA-Sequenz erweist sich als gut möglich. Die QISS-MRA hingegen zeigt Inhomogenitäten, die einen Ausschluss der Pathologie deutlich erschweren. Die VIBE-MRI zeigt sich in dieser Messebene zwar mit besserer Abgrenzbarkeit der Aorta als in anderen Messebenen, im Vergleich zu den anderen MR-Aufnahmen in dieser Messebene hat sie aber eine schlechte Qualität.

Durchmesservergleich:

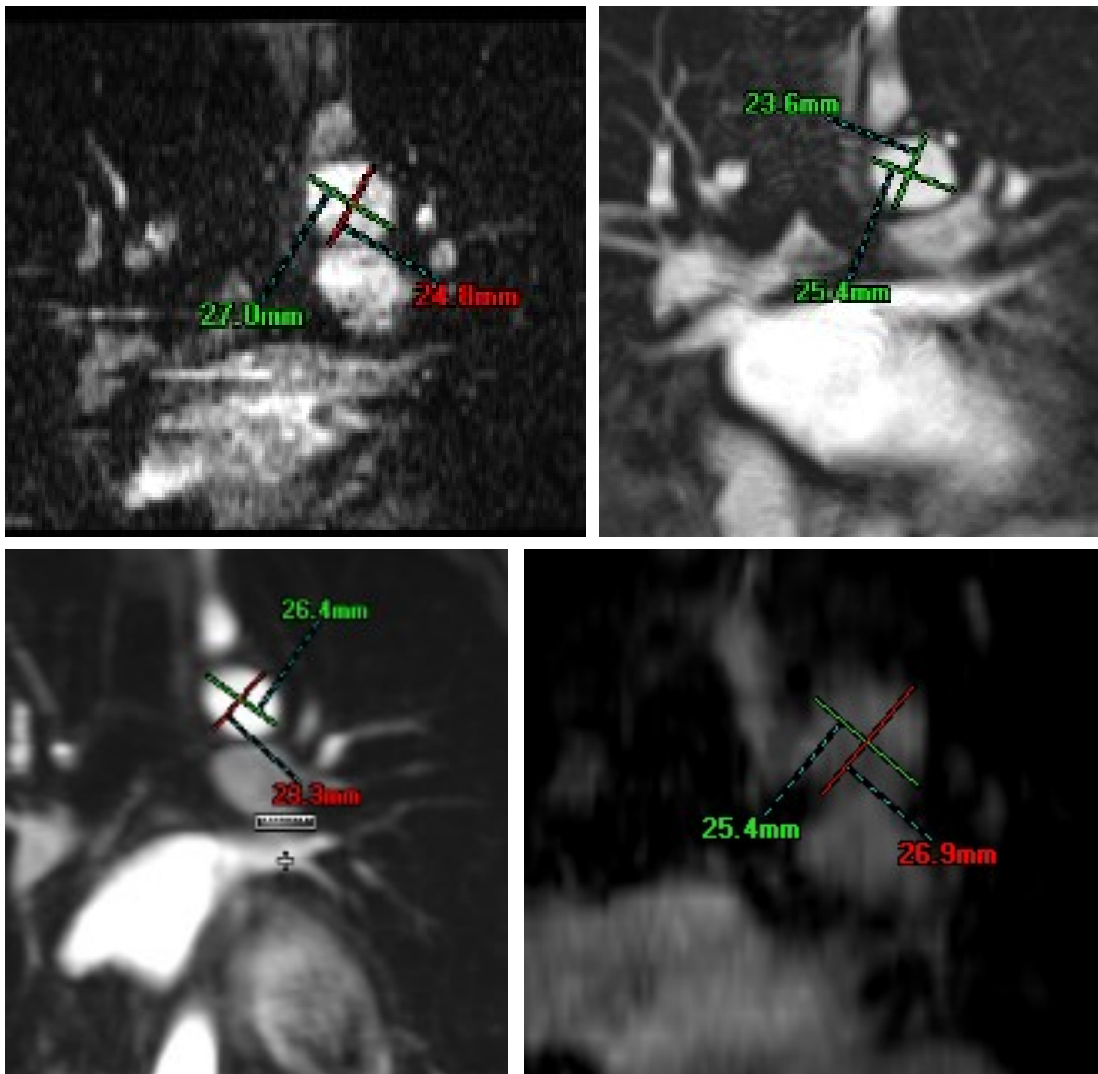


Abbildung 166: Durchmesser Arcus aortae, nach Abgang der Supraaortalen, QISS-MRA (l.-o.), SPACE-MRA (r.-o.), CE-MRA (l.-u.) (MPR-Rekonst.: transversal), Pat. 3  
QISS-MRA (l.-o.): 2,7 x 2,5cm, SPACE-MRA (r.-o.): 2,5 x 2,4cm  
CE-MRA (l.-u.): 2,6 x 2,3cm, VIBE-MRI (r.-u.): 2,7 x 2,5cm

Die Durchmessermessungen liegen bei allen Sequenzen nah beieinander, vor allem die größeren der beiden Messwerte in den Aufnahmen der QISS-MRA, CE-MRA und VIBE-MRI weichen nur wenig voneinander ab. Die Messung der schlecht abgrenzbaren Aorta in der VIBE-MRI-Bildgebung scheint trotzdem genau zu sein.

„Größter Durchmesser der Aorta descendens“:

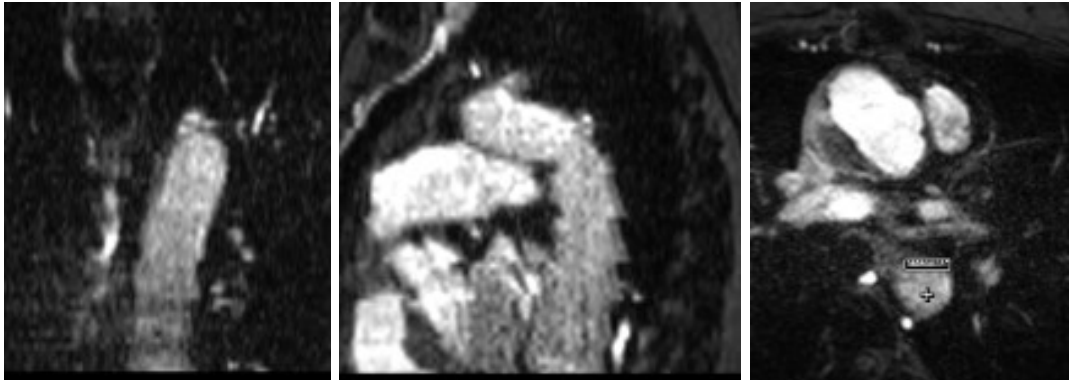


Abbildung 167: MPR-Rekonstruktion, QISS-MRA, Aorta descendens, Pat. 3  
links: cor. E., mittig: sag. E., rechts: tra. E.

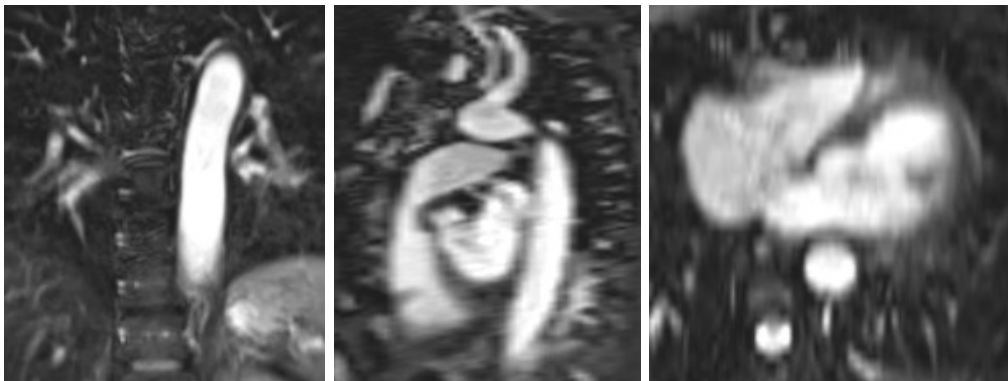


Abbildung 168: MPR-Rekonstruktion, SPACE-MRA, Aorta descendens, Pat. 3  
links: cor. E., mittig: sag. E., rechts: tra. E.

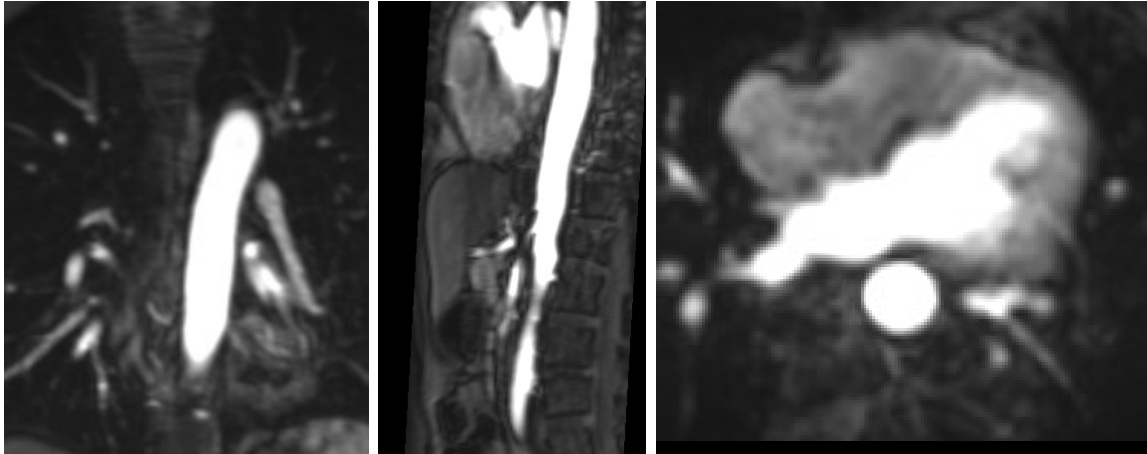


Abbildung 169: MPR-Rekonstruktion, CE-MRA, Aorta descendens, Pat. 3  
links: cor. E., mittig: sag. E., rechts: tra. E.

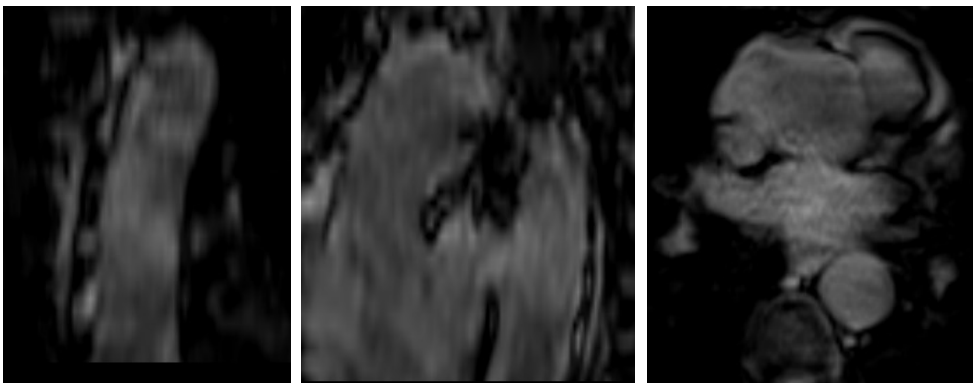


Abbildung 170: MPR-Rekonstruktion, VIBE-MRI, Aorta descendens, Pat. 3  
links: cor. E., mittig: sag. E., rechts: tra. E.

In allen Aufnahmen ist die Aorta descendens vor allem in der Transversalebene gut sichtbar, allerdings verschlechtert die bei der QISS-MRA auftretende Signalauslöschung die Qualität. Das Lumen kann also nur bei der SPACE-, CE-MRA und VIBE-MRI gut beurteilt werden.

Durchmesservergleich:

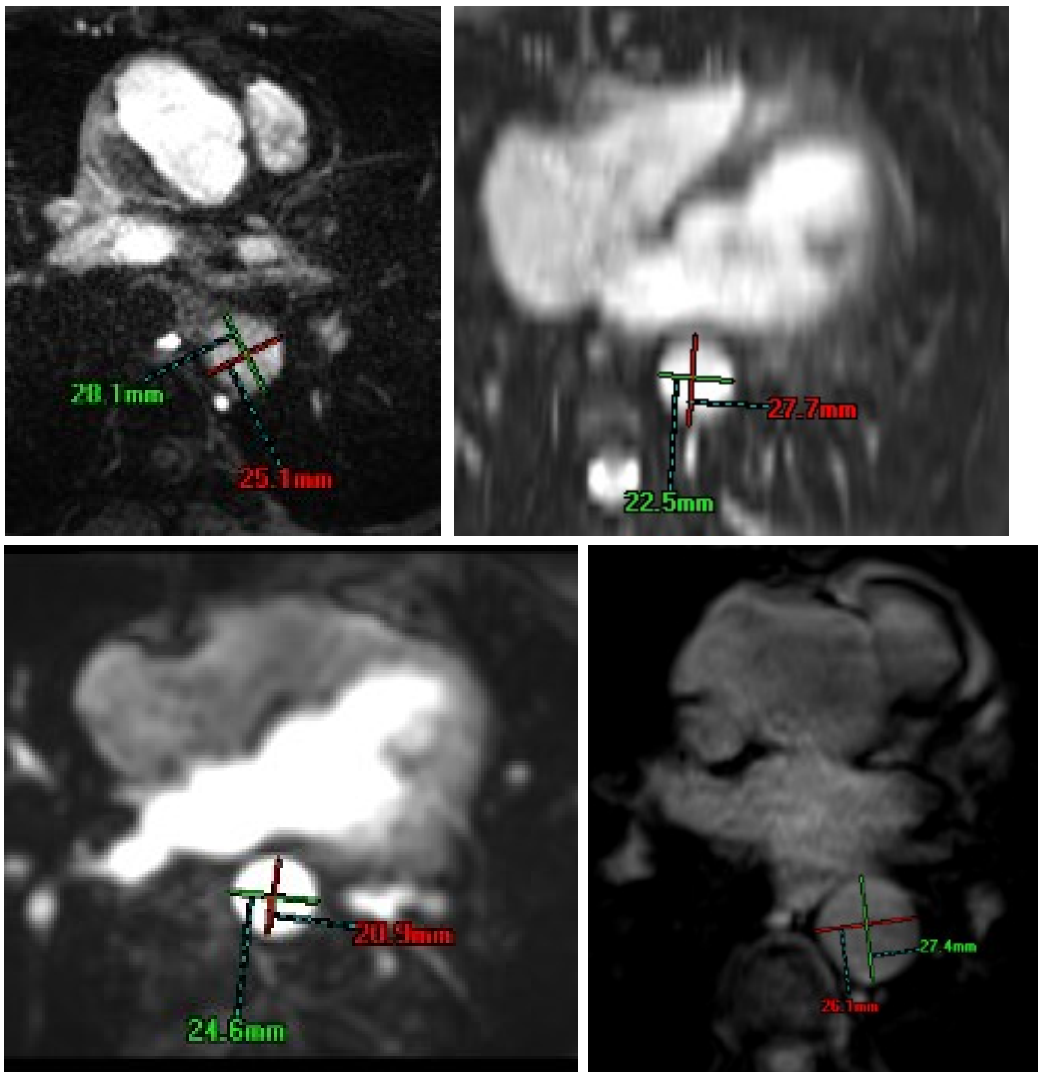


Abbildung 171: Durchmesser Aorta desc., QISS-MRA (l.-o.), SPACE-MRA (r.-o.), CE-MRA (l.-u.) (MPR-Rekonst.: transversal), Pat. 3

QISS-MRA (l.-o.): 2,8 x 2,5cm, SPACE-MRA (r.-o.): 2,8 x 2,3cm

CE-MRA (l.-u.): 2,5 x 2,1cm, VIBE-MRI (r.-u.): 2,7 x 2,6cm

Das Lumen kann in der QISS-Sequenz zwar nicht gut beurteilt werden, aber die Aortenwand ist scharf abgegrenzt, somit kann auch die Durchmessermessung gut erfolgen. Die Messergebnisse der QISS-, SPACE-MRA und VIBE-MRI liegen nah beieinander, die der CE-MRA aber weichen ab.

„Abdominelle Pathologie“:

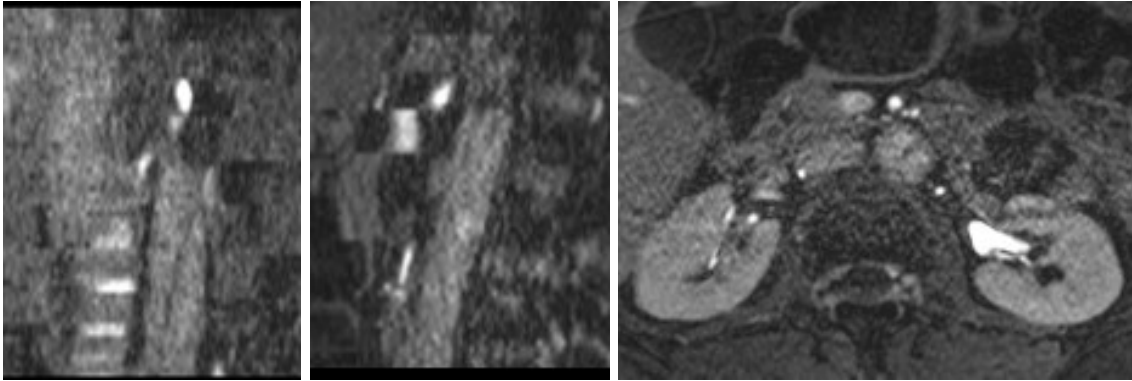


Abbildung 172: MPR-Rekonstruktion, QISS-MRA, Aorta descendens, abdominelle Pathologie, Pat. 3

links: cor. E., mittig: sag. E., rechts: tra. E.

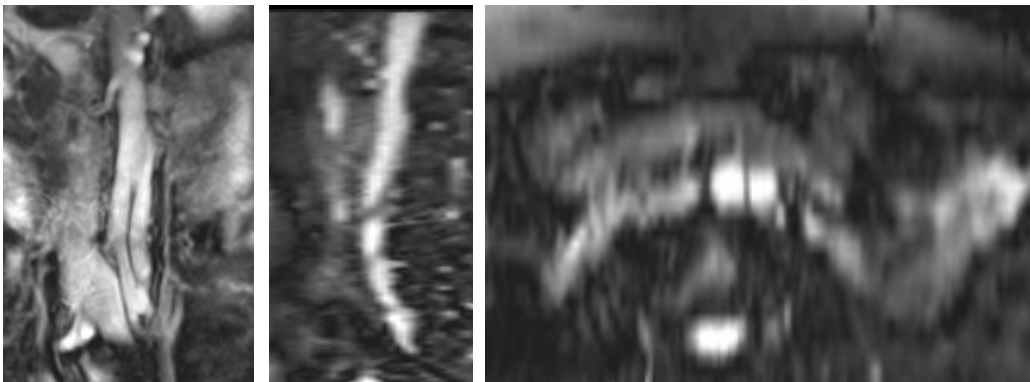


Abbildung 173: MPR-Rekonstruktion, SPACE-MRA, Aorta descendens, abdominelle Pathologie, Pat. 3

links: cor. E., mittig: sag. E., rechts: tra. E.

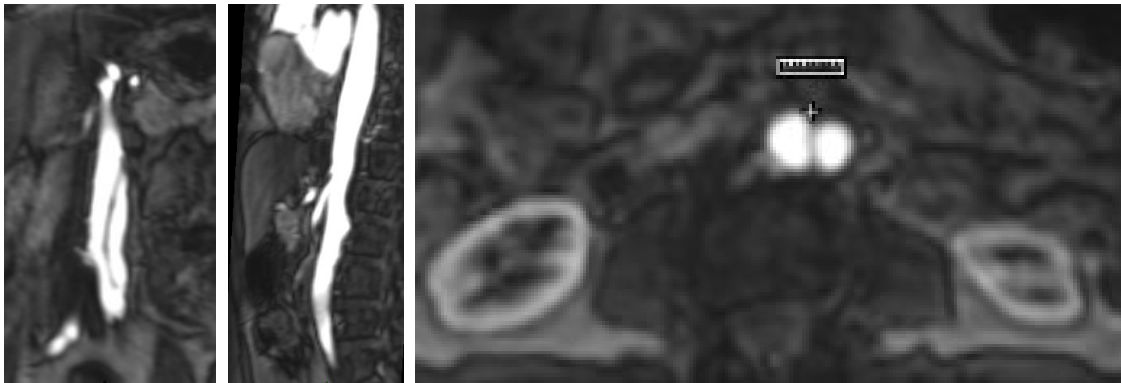


Abbildung 174: MPR-Rekonstruktion, CE-MRA, Aorta descendens, abdominelle Pathologie, Pat. 3

links: cor. E., mittig: sag. E., rechts: tra. E.

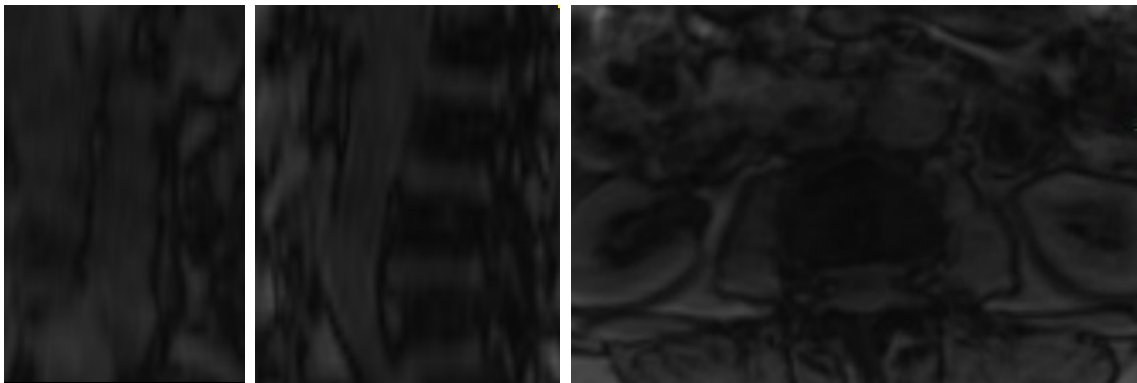


Abbildung 175: MPR-Rekonstruktion, VIBE-MRI, Aorta descendens, abdominelle Pathologie, Pat. 3

links: cor. E., mittig: sag. E., rechts: tra. E.

Wie bereits bei der Darstellung der distalen Pathologie beschrieben, kann aufgrund der Stufenbildung und der Inhomogenitäten die QISS-Sequenz allein nicht zur Befundung verwendet werden. Nur in der Transversalebene ist die Dissektionsmembran erkennbar. Die SPACE-MRA und CE-MRA hingegen ermöglichen eine gute Beurteilung der Aorta und der Dissektion. In der VIBE-MRI-Aufnahme wiederum ist die Aorta durch den geringen Kontrastunterschied nur schwer abgrenzbar und eine Dissektion gar nicht möglich zu erkennen.

Durchmesservergleich:

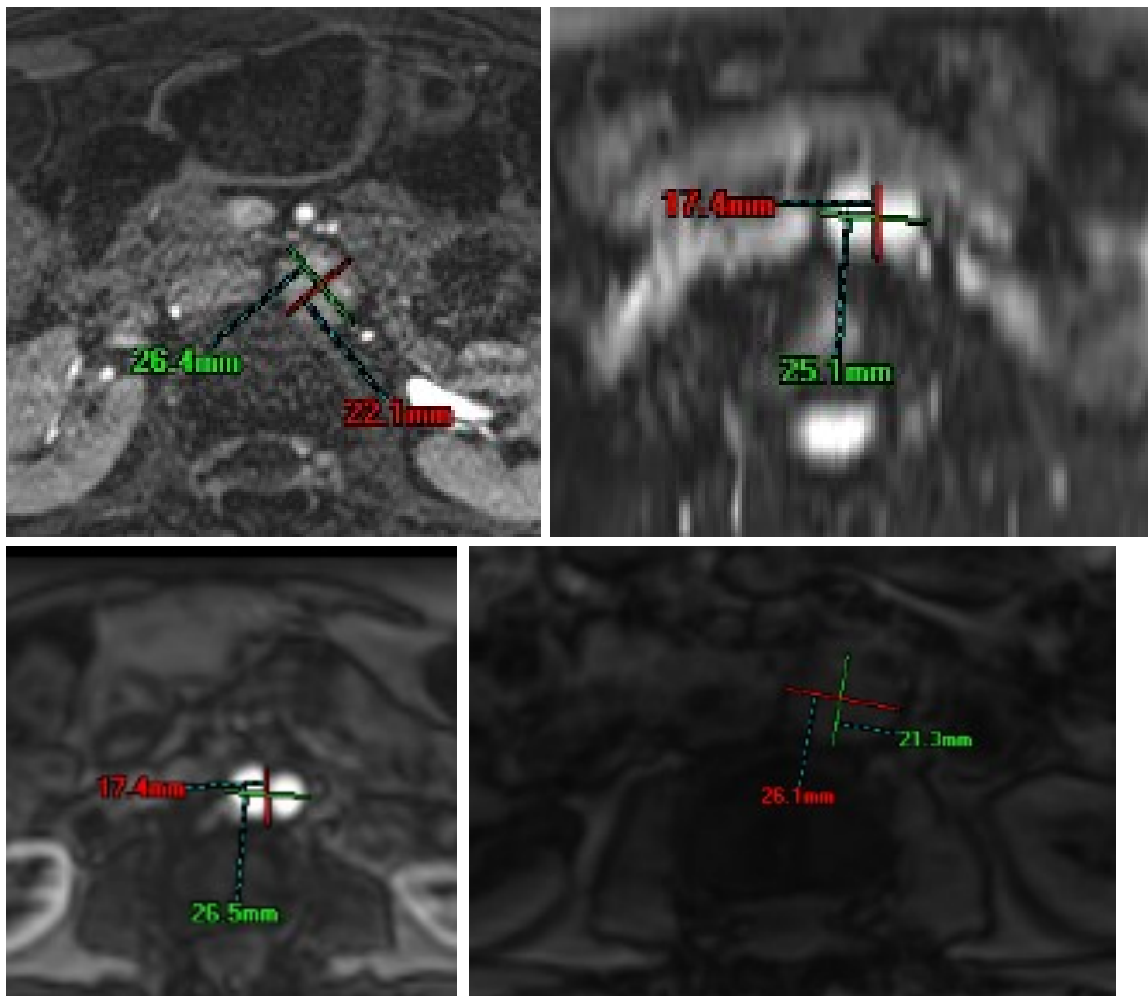


Abbildung 176: Durchmesser Aorta desc., abdominelle Pathologie, QISS-MRA (l.-o.), SPACE-MRA (r.-o.), CE-MRA (l.-u.) (MPR-Rekonst.: transversal), Pat. 3  
QISS-MRA (l.-o.): 2,6 x 2,2cm, SPACE-MRA (r.-o.): 2,5 x 1,7cm  
CE-MRA (l.-u.): 2,7 x 1,7cm, VIBE-MRI (r.-u.): 2,6 x 2,1cm

Die Qualitätsbeurteilung bestätigt sich auch bei dem Durchmesservergleich. Die Durchmesser in SPACE- und CE-MRA liegen sehr nah beieinander. Bei der QISS- und VIBE-Sequenz weichen die Messwerte nur gering voneinander ab, aufgrund der schlechten Aortenwandabgrenzbarkeit kann eine hohe Messvariabilität entstehen.

Bei jeder Art von Dissektion muss auch ein möglicherweise vorliegendes Entry/Re-Entry abgeklärt werden:

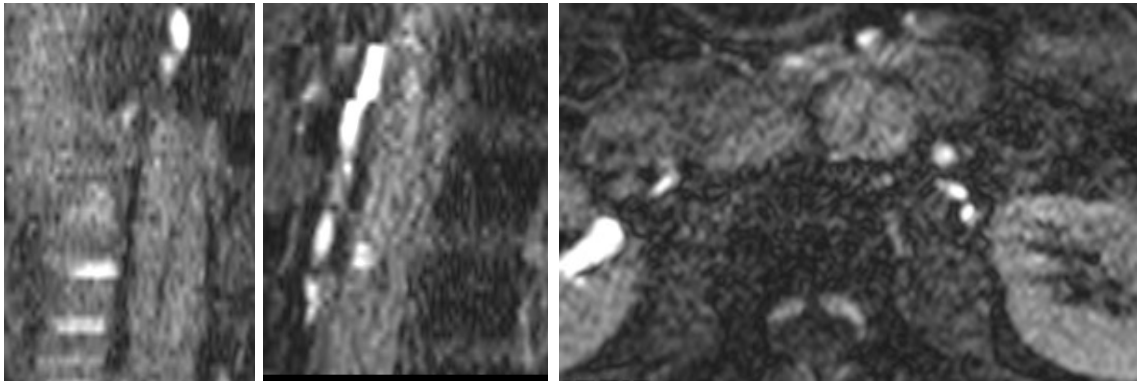


Abbildung 177: MPR-Rekonstruktion, QISS-MRA, Aorta descendens, abdominelle Pathologie, Entry, Pat. 3  
links: cor. E., mittig: sag. E., rechts: tra. E.

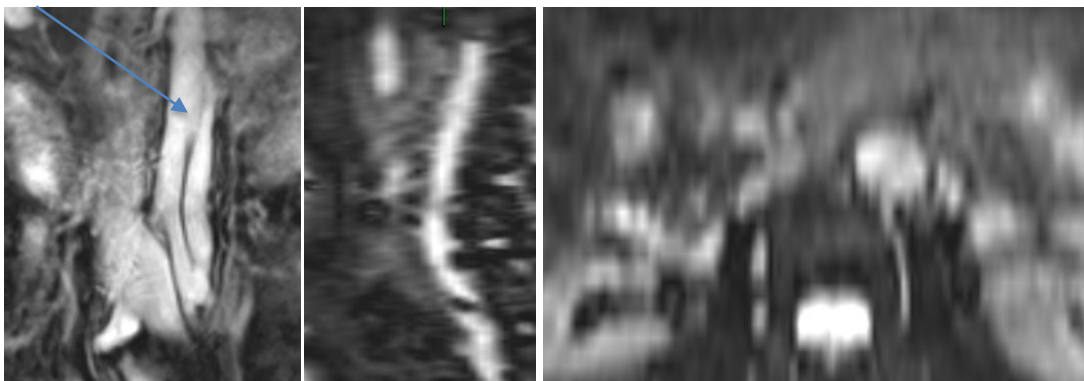


Abbildung 178: MPR-Rekonstruktion, SPACE-MRA, Aorta descendens, abdominelle Pathologie, Entry, Pat. 3  
links: cor. E., mittig: sag. E., rechts: tra. E.

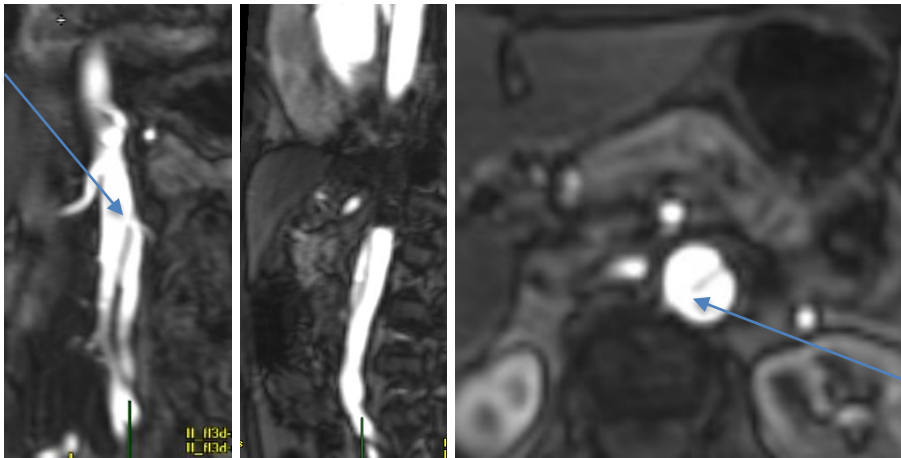


Abbildung 179: MPR-Rekonstruktion, CE-MRA, Aorta descendens, abdominelle Pathologie, Entry, Pat. 3  
links: cor. E., mittig: sag. E., rechts: tra. E.

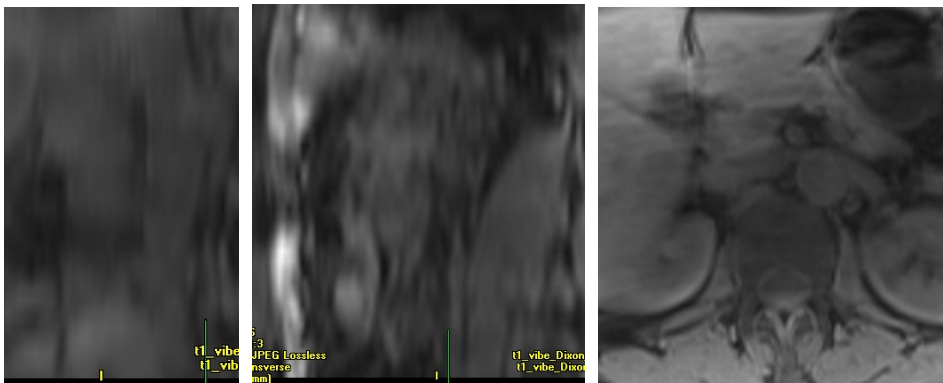


Abbildung 180: MPR-Rekonstruktion, VIBE-MRI, Aorta descendens, abdominelle Pathologie, Entry, Pat. 3  
links: cor. E., mittig: sag. E., rechts: tra. E.

In der QISS-MRA und VIBE-MRI-Aufnahme kann aufgrund schlechter Qualität kein Entry erkannt werden, in der QISS-MRA ist nur leicht eine Dissektionsmembran sichtbar, in der VIBE-MRI ist auch diese nicht erkennbar. In den Sequenzen SPACE-MRA und CE-MRA hingegen ist die Dissektion und auch ein mögliches Entry/Re-Entry (Pfeil) gut erkennbar, sowohl in der Coronalebene als auch in der Transversalebene der CE-MRA.

Der vierte Patient erlitt bei einem Unfall eine Aortendissektion des Typs A. Diese wurde mit einem Ersatz der Aorta ascendens und der Aortenklappe therapiert. Da im Aortenbogen und der Aorta descendens weiterhin eine Dissektionsmembran vorliegt, sind eine weiterführende medikamentöse Therapie und regelmäßige Nachkontrollen von großer Wichtigkeit. Es können die Ergebnisse der SPACE-MRA, CE-MRA, VIBE-MRI und CE-CTA verglichen werden.

Man legte folgende Messebenen fest:

- Größter Durchmesser der Aorta ascendens
- Vor Abgang der Supraaortalen
- Nach Abgang der Supraaortalen = proximaler Beginn der Pathologie
- Größter Durchmesser der Aorta descendens
- Mittlerer Abschnitt der Pathologie
- Distales Ende der Pathologie

Zum Qualitätsvergleich wurden außerdem die 3D-Rekonstruktion, die Bildgebung der Supraaortalen, die Darstellung der Pathologie sowie die Beurteilbarkeit möglicher Entries/Re-Entries eingesetzt.

„3D-Rekonstruktion“:

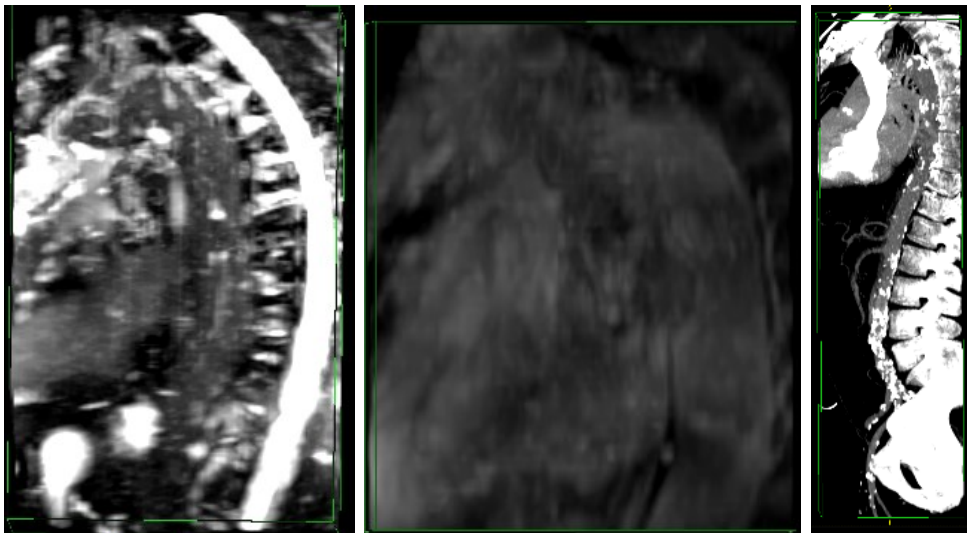


Abbildung 181: MIP-3D-Rekonst., SPACE-MRA (l.), VIBE-MRI (m.), CE-CTA (r.), Pat. 4

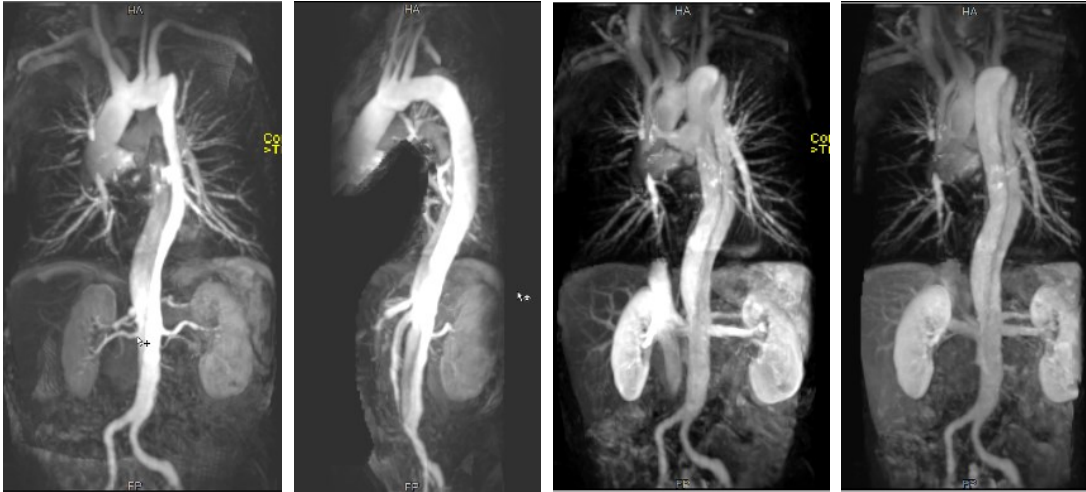
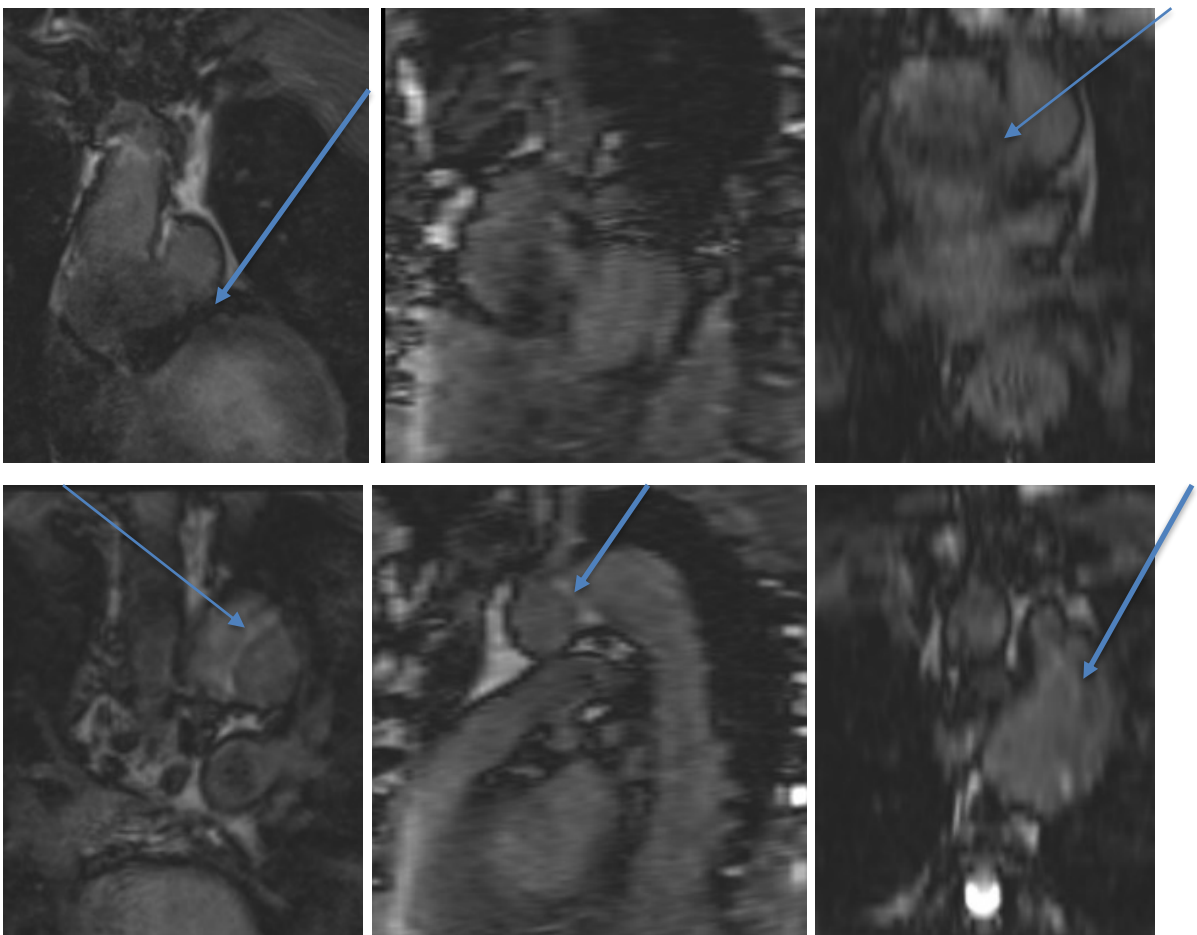


Abbildung 182: MIP-3D-Rekonst., CE-MRA (von links nach rechts: 1-4; Bild 1+2: 1. Phase, Bild 3: 2. Phase und Bild 4: 3. Phase), Pat. 4

„Darstellung der Pathologie“:



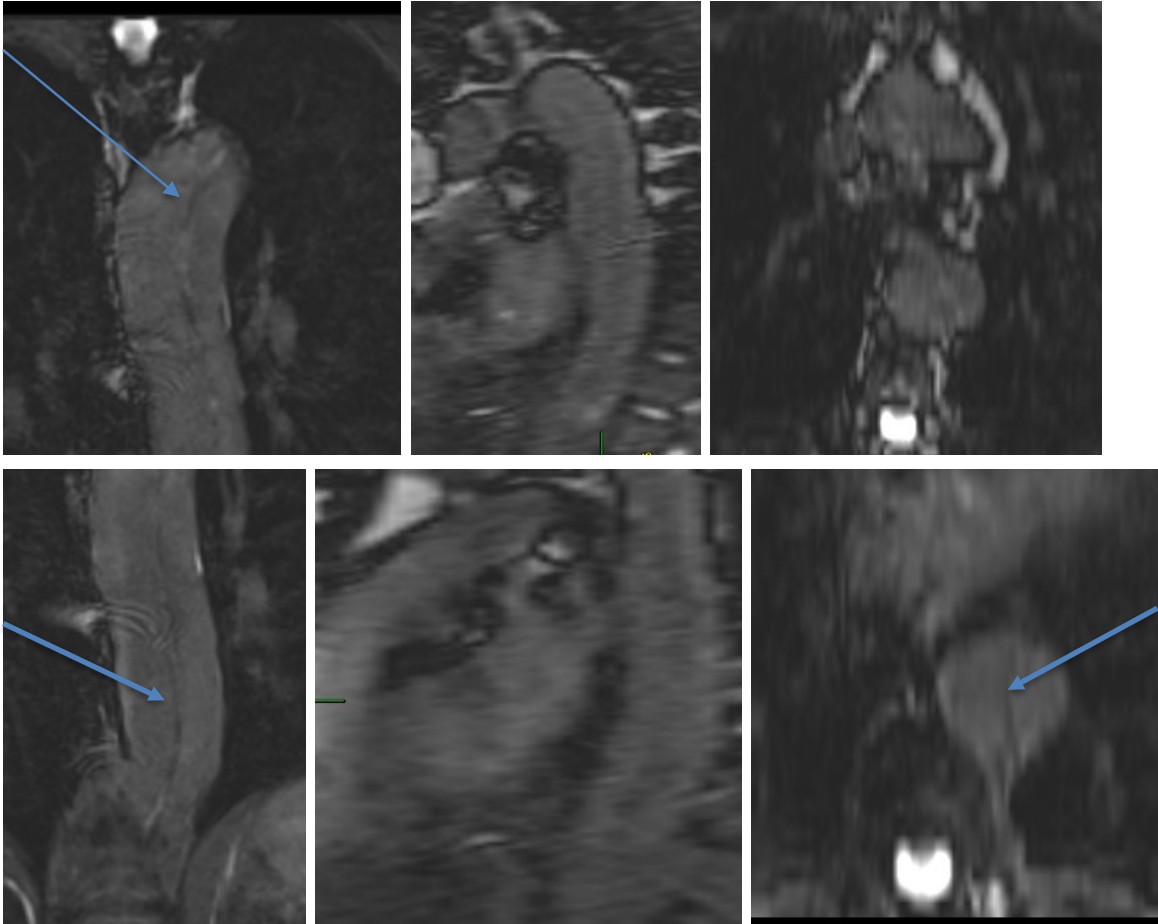
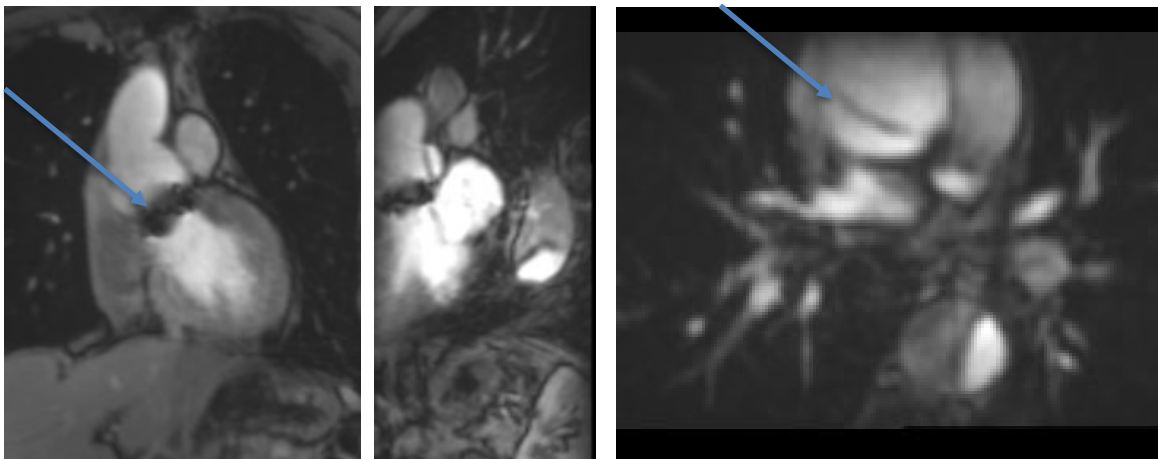


Abbildung 183: MPR-Rekonstruktion, SPACE-MRA, Pathologie, Pat. 4  
links: cor. E., mittig: sag. E., rechts: tra. E.



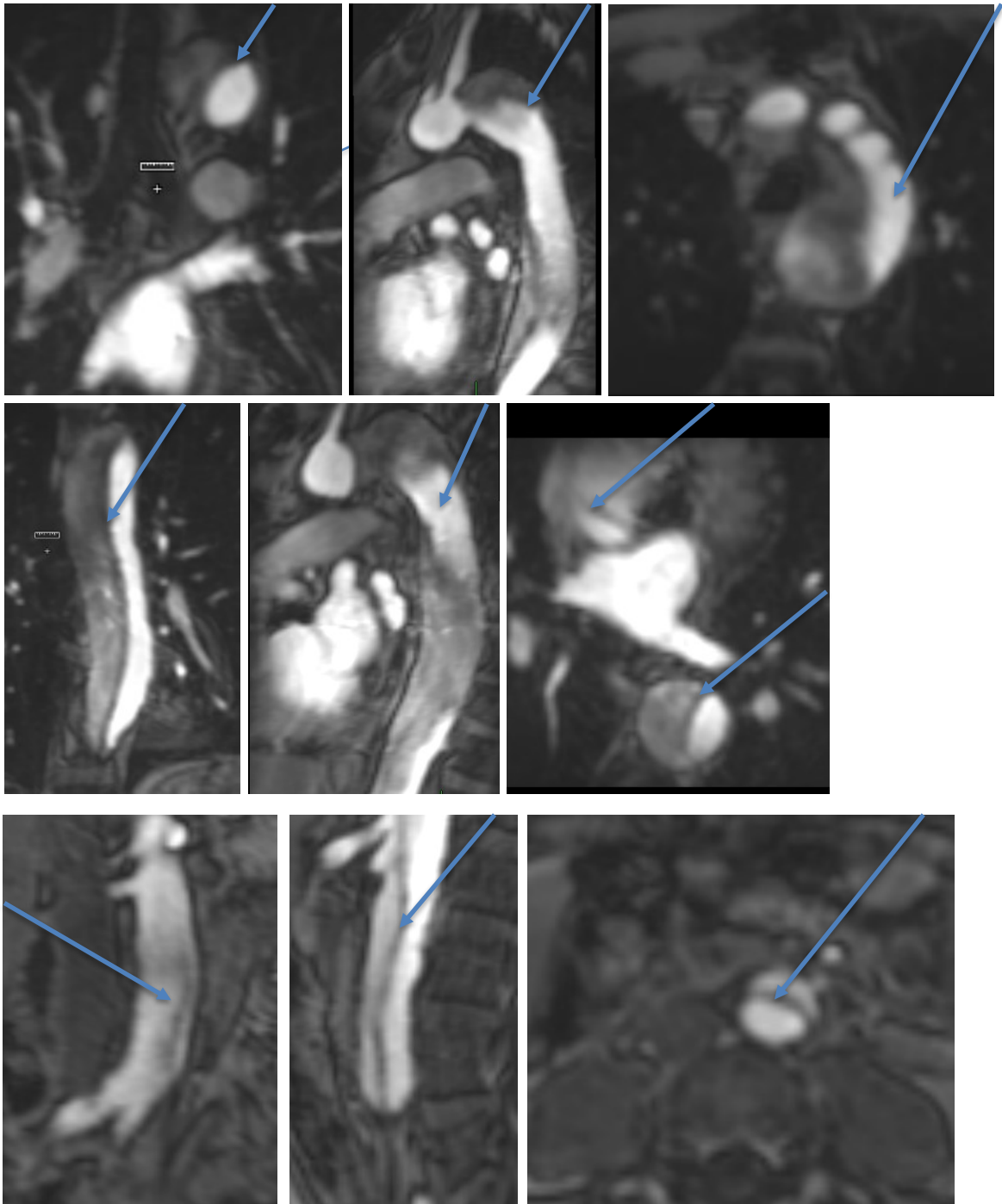
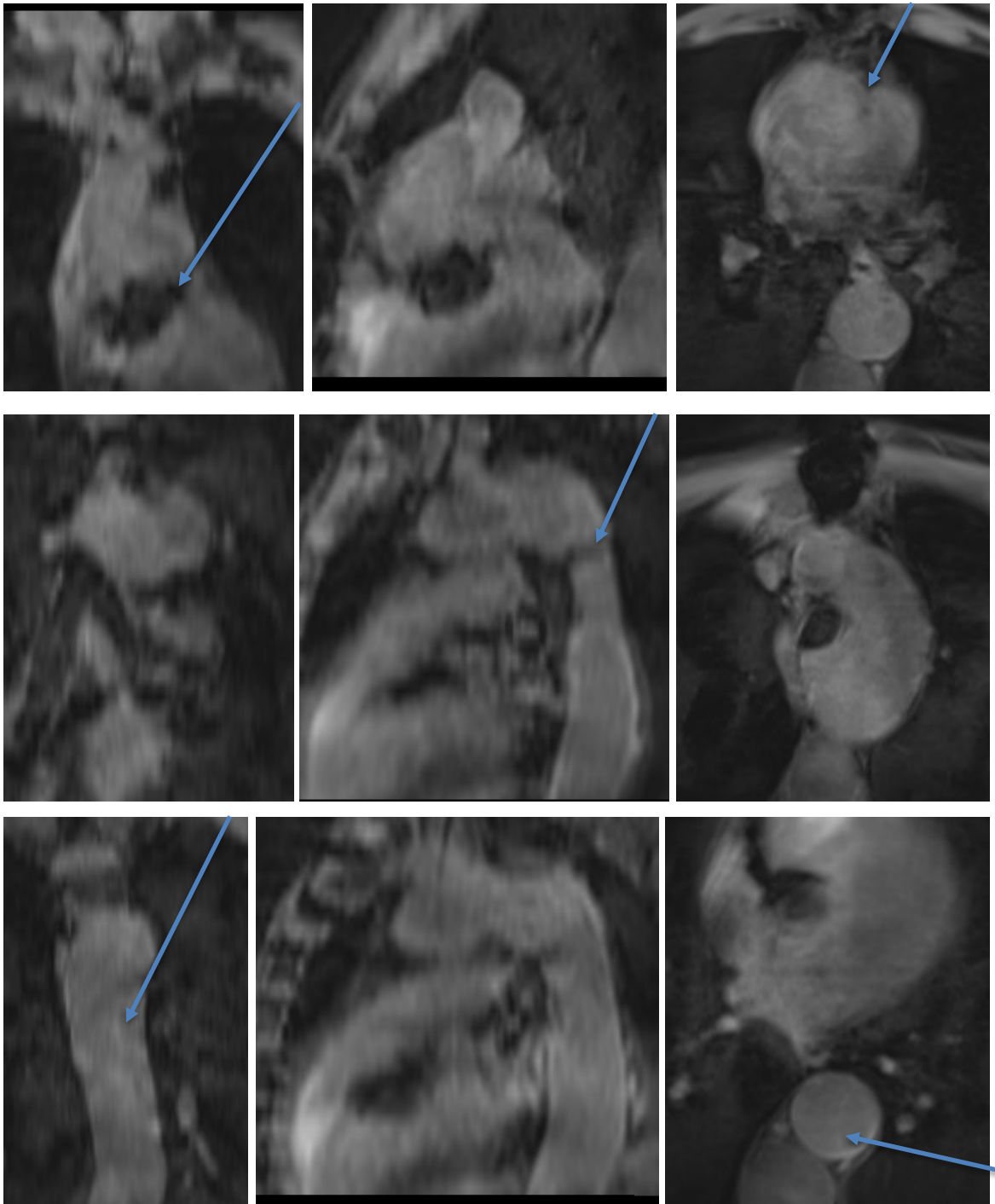


Abbildung 184: MPR-Rekonstruktion, CE-MRA, Pathologie, Pat. 4  
links: cor. E., mittig: sag. E., rechts: tra. E.



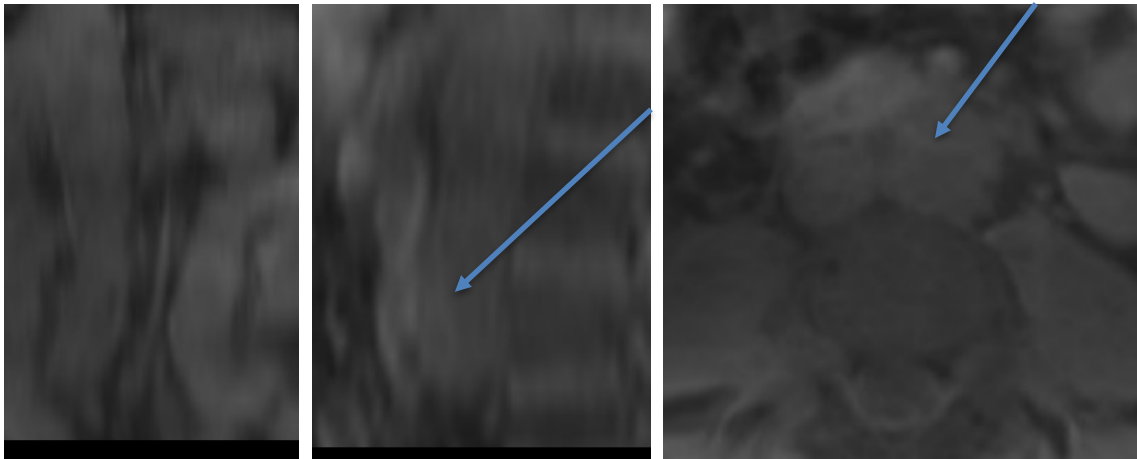


Abbildung 185: MPR-Rekonstruktion, VIBE-MRI, Pathologie, Pat. 4  
 links: cor. E., mittig: sag. E., rechts: tra. E.

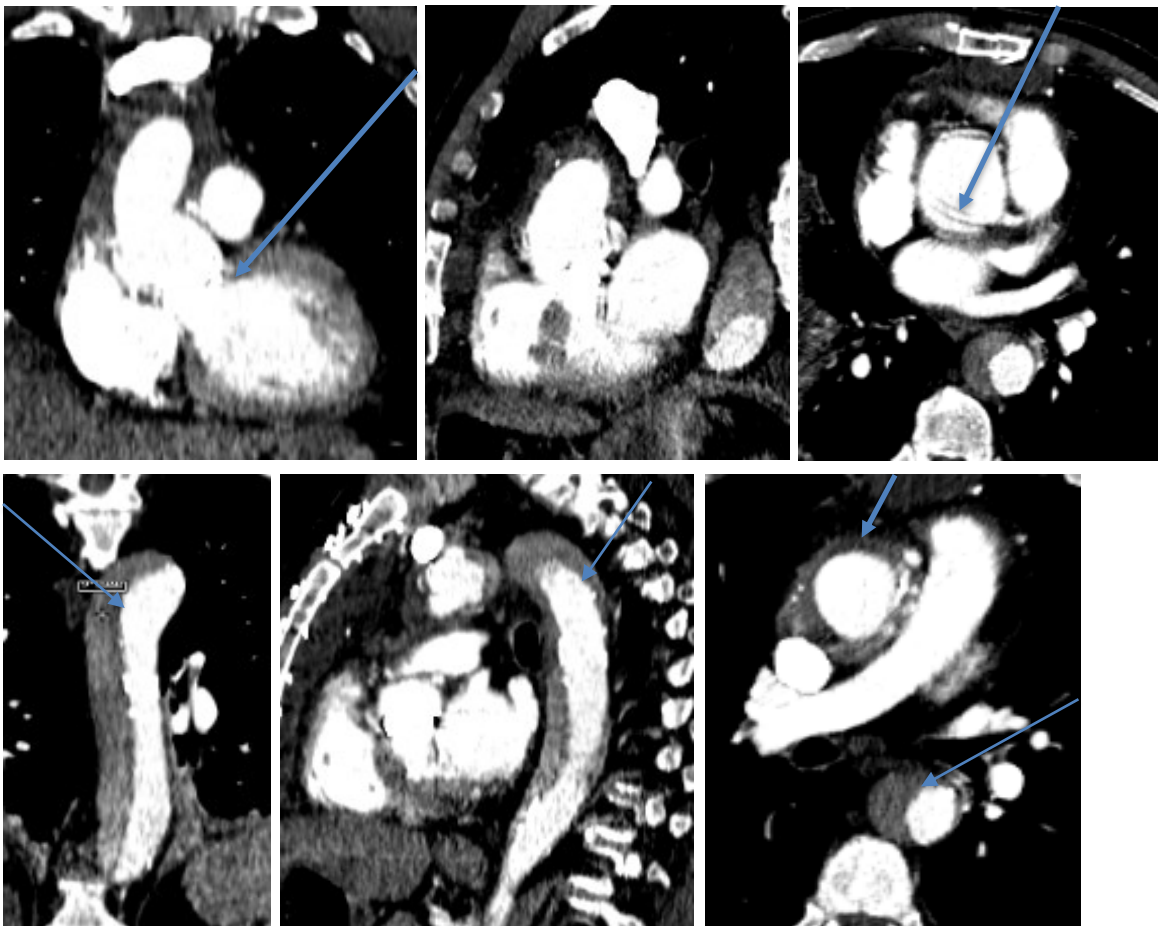




Abbildung 186: MPR-Rekonstruktion, CE-CTA, Pathologie, Pat. 4  
links: cor. E., mittig: sag. E., rechts: tra. E.

In den CE-MRA- und CE-CTA-Aufnahmen wird die Pathologie mit der Dissektionsmembran auf den ersten Blick deutlich (siehe Pfeile). Aber auch in der SPACE-MRA ist die Pathologie mit der Dissektionsmembran (Pfeile) sichtbar, im Verhältnis zu den CE-MRA- und CE-CTA-Aufnahmen aber deutlich schlechter. In den Aufnahmen, die anhand der VIBE-MRI erstellt wurden, kann eine Pathologie bzw. die Dissektionsmembran nur erahnt werden, wenn man den Verlauf aus anderen Bildgebungen kennt.

In der jeweiligen ersten Aufnahme bei jeder Sequenz ist in der Transversalebene ein Artefakt per Pfeil markiert, dass womöglich durch den Übergang von Aorta ascendens-Ersatz in das normale Aortengewebe entsteht. Außerdem wurde in der Coronalebene der ersten Aufnahmen bei jeder Sequenz das Artefakt des Aortenklappenersatz per Pfeil markiert.

„Größter Durchmesser der Aorta ascendens“:



Abbildung 187: MPR-Rekonstruktion, SPACE-MRA, Aorta asc., Pat. 4  
links: cor. E., mittig: schräg-sag. E., rechts: schräg-tra. E.



Abbildung 188: MPR-Rekonstruktion, CE-MRA, Aorta asc., Pat. 4  
links: cor. E., mittig: schräg-sag. E., rechts: schräg-tra. E.

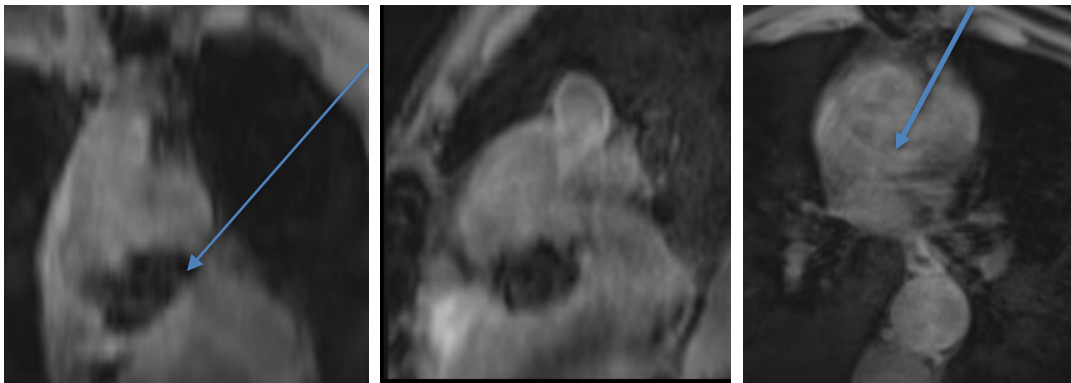


Abbildung 189: MPR-Rekonstruktion, VIBE-MRI, Aorta asc., Pat. 4  
links: cor. E., mittig: schräg-sag. E., rechts: schräg-tra. E.



Abbildung 190: MPR-Rekonstruktion, CE-MRA, Aorta asc., Pat. 4  
links: cor. E., mittig: schräg-sag. E., rechts: schräg-tra. E.

In dieser Ebene der Aorta ist keine Pathologie mehr sichtbar, da es sich um den Ersatz der Aortenklappe und der Aorta ascendens handelt. Die Artefakte der Aortenklappe sind in jeder Sequenz sichtbar (Pfeil in der Aufnahme in der Coronalebene), in der CE-MRA- und VIBE-MRI-Aufnahme ist das Artefakt am stärksten ausgeprägt. Auch den Übergang von Aortenklappenersatz zu Aorta ascendens-Ersatz erkennt man etwas weiter distal in der Aorta, da das Aortenlumen dort abgknickt ist.

Durchmesservergleich:

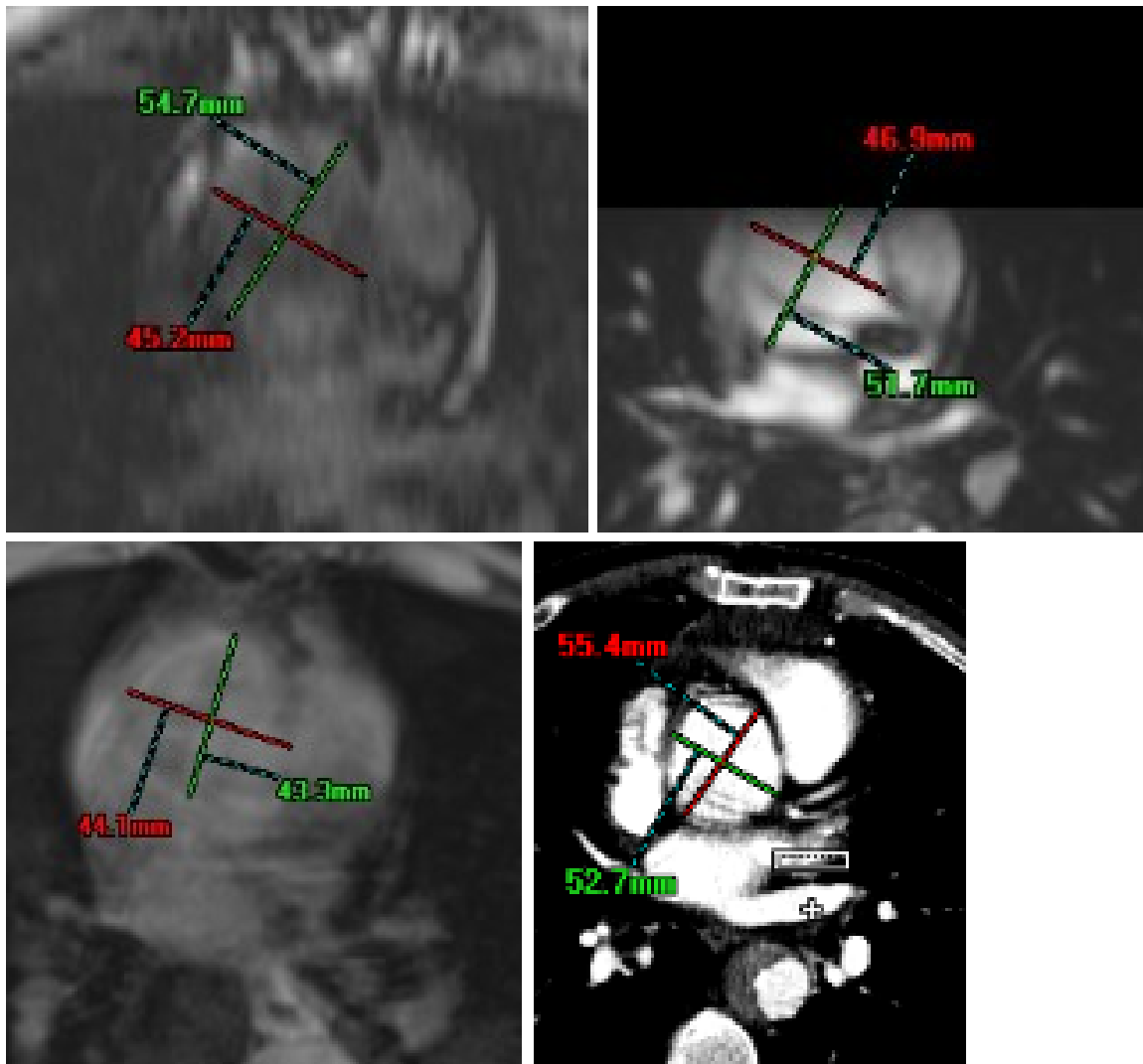


Abbildung 191: Durchmesser Aorta asc., SPACE-MRA (l.-o.), CE-MRA (r.-o.), VIBE-MRI (l.-u.), CE-CTA (r.-u.) (MPR-Rekonst.: transversal), Pat. 4  
SPACE-MRA (l.-o.): 5,5 x 4,5cm, CE-MRA (r.-o.): 5,2 x 4,7cm  
VIBE-MRI (l.-u.): 4,4 x 4,3cm, CE-CTA (r.-u.): 5,5 x 5,3cm

Die SPACE-MRA und CE-MRA-Messwerte liegen im ähnlichen Bereich, der größere der beiden Messwerte bei der CE-CTA-Messung liegt auch in dem Bereich. Stark abweichend ist mit 4,4cm der größere der beiden Messwerte der VIBE-MRI und mit 5,3cm der kleinere der beiden Messwerte der CE-CTA. Erschwert wird die Durchmesserermessung in diesem Fall sehr stark durch die Artefaktbildung aufgrund des Aorta-ascendens-Ersatzes. In den Aufnahmen der SPACE-MRA und VIBE-MRI ist die Aortenwand schwer zur Umgebung abgegrenzt.

„Vor dem Abgang der Supraaortalen“:

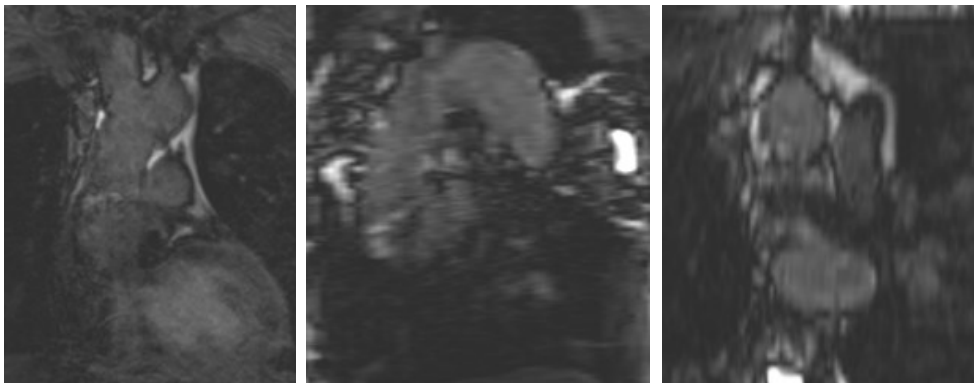


Abbildung 192: MPR-Rekonstruktion, SPACE-MRA, Aorta asc., vor Abgang der Supraaortalen, Pat. 4

links: cor. E., mittig: schräg-sag. E., rechts: schräg-tra. E.

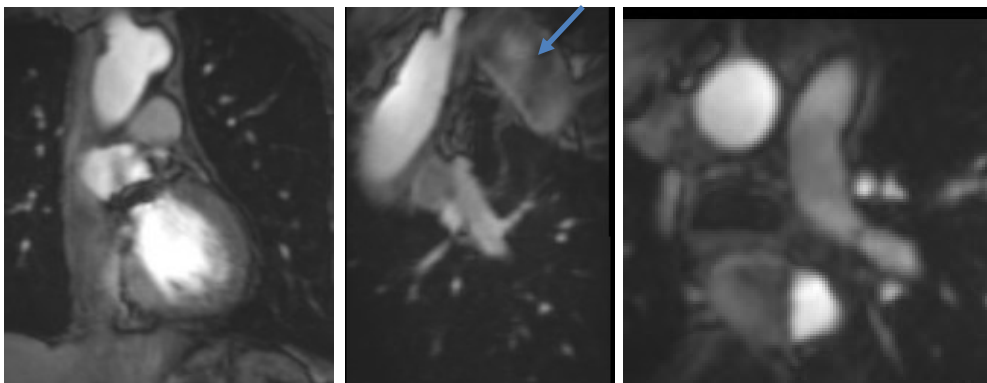


Abbildung 193: MPR-Rekonstruktion, CE-MRA, Aorta asc., vor Abgang der Supraaortalen, Pat. 4

links: cor. E., mittig: schräg-sag. E., rechts: schräg-tra. E.

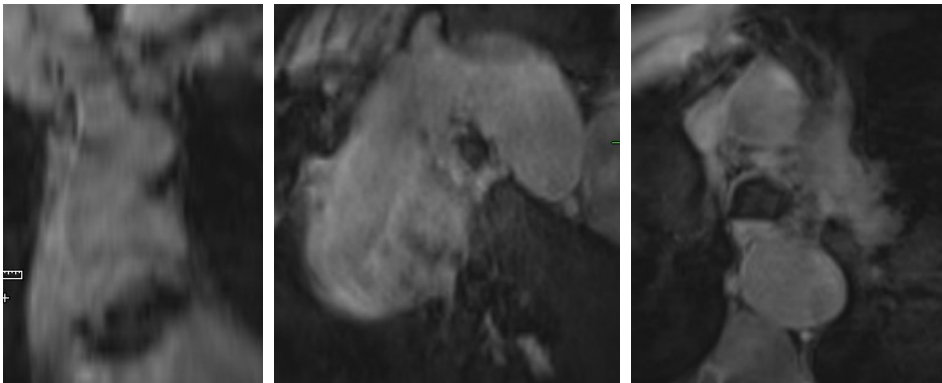


Abbildung 194: MPR-Rekonstruktion, VIBE-MRI, Aorta asc., vor Abgang der Supraaortalen, Pat. 4  
links: cor. E., mittig: schräg-sag. E., rechts: schräg-tra. E.

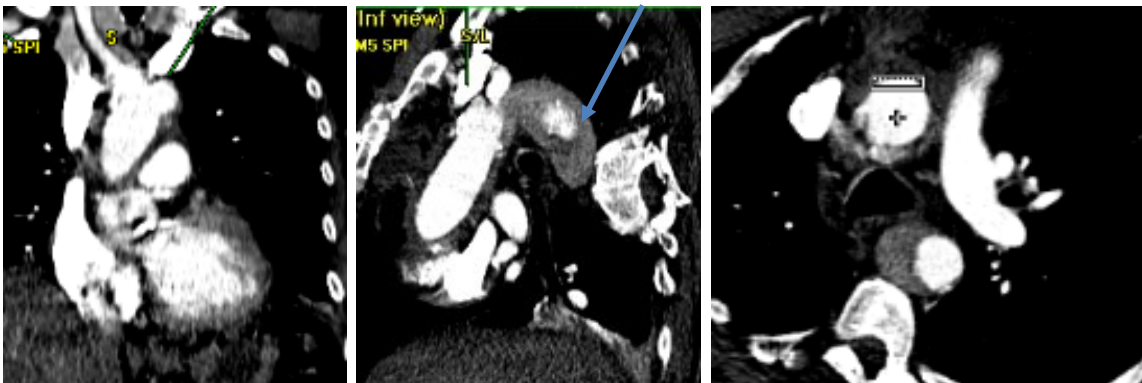


Abbildung 195: MPR-Rekonstruktion, CE-CTA, Aorta asc., vor Abgang der Supraaortalen, Pat. 4  
links: cor. E., mittig: schräg-sag. E., rechts: schräg-tra. E.

Die beste Qualität weist in dieser Ebene die CE-CTA-Aufnahme auf. Bei der VIBE-MRI erschweren Inhomogenitäten die verlässliche Beurteilung des Aortenlumens. In der CE-CTA- und CE-MRA-Aufnahme kann in der schräg-sagittalen Ebene bereits der Beginn der Aortendissektion im Arcus aortae erkannt werden (Pfeil).

Durchmesservergleich:

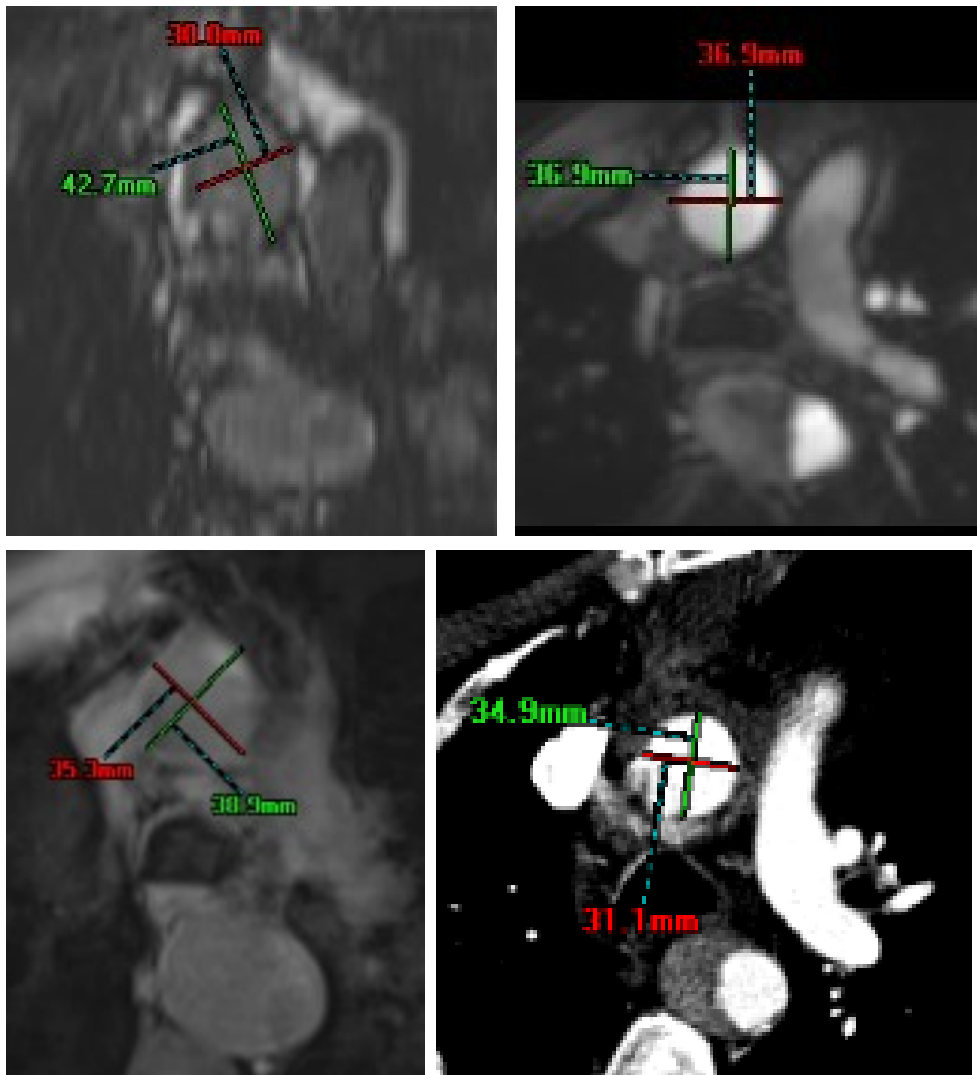


Abbildung 196: Durchmesser Aorta asc., vor Abgang der Supraaortalen, SPACE-MRA (l.-o.), CE-MRA (r.-o.), VIBE-MRI (l.-u.), CE-CTA (r.-u.) (MPR-Rekonst.: transversal), Pat. 4  
SPACE-MRA (l.-o.): 4,3 x 3,0cm, CE-MRA (r.-o.): 3,7 x 3,7cm  
VIBE-MRI (l.-u.): 3,9 x 3,5cm, CE-CTA (r.-u.): 3,5 x 3,1cm

Die Ausmessungen der CE-MRA und VIBE-MRI unterscheiden sich nur wenig, die Messungen der CE-CTA und SPACE-MRA hingegen weichen stärker ab. Die Messung des Durchmessers in der SPACE-MRA scheint verfälscht zu sein, da das Aortenlumen in dieser Aufnahme deutlich schräger angeschnitten ist, als in den anderen Aufnahmen. Der größere Durchmesserwert von 4,3cm ist in den anderen Aufnahmen mit maximal 3,9cm (Durchmesser in der VIBE-MRI-Aufnahme gemessen) vermessen. Der kleinere der beiden Durchmesserwerte wiederum ist mit 3,0cm niedriger als die Werte der anderen Aufnahmen.

„Supraaortale“:

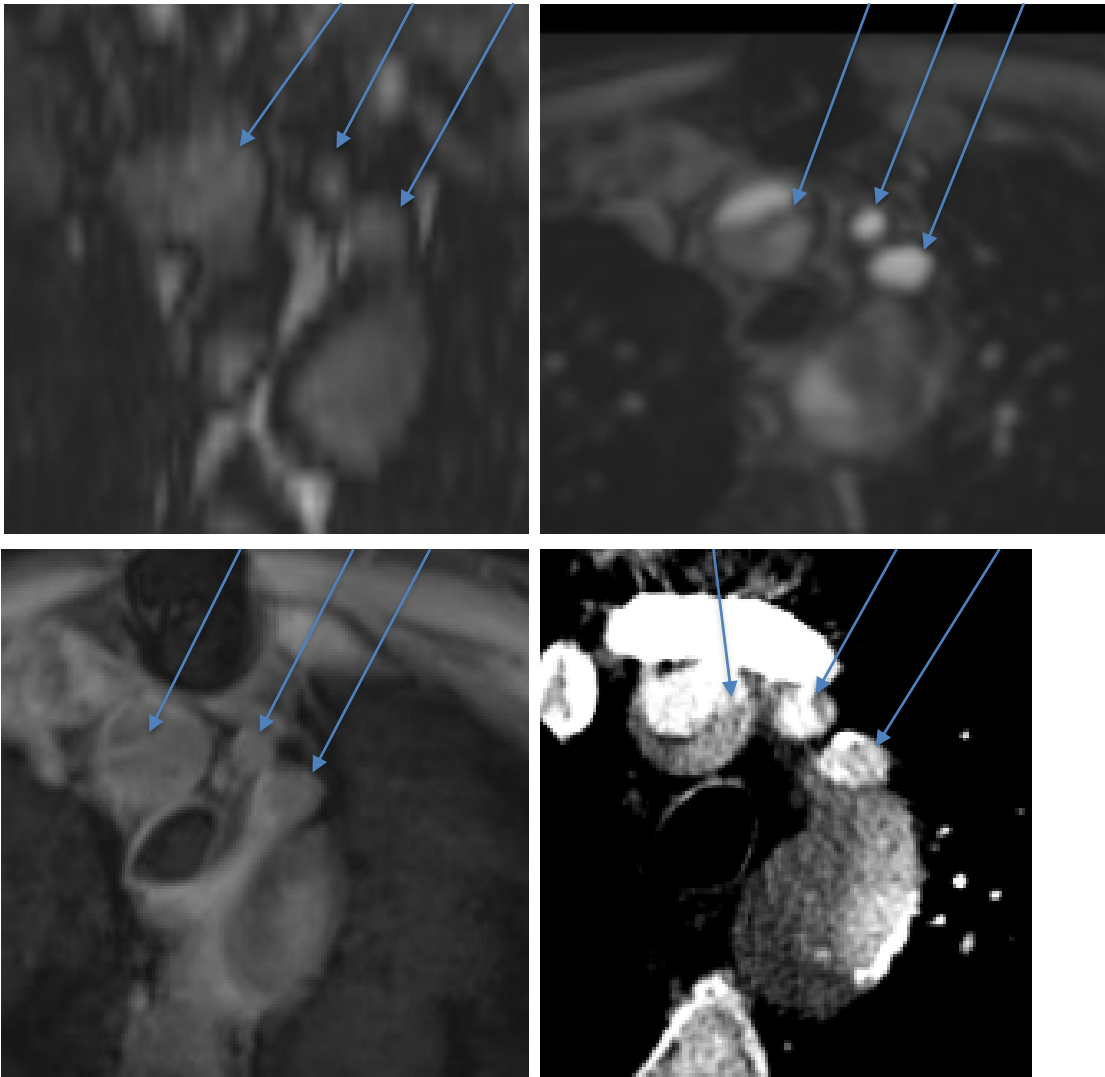


Abbildung 197: Supraaortale GefäÙe in der Transversalebene (MPR-Rekonst.), SPACE-MRA (l.-o.), CE-MRA (r.-o.), VIBE-MRI (l.-u.), CE-CTA (r.-u.), Pat. 4  
Truncus brachiocephalicus (l. Pfeil), Arteria carotis sinistra (m. Pfeil), Arteria subclavia sinistra (r. Pfeil)

Mit dem Pfeil, der auf den Truncus brachiocephalicus zeigt, ist im gleichen Moment auch die Dissektionsmembran markiert, die sich von der Aorta kommend in die supraaortalen GefäÙe fortgesetzt hat, in diesem Fall nur in den Truncus brachiocephalicus. Die Dissektionsmembran ist am besten in den Aufnahmen der CE-MRA und der CE-CTA erkennbar. In der SPACE-MRA-Aufnahme ist die Fortsetzung der Dissektion in die Supraaortalen am schwierigsten zu erkennen. Aufgrund von Inhomogenitäten sind die anderen beiden supraaortalen GefäÙe in der CE-CTA-Aufnahme schwer zu beurteilen. Die Dissektion im Aortenbogen ist in den Aufnahmen der CE-MRA, VIBE-MRI und CE-CTA gut dargestellt.

„Nach Abgang der Supraaortalen“:

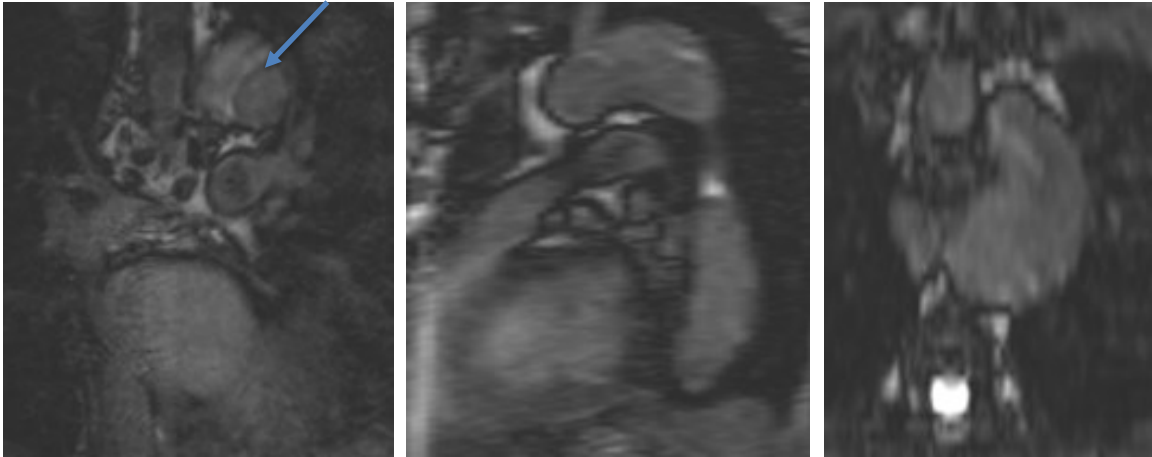


Abbildung 198: MPR-Rekonstruktion, SPACE-MRA, Arcus aortae, nach Abgang der Supraaortalen, Pat. 4

links: cor. E., mittig: sag. E., rechts: tra. E.

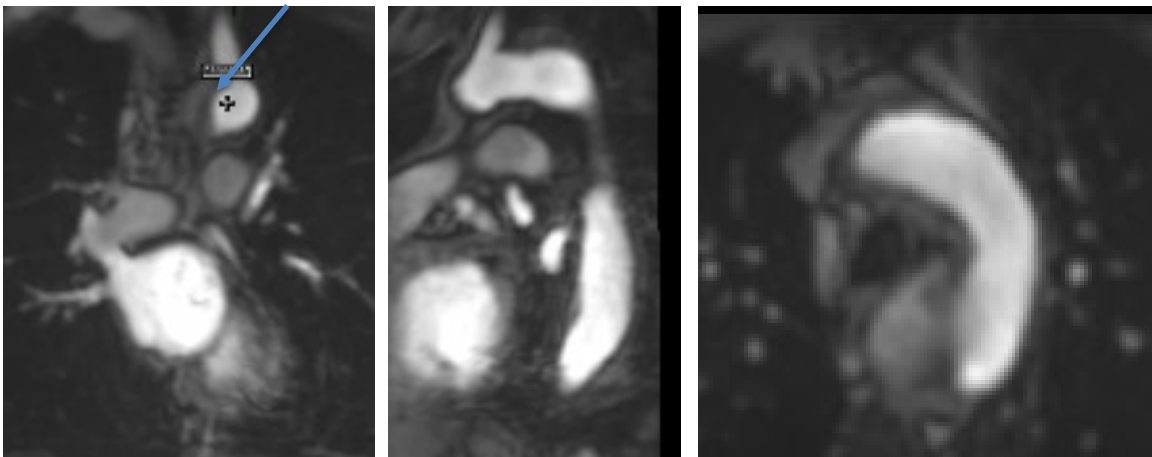


Abbildung 199: MPR-Rekonstruktion, CE-MRA, Arcus aortae, nach Abgang der Supraaortalen, Pat. 4

links: cor. E., mittig: sag. E., rechts: tra. E.

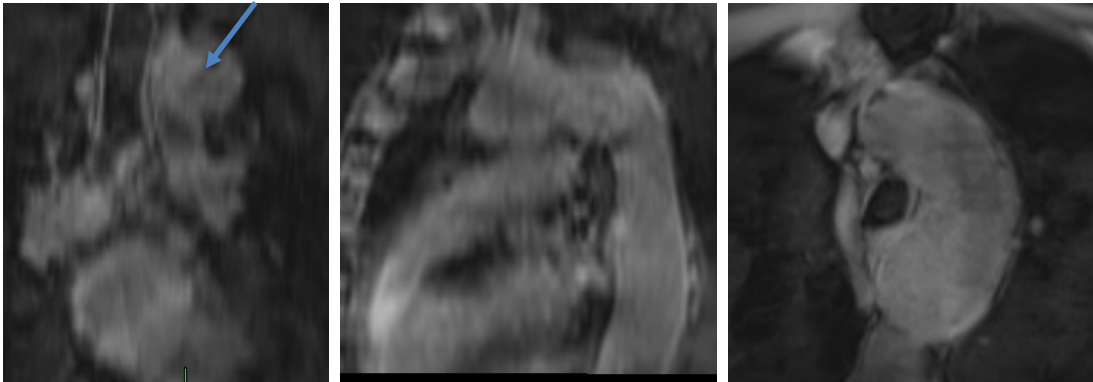


Abbildung 200: MPR-Rekonstruktion, VIBE-MRI, Arcus aortae, nach Abgang der Supraaortalen, Pat. 4  
links: cor. E., mittig: sag. E., rechts: tra. E.

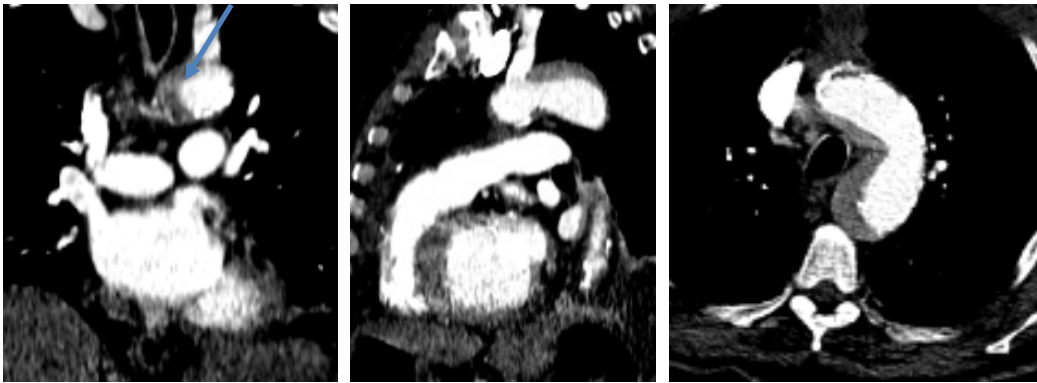


Abbildung 201: MPR-Rekonstruktion, CE-CTA, Arcus aortae, nach Abgang der Supraaortalen, Pat. 4  
links: cor. E., mittig: sag. E., rechts: tra. E.

In dieser Messebene sind in der Coronalansicht in allen Sequenzen, wenn auch unterschiedlich deutlich, die Dissektionsmembran und das wahre und falsche Lumen sichtbar. In den CE-MRA- und CE-CTA-Aufnahmen ist das falsche Lumen nicht nur in der Coronalansicht, sondern auch in der Sagittal- und Transversalansicht erkennbar.

Durchmesservergleich:

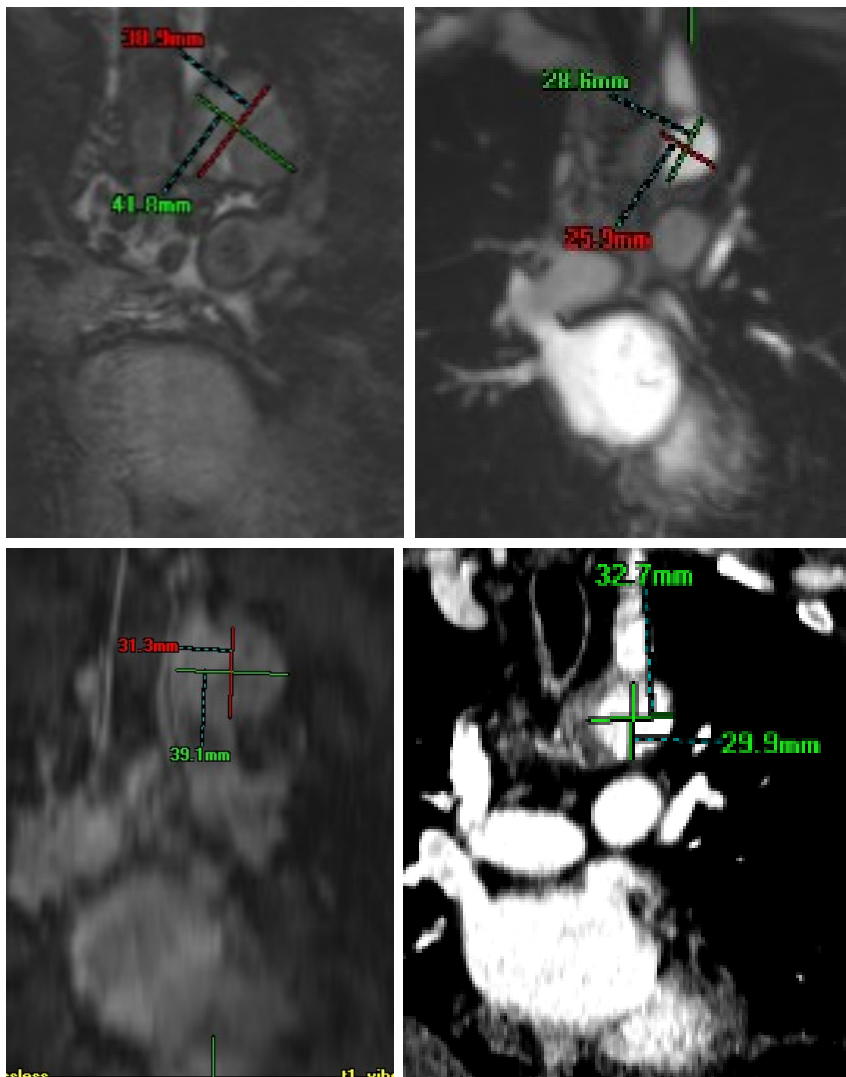


Abbildung 202: Durchmesser Arcus aortae., nach Abgang der Supraaortalen, SPACE-MRA (l.-o.), CE-MRA (r.-o.), VIBE-MRI (l.-u.), CE-CTA (r.-u.) (MPR-Rekonst.: coronal), Pat. 4  
SPACE-MRA (l.-o.): 4,2 x 3,9cm, CE-MRA (r.-o.): 2,9 x 2,6cm  
VIBE-MRI (l.-u.): 3,9 x 3,1cm, CE-CTA (r.-u.): 3,3 x 3,0cm

Hierbei können nicht alle Werte verglichen werden. In der SPACE-MRA- und VIBE-MRI-Aufnahme können wahres und falsches Lumen schlechter unterschieden werden, daher wurde das gesamte Lumen ausgemessen. Der zweite Messwert weicht aber voneinander ab. Die Aortenwand ist in der SPACE-MRA-Aufnahme besser abgrenzbar als in der VIBE-MRI-Aufnahme, sodass man bei der VIBE-MRI von einer höheren Messvariabilität ausgeht. Bei den Bildern der CE-MRA und CE-CTA kann das wahre Lumen durch die stärkere Kontrastierung besser abgegrenzt werden. Deshalb wurde dieses ausgemessen, die Werte für das wahre Lumen unterscheiden sich allerdings deutlich.

„Größter Durchmesser Aorta descendens“:



Abbildung 203: MPR-Rekonstruktion, SPACE-MRA, Aorta desc., Pat. 4  
links: cor. E., mittig: schräg-sag. E., rechts: schräg-tra. E.

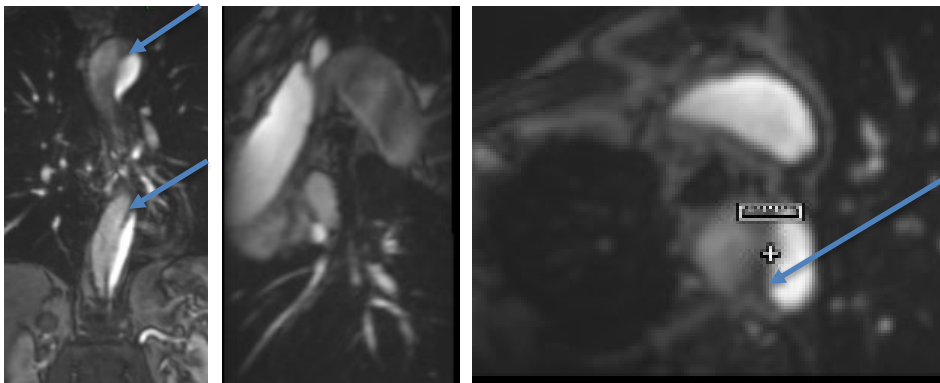


Abbildung 204: MPR-Rekonstruktion, CE-MRA, Aorta desc., Pat. 4  
links: cor. E., mittig: schräg-sag. E., rechts: schräg-tra. E.

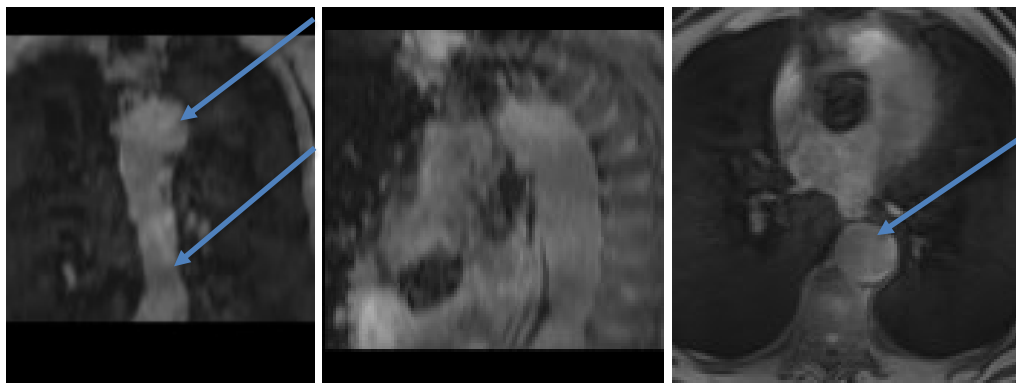


Abbildung 205: MPR-Rekonstruktion, VIBE-MRI, Aorta desc., Pat. 4  
links: cor. E., mittig: schräg-sag. E., rechts: schräg-tra. E.

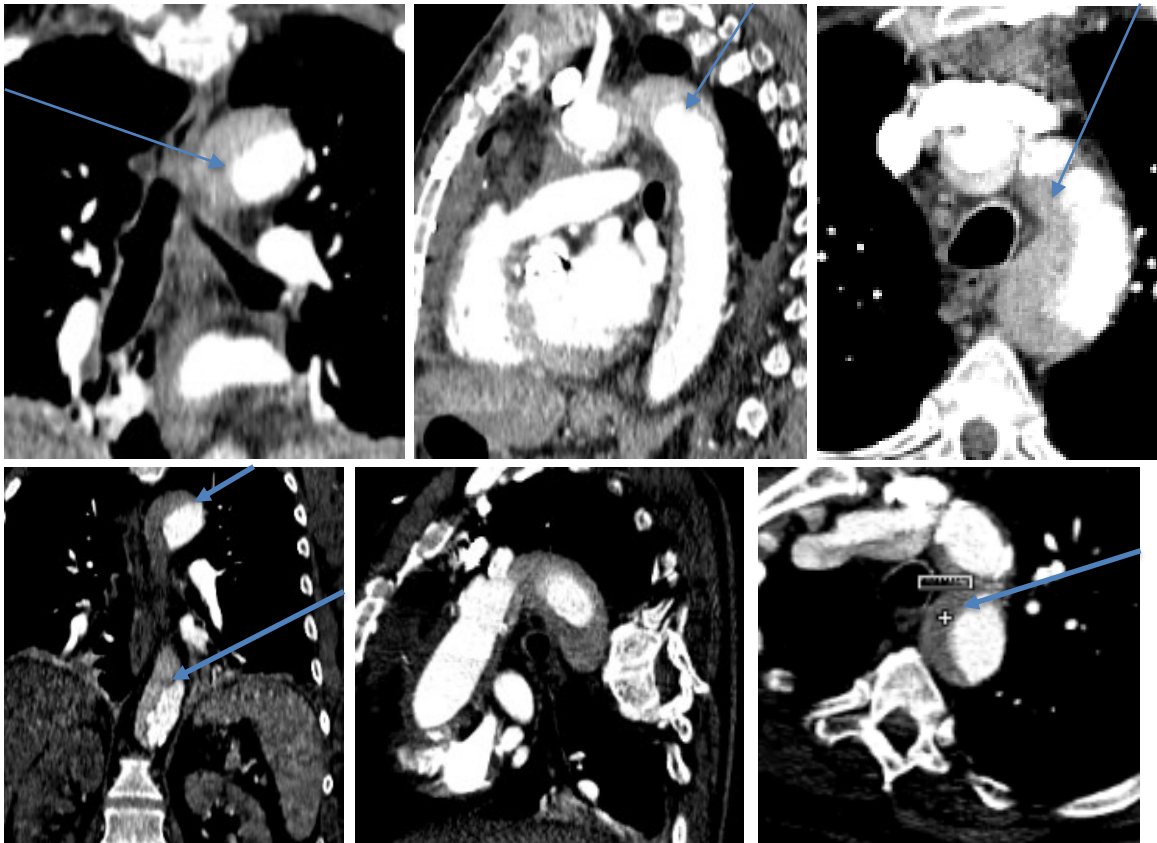


Abbildung 206: MPR-Rekonstruktion, CE-CTA, Aorta desc., Pat. 4  
links: cor. E., mittig: schräg-sag. E., rechts: schräg-tra. E.

Die Pathologie ist sowohl in der CE-MRA als auch in der CE-CTA, vor allem durch die starke Kontrastierung des wahren Lumens, gut beurteilbar. Auch in der schräg-sagittalen Ansicht kann bei den CE-MRA- und CE-CTA-Aufnahmen die Dissektion erkannt werden. In der SPACE-MRA ist die Dissektion zwar auch sichtbar, aber aufgrund des geringeren Kontrastunterschieds zwischen wahren und falschem Lumen ist die Beurteilung entsprechend schwer. In der VIBE-MRI-Aufnahme ist die Dissektionsmembran nur zu erahnen, wenn man aus anderen Aufnahmen den Verlauf kennt.

Durchmesservergleich:

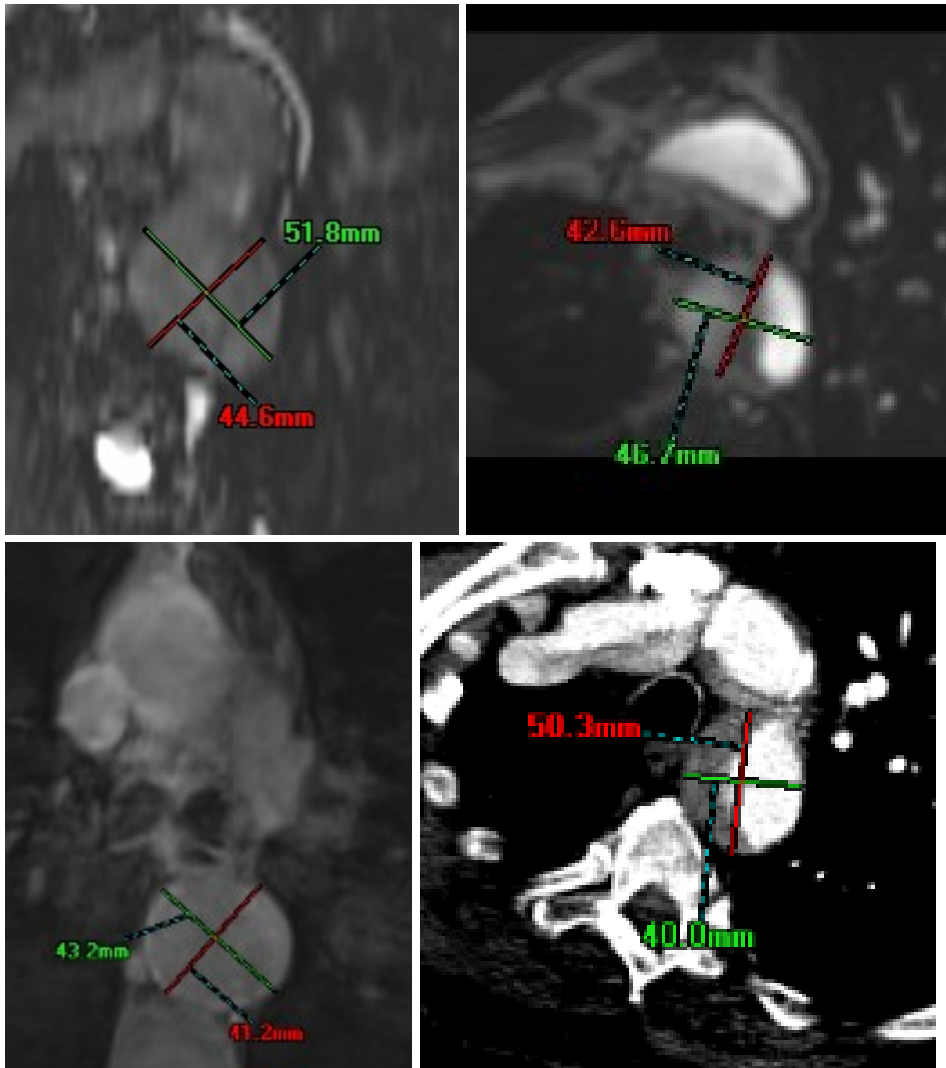


Abbildung 207: Durchmesser Aorta desc., SPACE-MRA (l.-o.), CE-MRA (r.-o.), VIBE-MRI (l.-u.), CE-CTA (r.-u.) (MPR-Rekonst.: coronal), Pat. 4  
SPACE-MRA (l.-o.): 5,2 x 4,5cm, CE-MRA (r.-o.): 4,7 x 4,3cm  
VIBE-MRI (l.-u.): 4,3 x 4,1cm, CE-CTA (r.-u.): 5,0 x 4,0cm

In diesem Fall wurde immer das gesamte Lumen abgemessen, nicht nur das wahre Lumen, auch wenn es gut abgrenzbar ist. Dabei schienen die Messwerte von der SPACE-MRA, CE-MRA und CE-CTA vergleichbar. Der größere Messwert der VIBE-MRI hingegen wich mit 4,3cm nach unten ab.

„Mittlerer Abschnitt der Pathologie“:

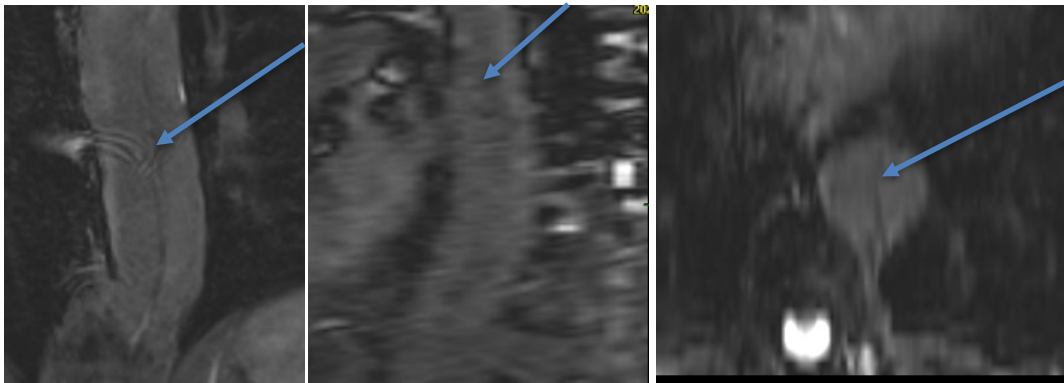


Abbildung 208: MPR-Rekonstruktion, SPACE-MRA, Aorta desc., mittlerer Abschnitt der Pathologie, Pat. 4

links: cor. E., mittig: sag. E., rechts: tra. E.

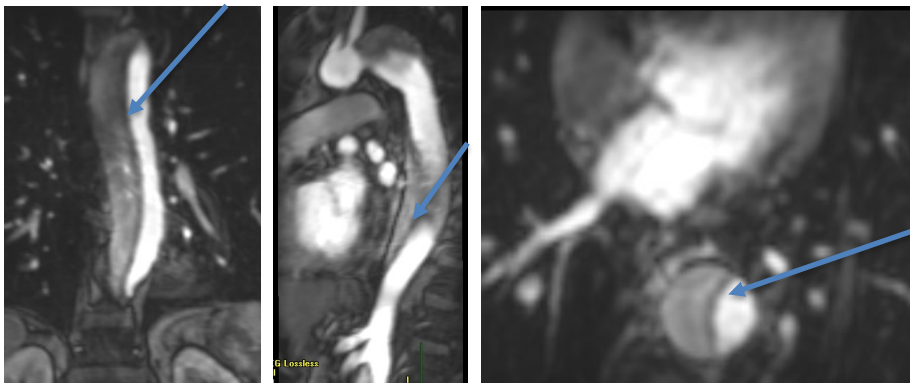


Abbildung 209: MPR-Rekonstruktion, CE-MRA, Aorta desc., mittlerer Abschnitt der Pathologie, Pat. 4

links: cor. E., mittig: sag. E., rechts: tra. E.

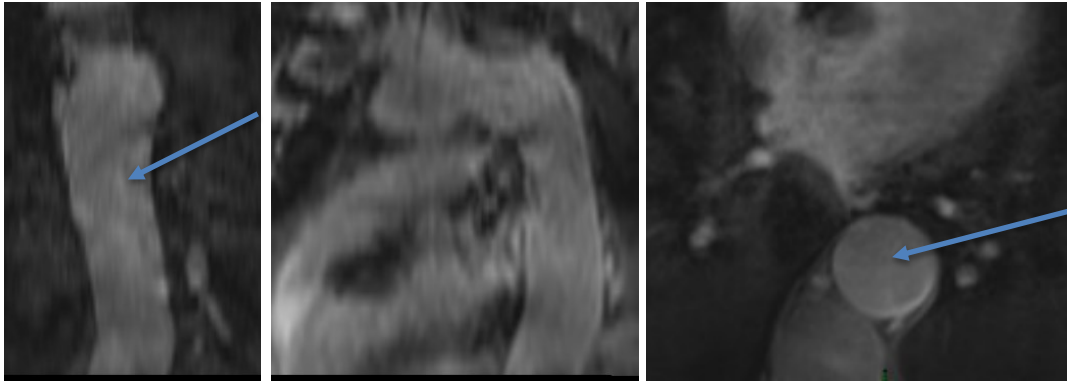


Abbildung 210: MPR-Rekonstruktion, VIBE-MRI, Aorta desc., mittlerer Abschnitt der Pathologie, Pat. 4  
links: cor. E., mittig: sag. E., rechts: tra. E.

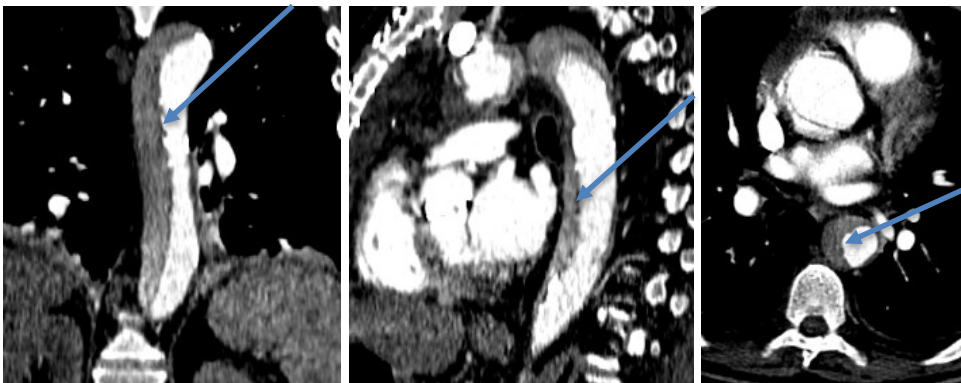


Abbildung 211: MPR-Rekonstruktion, CE-CTA, Aorta desc., mittlerer Abschnitt der Pathologie, Pat. 4  
links: cor. E., mittig: sag. E., rechts: tra. E.

Wie in den anderen Messebenen auch, ist die Dissektion in der CE-MRA und CE-CTA weiterhin am besten erkennbar, da der Kontrastunterschied zwischen wahren und falschem Lumen dort am stärksten ausgeprägt ist (Pfeil). In der SPACE-MRA-Rekonstruktion kann in allen drei Ansichten, wenn auch schwächer ausgeprägt, die Dissektionsmembran (Pfeil) erkannt werden. In der VIBE-MRI hingegen ist die Dissektion kaum erkennbar.

Durchmesservergleich:

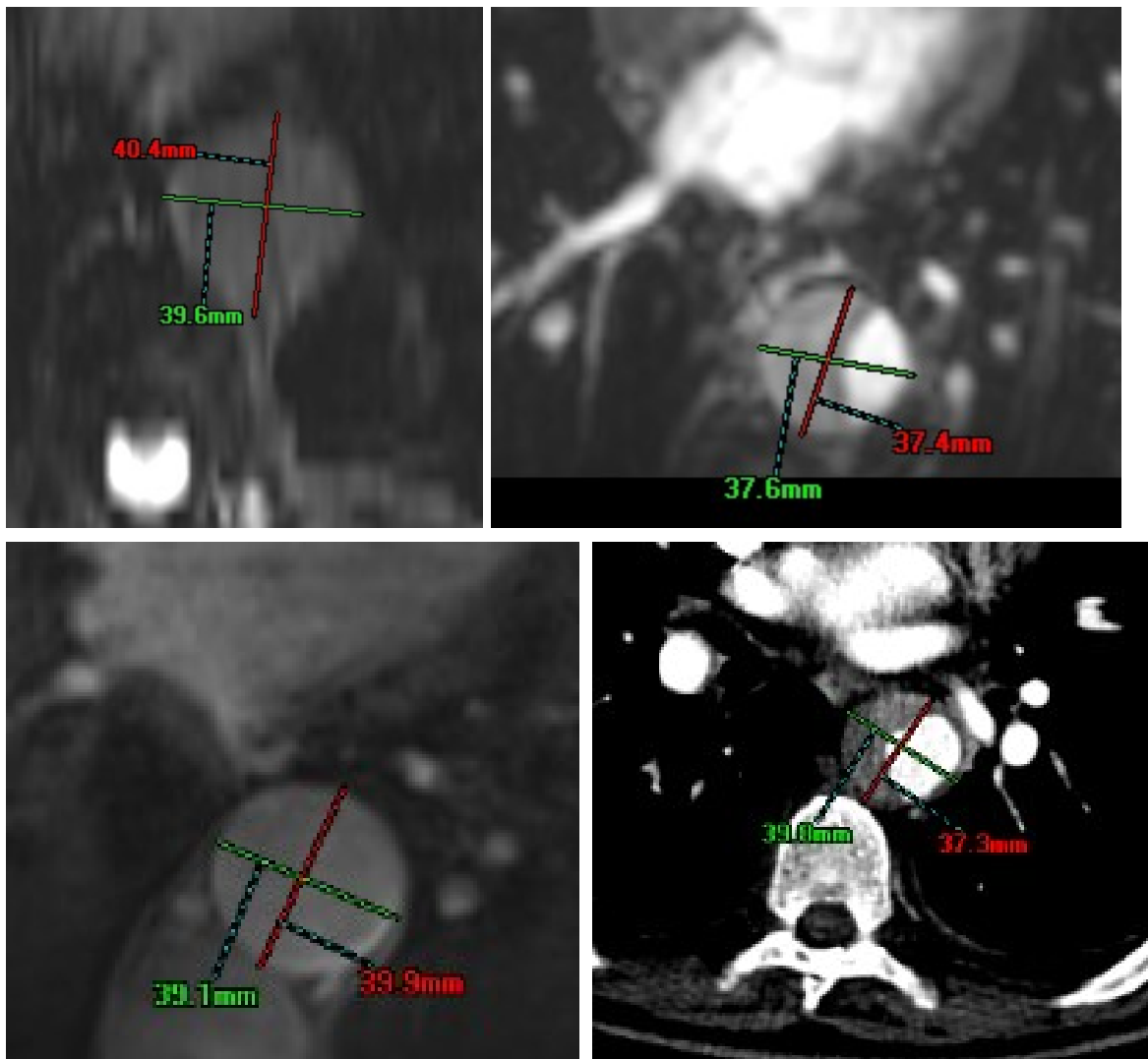


Abbildung 212: Durchmesser Aorta desc., mittlerer Abschnitt der Pathologie, SPACE-MRA (l.-o.), CE-MRA (r.-o.), VIBE-MRI (l.-u.), CE-CTA (r.-u.) (MPR-Rekonst.: coronal), Pat. 4  
SPACE-MRA (l.-o.): 4,0 x 4,0cm, CE-MRA (r.-o.) 3,8 x 3,7cm  
VIBE-MRI (l.-u.): 4,0 x 3,9cm, CE-CTA (r.-u.): 4,0 x 3,7cm

Auch in diesem Fall wurde in allen Aufnahmen das gesamte Lumen und nicht nur das wahre Lumen gemessen. Die Messwerte weichen in diesem Fall nicht stark voneinander ab. Vor allem die SPACE-MRA- und VIBE-MRI-Messwerte liegen nah beieinander.

„Distale Pathologie“:

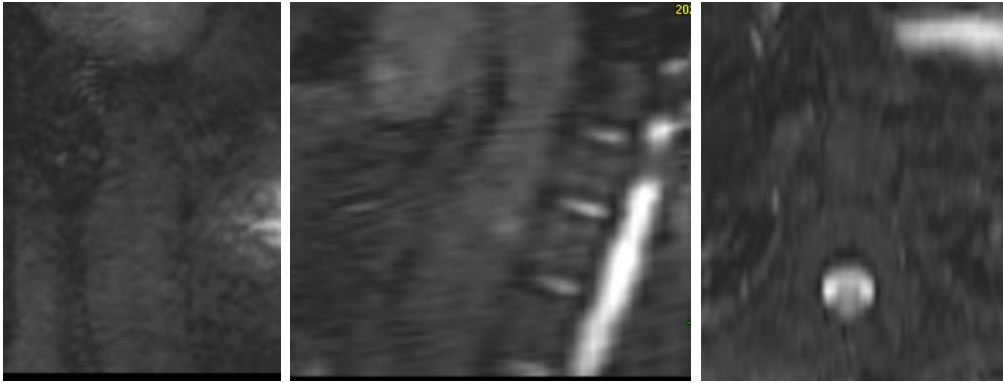


Abbildung 213: MPR-Rekonstruktion, SPACE-MRA, Aorta desc., distaler Abschnitt der Pathologie, Pat. 4

links: cor. E., mittig: sag. E., rechts: tra. E.

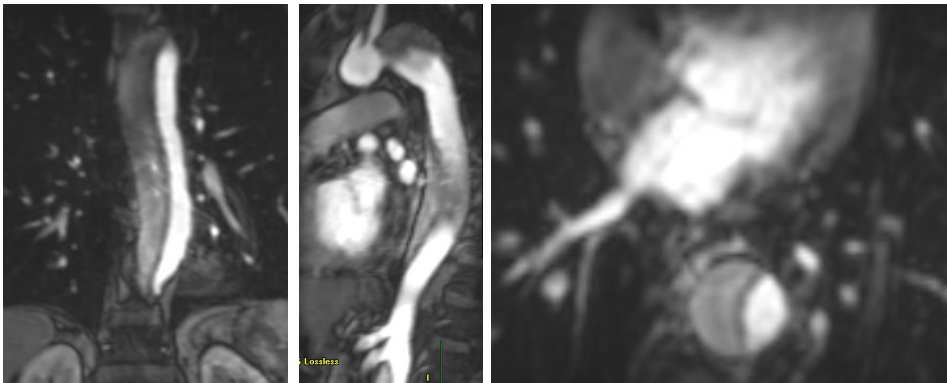


Abbildung 214: MPR-Rekonstruktion, CE-MRA, Aorta desc., distaler Abschnitt der Pathologie, Pat. 4

links: cor. E., mittig: sag. E., rechts: tra. E.

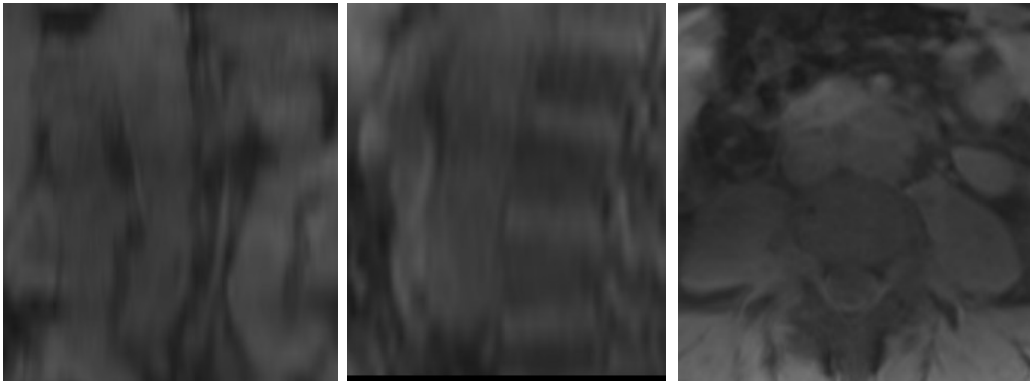


Abbildung 215: MPR-Rekonstruktion, VIBE-MRI, Aorta desc., distaler Abschnitt der Pathologie, Pat. 4  
links: cor. E., mittig: sag. E., rechts: tra. E.



Abbildung 216: MPR-Rekonstruktion, CE-CTA, Aorta desc., distaler Abschnitt der Pathologie, Pat. 4  
links: cor. E., mittig: sag. E., rechts: tra. E.

Bei den Aufnahmen der SPACE-MRA und VIBE-MRI ist weder die Aorta noch die Dissektion gut erkennbar. In der CE-MRA-Aufnahme ist die Dissektion nach wie vor gut erkennbar, allerdings sind im distalen Abschnitt beide Lumina gleich stark kontrastiert, was ein Zeichen für ein Entry in diesem Bereich der Aorta sein könnte. Die Aufnahme der CE-CTA zeigt auch die gleich starke Kontrastierung von wahrem und falschem Lumen, die Dissektionsmembran ist hier nur noch leicht erkennbar. Anhand dieser Bilder ist unklar, ob sich die Dissektion in die Beckenarterien ausgebreitet hat, deshalb werden die Beckenarterien noch gesondert betrachtet. Da die Sequenzen bis zu unterschiedlichen distalen Punkten akquiriert wurden, unterscheiden sich die Höhen dieser Messebene, sodass ein Durchmesservergleich nicht zielführend wäre. Somit wird an diese Stelle darauf verzichtet.

Auch bei dieser Aortendissektion sollten mögliche Entries/Re-Entries abgeklärt werden. Da die Kontrastierung des falschen Lumens im proximalen Aortenbereich gering ist und erst im distalen Bereich stärker wird, kann man davon ausgehen, dass sich die Entries nicht im proximalen Abschnitt der Aorta befinden, sondern vielmehr im distaleren Bereich.

„Entry/Re-Entry“:

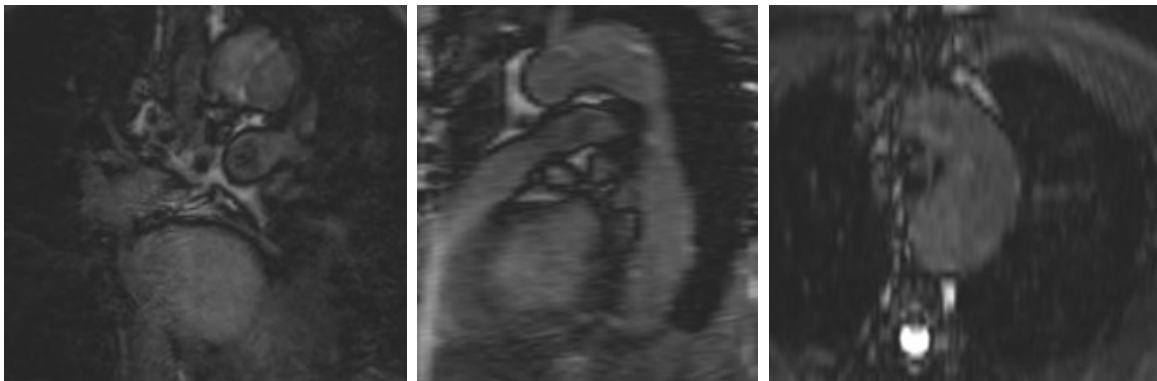


Abbildung 217: MPR-Rekonstruktion, SPACE-MRA, Entry, Pat. 4  
links: cor. E., mittig: sag. E., rechts: tra. E.

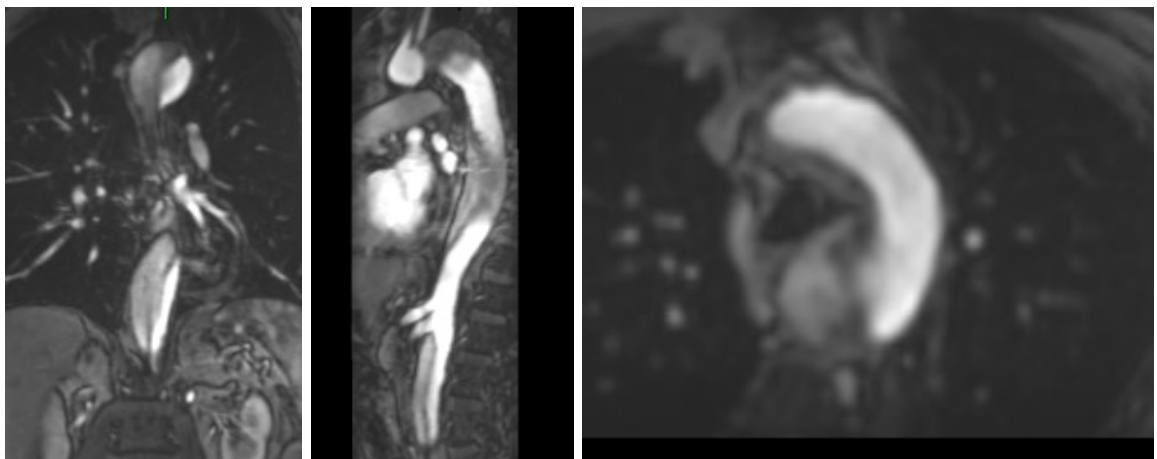


Abbildung 218: MPR-Rekonstruktion, CE-MRA, Entry, Pat. 4  
links: cor. E., mittig: sag. E., rechts: tra. E.



Abbildung 219: MPR-Rekonstruktion, VIBE-MRI, Entry, Pat. 4  
links: cor. E., mittig: sag. E., rechts: tra. E.



Abbildung 220: MPR-Rekonstruktion, CE-CTA, Entry, Pat. 4  
links: cor. E., mittig: sag. E., rechts: tra. E.

In keiner der Aufnahmen ist ein Entry oder Re-Entry sichtbar. Dies erklärt im proximalen Aortenabschnitt die verminderte Kontrastierung des falschen Lumens in der CE-MRA- und CE-CTA-Aufnahme.

„Ausbreitung der Dissektion in die Arteriae iliacaes communes“:

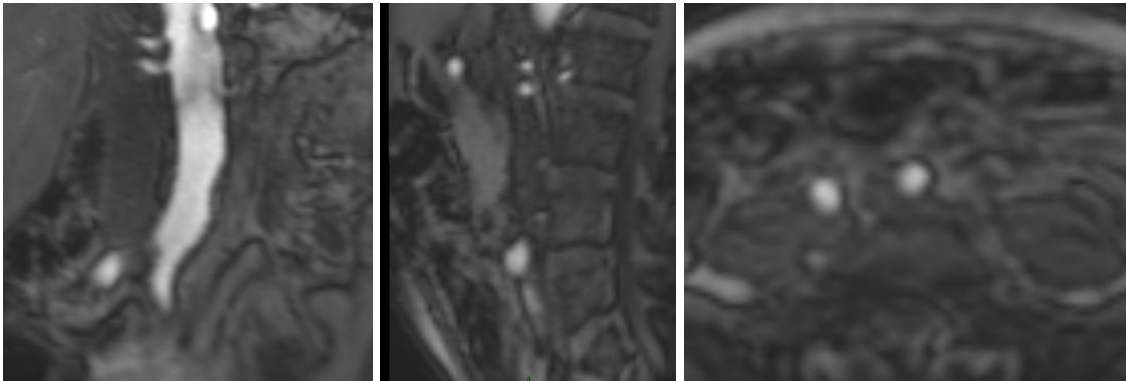


Abbildung 221: MPR-Rekonstruktion, CE-MRA, Arteriae iliacaes communes, Pat. 4  
links: cor. E., mittig: sag. E., rechts: tra. E.

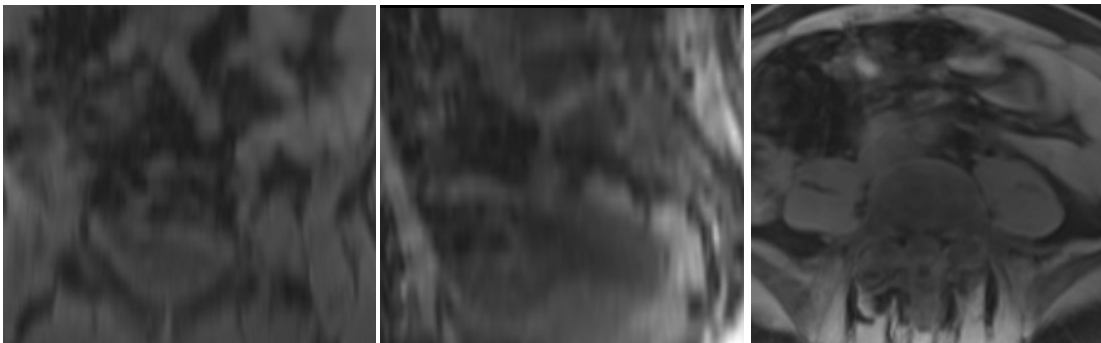


Abbildung 222: MPR-Rekonstruktion, VIBE-MRI, Arteriae iliacaes communes, Pat. 4  
links: cor. E., mittig: sag. E., rechts: tra. E.

In der VIBE-MRI-Aufnahme sind weder Aorta desc. und die Beckenarterien noch eine möglicherweise bestehende Pathologie sichtbar, in der CE-MRA-Aufnahme hingegen kann man die beiden Beckenarterien recht gut abgrenzen, eine fortlaufende Dissektion in die Beckenarterien aber kann nicht erkannt werden.

Die Patientin Nummer 5 leidet an einer Ektasie der Aorta ascendens.

Es wurden folgende Ebenen für die Durchmessermessungen und Qualitätsbeurteilungen ausgewählt:

- Größter Durchmesser der Aorta ascendens
- Vor Abgang der Supraaortalen
- Nach Abgang der Supraaortalen
- Größter Durchmesser der Aorta descendens
- Mittlerer Abschnitt der Pathologie  $\approx$  größter Durchmesser der Aorta asc.
- Distale Aorta descendens (keine Pathologie)

Zur Qualitätsbeurteilung wurden auch die 3D-Rekonstruktion, die Bildgebung der Supraaortalen und die Darstellung der Pathologie eingesetzt. Man verglich die Ergebnisse der SPACE-MRA-, CE-MRA-, VIBE-MRI- und CE-CTA-Sequenzen.

„3D-Rekonstruktion“:

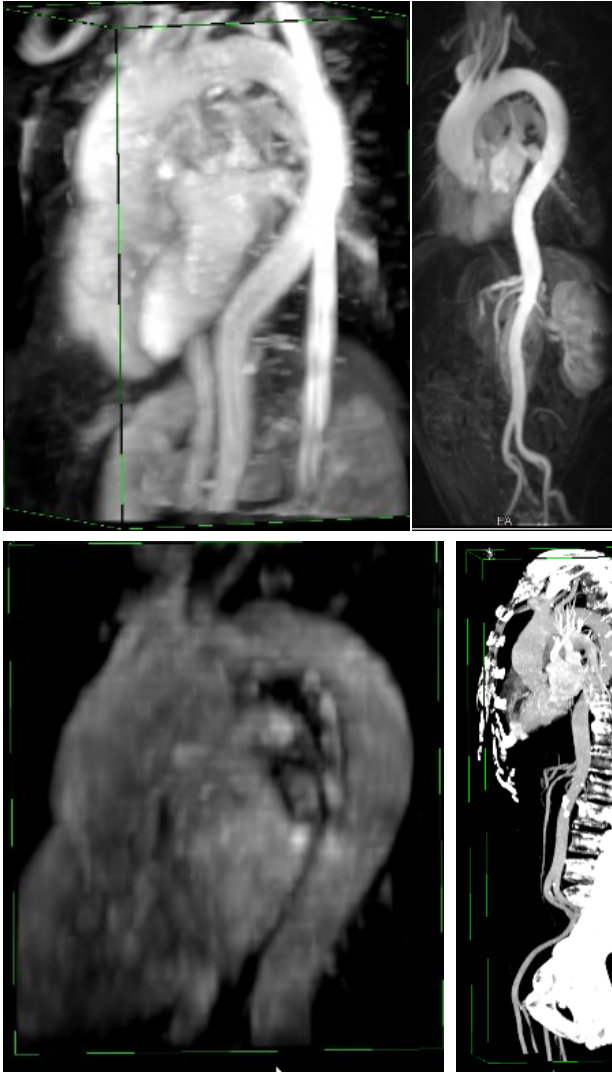


Abbildung 223: MIP-3D-Rekonst.,  
SPACE-MRA (l.-o.),  
CE-MRA (r.-o.),  
VIBE-MRI (l.-u.),  
CE-CTA (r.-u.), Pat. 5

Die Aorta und die Aortenektasie sind in allen vier Sequenzen gut sichtbar.

„Darstellung der Pathologie“:

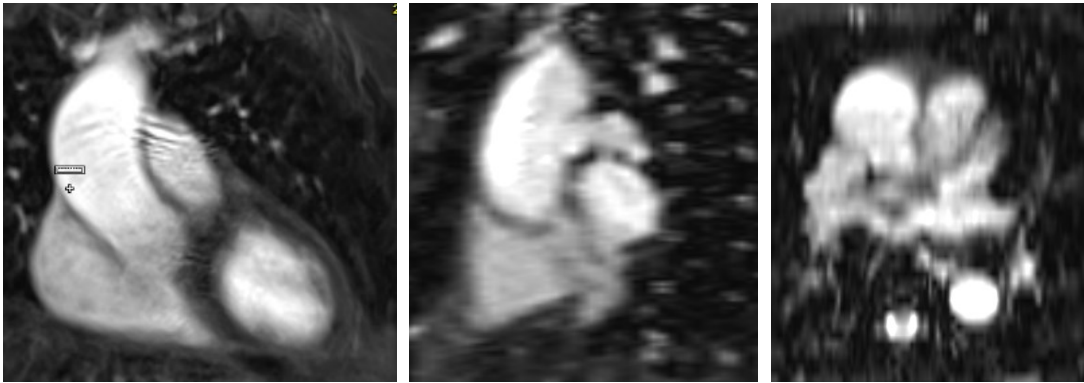


Abbildung 224: MPR-Rekonstruktion, SPACE-MRA, Pathologie, Pat. 5  
links: cor. E., mittig: sag. E., rechts: tra. E.

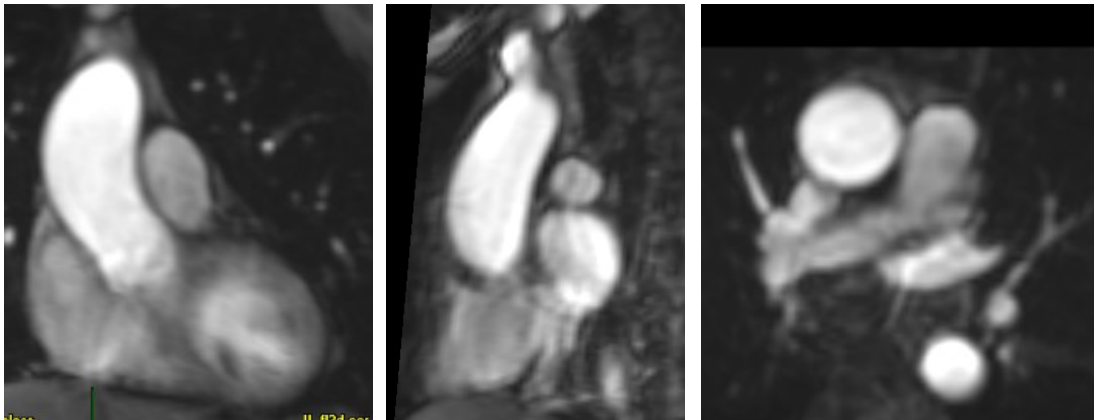


Abbildung 225: MPR-Rekonstruktion, CE-MRA, Pathologie, Pat. 5  
links: cor. E., mittig: sag. E., rechts: tra. E.

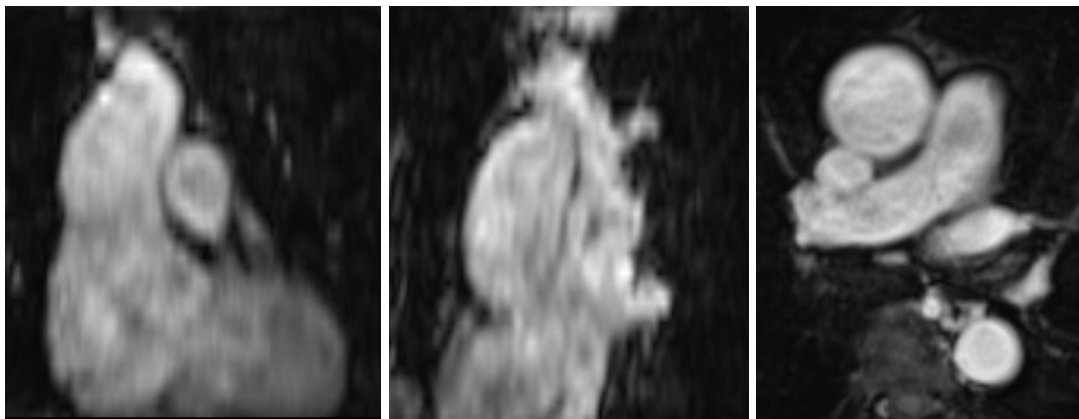


Abbildung 226: MPR-Rekonstruktion, VIBE-MRI, Pathologie, Pat. 5  
links: cor. E., mittig: sag. E., rechts: tra. E.



Abbildung 227: MPR-Rekonstruktion, CE-CTA, Pathologie, Pat. 5  
links: cor. E., mittig: sag. E., rechts: tra. E.

Die Aufnahmen der vier verschiedenen Sequenzen liefern eine gute Qualität und stellen die Aortenektasie gut dar. In den Aufnahmen der SPACE-Sequenz liegt in der Sagittal- und Transversalebene eine Inhomogenität vor, die den Ausschluss einer Aortendissektion erschwert.

„Größter Durchmesser Aorta ascendens“ = „mittlerer Abschnitt der Pathologie“:

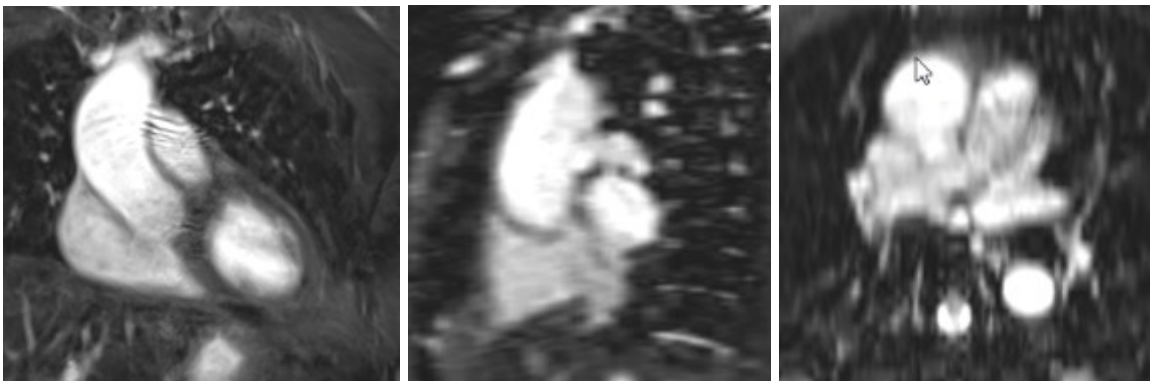


Abbildung 228: MPR-Rekonstruktion, SPACE-MRA, Aorta asc., Pat. 5  
links: cor. E., mittig: sag. E., rechts: tra. E.

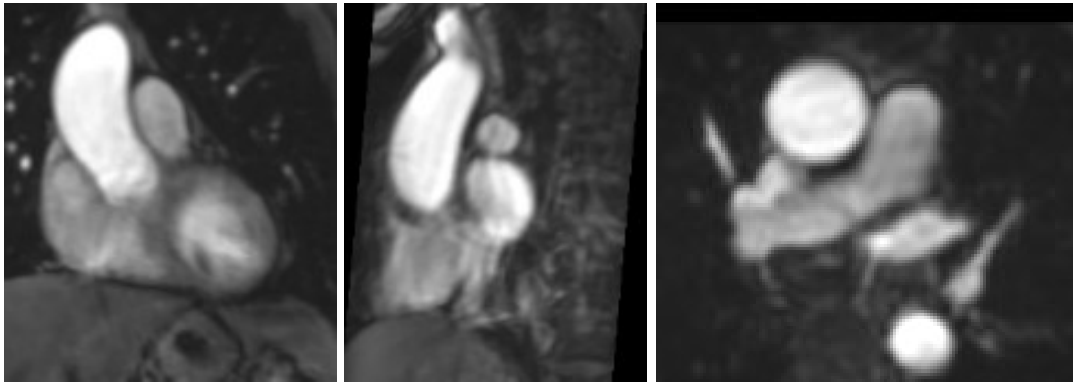


Abbildung 229: MPR-Rekonstruktion, CE-MRA, Aorta asc., Pat. 5  
links: cor. E., mittig: sag. E., rechts: tra. E.

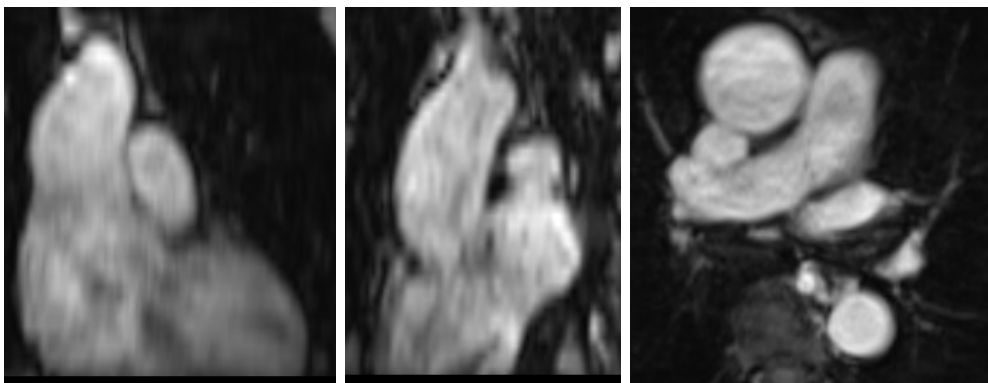


Abbildung 230: MPR-Rekonstruktion, VIBE-MRI, Aorta asc., Pat. 5  
links: cor. E., mittig: sag. E., rechts: tra. E.

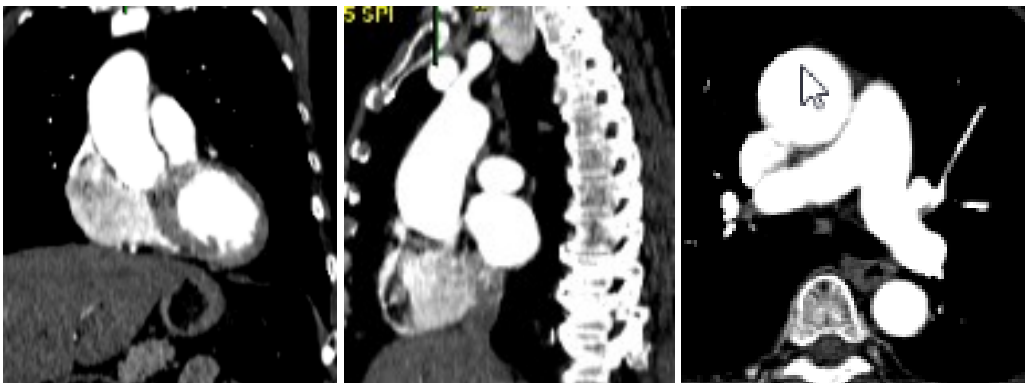


Abbildung 231: MPR-Rekonstruktion, CE-CTA, Aorta asc., Pat. 5  
links: cor. E., mittig: sag. E., rechts: tra. E.

Ähnlich wie bei der Darstellung der Pathologie liegt bis auf minimale nicht qualitätsreduzierende Inhomogenitäten eine gute Qualität vor. Die Aortenwand ist in allen Sequenzen gut abgrenzbar zum umliegenden Gewebe.

Durchmesservergleich:

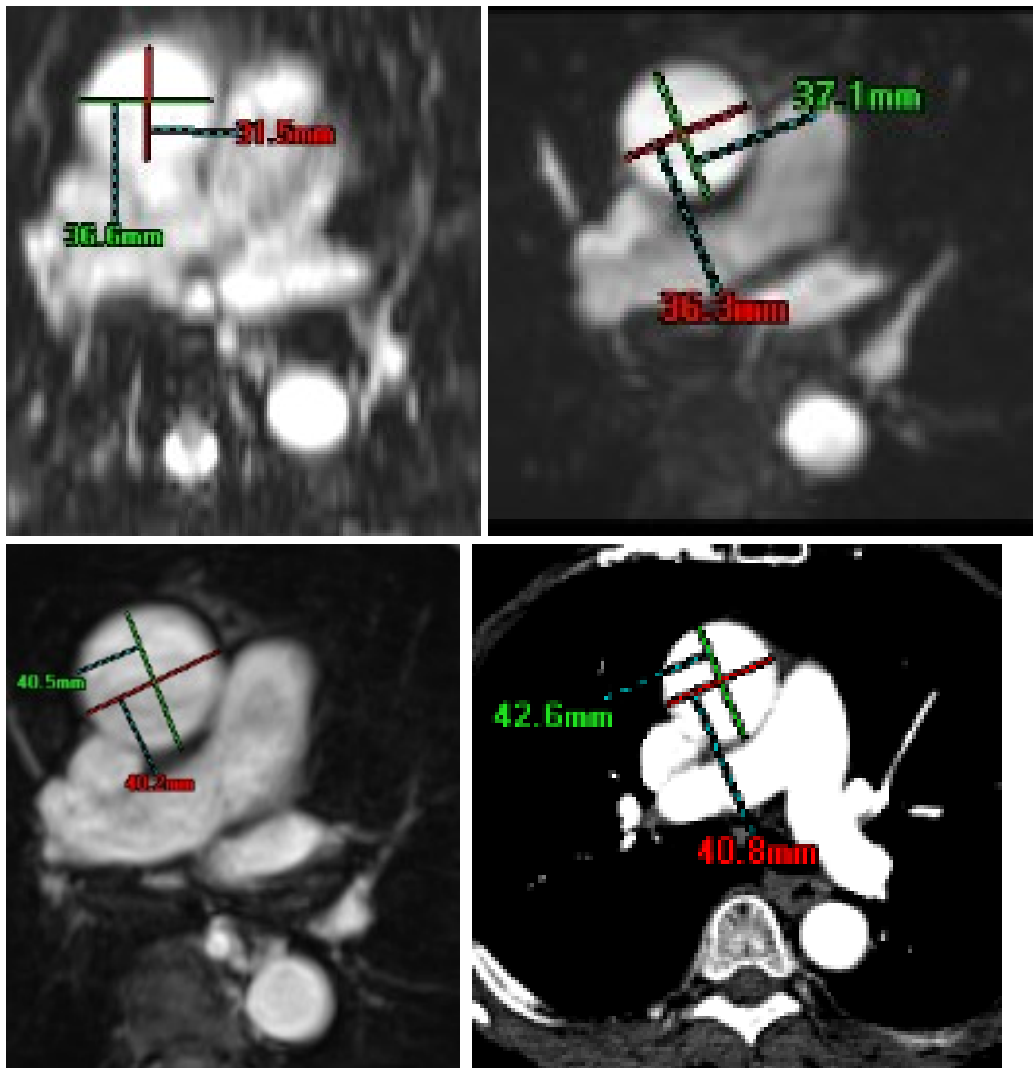


Abbildung 232: Durchmesser Aorta asc., SPACE-MRA (l.-o.), CE-MRA (r.-o.), VIBE-MRI (l.-u.), CE-CTA (r.-u.) (MPR-Rekonst.: transversal), Pat. 5  
SPACE-MRA (l.-o.): 3,7 x 3,2cm, CE-MRA (r.-o.): 3,7 x 3,6cm  
VIBE-MRI (l.-u.): 4,1 x 4,0cm, CE-CTA (r.-u.): 4,3 x 4,1cm

Vor allem die Messwerte der VIBE-MRI und CE-CTA ähneln sich, die Messung aus der CE-MRA passt vom Verhältnis auch zu den anderen Werten, fällt mit 3,7 x 3,6cm aber etwas kleiner aus. Nur die Messung aus der SPACE-MRA-Aufnahme weicht von den anderen Werten deutlich ab. Dies könnte womöglich daran liegen, dass in der Aufnahme die Aortenwand nach dorsal hin schlechter zur Umgebung abgrenzt ist.

„Vor dem Abgang der Supraaortalen“:

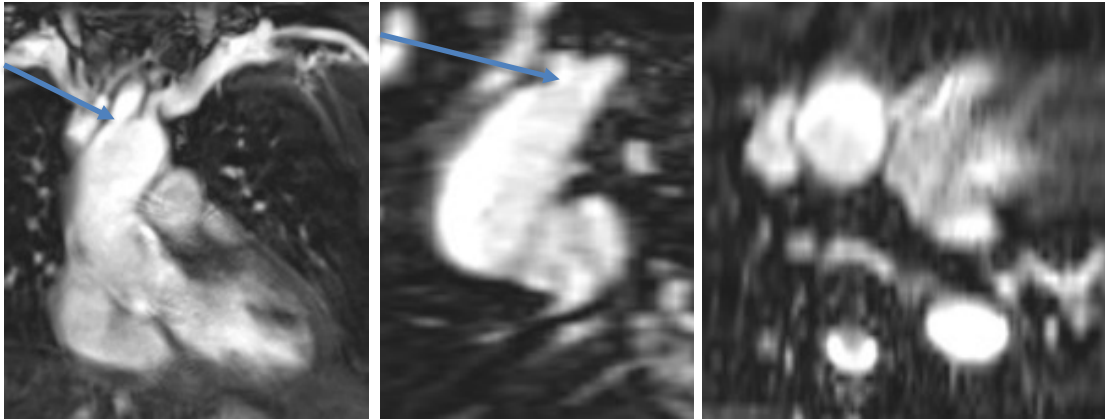


Abbildung 233: MPR-Rekonstruktion, SPACE-MRA, Aorta asc., vor Abgang der Supraaortalen, Pat. 5

links: cor. E., mittig: schräg-sag. E., rechts: schräg-tra. E.

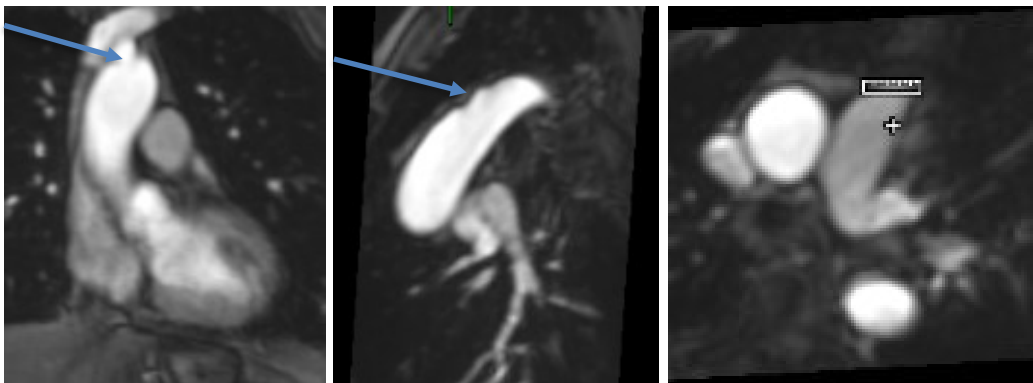


Abbildung 234: MPR-Rekonstruktion, CE-MRA, Aorta asc., vor Abgang der Supraaortalen, Pat. 5

links: cor. E., mittig: schräg-sag. E., rechts: schräg-tra. E.

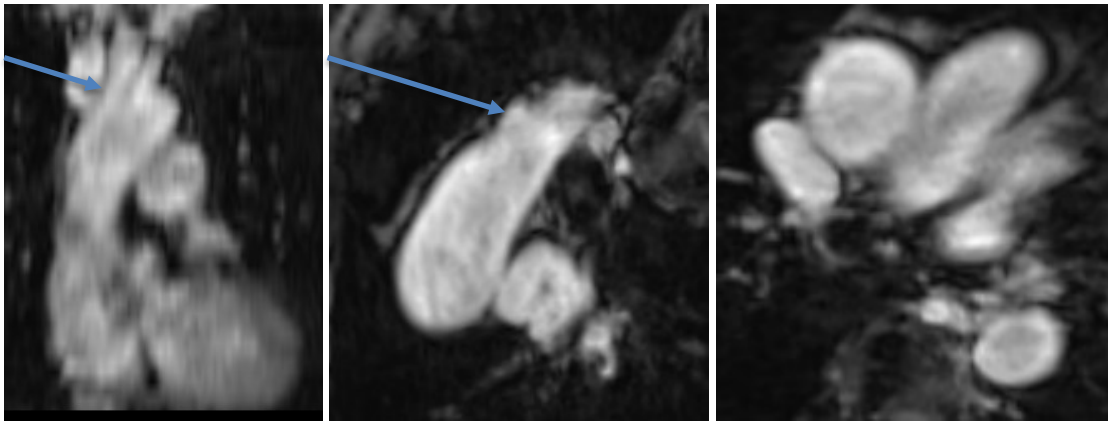


Abbildung 235: MPR-Rekonstruktion, VIBE-MRI, Aorta asc., vor Abgang der Supraaortalen, Pat. 5

links: cor. E., mittig: schräg-sag. E., rechts: schräg-tra. E.

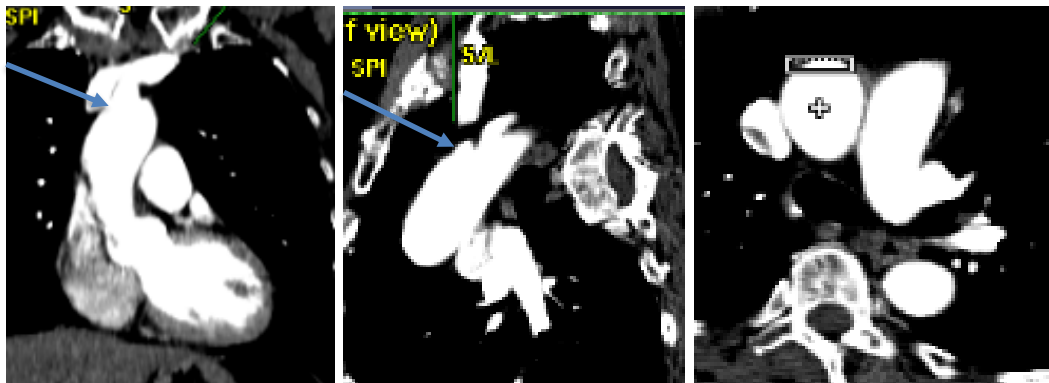


Abbildung 236. MPR-Rekonstruktion, CE-ctA, Aorta asc., vor Abgang der Supraaortalen, Pat. 5

links: cor. E., mittig: schräg-sag. E., rechts: schräg-tra. E.

Alle Sequenzen liefern qualitativ gute Ergebnisse. Der Abgang des Truncus brachiocephalicus ist in den Aufnahmen jeder Sequenz gut dargestellt (Pfeil). Die Problematik der Inhomogenität im Aortenlumen bei der Aufnahme der SPACE-Sequenz ist weiterhin bestehend wie in der vorherigen Messebene.

Durchmesservergleich:

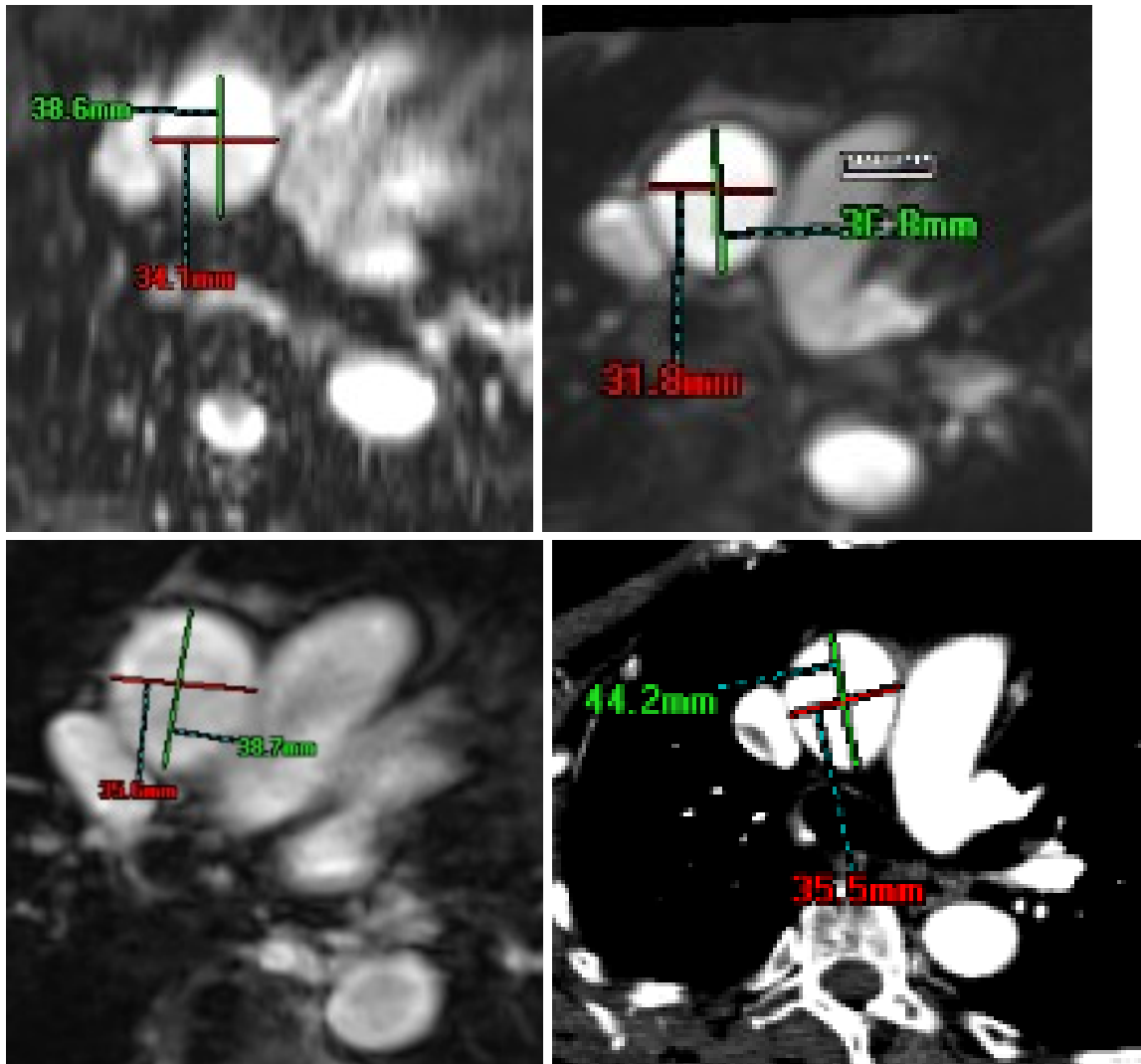


Abbildung 237: Durchmesser Aorta asc., vor Abgang der Supraaortalen, SPACE-MRA (l.-o.), CE-MRA (r.-o.), VIBE-MRI (l.-u.), CE-CTA (r.-u.) (MPR-Rekonst.: transversal), Pat. 5  
SPACE-MRA (l.-o.): 3,9 x 3,4cm, CE-MRA (r.-o.): 3,7 x 3,2cm  
VIBE-MRI (l.-u.): 3,9 x 3,6cm, CE-CTA (r.-u.): 4,4 x 3,6cm

Die für den Aortendurchmesser ausgemessenen Werte stimmen alle bis auf den größeren der beiden Werte (4,4cm) aus der CE-CTA-Messung gut überein. Die Form des Aortenlumens sieht auch in jeder der Aufnahmen gleich aus.

„Supraaortale Gefäße“:

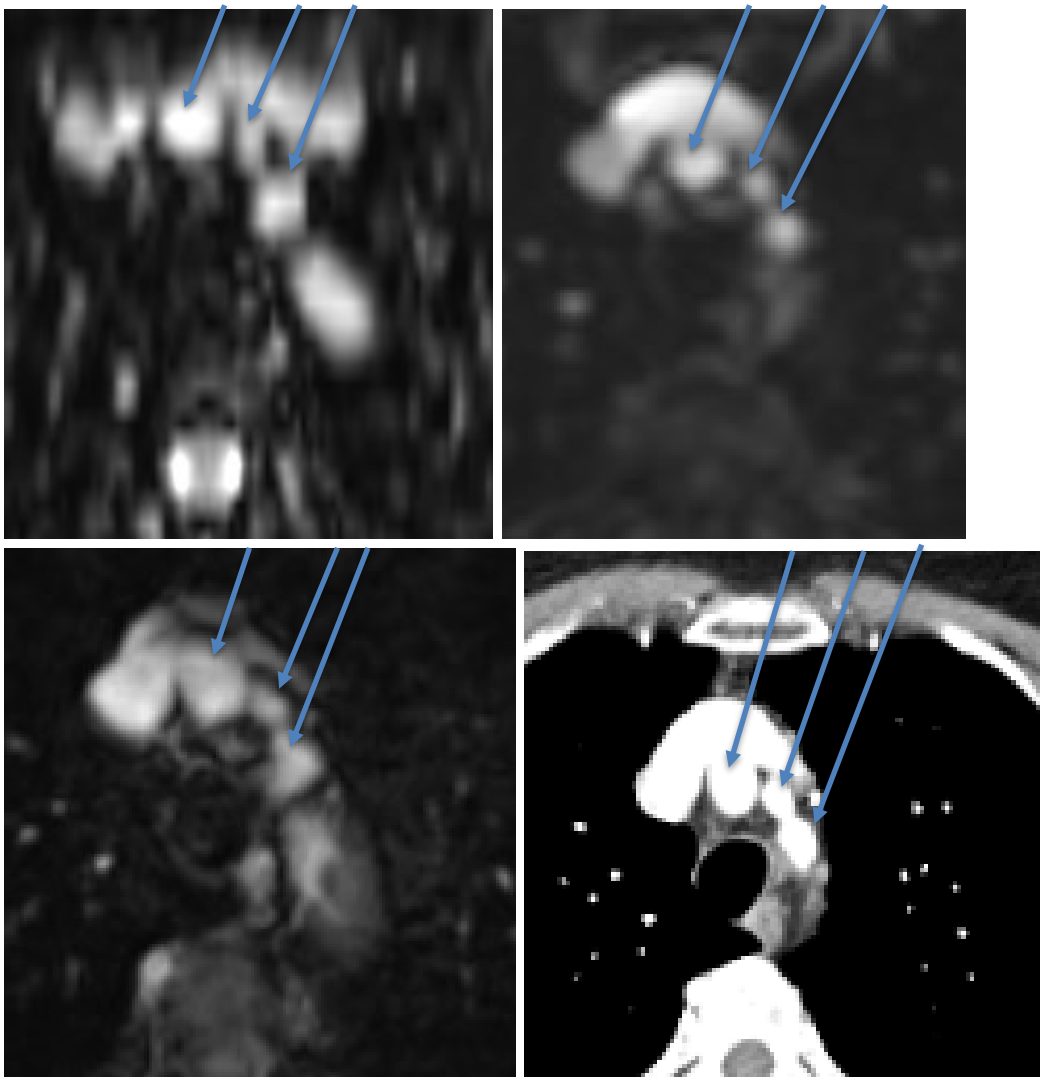


Abbildung 238: Supraaortale Gefäße in der Transversalebene (MPR-Rekonst.), SPACE-MRA (l.-o.), CE-MRA (r.-o.), VIBE-MRI (l.-u.), CE-CTA (r.-u.), Pat. 5  
Truncus brachiocephalicus (l. Pfeil), Arteria carotis sinistra (m. Pfeil), Arteria subclavia sinistra (r. Pfeil)

In allen Sequenzen können die supraaortalen Gefäße gut zur Umgebung abgegrenzt und beurteilt werden.

„Nach dem Abgang der Supraaortalen“:

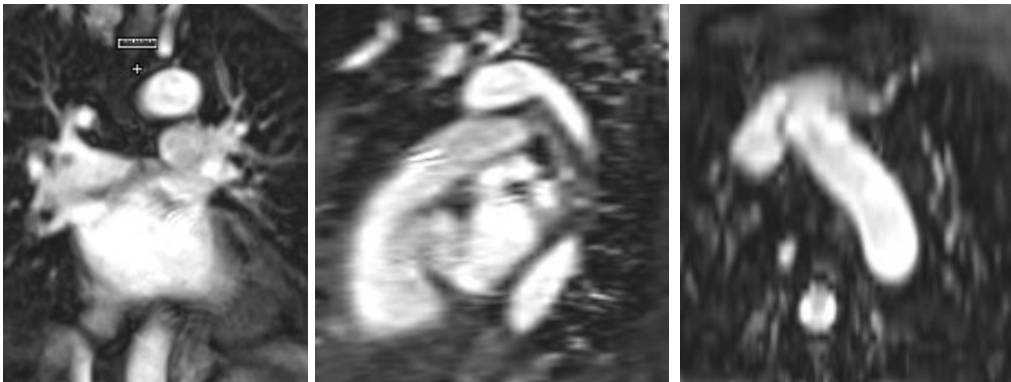


Abbildung 239: MPR-Rekonstruktion, SPACE-MRA, Arcus aortae, nach Abgang der Supraaortalen, Pat. 5

links: cor. E., mittig: sag. E., rechts: tra. E.

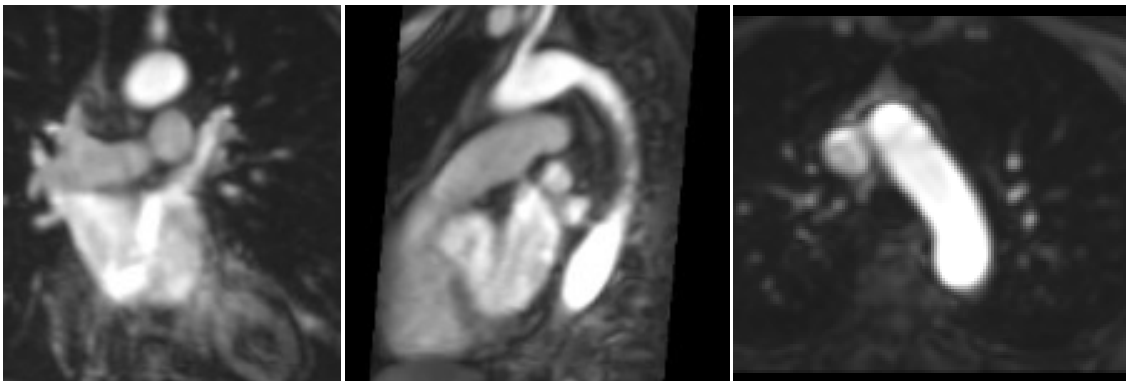


Abbildung 240: MPR-Rekonstruktion, CE-MRA, Arcus aortae, nach Abgang der Supraaortalen, Pat. 5

links: cor. E., mittig: sag. E., rechts: tra. E.

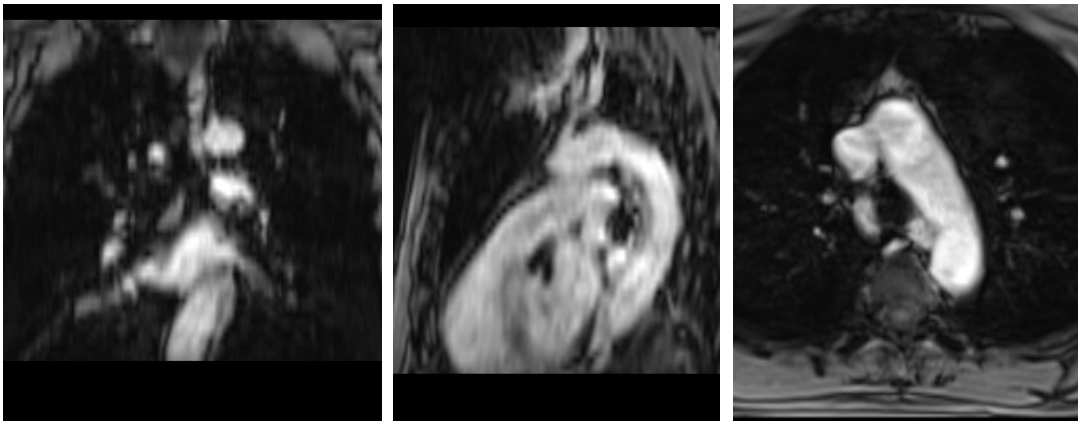


Abbildung 241: MPR-Rekonstruktion, VIBE-MRI, Arcus aortae, nach Abgang der Supraaortalen, Pat. 5  
links: cor. E., mittig: sag. E., rechts: tra. E.



Abbildung 242: MPR-Rekonstruktion, CE-CTA, Arcus aortae, nach Abgang der Supraaortalen, Pat. 5  
links: cor. E., mittig: sag. E., rechts: tra. E.

Die Qualität der SPACE-MRA, CE-MRA und CE-CTA ist gut, die der VIBE-MRI ist im Vergleich deutlich eingeschränkter. Die Inhomogenitäten erschweren die Beurteilung des Aortenlumens sehr und der Ausschluss einer Aortendissektion ist allein mit den VIBE-MRI-Aufnahmen nicht möglich.

Durchmesservergleich:

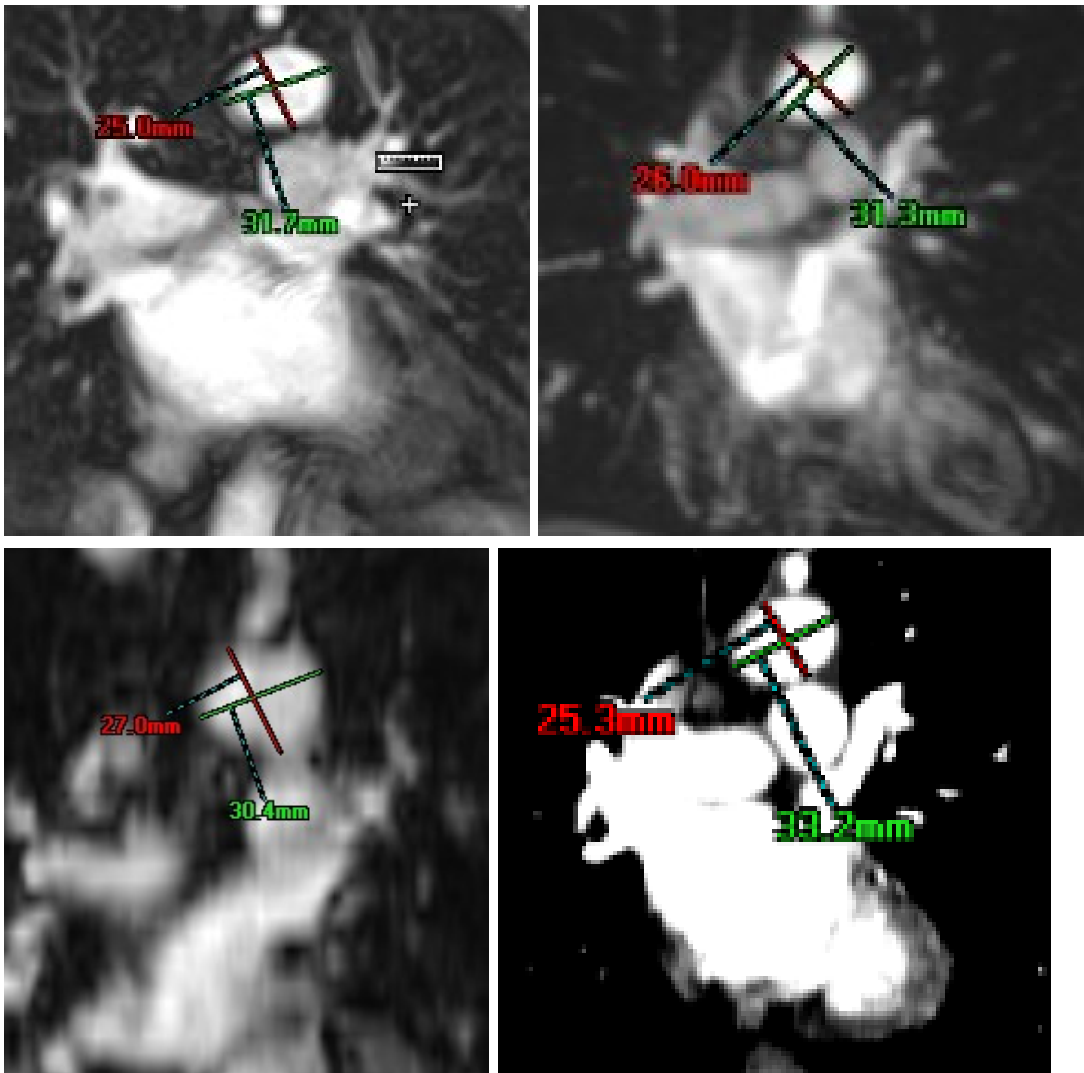


Abbildung 243: Durchmesser Aorta asc., vor Abgang der Supraaortalen, SPACE-MRA (l.-o.), CE-MRA (r.-o.), VIBE-MRI (l.-u.), CE-CTA (r.-u.) (MPR-Rekonst.: transversal), Pat. 5  
SPACE-MRA (l.-o.): 3,2 x 2,5cm, CE-MRA (r.-o.): 3,1 x 2,6cm  
VIBE-MRI (l.-u.): 3,0 x 2,7cm, CE-CTA (r.-u.): 3,3 x 2,5cm

Die Messergebnisse in dieser Ebene weichen nur geringgradig voneinander ab. Der größere Messwert variiert zwischen 3,0 bis 3,3cm und der kleinere Messwert variiert zwischen 2,5 und 2,7cm.

„Größter Durchmesser der Aorta descendens“:



Abbildung 244: MPR-Rekonstruktion, SPACE-MRA, Aorta desc., Pat. 5  
links: cor. E., mittig: sag. E., rechts: tra. E.

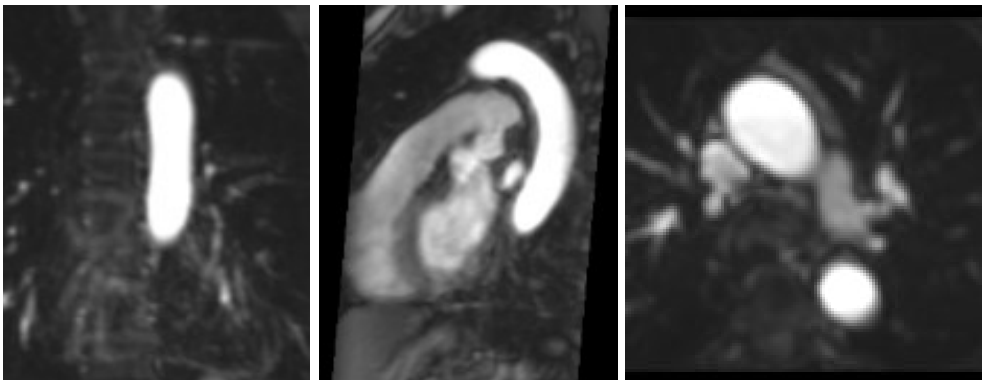


Abbildung 245: MPR-Rekonstruktion, CE-MRA, Aorta desc., Pat. 5  
links: cor. E., mittig: sag. E., rechts: tra. E.



Abbildung 246: MPR-Rekonstruktion, VIBE-MRI, Aorta desc., Pat. 5  
links: cor. E., mittig: sag. E., rechts: tra. E.

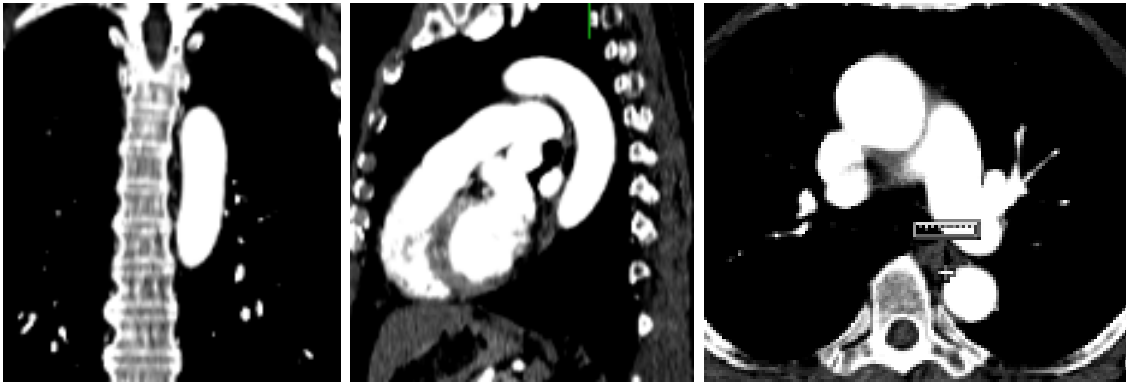


Abbildung 247: MPR-Rekonstruktion, CE-CTA, Aorta desc., Pat. 5  
links: cor. E., mittig: sag. E., rechts: tra. E.

Die Aorta descendens ist in allen MRA-Sequenz-Aufnahmen und auch in jeder Ansichtsebene gut beurteilbar.

Durchmesservergleich:

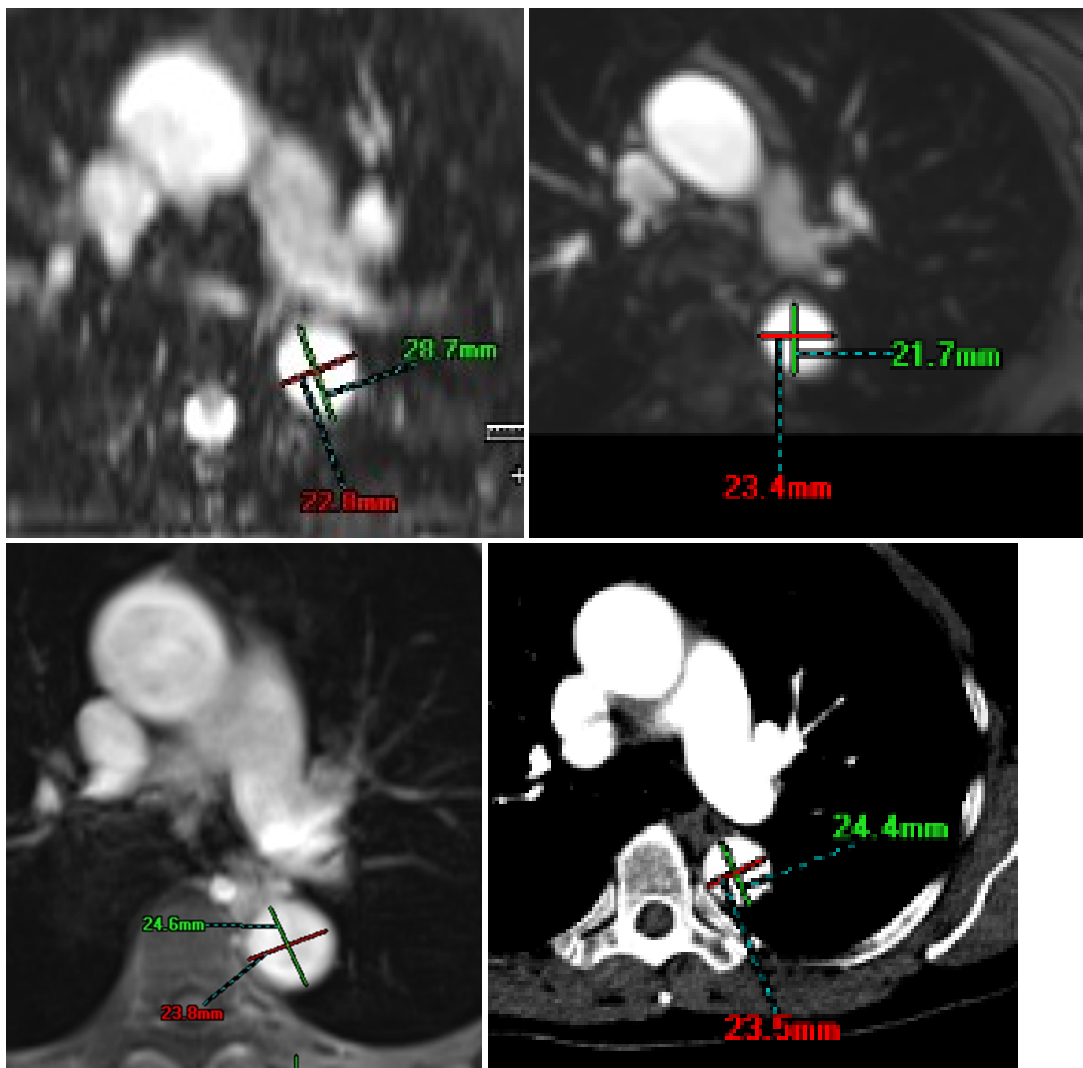


Abbildung 248: Durchmesser Aorta asc., vor Abgang der Supraaortalen, SPACE-MRA (l.-o.), CE-MRA (r.-o.), VIBE-MRI (l.-u.), CE-CTA (r.-u.) (MPR-Rekonst.: transversal), Pat. 5  
SPACE-MRA (l.-o.): 2,9 x 2,3cm, CE-MRA (r.-o.): 2,3 x 2,2cm  
VIBE-MRI (l.-u.): 2,5 x 2,4cm, CE-CTA (r.-u.): 2,4 x 2,4cm

Die Messwerte der CE-MRA und CE-CTA unterscheiden sich nicht stark. Die Aortenwand ist allerdings in der CE-CTA-Aufnahme schärfer abgegrenzt, sodass man bei der Messung in der CE-MRA von einer verhältnismäßig höheren Messvariabilität ausgeht. In der SPACE-MRA-Aufnahme ist die Form des Aortenlumens ovaler als in den CE-MRA- und CE-CTA-Aufnahmen, vermutlich da dieses nicht ganz senkrecht angeschnitten ist in der Ansichtsebene. Daher weicht der größere der beiden Messwerte mit 2,9cm von den anderen Messwerten ab. Die Messwerte der VIBE-MRI zeigen mit 2,5 x 2,4cm keine starke Abweichung von denen der CE-MRA- und CE-CTA-Aufnahme.

„Distaler Abschnitt der Aorta“:



Abbildung 249: MPR-Rekonstruktion, SPACE-MRA, Aorta desc., Pat. 5  
links: cor. E., mittig: sag. E., rechts: tra. E.

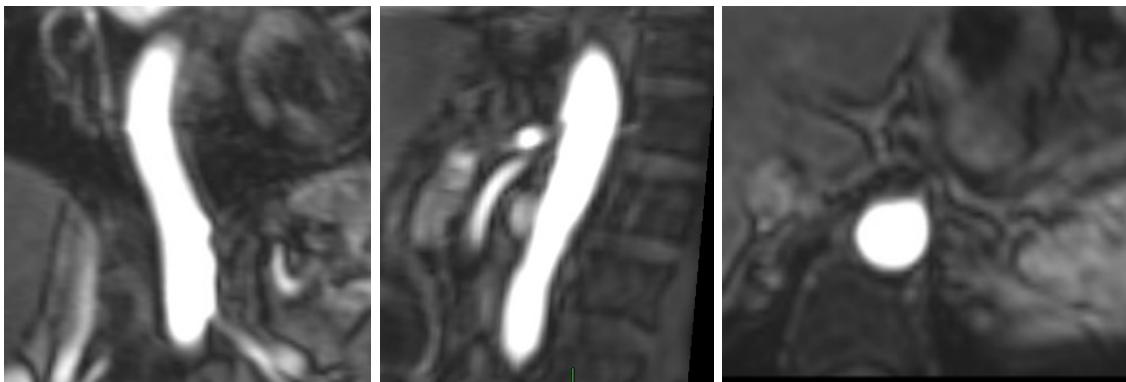


Abbildung 250: MPR-Rekonstruktion, CE-MRA, Aorta desc., Pat. 5  
links: cor. E., mittig: sag. E., rechts: tra. E.

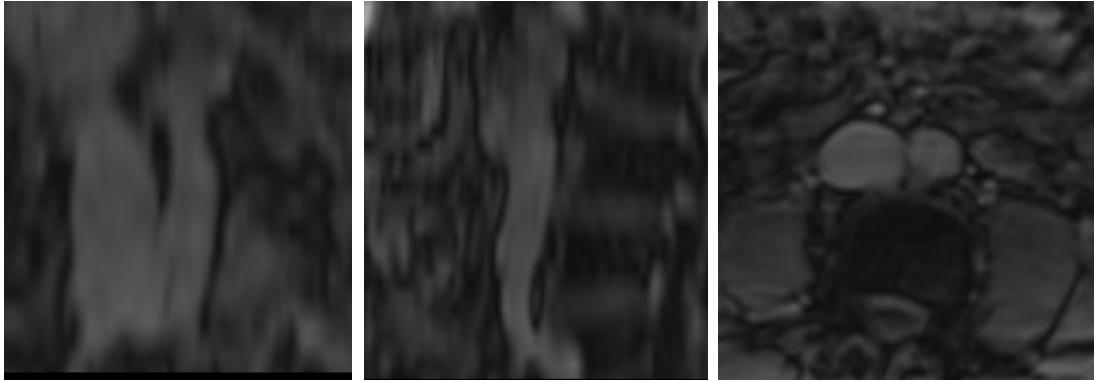


Abbildung 251: MPR-Rekonstruktion, VIBE-MRI, Aorta desc., Pat. 5  
links: cor. E., mittig: sag. E., rechts: tra. E.

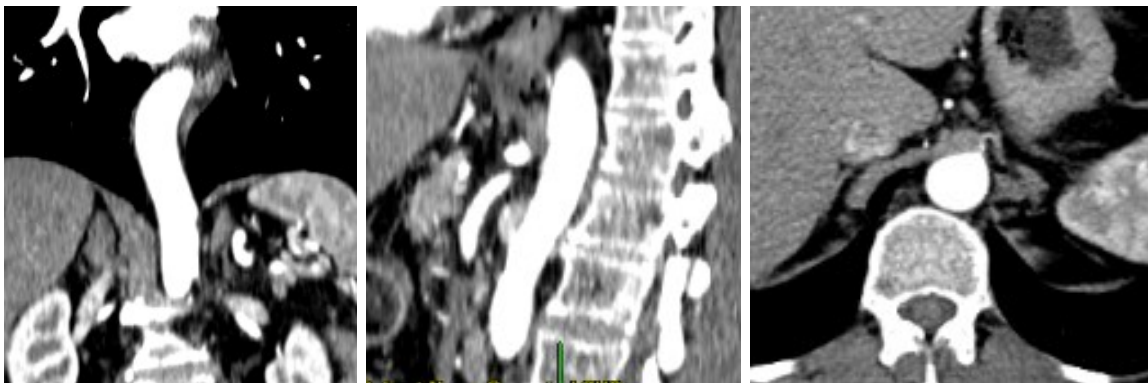


Abbildung 252: MPR-Rekonstruktion, CE-CTA, Aorta desc., Pat. 5  
links: cor. E., mittig: sag. E., rechts: tra. E.

Vor allem die Qualität der CE-MRA- und CE-CTA-Aufnahmen ist gut. Bei der SPACE-MRA und VIBE-MRI kommt es zu Qualitätseinschränkungen. Bei der SPACE-MRA ist die Aortenwand unscharf abgegrenzt, bei der VIBE-MRI ist der Kontrast von der Aorta zum umliegenden Gewebe niedrig, sodass die Aorta teilweise schwer zu zuordnen ist.

Durchmesservergleich:

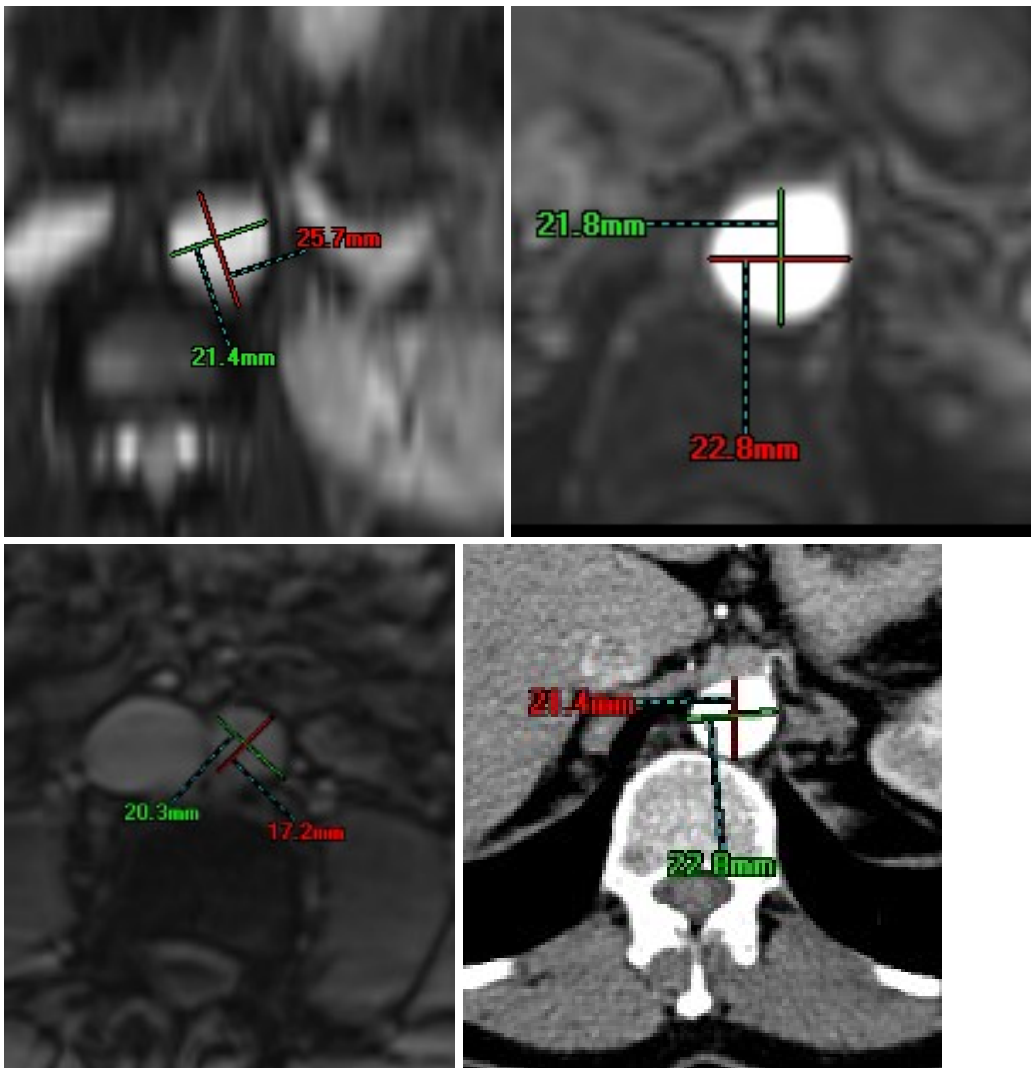


Abbildung 253: Durchmesser Aorta asc., vor Abgang der Supraaortalen, SPACE-MRA (l.-o.), CE-MRA (r.-o.), VIBE-MRI (l.-u.), CE-CTA (r.-u.) (MPR-Rekonst.: transversal), Pat. 5

SPACE-MRA (l.-o.): 2,6 x 2,1cm, CE-MRA (r.-o.): 2,3 x 2,2cm

VIBE-MRI (l.-u.): 2,0 x 1,7cm, CE-CTA (r.-u.): 2,3 x 2,1cm

Die Durchmesserwerte, die in der CE-MRA- und CE-CTA-Aufnahme gemessen wurden, sind nahezu ident. Bei der SPACE-MRA weicht der größere der beiden Messwerte mit 2,6cm davon ab, was sich durch die unscharfe Aortenwandabgrenzung erklären lässt. Auch in der VIBE-MRI ist die genaue Abgrenzung der Aortenwand erschwert, die Messwerte weichen mit 2,0 x 1,7cm aber nach unten ab.

Die sechste Patientin erlitt eine Typ A Dissektion, die sich bis in die distale Aorta descendens fortsetzte. Die Therapie erfolgte anhand eines Aorta-ascendens-Ersatzes und mithilfe von Stentgrafts entlang der Aorta descendens.

Folgende Ebenen wurden zur Durchmessermessung und zum Qualitätsvergleich ausgewählt:

- Größter Durchmesser der Aorta ascendens
- Vor Abgang der Supraaortalen
- Nach Abgang der Supraaortalen
- Größter Durchmesser der Aorta descendens
- Zwei verschiedene Ebenen im distalen Abschnitt der Aorta

Die Beurteilung der Qualität wurde auch anhand der 3D-Rekonstruktion, der Bildgebung der Supraaortalen und der Darstellung der operierten Pathologie und der Engstelle durchgeführt. So wurden die Sequenzen SPACE-MRA, CE-MRA, VIBE-MRI und CE-CTA verglichen.

„3D-Rekonstruktionen“:

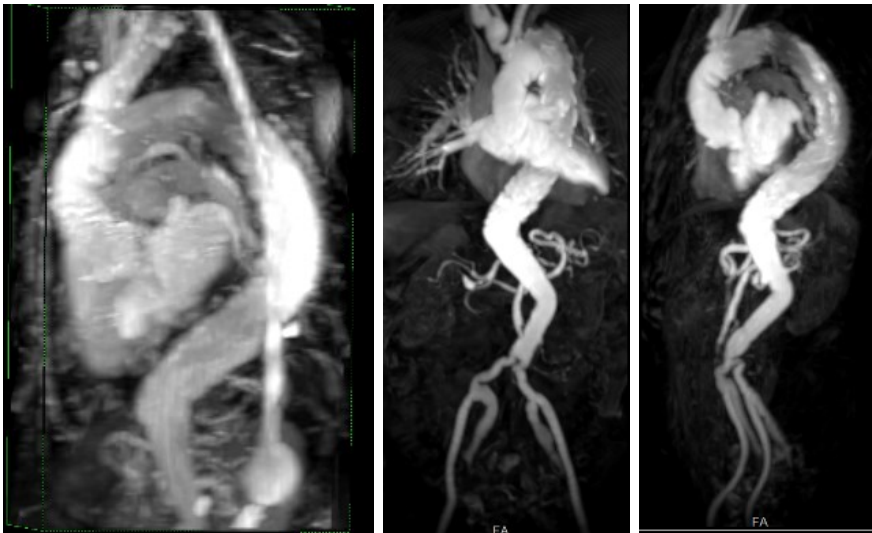


Abbildung 255: MIP-3D-Rekonst., SPACE-MRA (l.), CE-MRA (m. und r.), Pat. 6

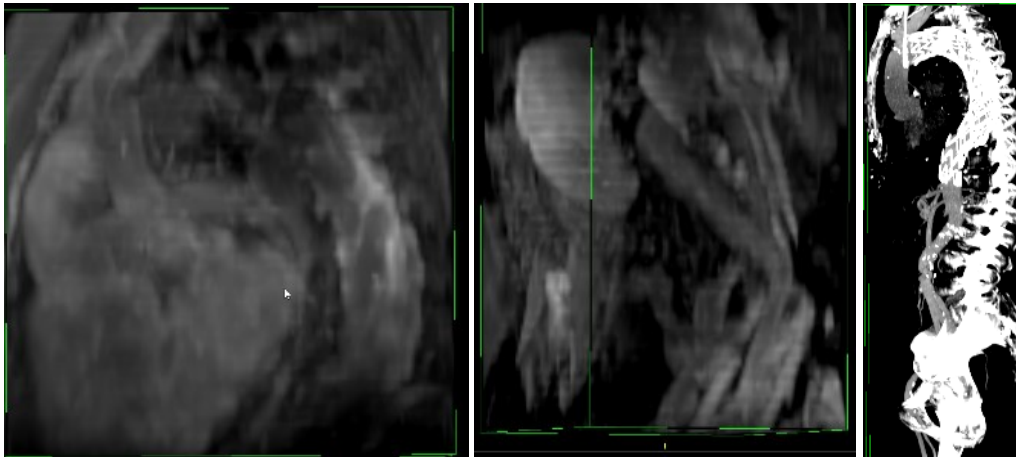


Abbildung 256: MIP-3D-Rekonst., VIBE-MRI (l. und m.), CE-CTA (r.), Pat. 6

Bei der SPACE-MRA, der CE-MRA und der CE-CTA ist die Qualität der 3D-Rekonstruktion gut. In der 3D-Rekonstruktion der VIBE-MRI ist es sehr schwer die Aorta zuzuordnen. In der 3D-Rekonstruktion des CE-CTA kann man den genauen Abschnitt des Aortenstents erkennen, der zur Therapie der Typ A-Aortendissektion verwendet wurde. Auch bei der SPACE-MRA und CE-MRA sind die Abschnitte der Aorta, die mit verschiedenen Methoden therapiert wurden, unterscheidbar. Die einzelnen, unterschiedlich therapierten Aortenabschnitte sind dort aber nicht so scharf abgrenzbar zueinander wie in der CE-CTA-Aufnahme.

„Darstellung der Pathologie“:

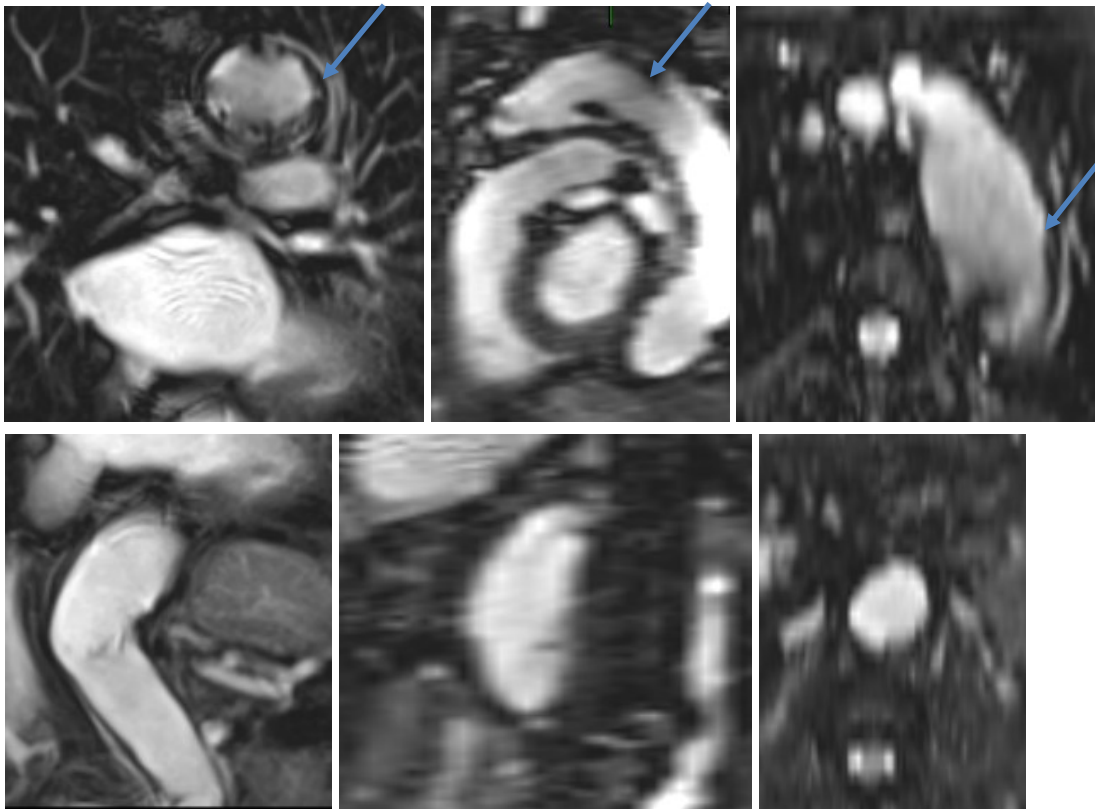
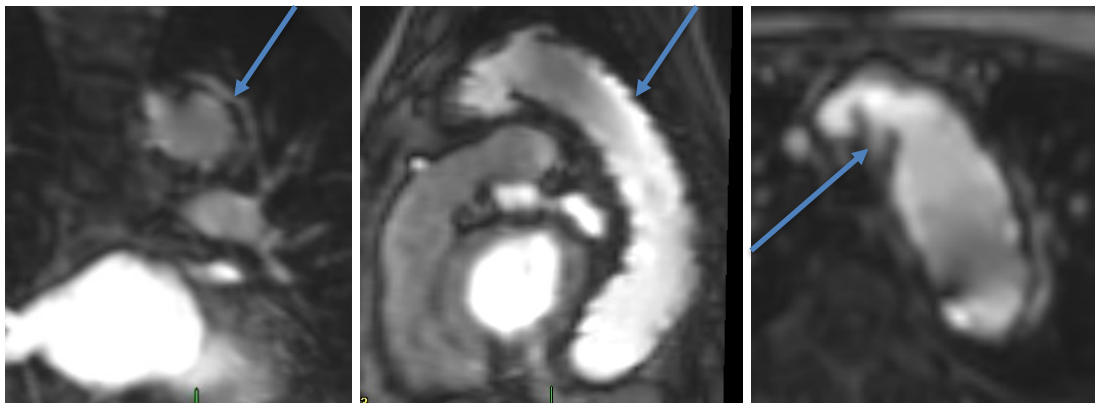


Abbildung 257: MPR-Rekonstruktion, SPACE-MRA, Pathologie, Pat. 6  
links: cor. E., mittig: sag. E., rechts: tra. E.



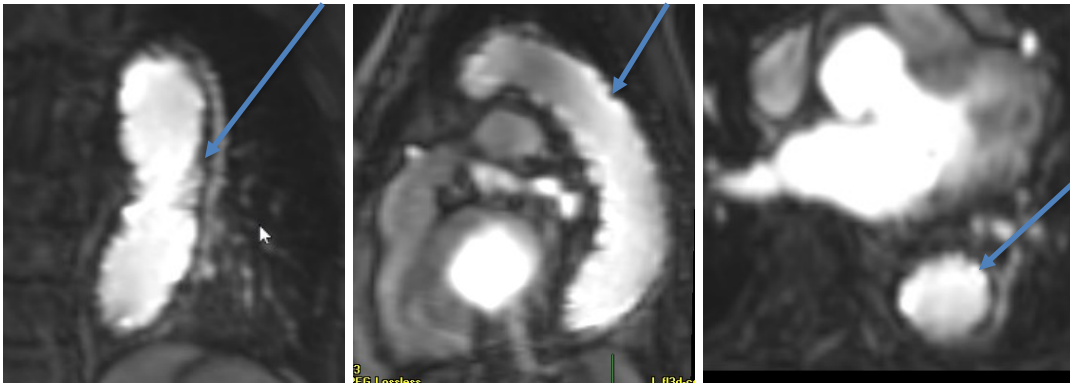


Abbildung 258: MPR-Rekonstruktion, CE-MRA, Pathologie, Pat. 6  
links: cor. E., mittig: sag. E., rechts: tra. E.

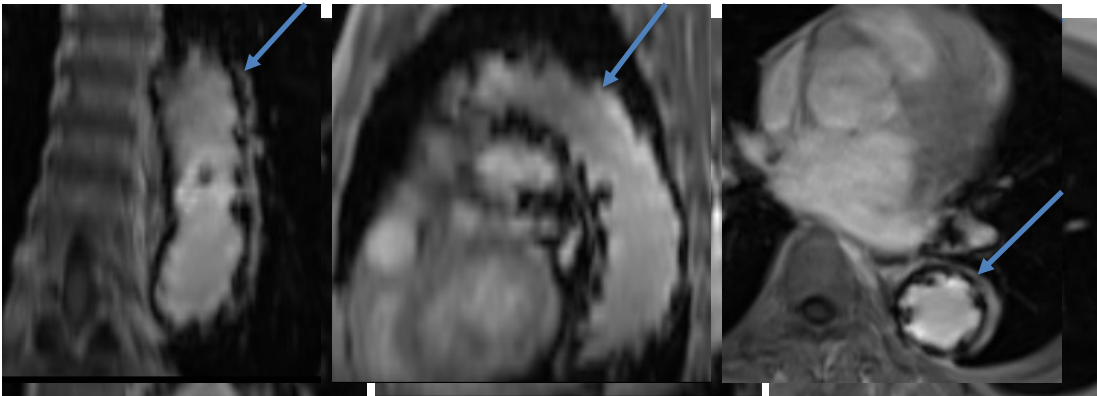
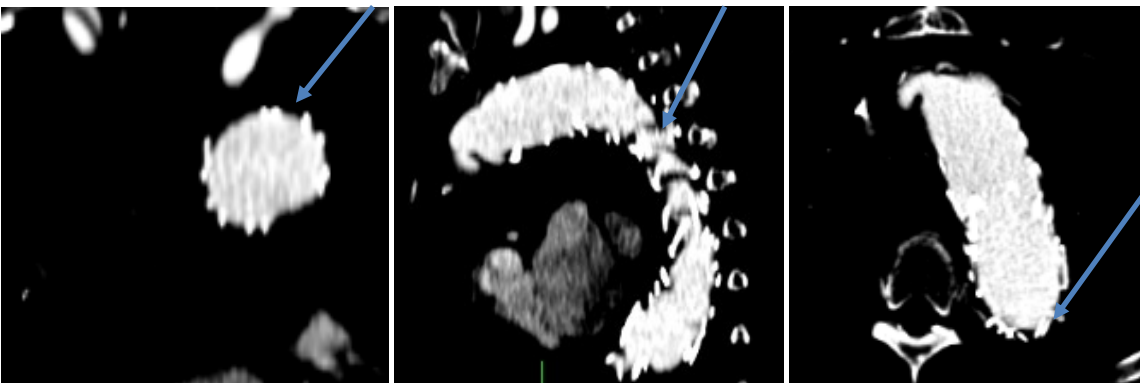


Abbildung 259: MPR-Rekonstruktion, VIBE-MRI, Pathologie, Pat. 6  
links: cor. E., mittig: sag. E., rechts: tra. E.



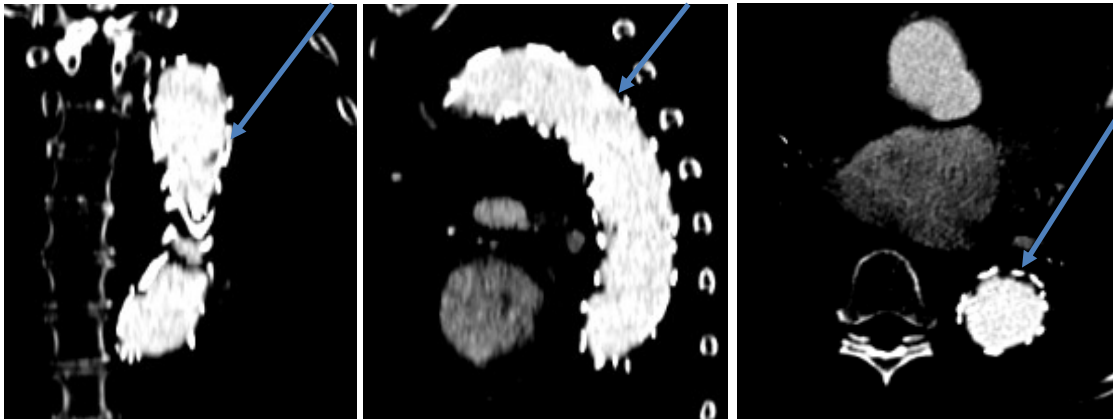


Abbildung 260: MPR-Rekonstruktion, CE-CTA, Pathologie, Pat. 6  
links: cor. E., mittig: sag. E., rechts: tra. E.

Alle vier Sequenzen präsentieren sich qualitativ gut und der Aortenstentgraft (Pfeil) ist in allen Aufnahmen gut erkennbar.

„Größter Durchmesser der Aorta ascendens“:

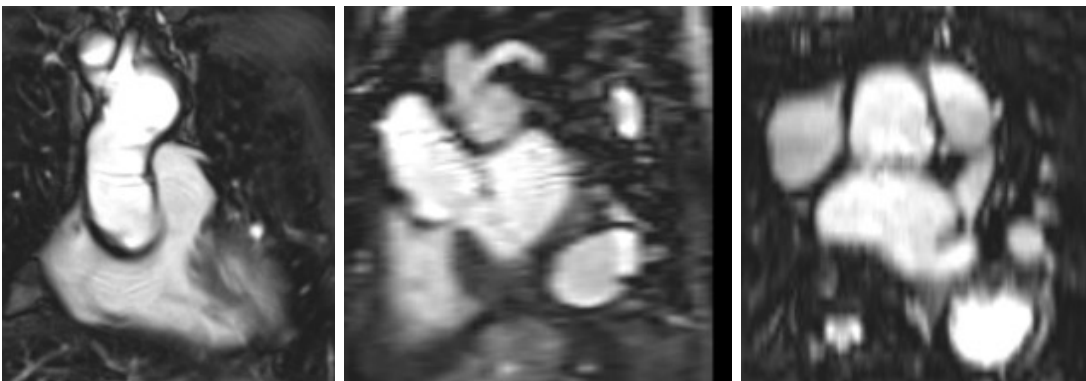


Abbildung 261: MPR-Rekonstruktion, SPACE-MRA, Aorta asc., Pat. 6  
links: cor. E., mittig: sag. E., rechts: tra. E.

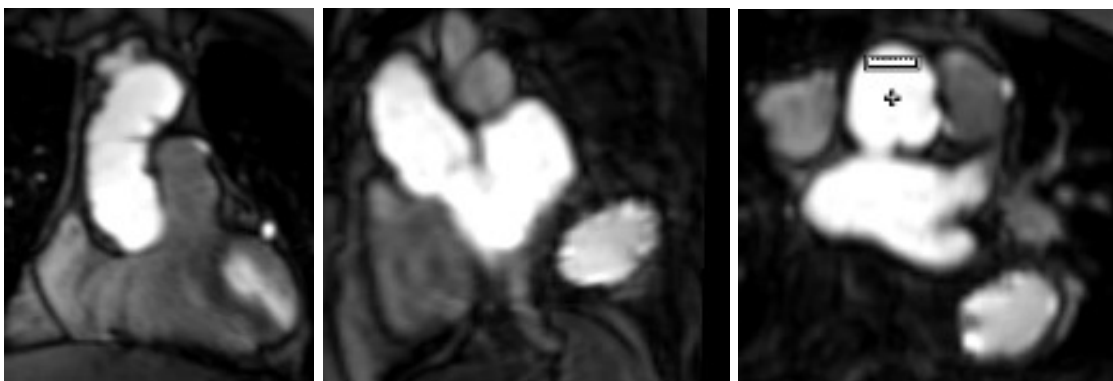


Abbildung 262: MPR-Rekonstruktion, CE-MRA, Aorta asc., Pat. 6  
links: cor. E., mittig: sag. E., rechts: tra. E.

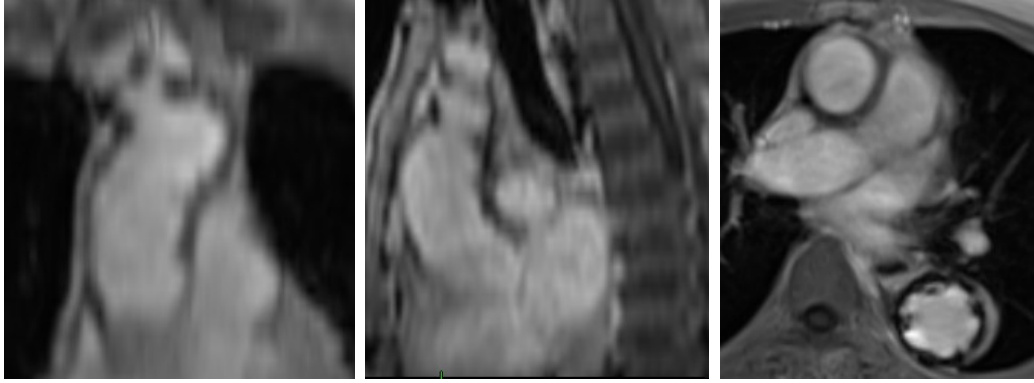


Abbildung 263: MPR-Rekonstruktion, CE-MRA, Aorta asc., Pat. 6  
links: cor. E., mittig: sag. E., rechts: tra. E.

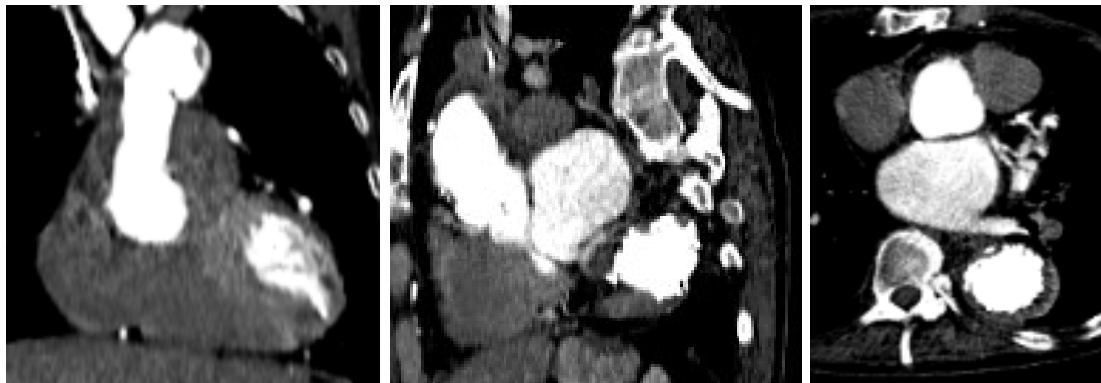


Abbildung 264: MPR-Rekonstruktion, CE-MRA, Aorta asc., Pat. 6  
links: cor. E., mittig: sag. E., rechts: tra. E.

Die Resultate aller vier Sequenzen haben eine gute Qualität und auch die Befundung ist anhand aller Sequenzen gut möglich.

Durchmesservergleich:

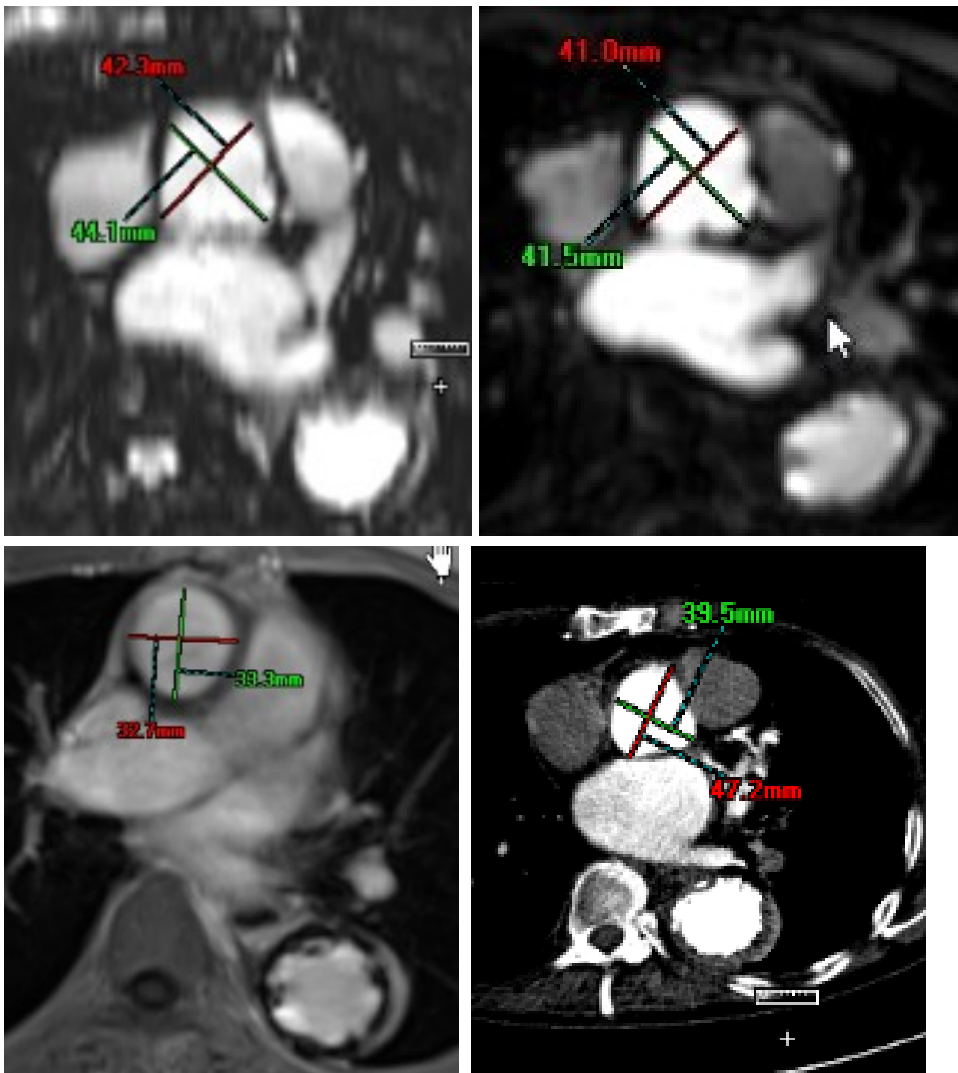


Abbildung 265: Durchmesser Aorta asc., SPACE-MRA (l.-o.), CE-MRA (r.-o.), VIBE-MRI (l.-u.), CE-CTA (r.-u.) (MPR-Rekonst.: transversal), Pat. 6  
SPACE-MRA (l.-o.): 4,4 x 4,2cm, CE-MRA (r.-o.): 4,2 x 4,1cm  
VIBE-MRI (l.-u.): 3,3 x 3,3cm, CE-CTA (r.-u.): 4,8cm x 4,0cm

Die Messergebnisse der SPACE-MRA und CE-MRA liegen nah beieinander, zu höheren Werten hin abweichend ist die Messung der CE-CTA mit 4,8cm als größerer Wert und zu den niedrigeren Werten hin abweichend sind beide Messwerte 3,3 x 3,3cm aus der VIBE-MRI-Aufnahme. Bei letzterer wurde womöglich fälschlicherweise nicht die gesamte Aortenwand in die Messung miteinbezogen.

„Vor dem Abgang der Supraaortalen“:

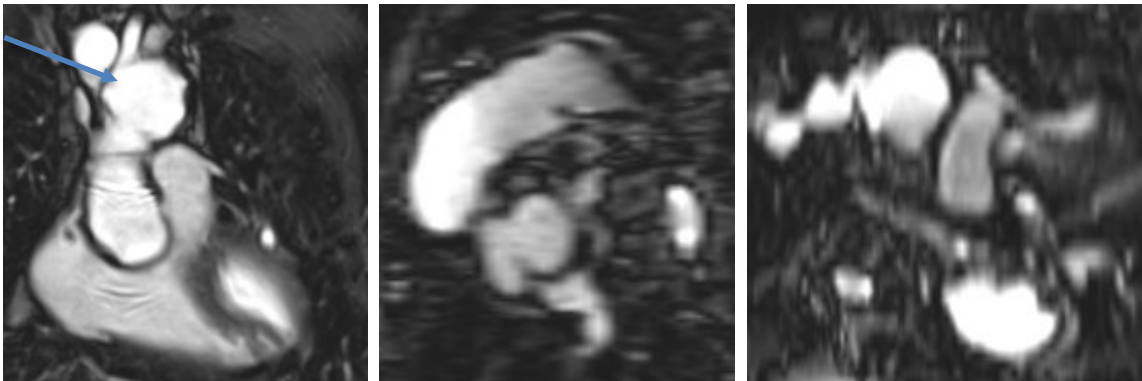


Abbildung 266: MPR-Rekonstruktion, SPACE-MRA, Aorta asc., vor Abgang der Supraaortalen, Pat. 6

links: cor. E., mittig: schräg-sag. E., rechts: schräg-tra. E.

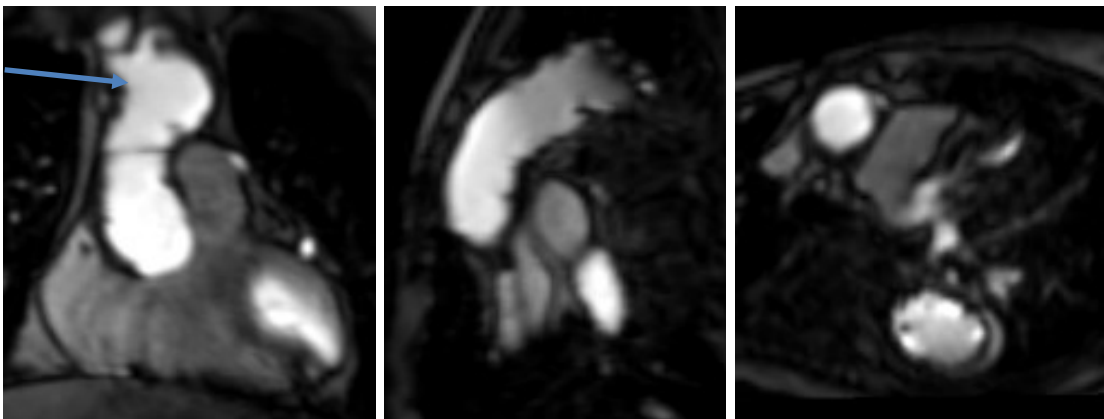


Abbildung 267: MPR-Rekonstruktion, CE-MRA, Aorta asc., vor Abgang der Supraaortalen, Pat. 6

links: cor. E., mittig: schräg-sag. E., rechts: schräg-tra. E.

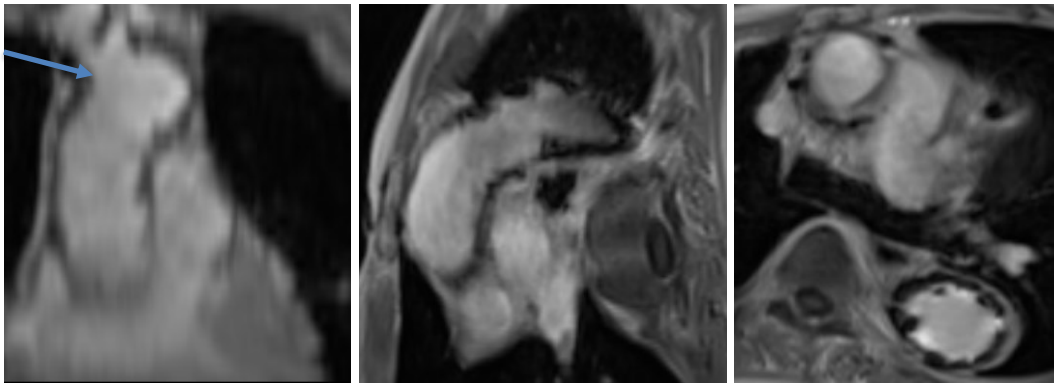


Abbildung 268: MPR-Rekonstruktion, VIBE-MRI, Aorta asc., vor Abgang der Supraaortalen, Pat. 6  
links: cor. E., mittig: schräg-sag. E., rechts: schräg-tra. E.

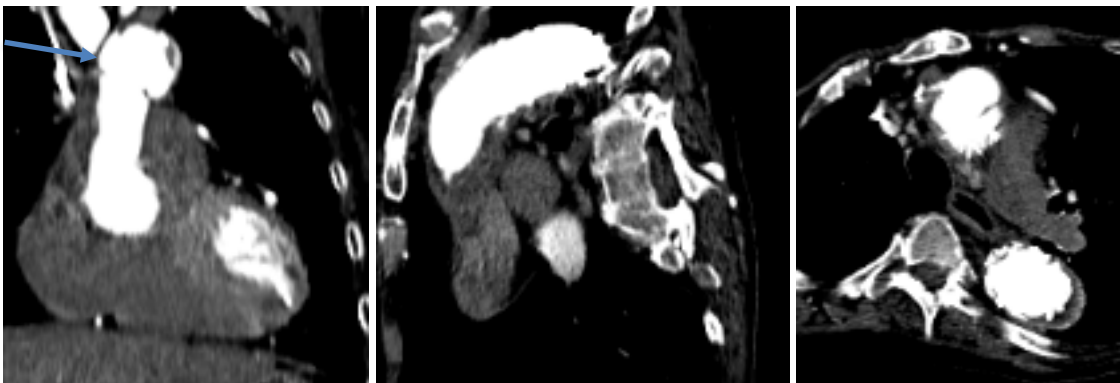


Abbildung 269: MPR-Rekonstruktion, CE-CTA, Aorta asc., vor Abgang der Supraaortalen, Pat. 6  
links: cor. E., mittig: schräg-sag. E., rechts: schräg-tra. E.

Die SPACE-MRA-Aufnahme weist eine Inhomogenität auf, die in leichterer Form auch bei der CE-MRA zu sehen ist. In der CE-MRA-Aufnahme ist die Beurteilbarkeit dadurch nicht eingeschränkt, in der SPACE-MRA-Aufnahme allerdings schon. Ein Pathologieausschluss kann alleinig mit den SPACE-MRA-Aufnahmen nicht erfolgen. Die Qualität der CE-CTA ist durch ein Artefakt leicht reduziert.

Durchmesservergleich:

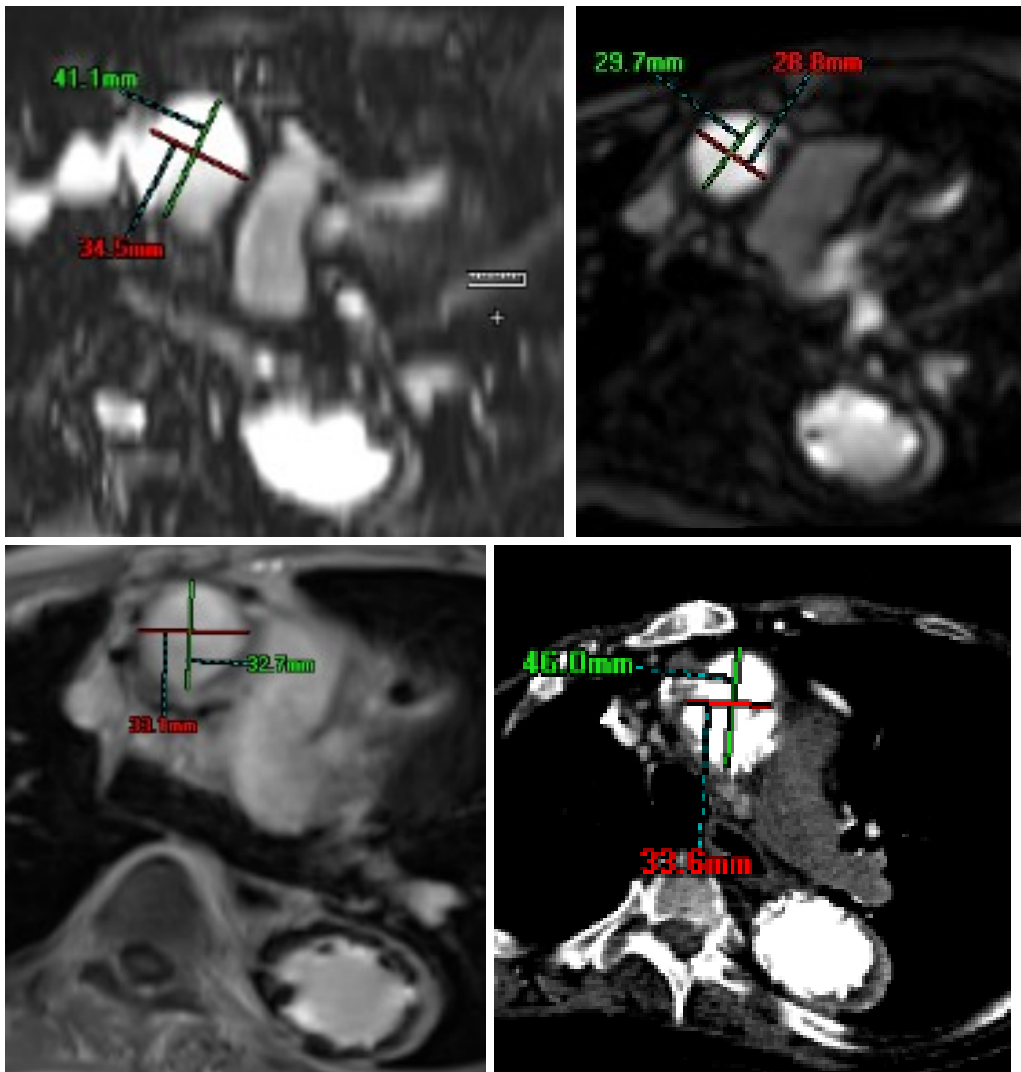


Abbildung 270: Durchmesser Aorta asc., vor Abgang der Supraaortalen, SPACE-MRA (l.-o.), CE-MRA (r.-o.), VIBE-MRI (l.-u.), CE-CTA (r.-u.) (MPR-Rekonst.: transversal), Pat. 6  
SPACE-MRA (l.-o.): 4,1 x 3,5cm, CE-MRA (r.-o.): 3,0 x 2,9cm  
VIBE-MRI (l.-u.): 3,3 x 3,3cm, CE-CTA (r.-u.): 4,6 x 3,4cm

Die Abmessung in der SPACE-MRA- und CE-CTA-Aufnahme scheinen eine höhere Messvariabilität zu haben, da zum einen die Aortenwand in der SPACE-Sequenz unscharf zur Umgebung abgegrenzt ist und zum anderen die Aorta bei der CE-CTA-Sequenz nicht im rechten Winkel angeschnitten zu sein scheint. Die Messungen der CE-MRA und VIBE-MRI weichen weniger stark voneinander ab.

„Supraaortale Gefäße“:

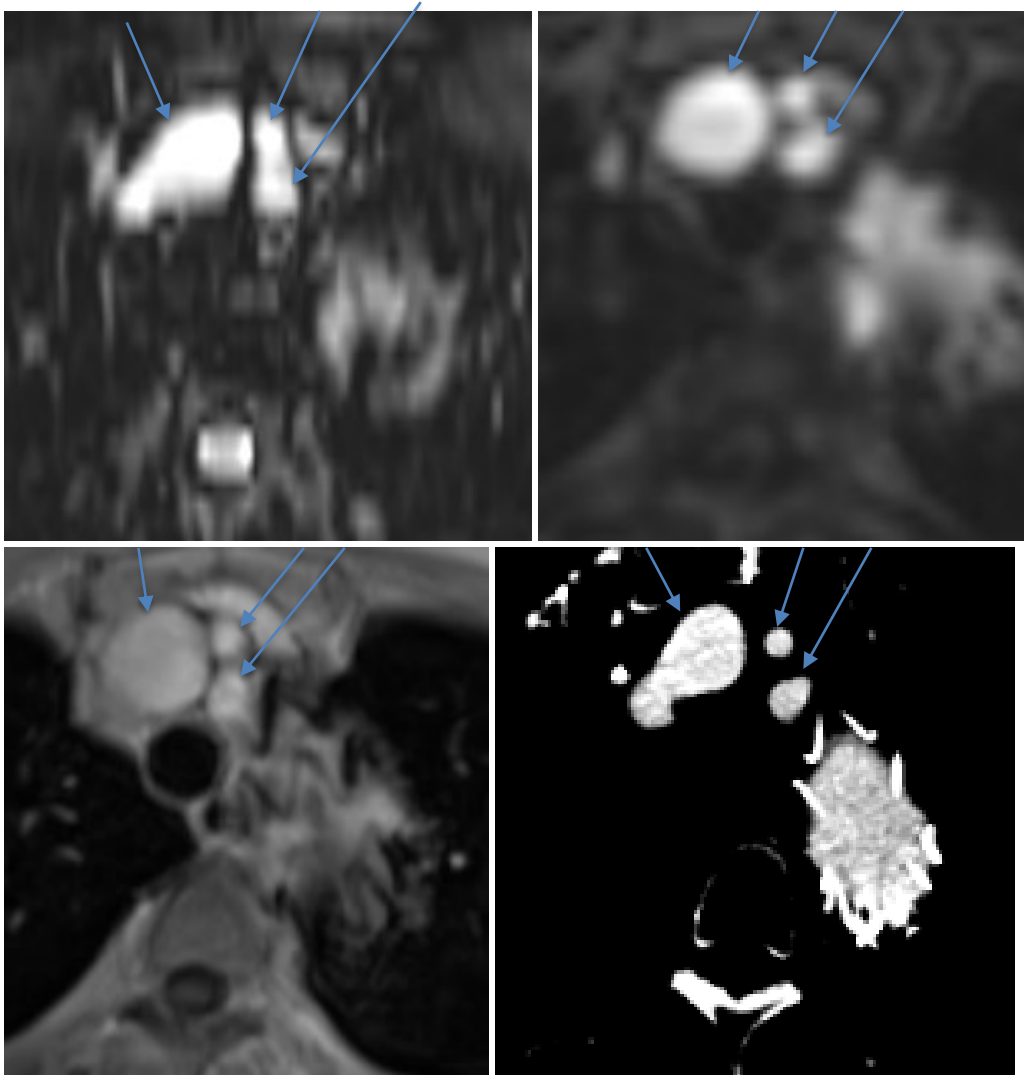


Abbildung 271: Supraaortale Gefäße in der Transversalebene (MPR-Rekonst.), SPACE-MRA (l.-o.), CE-MRA (r.-o.), VIBE-MRI (l.-u.), CE-CTA (r.-u.), Pat. 6  
Truncus brachiocephalicus (l. Pfeil), Arteria carotis sinistra (m. Pfeil), Arteria subclavia sinistra (r. Pfeil)

Die Supraaortalen sind in allen Aufnahmen gut abgrenzbar, am besten in der VIBE-MRI. In der SPACE-MRA-Aufnahme sind Arteria carotis sinistra und Arteria subclavia sinistra schlecht voneinander abgrenzbar. Anhand der CE-CTA-Aufnahme ist eine Dissektion im Truncus brachiocephalicus nicht ganz auszuschließen. Hingegen zeigen alle Sequenzen mehr eine Lumenerweiterung des Truncus brachiocephalicus als eine Dissektionsmembran auf.

„Nach Abgang der Supraaortalen“:

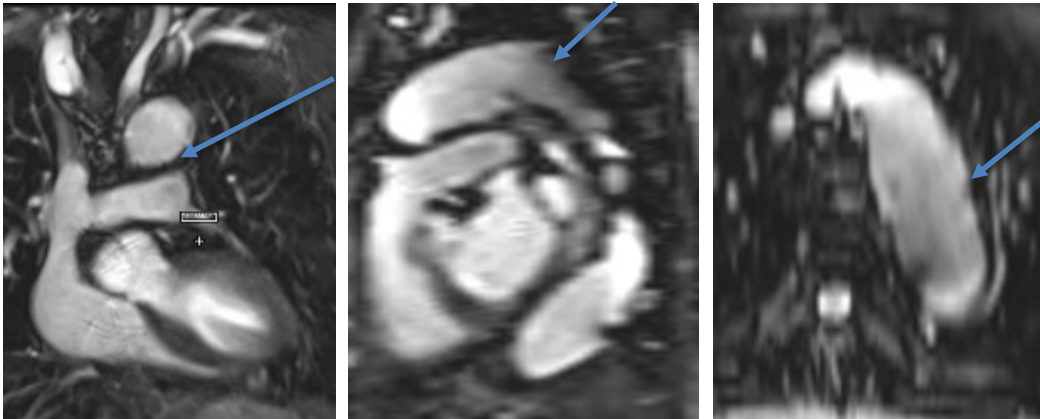


Abbildung 272: MPR-Rekonstruktion, SPACE-MRA, Arcus aortae, nach Abgang der Supraaortalen, Pat. 6

links: cor. E., mittig: sag. E., rechts: tra. E.

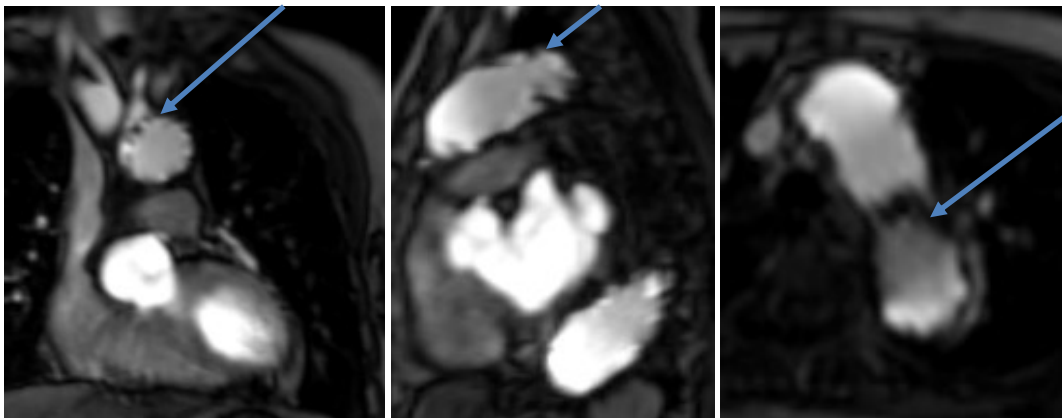


Abbildung 273: MPR-Rekonstruktion, CE-MRA, Arcus aortae, nach Abgang der Supraaortalen, Pat. 6

links: cor. E., mittig: sag. E., rechts: tra. E.

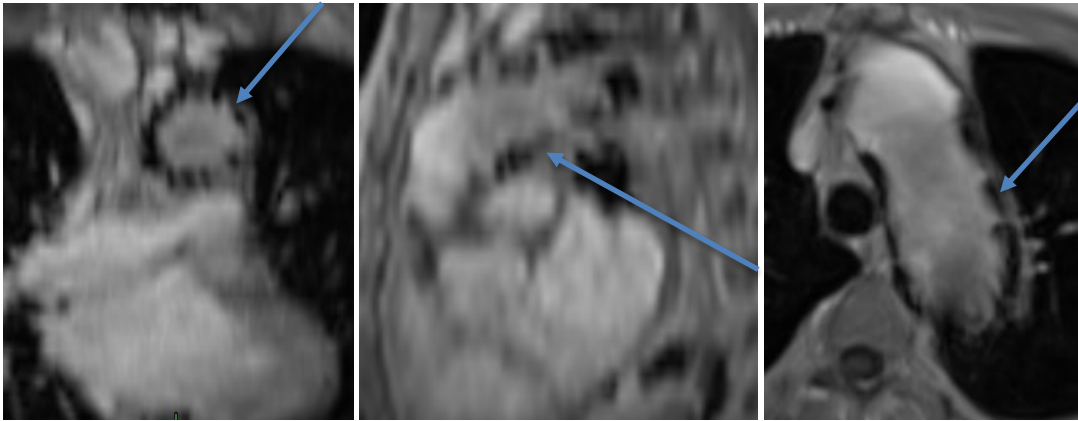


Abbildung 274: MPR-Rekonstruktion, VIBE-MRI, Arcus aortae, nach Abgang der Supraaortalen, Pat. 6  
links: cor. E., mittig: sag. E., rechts: tra. E.

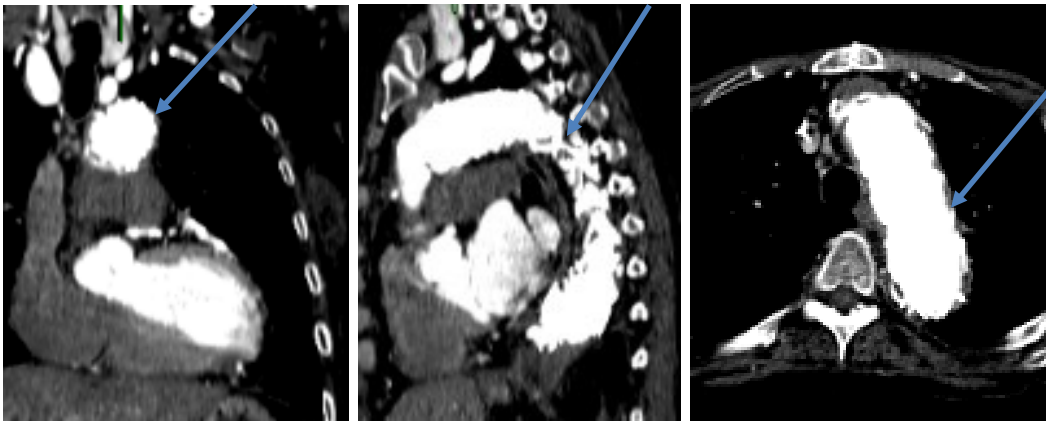


Abbildung 275: MPR-Rekonstruktion, CE-CTA, Arcus aortae, nach Abgang der Supraaortalen, Pat. 6  
links: cor. E., mittig: sag. E., rechts: tra. E.

In den Aufnahmen der CE-MRA, VIBE-MRI und CE-CTA sieht man den Beginn des Aortenstentgrafts (Pfeile) sehr deutlich, in der SPACE-MRA-Aufnahme hingegen tritt dieser noch nicht so stark in Erscheinung. Die Qualität ist aber in allen Sequenzen vergleichbar gut.

Durchmesservergleich:

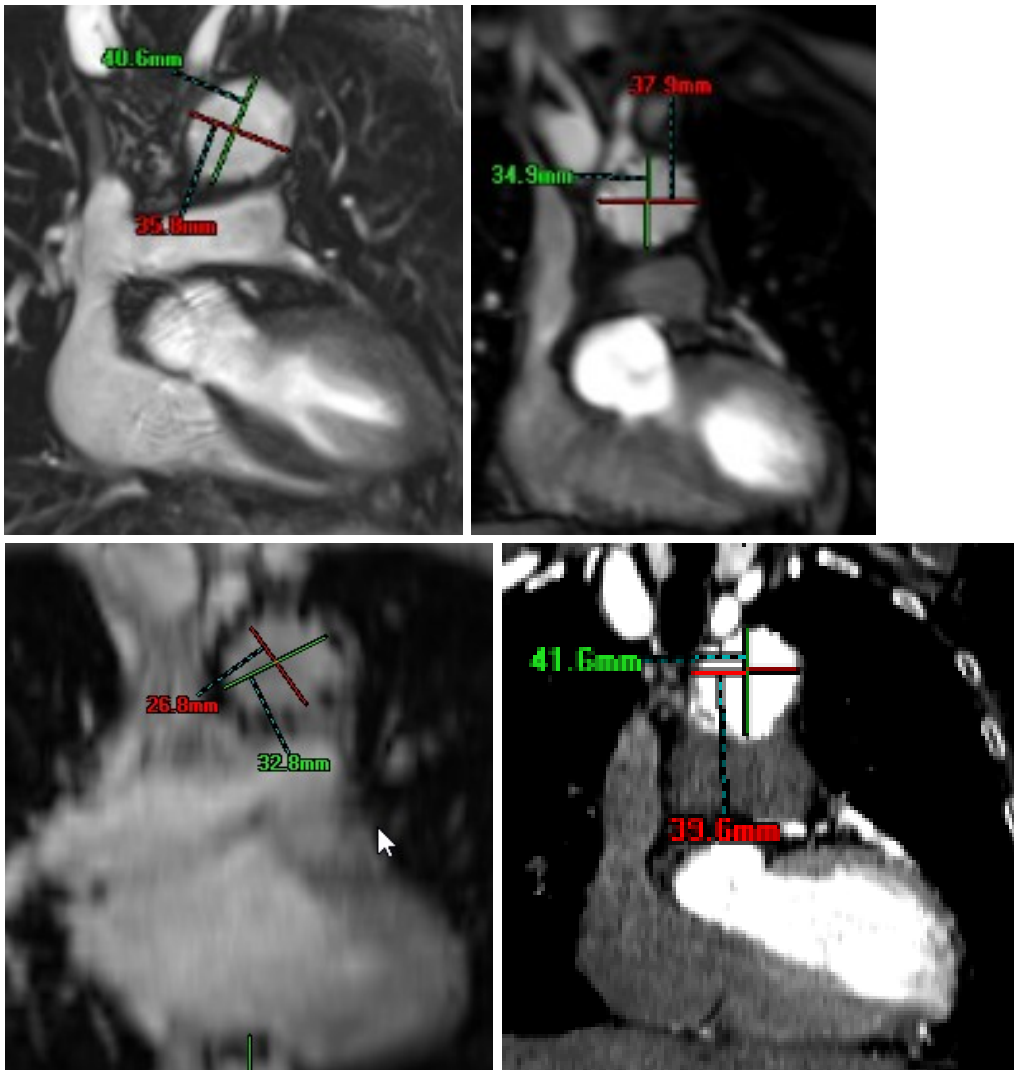


Abbildung 276: Durchmesser Arcus aortae, nach Abgang der Supraaortalen, SPACE-MRA (l.-o.), CE-MRA (r.-o.), VIBE-MRI (l.-u.), CE-CTA (r.-u.) (MPR-Rekonst.: coronal), Pat. 6  
SPACE-MRA (l.-o.): 4,1 x 3,6cm, CE-MRA (r.-o.): 3,8 x 3,5cm  
VIBE-MRI (l.-u.): 3,3 x 2,7cm, CE-CTA (r.-u.): 4,2 x 4,0cm

Die Messergebnisse der SPACE-MRA, CE-MRA und CE-CTA (größerer der beiden Werte) liegen recht nah aneinander. Die der VIBE-MRI liegen mit 3,3 x 2,7cm deutlich darunter. Dies liegt womöglich daran, dass bei dieser Messung, anders als bei den anderen Sequenzauswertungen, die Wand des Stentgrafts nicht in die Durchmesserermessung miteinbezogen wurde.

„Größter Durchmesser der Aorta descendens“:

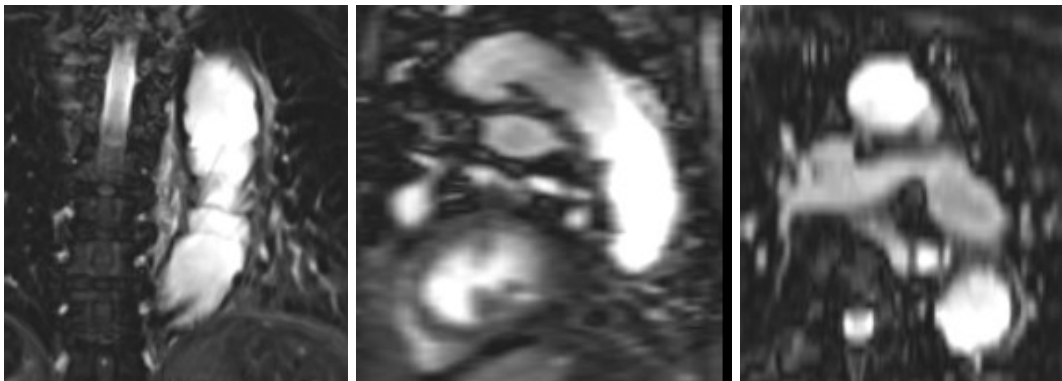


Abbildung 277: MPR-Rekonstruktion, SPACE-MRA, Aorta desc., Pat. 6  
links: cor. E., mittig: sag. E., rechts: tra. E.

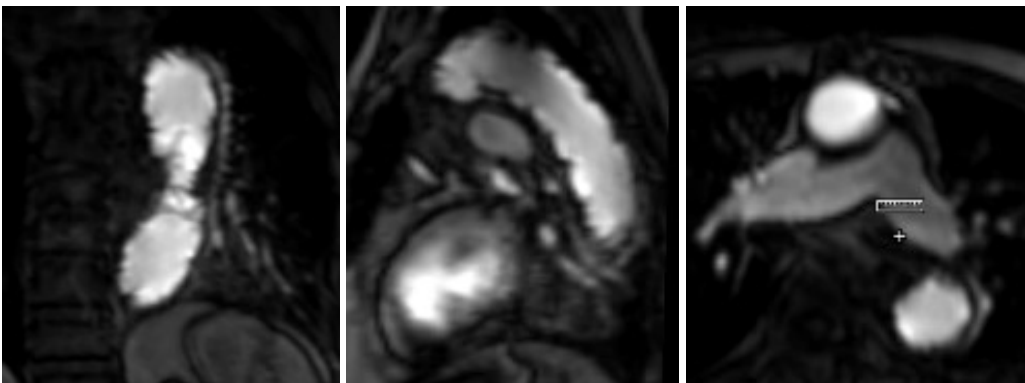


Abbildung 278. MPR-Rekonstruktion, CE-MRA, Aorta desc., Pat. 6  
links: cor. E., mittig: sag. E., rechts: tra. E.



Abbildung 279: MPR-Rekonstruktion, VIBE-MRI, Aorta desc., Pat. 6  
links: cor. E., mittig: sag. E., rechts: tra. E.

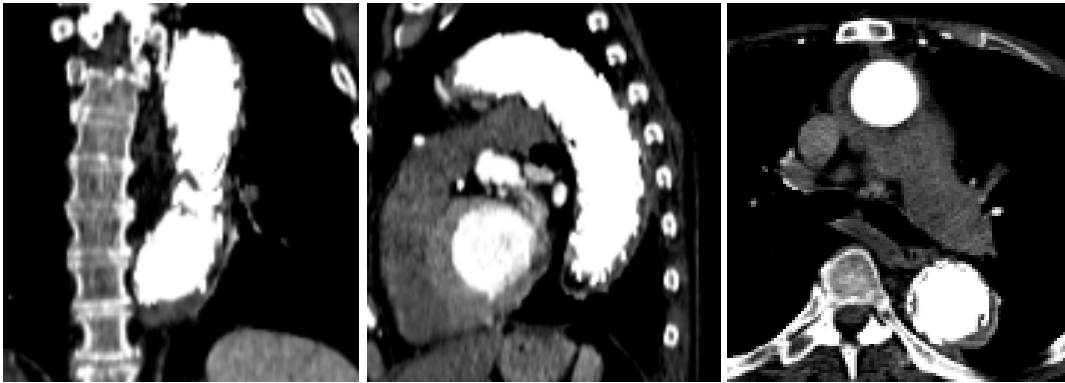


Abbildung 280: MPR-Rekonstruktion, CE-CTA, Aorta desc., Pat. 6  
links: cor. E., mittig: sag. E., rechts: tra. E.

In jeder Sequenz ist der Aortenstentgraft eindeutig zu erkennen und auch die Beurteilbarkeit des Aortenlumens ist in allen Aufnahmen gut.

Durchmesservergleich:

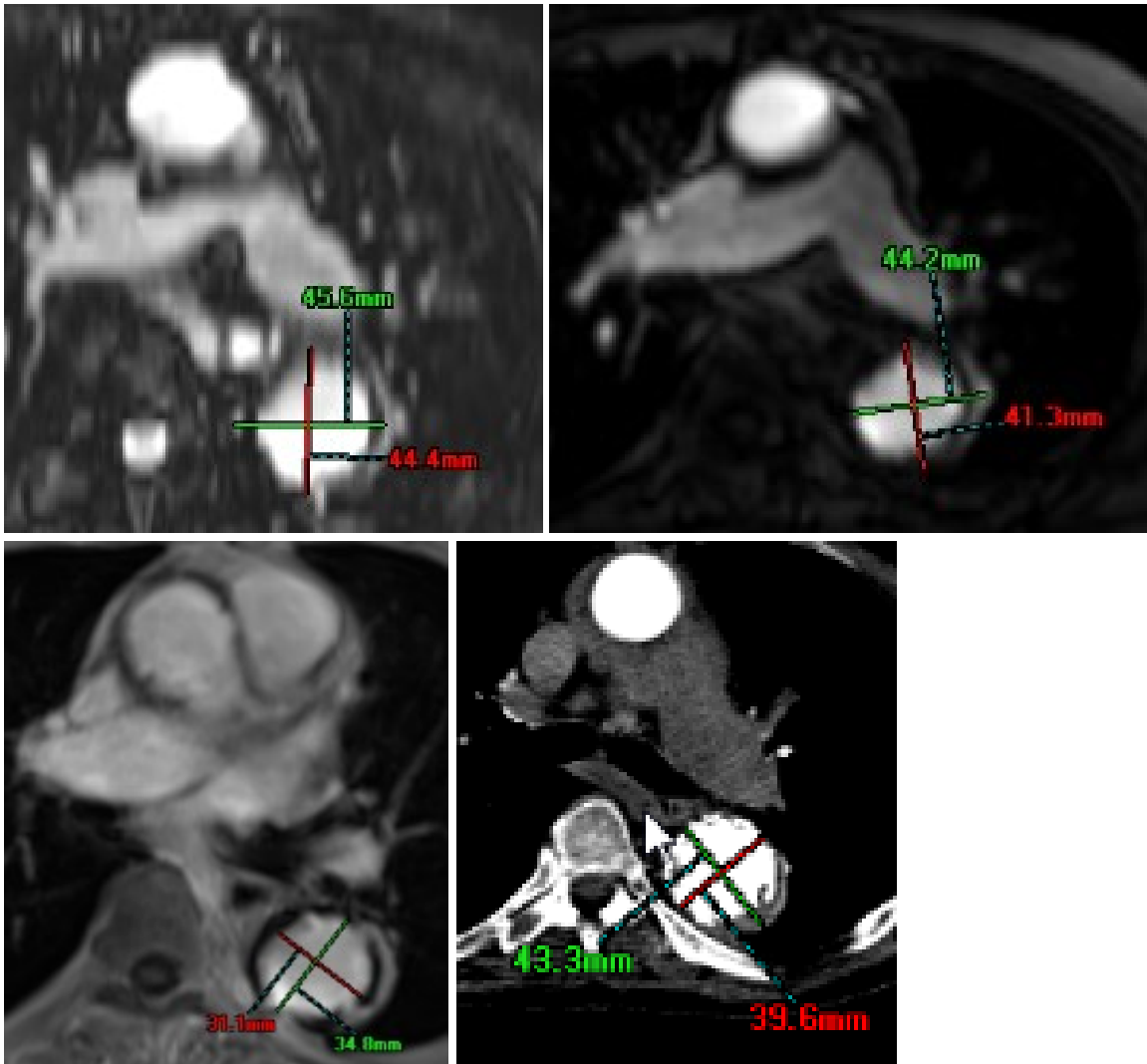


Abbildung 281: Durchmesser Aorta desc., SPACE-MRA (l.-o.), CE-MRA (r.-o.), VIBE-MRI (l.-u.), CE-CTA (r.-u.) (MPR-Rekonst.: transversal), Pat. 6  
SPACE-MRA (l.-o.): 4,6 x 4,4cm, CE-MRA (r.-o.): 4,4 x 4,1cm  
VIBE-MRI (l.-u.): 3,5 x 3,1cm, CE-CTA (r.-u.): 4,3 x 4,0cm

Wie in der Ebene zuvor sind die Messergebnisse der Sequenzen SPACE-MRA, CE-MRA und CE-CTA kaum voneinander abweichend, aber die VIBE-MRI-Messung fällt niedriger aus. Dies liegt womöglich nun erneut daran, dass die Dicke des Stentgrafts nicht in die Messung miteinbezogen wurde.

“Distaler Abschnitt der Aorta”:

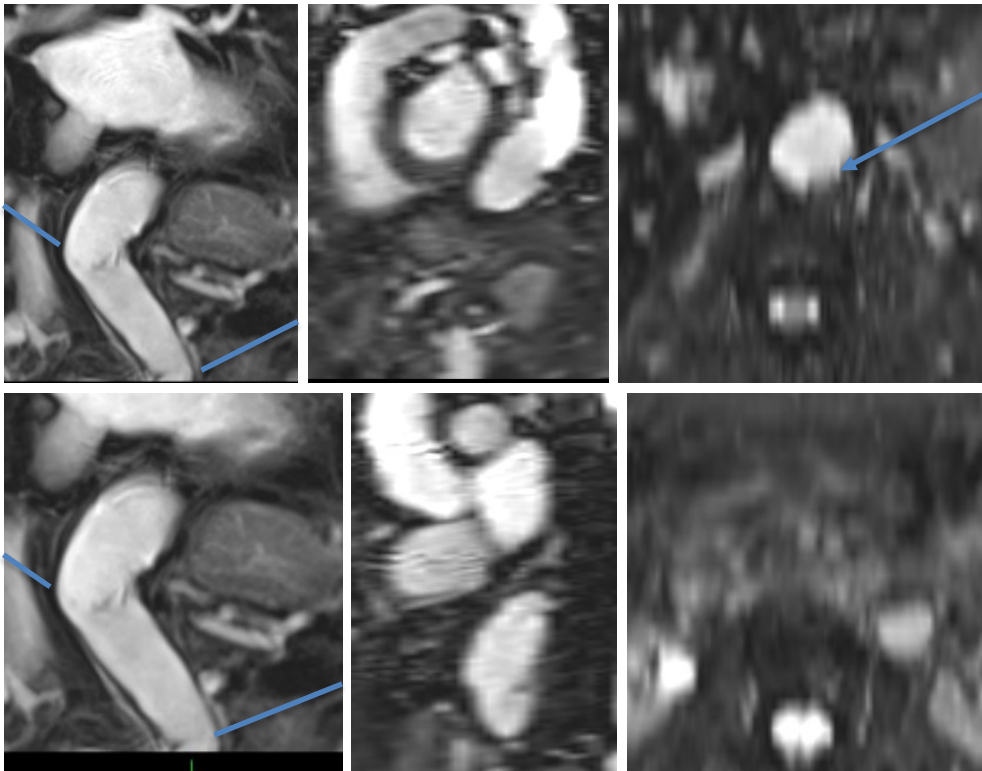


Abbildung 282: MPR-Rekonstruktion, SPACE-MRA, distale Pathologie, Pat. 6  
links: cor. E., mittig: sag. E., rechts: tra. E.

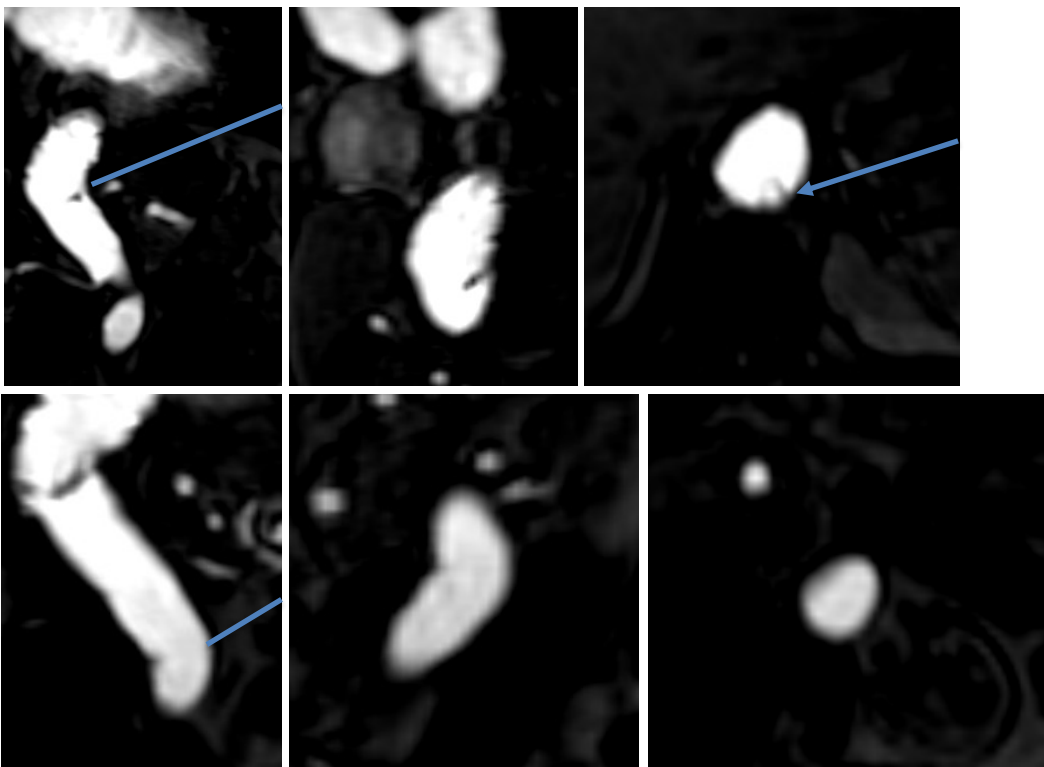


Abbildung 283: MPR-Rekonstruktion, CE-MRA, distale Pathologie, Pat. 6  
links: cor. E., mittig: sag. E., rechts: tra. E.

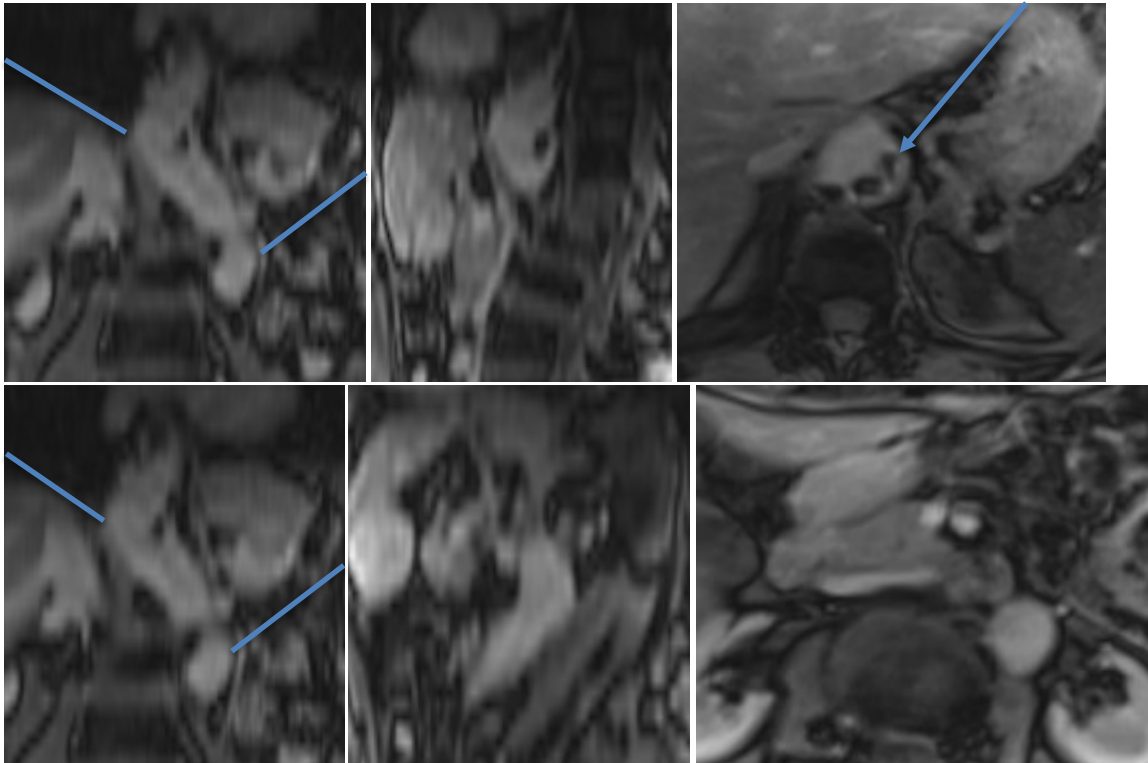


Abbildung 284: MPR-Rekonstruktion, VIBE-MRI, distale Pathologie, Pat. 6  
links: cor. E., mittig: sag. E., rechts: tra. E.

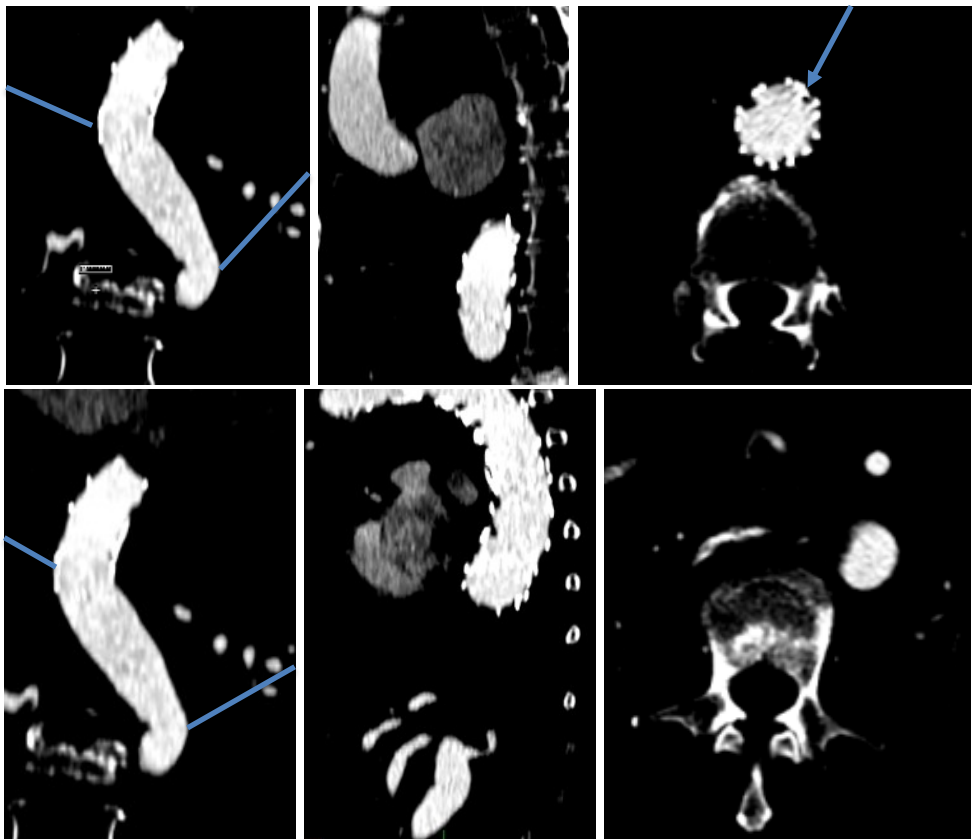


Abbildung 285: MPR-Rekonstruktion, CE-CTA, distale Pathologie, Pat. 6  
links: cor. E., mittig: sag. E., rechts: tra. E.

Für die Analyse des distalen Aortenabschnitts wurden zwei Ebenen an den in der coronalen Ebene sichtbaren „Knickpunkten“ (mit Strichen markiert in der Coronalebene), die durch die Aortenstentgrafts entstanden sind, festgelegt. Im proximaleren Abschnitt der Aorta descendens (Ebene 1) ist noch ein Aortenstentgraft darstellbar, im distaleren Abschnitt (Ebene 2) nicht mehr. Dies kann in jeder Aufnahme der vier Sequenzen bestätigt werden.

Durchmesservergleich:

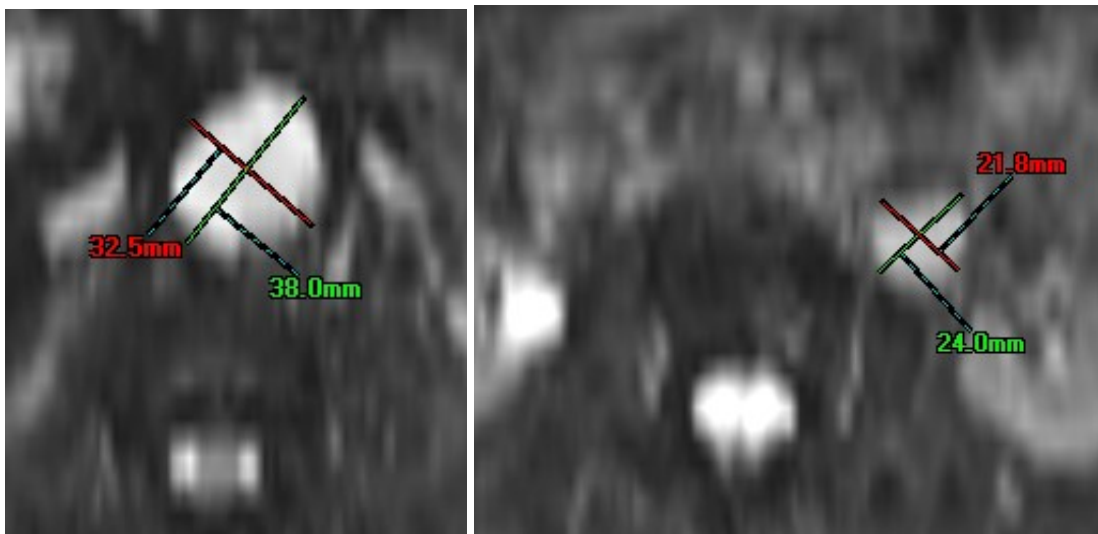


Abbildung 286: Durchmesser Aorta desc., SPACE-MRA, proximaler „Knickpunkt“ (l.), distaler „Knickpunkt“ (r.) (MPR-Rekonst.: transversal), Pat. 6  
SPACE-MRA: proximal: 3,8 x 3,3cm, distal: 2,4 x 2,2cm

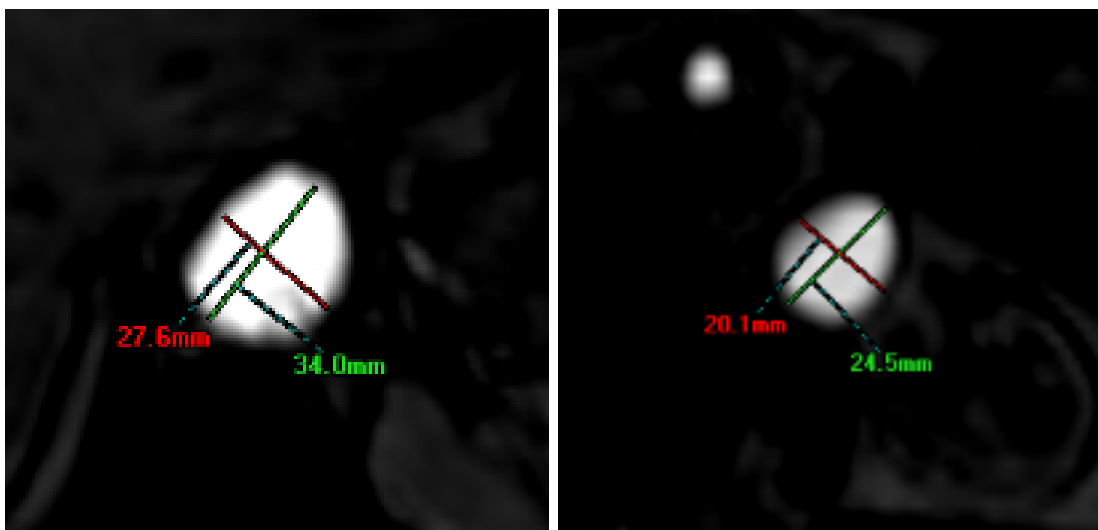


Abbildung 287: Durchmesser Aorta desc., CE-MRA, proximaler „Knickpunkt“ (l.), distaler „Knickpunkt“ (r.) (MPR-Rekonst.: transversal), Pat. 6  
CE-MRA: proximal: 3,4 x 2,8cm, distal: 2,5 x 2,0cm

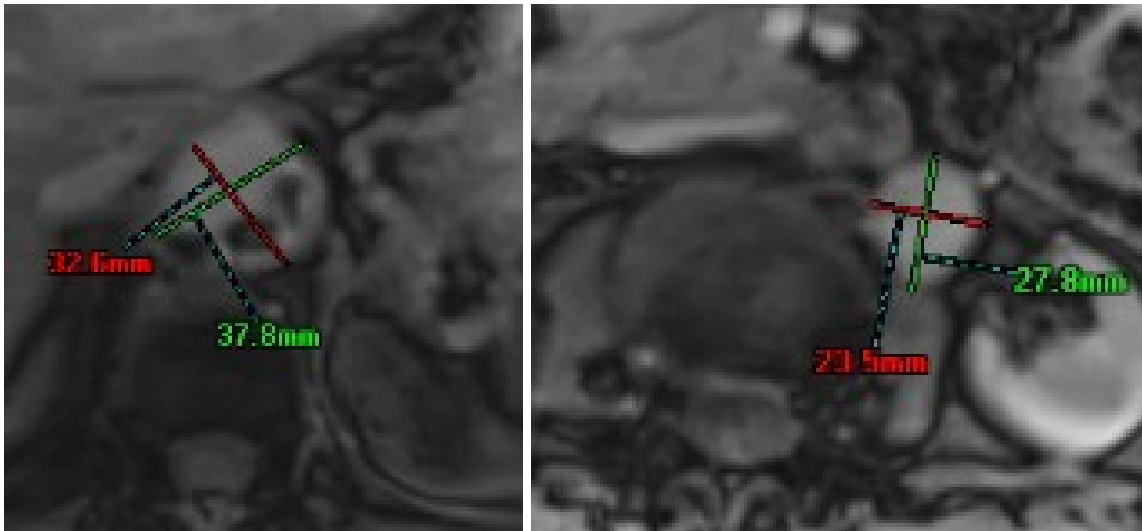


Abbildung 288: Durchmesser Aorta desc., VIBE-MRI, proximaler „Knickpunkt“ (l.), distaler „Knickpunkt“ (r.) (MPR-Rekonst.: transversal), Pat. 6  
 VIBE-MRI: proximal: 3,8 x 3,3cm, distal: 2,8 x 2,4cm

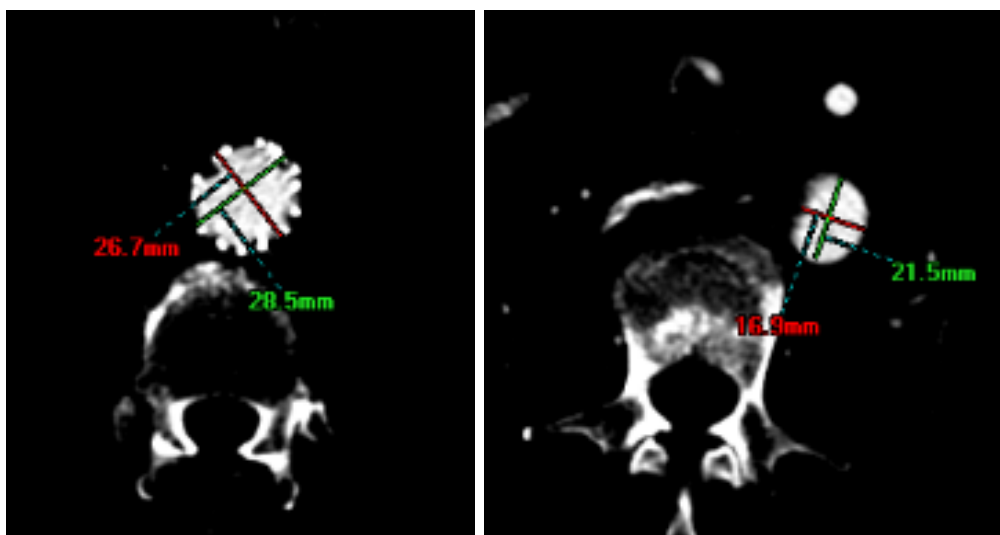


Abbildung 289: Durchmesser Aorta desc., CE-CTA, proximaler „Knickpunkt“ (l.), distaler „Knickpunkt“ (r.) (MPR-Rekonst.: transversal), Pat. 6  
 CE-CTA: proximal: 2,9 x 2,7cm, distal: 2,2cm x 1,7cm

Die Messwerte für den proximalen Durchmesser weichen in der SPACE-MRA und VIBE-MRI nur geringgradig voneinander ab. Die Messwerte der CE-MRA passen vom Verhältnis auch dazu, nur der Messwert aus der CE-CTA-Aufnahme fällt deutlich kleiner aus. Bei den Messungen der distalen Ebene sind die Werte, die in der SPACE-MRA und CE-MRA-Aufnahme gemessen wurden, am ähnlichsten. Die Werte der VIBE-MRI weichen nach oben hin ab (der größere der beiden Werte ist auch großzügig gemessen, wie sich der Abbildung entnehmen lässt) und die Werte

der CE-CTA weichen deutlich zur kleineren Seite ab (durch eine Signalauslöschung erfasst der kleinere der beiden Messwerte auch deutlich erkennbar nicht das gesamte Lumen).

Im Bereich des Aortenbogens liegt am Beginn des Aortenstentgrafts womöglich eine Engstelle vor, diese wurde bei dieser Gegenüberstellung erneut betrachtet:

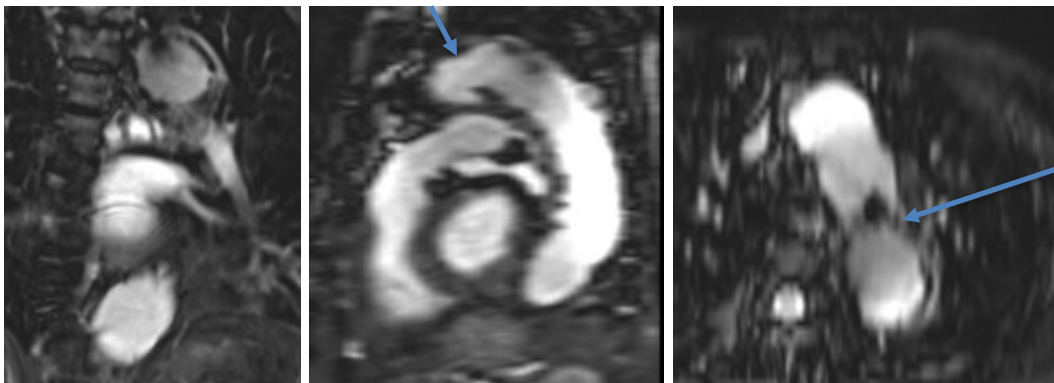


Abbildung 290: MPR-Rekonstruktion, SPACE-MRA, Engstelle, Pat. 6  
links: cor. E., mittig: sag. E., rechts: tra. E.

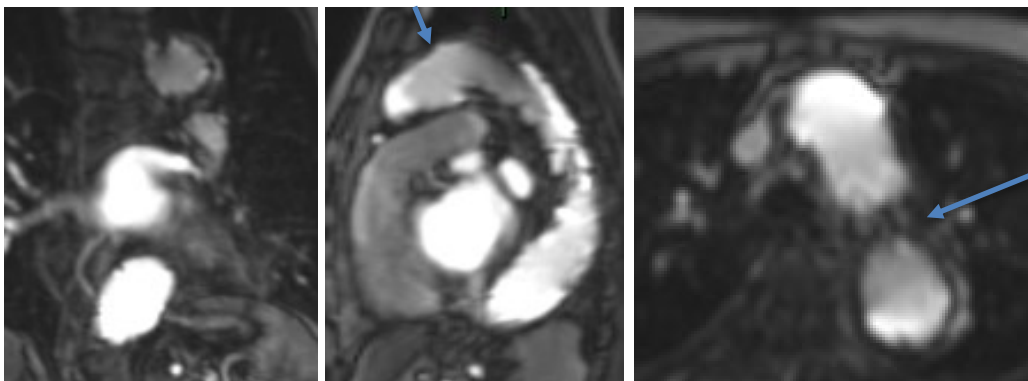


Abbildung 291: MPR-Rekonstruktion, CE-MRA, Engstelle, Pat. 6  
links: cor. E., mittig: sag. E., rechts: tra. E.

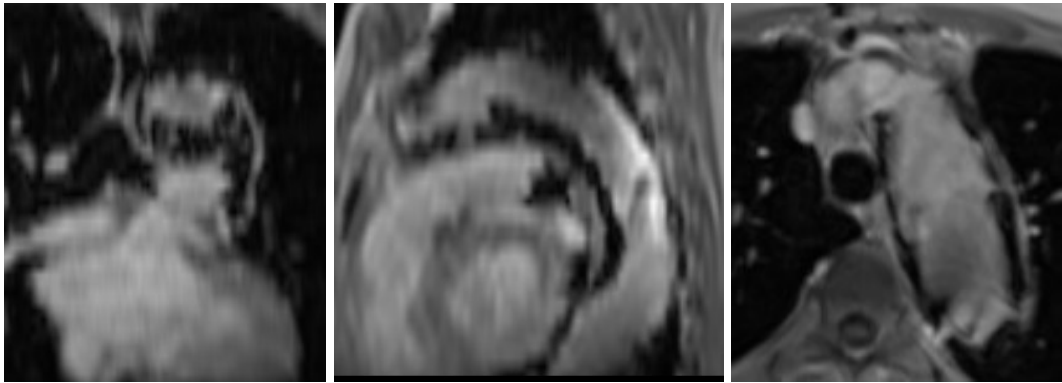


Abbildung 292: MPR-Rekonstruktion, VIBE-MRI, Engstelle, Pat. 6  
links: cor. E., mittig: sag. E., rechts: tra. E.

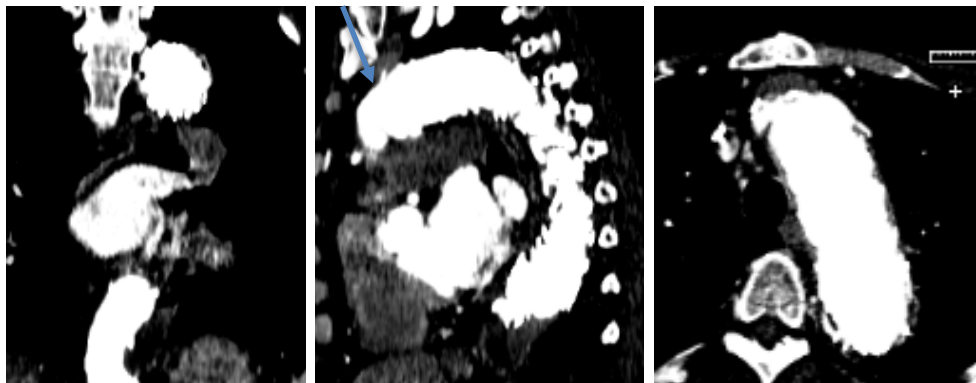


Abbildung 293: MPR-Rekonstruktion, CE-CTA, Engstelle, Pat. 6  
links: cor. E., mittig: sag. E., rechts: tra. E.

Diese Engstelle erscheint in allen Sequenzen auffällig verengt (Pfeile) außer in der CE-CTA-Aufnahme. In der sagittalen Ansicht der CE-CTA (Pfeil) ist die Engstelle nur im Ansatz zu erkennen.

Generell fällt die Engstelle nicht im Querschnitt des Aortenlumens auf, sondern vor allem in der Sagittal- und Transversalansicht.

Der siebte und damit letzte Patient der Studie leidet an einer Typ B-Dissektion der Aorta thoracalis und abdominalis.

Die Durchmessermessungen und Qualitätsbeurteilungen der Bildgebungen des Patienten Nummer 7 erfolgten in folgenden Ebenen:

- Größter Durchmesser der Aorta ascendens
- Vor Abgang der Supraaortalen
- Nach Abgang der Supraaortalen
- Größter Durchmesser der Aorta descendens
- Proximaler Beginn der Pathologie
- Mittlerer Abschnitt der Pathologie (wichtiger als der größte Durchmesser der Aorta desc.)
- Distaler Abschnitt der Pathologie

Die qualitative Beurteilung und der Vergleich der Sequenzen erfolgten auch anhand der 3D-Rekonstruktion, der Bildgebung der Supraaortalen, der Darstellung der Pathologie und vor allem anhand der Beurteilbarkeit eines möglichen Entry oder eines Wandthrombus. So wurden die QISS-MRA-, SPACE-MRA-, CE-MRA-, VIBE-MRI- und CE-CTA-Sequenz verglichen.

„3D-Rekonstruktion“:

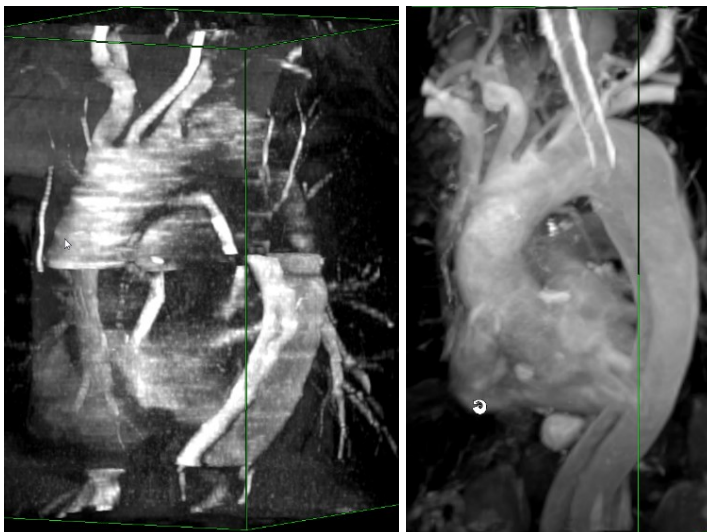


Abbildung 294: MIP-3D-Rekonst., QISS-MRA (l.), SPACE-MRA (r.), Pat. 7

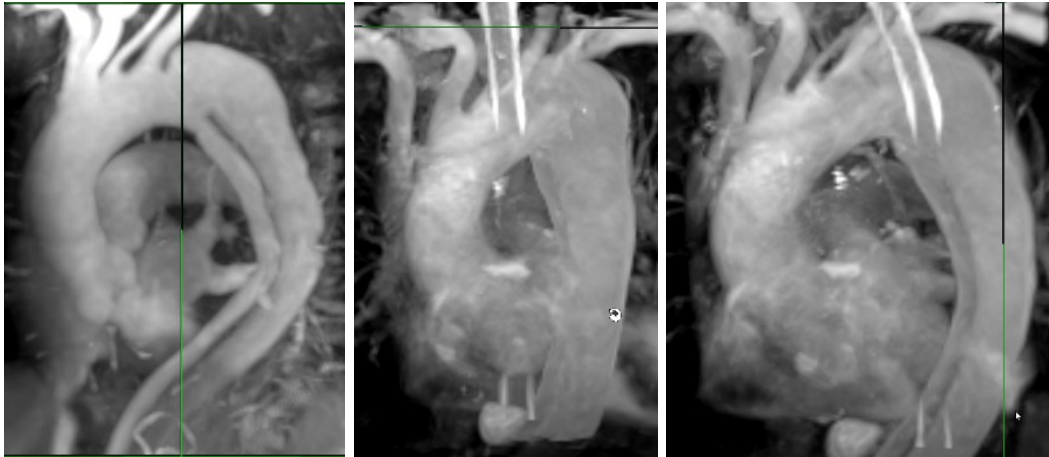


Abbildung 295: MIP-3D-Rekonst., CE-MRA (l., m., r.), Pat. 7

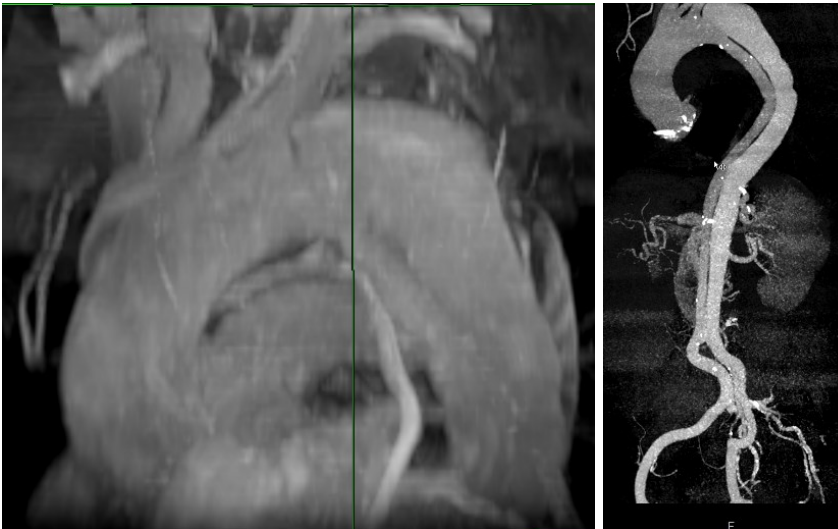


Abbildung 296: MIP-3D-Rekonst., VIBE-MRI (l.), CE-CTA (r.), Pat. 7

Alle Rekonstruktionen stellen den Verlauf der Aorta recht gut dar. Die Dissektion und Dissektionsmembran ist in jeder 3D-Rekonstruktion erkennbar. In der QISS-MRA-Aufnahme ist allerdings auf den ersten Blick wieder die Problematik der Signalauslöschungen zu sehen.

„Darstellung der Pathologie“:

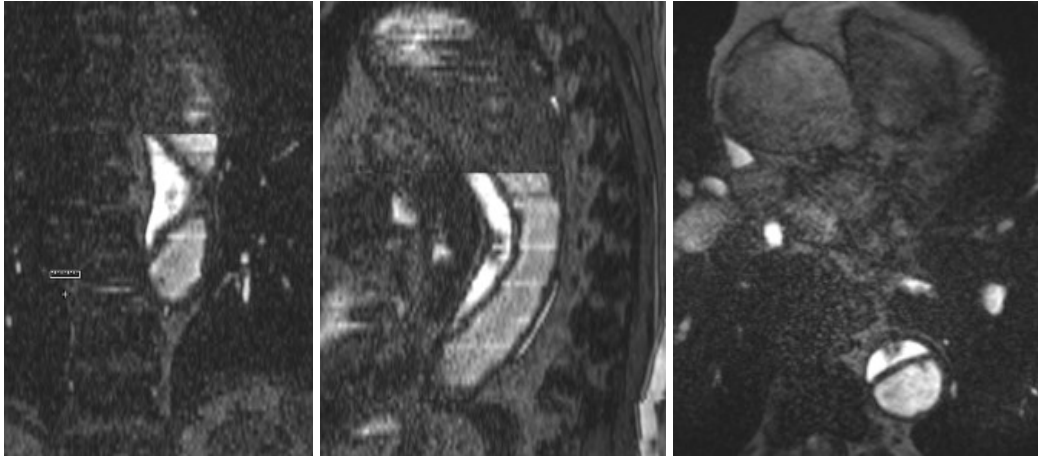


Abbildung 297: MPR-Rekonstruktion, QISS-MRA, Pathologie, Pat. 7  
links: cor. E., mittig: sag. E., rechts: tra. E.

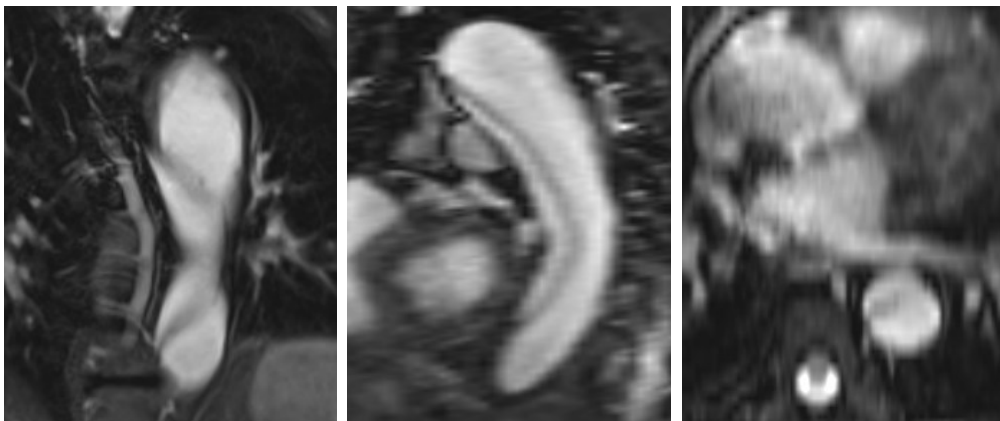


Abbildung 298: MPR-Rekonstruktion, SPACE-MRA, Pathologie, Pat. 7  
links: cor. E., mittig: sag. E., rechts: tra. E.

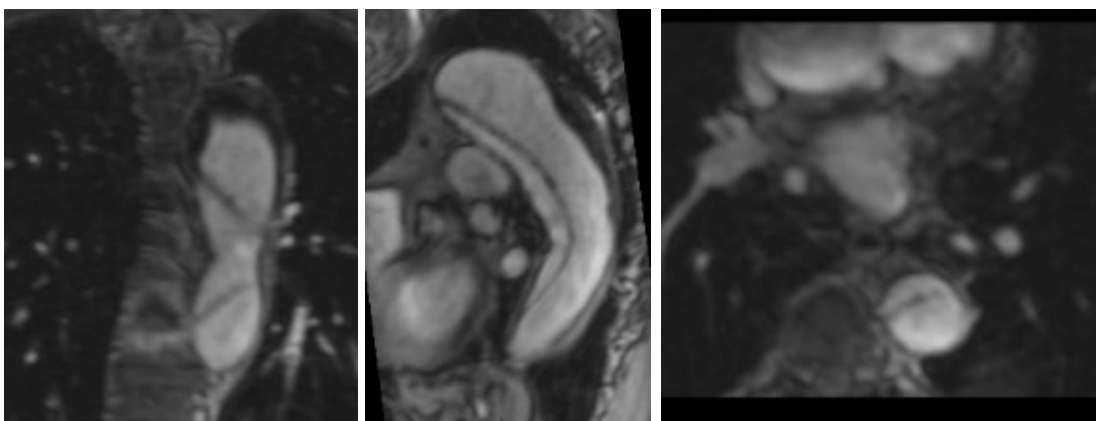


Abbildung 299: MPR-Rekonstruktion, CE-MRA, Pathologie, Pat. 7  
links: cor. E., mittig: sag. E., rechts: tra. E.



Abbildung 300: MPR-Rekonstruktion, VIBE-MRI, Pathologie, Pat. 7  
links: cor. E., mittig: sag. E., rechts: tra. E.

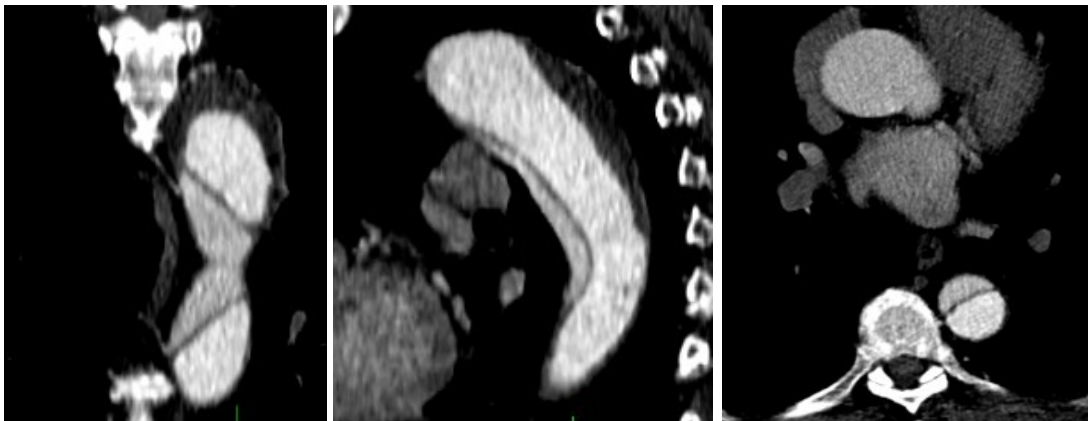


Abbildung 301: MPR-Rekonstruktion, CE-CTA, Pathologie, Pat. 7  
links: cor. E., mittig: sag. E., rechts: tra. E.

Die Aorta, die Dissektionsmembran und das Wandhämatom sind in allen Sequenzen bis auf die QISS-Sequenz gut beurteilbar. Die CE-MRA-Aufnahme ist allerdings ventral abgeschnitten, sodass dort nicht das gesamte Lumen der Aorta ascendens beurteilt werden kann. In der SPACE-Sequenz ist die Aortenwand weniger scharf zur Umgebung abgegrenzt als in den anderen Sequenzen, dadurch ist die Beurteilung des Wandhämatoms erschwert. Die Qualität und Beurteilbarkeit der QISS-Sequenz wird durch die Signalauslöschung eingeschränkt.

„Größter Durchmesser der Aorta ascendens“:

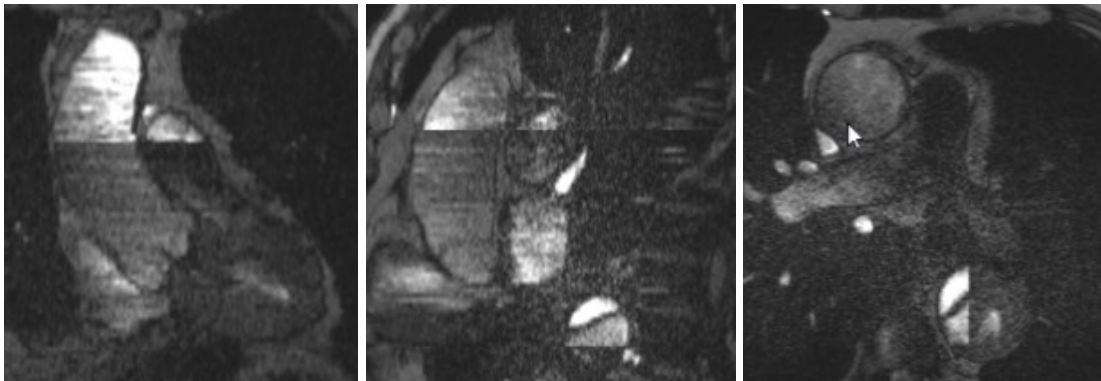


Abbildung 302: MPR-Rekonstruktion, QISS-MRA, Aorta asc., Pat. 7  
links: cor. E., mittig: sag. E., rechts: tra. E.

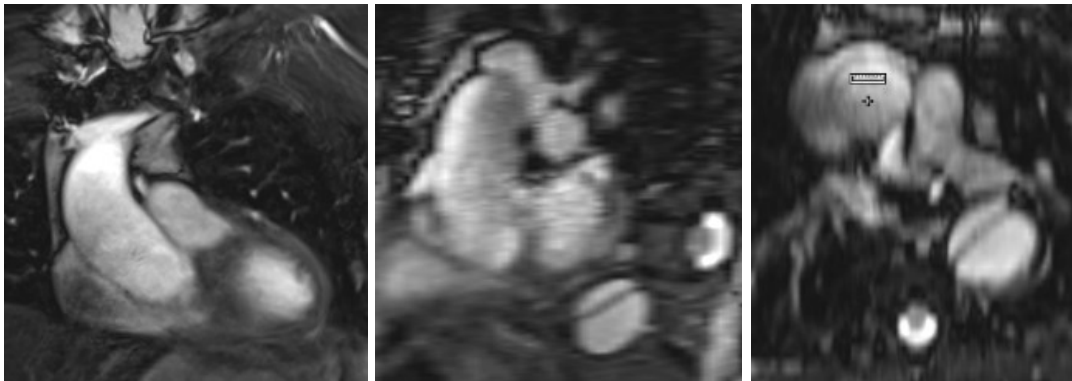


Abbildung 303: MPR-Rekonstruktion, SPACE-MRA, Aorta asc., Pat. 7  
links: cor. E., mittig: sag. E., rechts: tra. E.

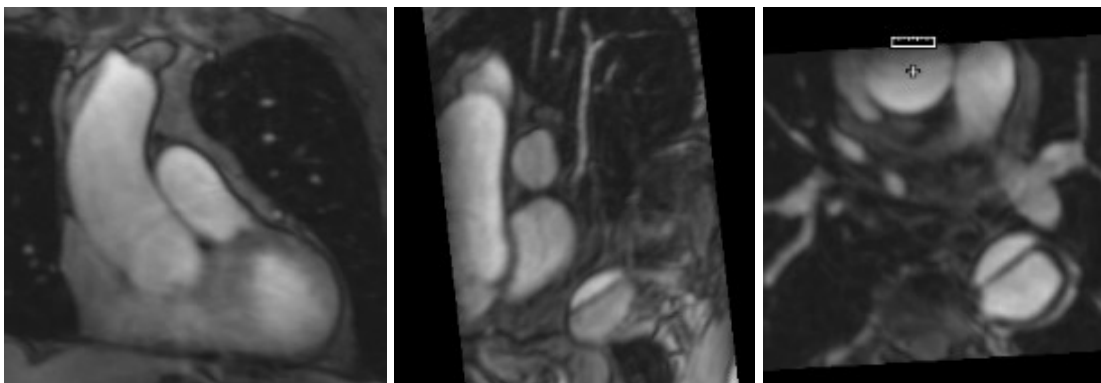


Abbildung 304: MPR-Rekonstruktion, CE-MRA, Aorta asc., Pat. 7  
links: cor. E., mittig: sag. E., rechts: tra. E.

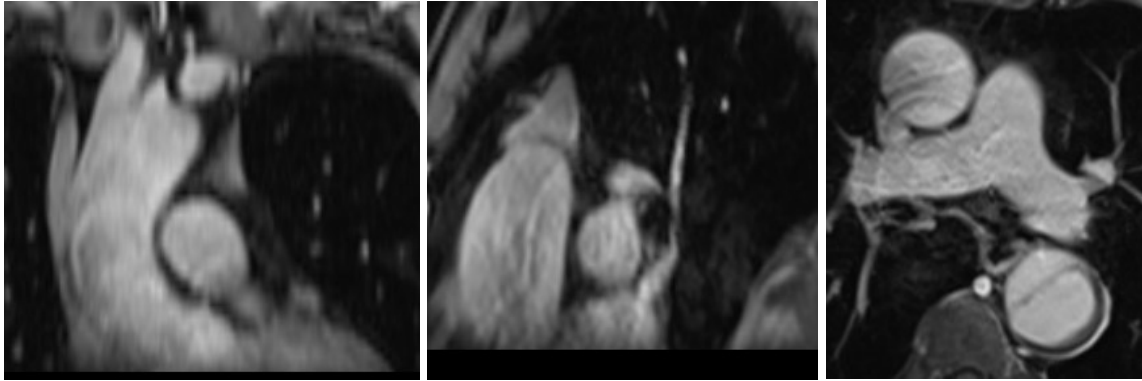


Abbildung 305: MPR-Rekonstruktion, VIBE-MRI, Aorta asc., Pat. 7  
links: cor. E., mittig: sag. E., rechts: tra. E.

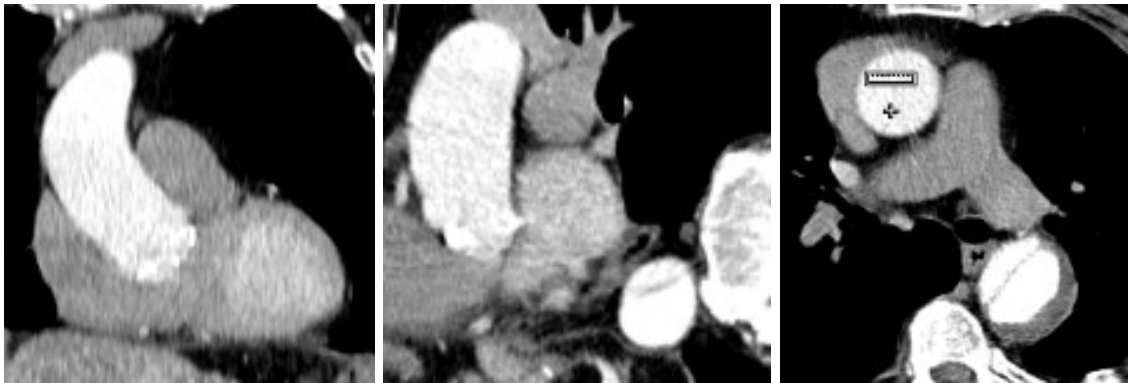


Abbildung 306: MPR-Rekonstruktion, CE-CTA, Aorta asc., Pat. 7  
links: cor. E., mittig: sag. E., rechts: tra. E.

Die QISS-MRA-Aufnahme ist zur Beurteilung der Aorta ascendens in dieser Ebene schlecht geeignet, da sie inmitten der Signalauslöschung liegt. Gut zur Umgebung abgrenzbar ist sie aber, dies ermöglicht eine genaue Durchmessermessung. Die SPACE-MRA-Qualität ist durch die Inhomogenitäten reduziert, die CE-MRA-Aufnahme ist aufgrund des frontal abgeschnittenen Bereichs eingeschränkt und die VIBE-MRI weist in der Aorta asc. ein Artefakt vor, der ähnlich wie eine Dissektionsmembran aussieht, sich aber in den anderen Aufnahmen nicht bestätigen lässt. Das Lumen der CE-CTA kann ohne Einschränkungen beurteilt werden.

Durchmesservergleich:

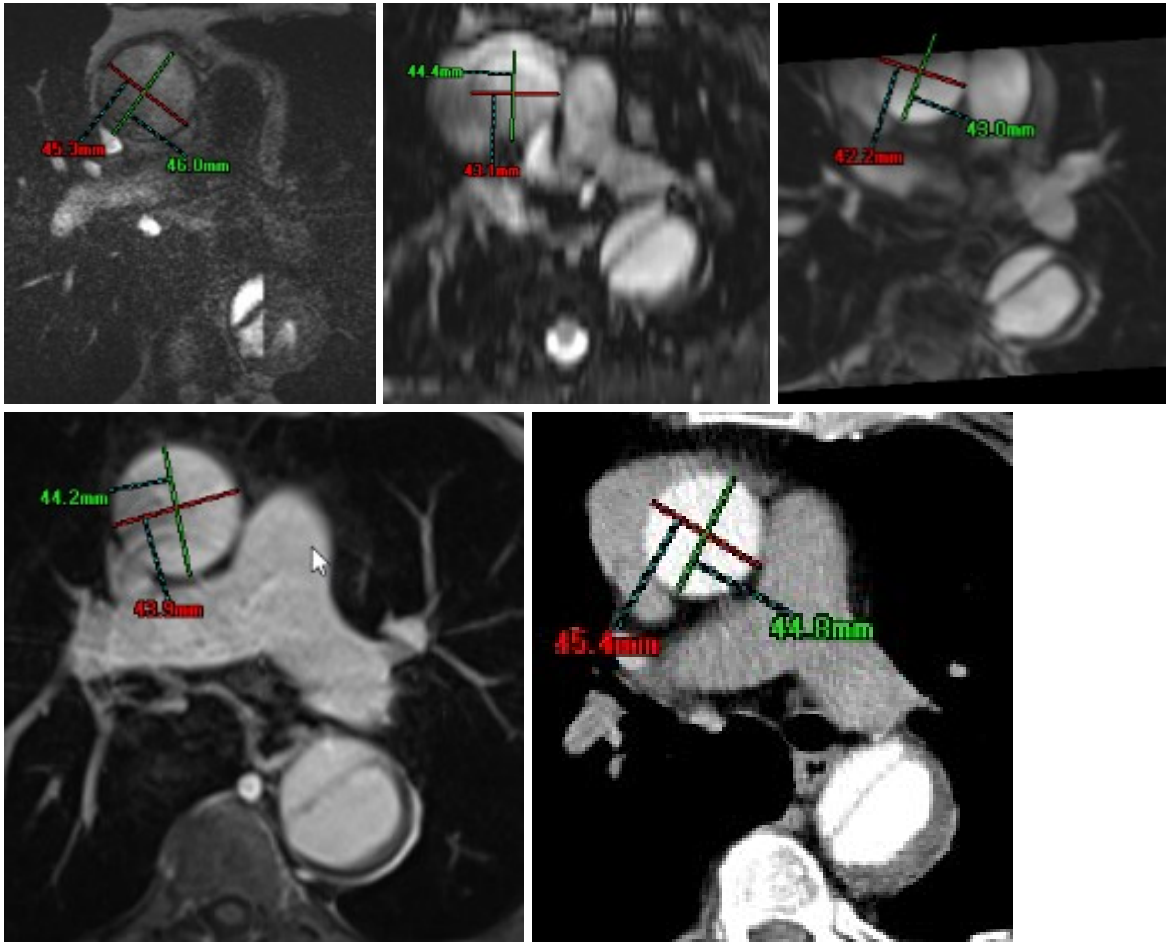


Abbildung 307: Durchmesser Aorta asc., QISS-MRA (l.-o.), SPACE-MRA (m.-o.), CE-MRA (r.-o.), VIBE-MRI (l.-u.), CE-CTA (r.-u.), (MPR-Rekonst.: transversal), Pat. 7  
QISS-MRA (l.-o.): 4,6 x 4,5cm, SPACE-MRA (m.-o.): 4,4 x 4,3cm, CE-MRA (r.-o.): 4,3 x 4,2cm, VIBE-MRI (l.-u.): 4,4 x 4,4cm, CE-CTA (r.-u.): 4,5 x 4,5cm

Die gemessenen Werte sind alle vergleichbar. Die Abweichungen sind in dieser Messebene nur sehr gering.

„Vor Abgang der Supraaortalen“:

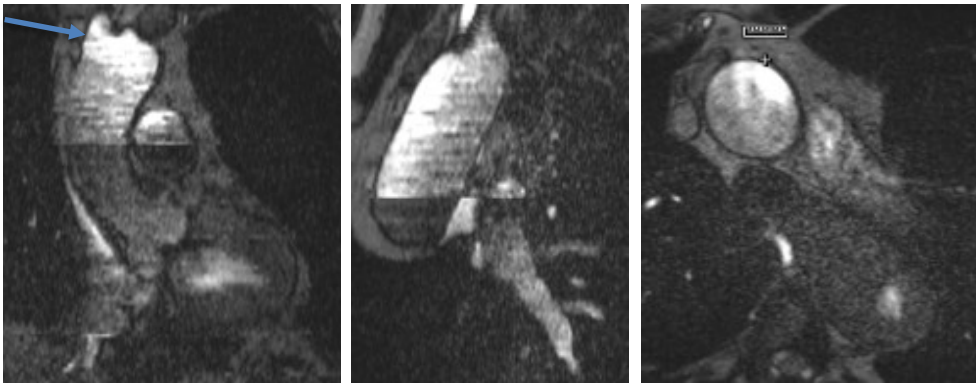


Abbildung 308: MPR-Rekonstruktion, QISS-MRA, Aorta asc., vor Abgang der Supraaortalen, Pat. 7  
links: cor. E., mittig: schräg-sag. E., rechts: schräg-tra. E.

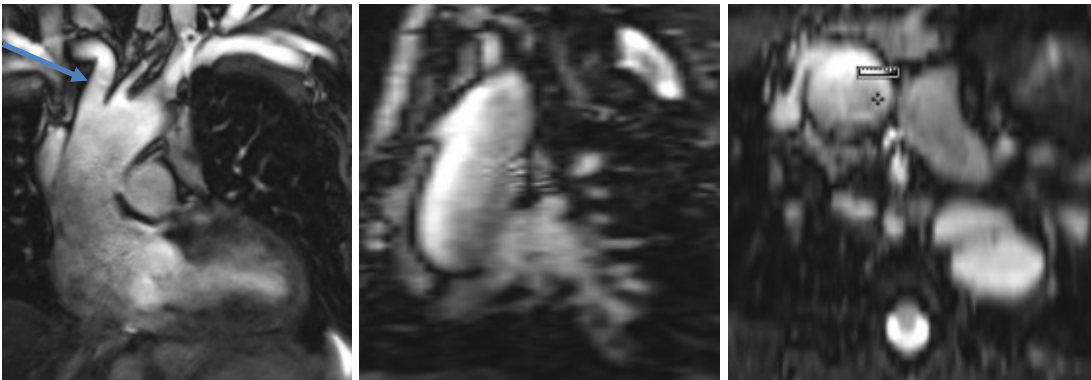


Abbildung 309: MPR-Rekonstruktion, SPACE-MRA, Aorta asc., vor Abgang der Supraaortalen, Pat. 7  
links: cor. E., mittig: schräg-sag. E., rechts: schräg-tra. E.

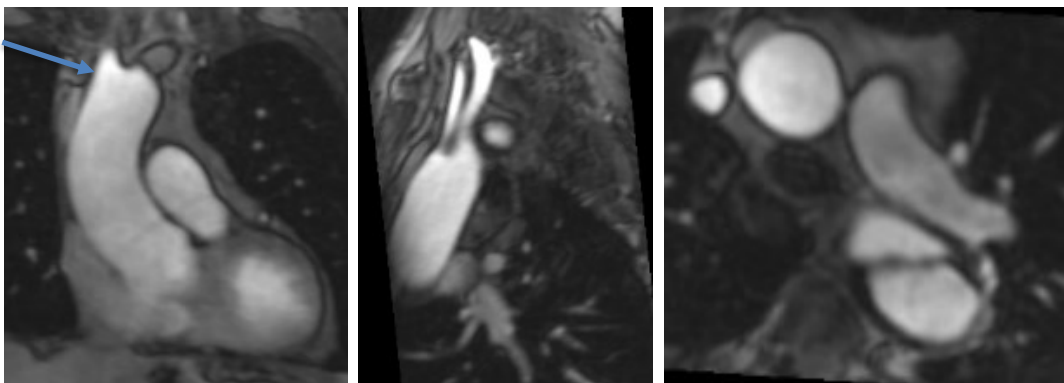


Abbildung 310: MPR-Rekonstruktion, CE-MRA, Aorta asc., vor Abgang der Supraaortalen, Pat. 7  
links: cor. E., mittig: schräg-sag. E., rechts: schräg-tra. E.

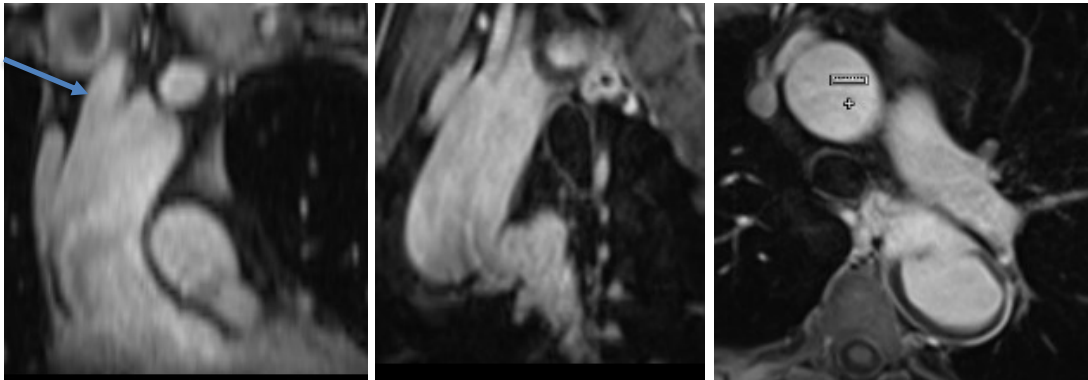


Abbildung 311: MPR-Rekonstruktion, VIBE-MRI, Aorta asc., vor Abgang der Supraaortalen, Pat. 7  
links: cor. E., mittig: schräg-sag. E., rechts: schräg-tra. E.

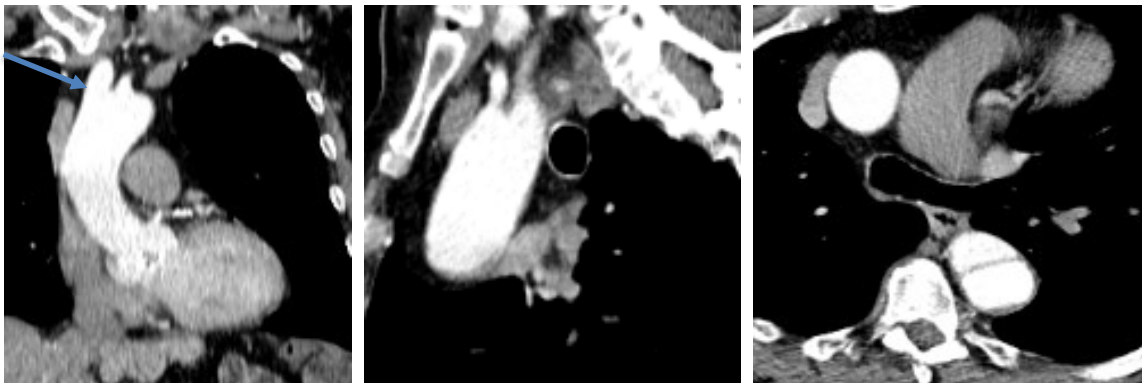


Abbildung 312: MPR-Rekonstruktion, QISS-MRA, Aorta asc., vor Abgang der Supraaortalen, Pat. 7  
links: cor. E., mittig: schräg-sag. E., rechts: schräg-tra. E.

Die Qualität der QISS-MRA und SPACE-MRA ist durch Inhomogenitäten eingeschränkt, die anderen drei Sequenzen sind qualitativ uneingeschränkt. Mit einem Pfeil ist in jeder Aufnahme der Truncus brachiocephalicus markiert.

Durchmesservergleich:

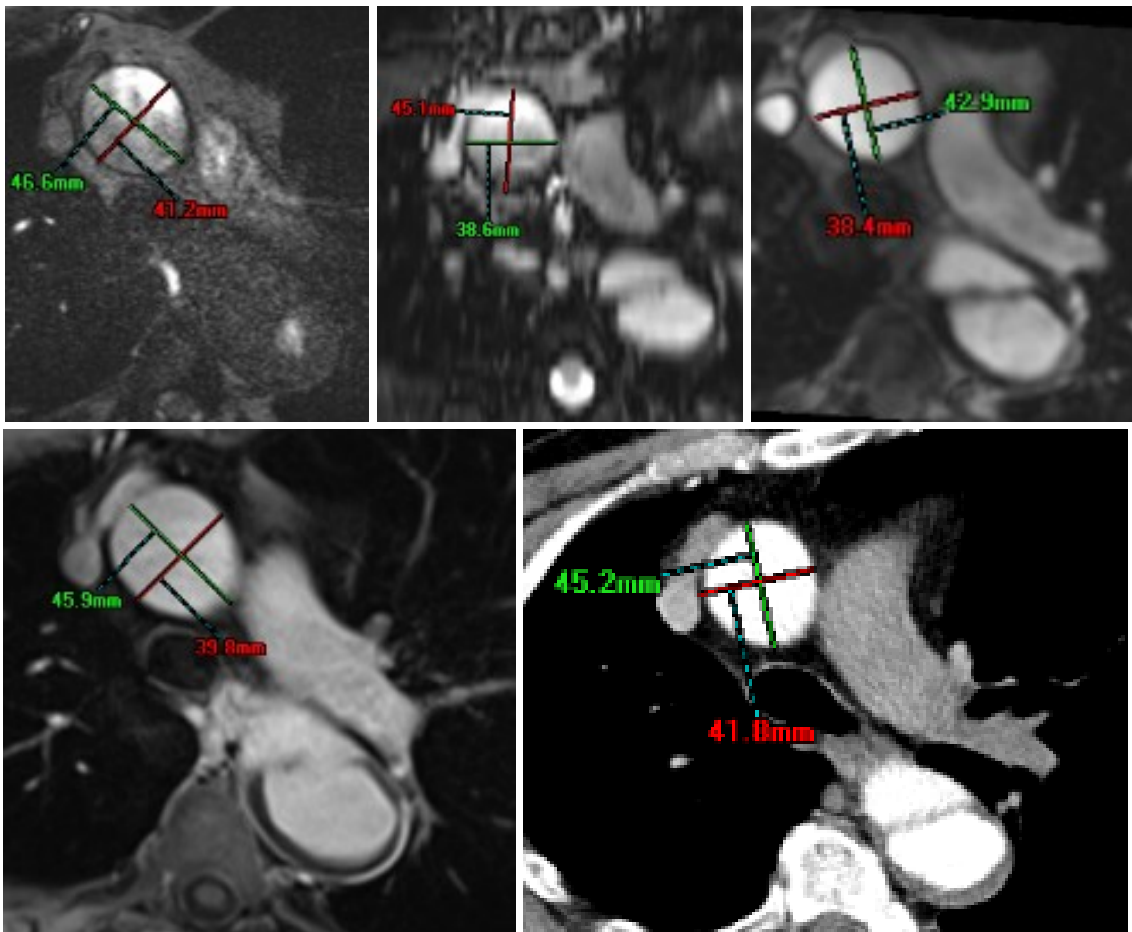


Abbildung 313: Durchmesser Aorta asc., vor Abgang der Supraaortalen QISS-MRA (l.-o.), SPACE-MRA (m.-o.), CE-MRA (r.-o.), VIBE-MRI (l.-u.), CE-CTA (r.-u.), (MPR-Rekonst.: transversal), Pat. 7

QISS-MRA (l.-o.): 4,7 x 4,1cm, SPACE-MRA (m.-o.): 4,5 x 3,9cm, CE-MRA (r.-o.): 4,3 x 3,8cm, VIBE-MRI (u.-l.): 4,6 x 4,0cm, CE-CTA (r.-u.): 4,5 x 4,2cm

Nahezu keine Abweichungen zwischen den gemessenen Durchmesserwerten der Aorta, lediglich der größere der beiden Messwerte bei der CE-MRA weicht etwas zur kleineren Seite ab. In der Abbildung erkennt man auch, dass die Messung nicht genau an der Aortenwand beginnt.

„Supraaortale Gefäße“:

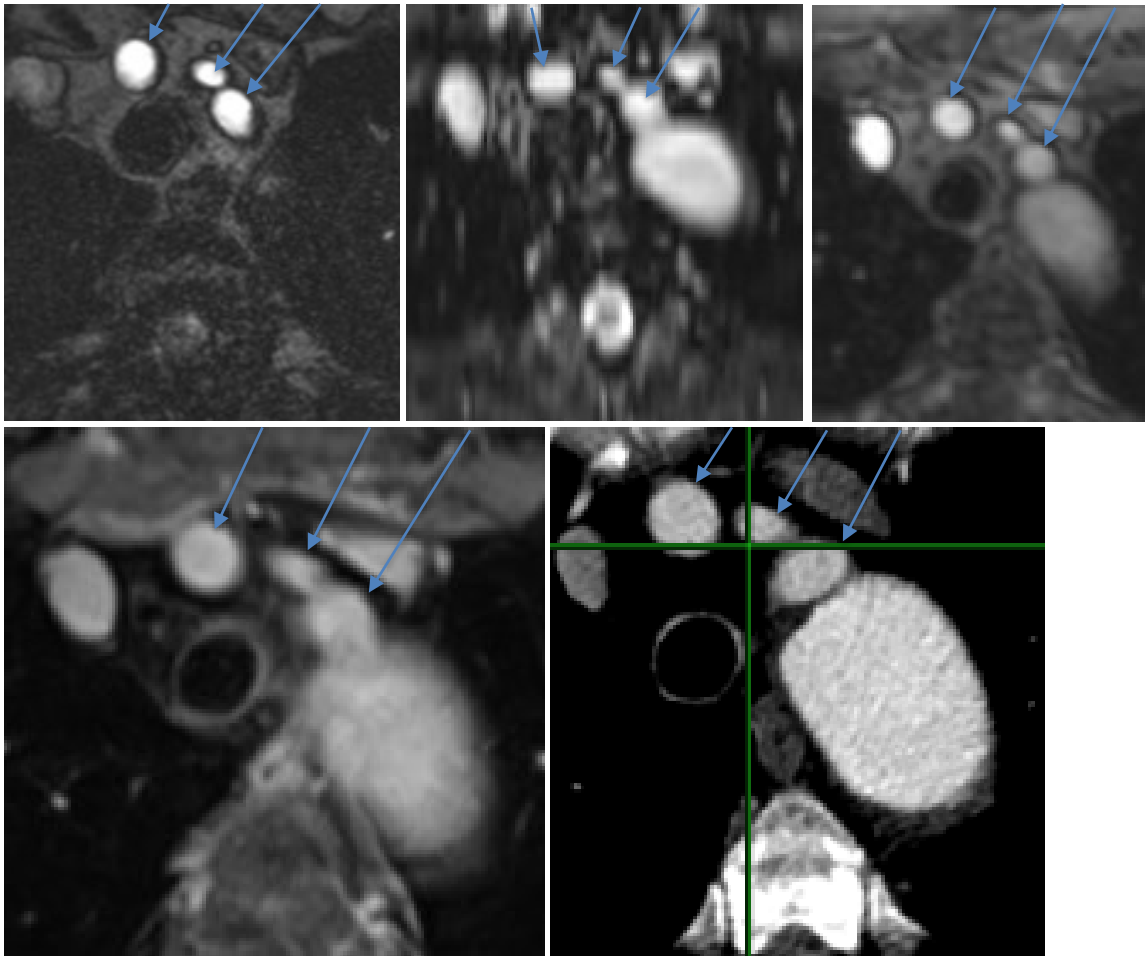


Abbildung 314: Supraaortale Gefäße in der Transversalebene (MPR-Rekonst.), SPACE-MRA (l.-o.), CE-MRA (r.-o.), VIBE-MRI (l.-u.), CE-CTA (r.-u.), Pat. 6  
Truncus brachiocephalicus (l. Pfeil), Arteria carotis sinistra (m. Pfeil), Arteria subclavia sinistra (r. Pfeil)

In allen Sequenzen können die drei mit Pfeilen markierten Supraaortalen erkannt und zur Umgebung abgegrenzt werden. Besonders gut aber sind sie in der QISS-MRA-, CE-MRA- und CE-CTA-Sequenz dargestellt.

„Nach Abgang der Supraaortalen“ (= Beginn der Pathologie):

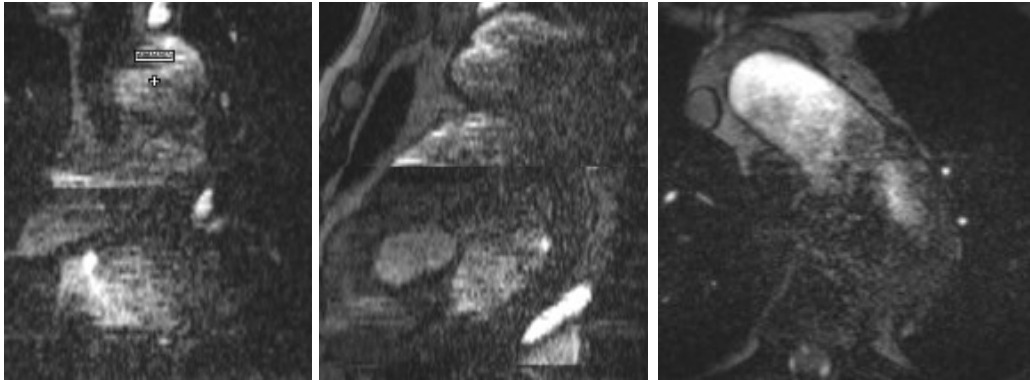


Abbildung 315: MPR-Rekonstruktion, QISS-MRA, Arcus aortae, nach Abgang der Supraaortalen, Pat. 7  
links: cor. E., mittig: sag. E., rechts: tra. E.



Abbildung 316: MPR-Rekonstruktion, SPACE-MRA, Arcus aortae, nach Abgang der Supraaortalen, Pat. 7  
links: cor. E., mittig: sag. E., rechts: tra. E.

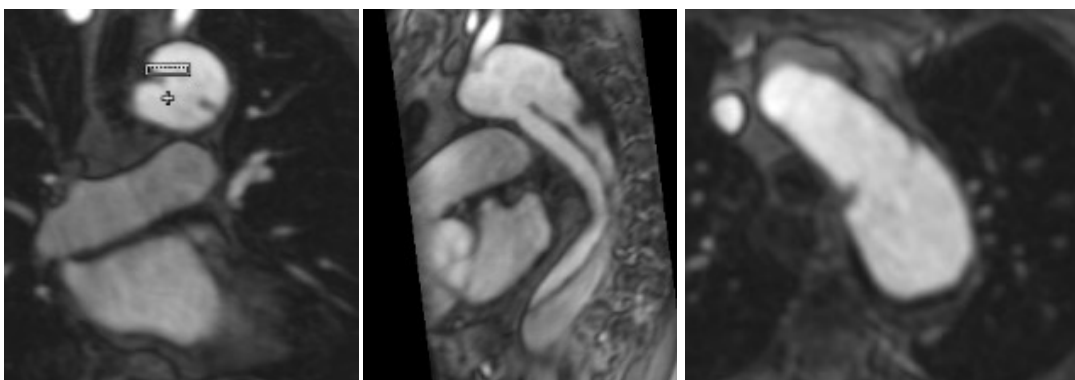


Abbildung 317: MPR-Rekonstruktion, CE-MRA, Arcus aortae, nach Abgang der Supraaortalen, Pat. 7  
links: cor. E., mittig: sag. E., rechts: tra. E.

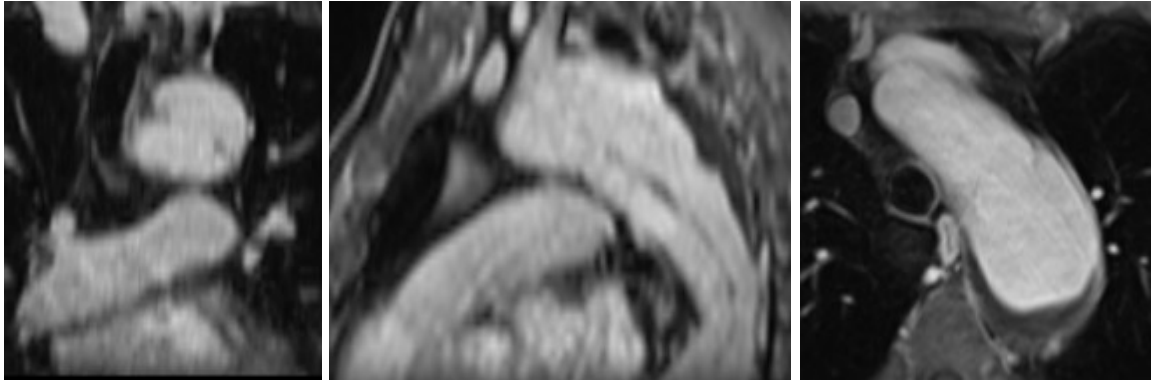


Abbildung 318: MPR-Rekonstruktion, VIBE-MRI, Arcus aortae, nach Abgang der Supraaortalen, Pat. 7

links: cor. E., mittig: sag. E., rechts: tra. E.



Abbildung 319: MPR-Rekonstruktion, CE-CTA, Arcus aortae, nach Abgang der Supraaortalen, Pat. 7

links: cor. E., mittig: sag. E., rechts: tra. E.

In allen Sequenzen, bis auf die QISS-Sequenz, ist die Aorta und die Dissektionsmembran gut beurteilbar. Die Signalauslöschungen der QISS-Sequenzen schränken die Qualität dieser ein, man kann lediglich den Verlauf der Dissektionsmembran erahnen.

Durchmesservergleich:

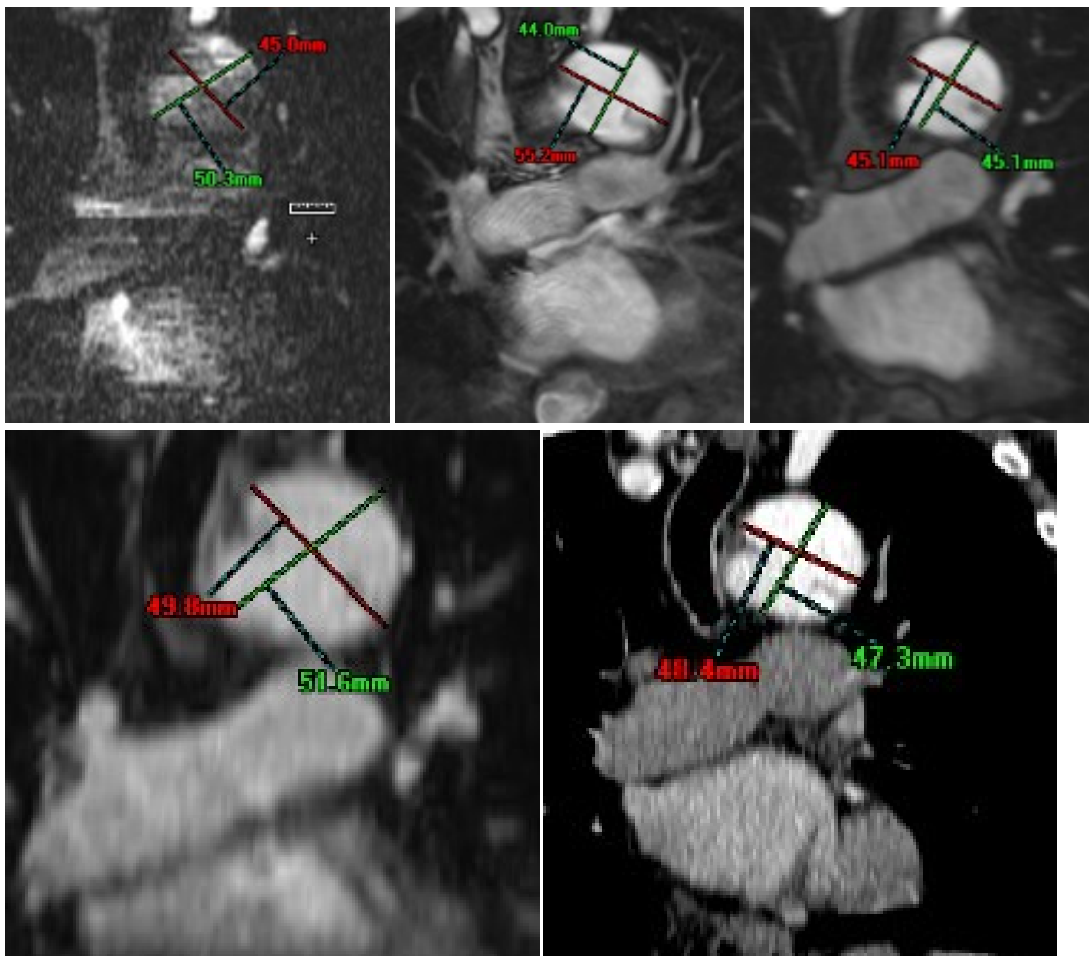


Abbildung 320: Durchmesser Arcus aortae, nach Abgang der Supraaortalen QISS-MRA (l.-o.), SPACE-MRA (m.-o.), CE-MRA (r.-o.), VIBE-MRI (l.-u.), CE-CTA (r.-u.), (MPR-Rekonst.: coronal), Pat. 7

QISS-MRA (l.-o.): 5,0 x 4,5cm, SPACE-MRA (m.-o.): 5,5 x 4,4cm, CE-MRA (r.-o.): 4,5 x 4,5cm, VIBE-MRI (l.-u.): 5,2 x 5,0cm, CE-CTA (r.-u.): 4,8 x 4,7cm

Bei dem größeren der beiden Werte weichen die Messwerte der SPACE-MRA und CE-MRA stärker ab. Bei dem kleineren der beiden Werte weicht vor allem der Messwert der VIBE-MRI von den anderen ab. Dieser ist mit 5,0cm deutlich größer als die anderen kleineren Messwerte.

„Größter Durchmesser der Aorta descendens“:

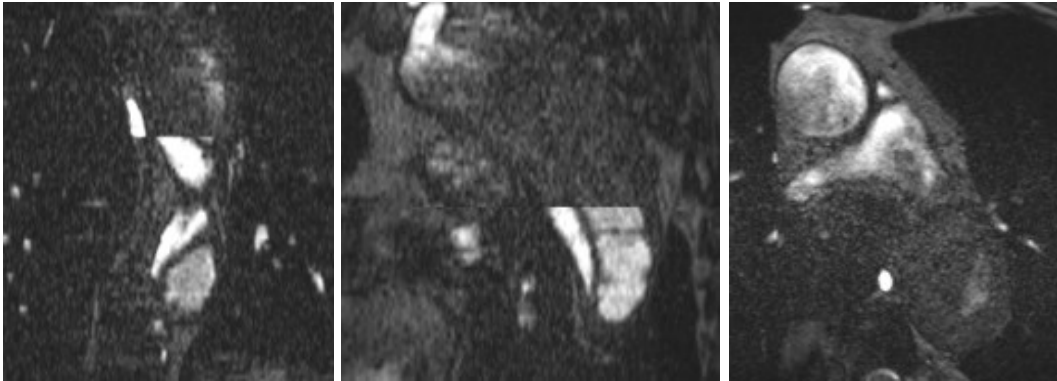


Abbildung 321: MPR-Rekonstruktion, QISS-MRA, Aorta desc., Pat. 7  
links: cor. E., mittig: schräg-sag. E., rechts: schräg-tra. E.



Abbildung 322: MPR-Rekonstruktion, SPACE-MRA, Aorta desc., Pat. 7  
links: cor. E., mittig: schräg-sag. E., rechts: schräg-tra. E.

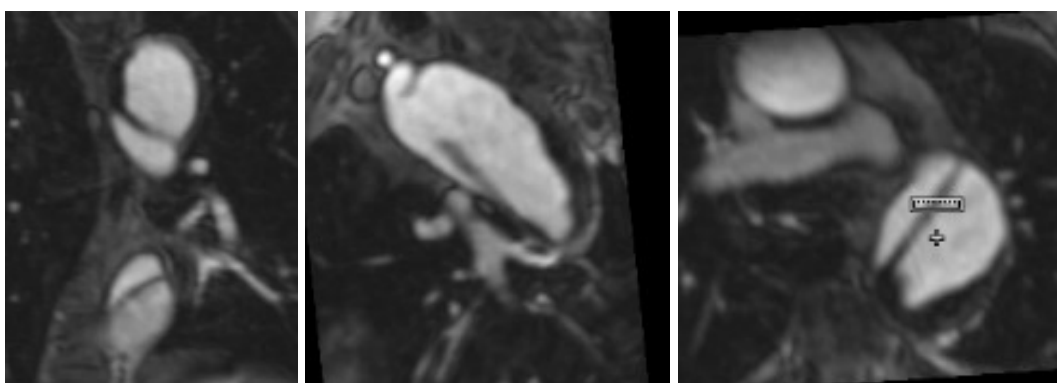


Abbildung 323: MPR-Rekonstruktion, CE-MRA, Aorta desc., Pat. 7  
links: cor. E., mittig: schräg-sag. E., rechts: schräg-tra. E.



Abbildung 324: MPR-Rekonstruktion, VIBE-MRI, Aorta desc., Pat. 7  
links: cor. E., mittig: schräg-sag. E., rechts: schräg-tra. E.

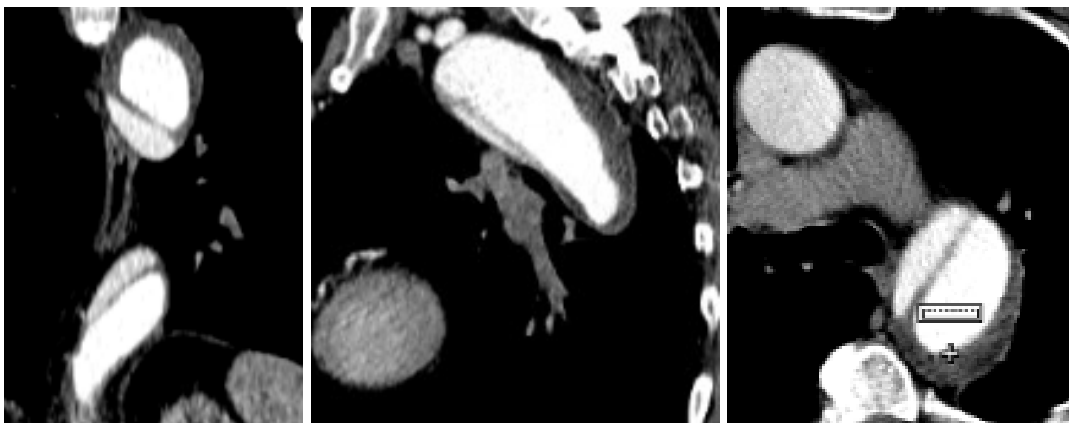


Abbildung 325: MPR-Rekonstruktion, CE-CTA, Aorta desc., Pat. 7  
links: cor. E., mittig: schräg-sag. E., rechts: schräg-tra. E.

Bis auf die QISS-MRA liefern alle Sequenzen eine gute Qualität. Aufgrund des bekannten Problems der Signalauslöschungen kann das Lumen der Aorta descendens gar nicht dargestellt und beurteilt werden. Somit sind dort weder die Dissektionsmembran noch der Wandthrombus zu sehen, die in den Aufnahmen der anderen Sequenzen gut dargestellt sind.

Durchmesservergleich:

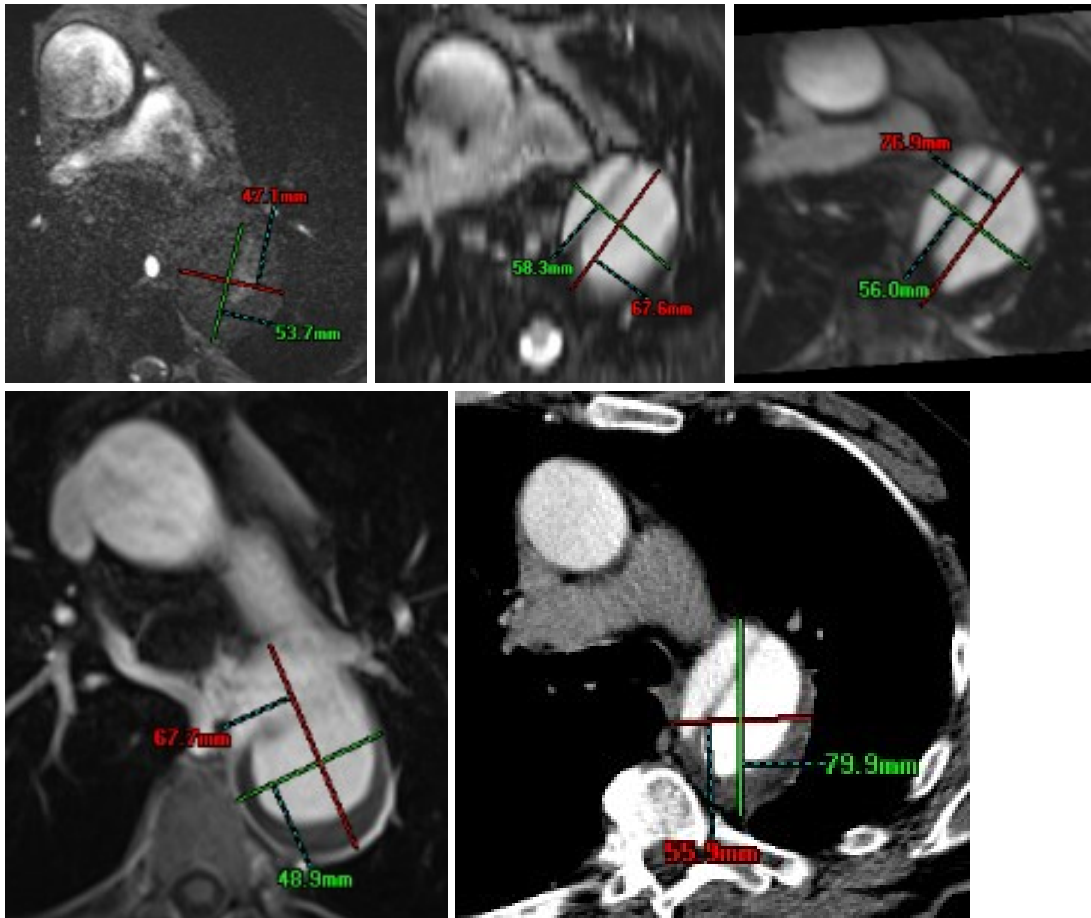


Abbildung 326: Durchmesser Aorta desc. QISS-MRA (l.-o.), SPACE-MRA (m.-o.), CE-MRA (r.-o.), VIBE-MRI (l.-u.), CE-CTA (r.-u.), (MPR-Rekonst.: transversal), Pat. 7  
QISS-MRA (l.-o.): 5,4 x 4,7cm, SPACE-MRA (m.-o.): 6,8 x 5,8cm, CE-MRA (r.-o.): 7,7 x 5,6cm, VIBE-MRI (l.-u.): 6,8 x 4,9cm, CE-CTA (r.-u.): 8,0 x 5,6cm

Bei den Aufnahmen der SPACE-MRA, CE-MRA, VIBE-MRI und CE-CTA-Sequenz konnte der Durchmesser inklusive Wandthrombus gemessen werden. Dadurch wurden sehr hohe Werte erreicht. Die Messungen der SPACE-MRA und VIBE-MRI unterschieden sich nur im kleineren der beiden Werte, die CE-MRA- und CE-CTA-Messwerte sind nur wenig voneinander abweichend. Auch der kleinere der beiden Werte, der in der SPACE-MRA gemessen wurde, ist vergleichbar mit dem der CE-MRA und CE-CTA. Stark abweichend ist die Messung aus der QISS-MRA, da die Aorta descendens von einer Signalauslöschung betroffen ist, sodass die Messung erschwert ist und der Wandthrombus nicht gut erkennbar und somit schlecht messbar ist.

„Mittlerer Abschnitt der Pathologie“:

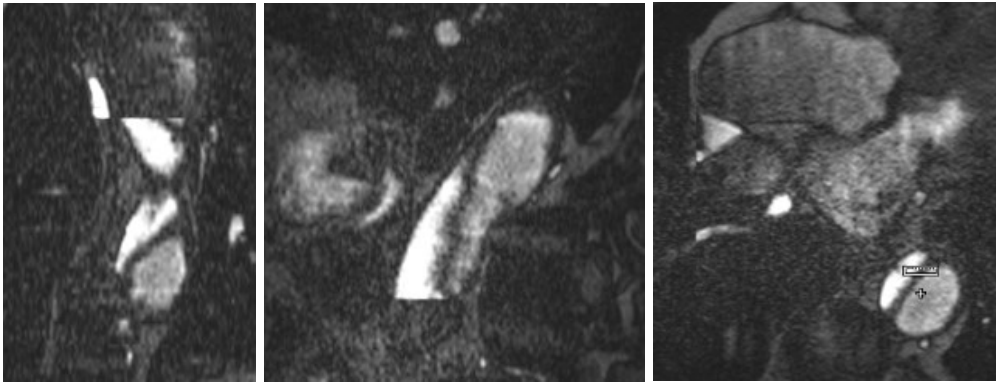


Abbildung 327: MPR-Rekonstruktion, QISS-MRA, mittlerer Abschnitt der Pathologie, Pat. 7

links: cor. E., mittig: schräg-sag. E., rechts: schräg-tra. E.

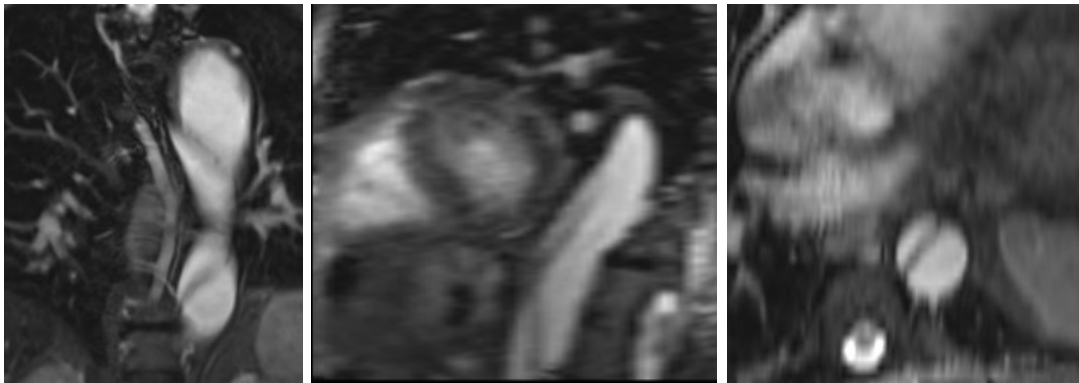


Abbildung 328: MPR-Rekonstruktion, SPACE-MRA, mittlerer Abschnitt der Pathologie, Pat. 7

links: cor. E., mittig: schräg-sag. E., rechts: schräg-tra. E.

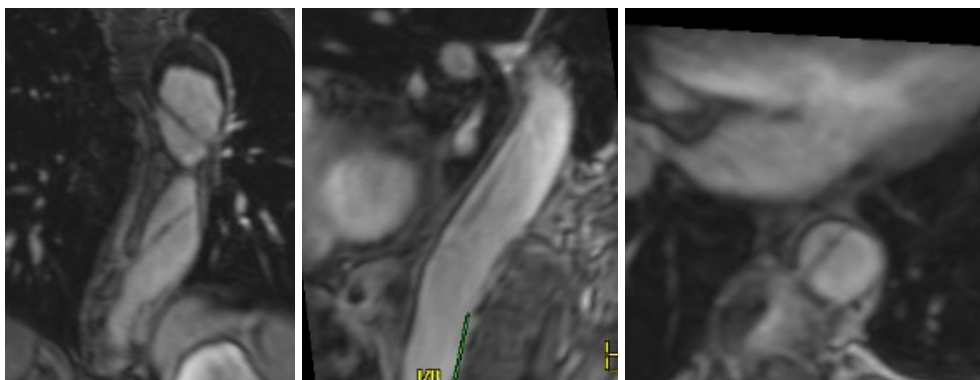


Abbildung 329: MPR-Rekonstruktion, CE-MRA, mittlerer Abschnitt der Pathologie, Pat. 7

links: cor. E., mittig: schräg-sag. E., rechts: schräg-tra. E.

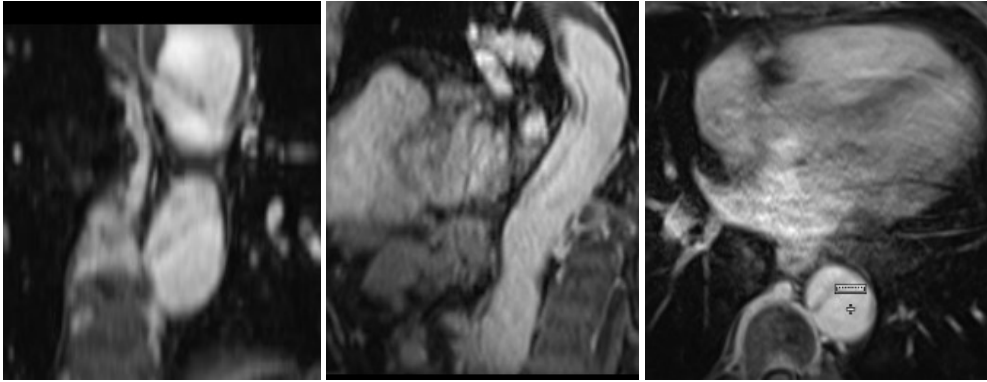


Abbildung 330: MPR-Rekonstruktion, VIBE-MRI, mittlerer Abschnitt der Pathologie, Pat. 7

links: cor. E., mittig: schräg-sag. E., rechts: schräg-tra. E.



Abbildung 331: MPR-Rekonstruktion, CE-CTA, mittlerer Abschnitt der Pathologie, Pat. 7

links: cor. E., mittig: schräg-sag. E., rechts: schräg-tra. E.

Die Beurteilung der Aorta descendens ist mit allen Sequenzen gut möglich. Bei der QISS-Sequenz sind die Coronal- und Sagittalansicht durch die Signalauslöschung eingeschränkt, die Beurteilung des Aortenlumens und der Dissektionsmembran ist in der Transversalebene aber gut möglich.

Durchmesservergleich:

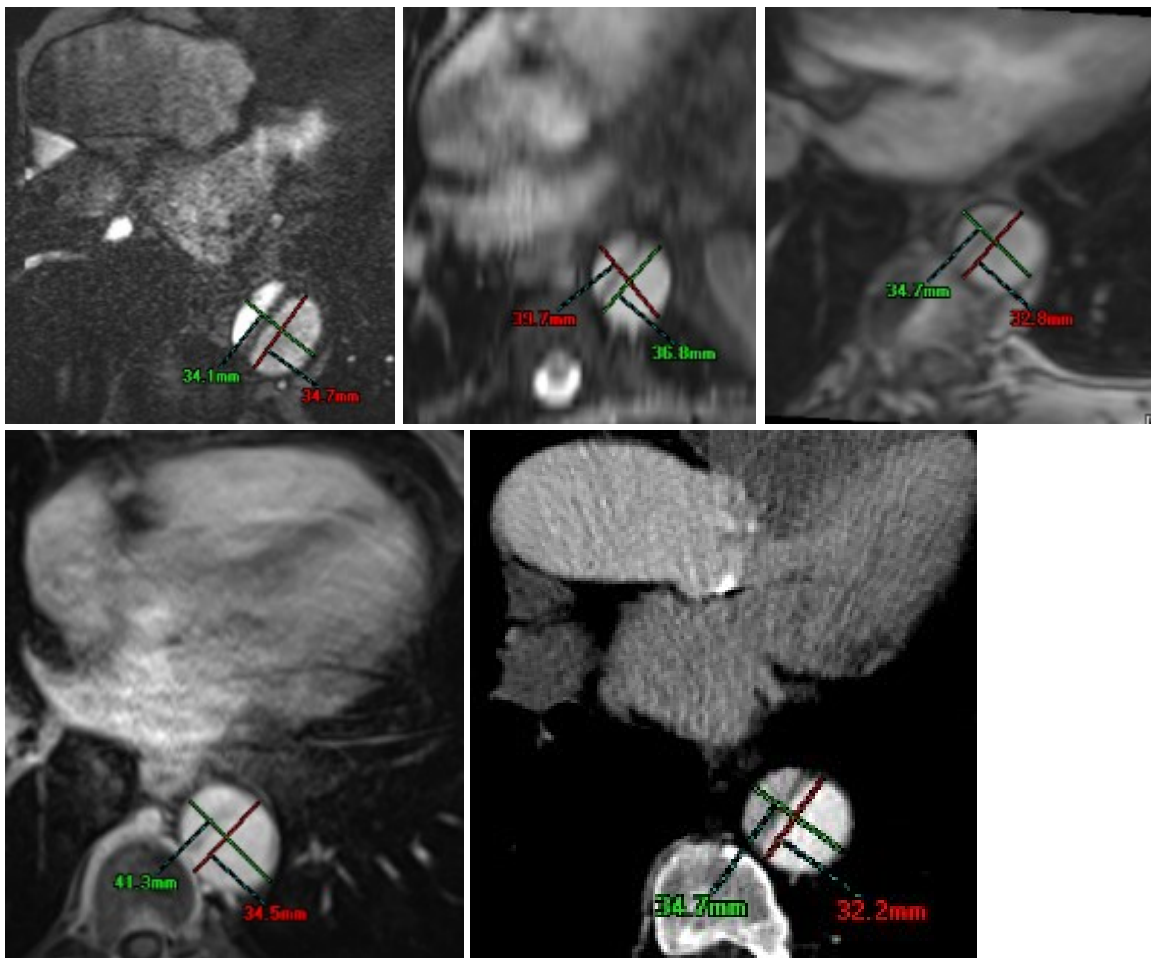


Abbildung 332: Durchmesser Aorta desc. QISS-MRA (l.-o.), SPACE-MRA (m.-o.), CE-MRA (r.-o.), VIBE-MRI (l.-u.), CE-CTA (r.-u.), (MPR-Rekonst.: transversal), Pat. 7  
QISS-MRA (l.-o.): 3,5 x 3,4cm, SPACE-MRA (m.-o.): 4,0 x 3,7cm, CE-MRA (r.-o.): 3,5 x 3,3cm, VIBE-MRI (l.-u.): 4,1 x 3,5cm, CE-CTA (r.-u.): 3,5 x 3,2cm

Nahezu identisch sind die Messwerte aus der CE-MRA- und CE-CTA-Aufnahme. Aber auch die Werte der QISS-MRA weichen nicht stark davon ab. Nach oben hin abweichend sind die Messwerte, die in den Aufnahmen der SPACE-MRA und VIBE-MRI gemessen wurden. Diese liegen aber jeweils nah beieinander.

„Distaler Abschnitt der Aorta descendens“:

Auf die Aufnahmen der QISS-Sequenz wurde in dieser Messebene verzichtet, da die Aorta in den Bildern nicht abgrenzbar ist und somit auch nicht in diesem Rahmen beurteilt und verglichen werden kann. Von den anderen Sequenzen wurden teilweise mehrere Ebenen in der distalen Aorta descendens ausgewählt, um auch die Fortführung der Aortendissektion auf die Iliakalarterien zu beurteilen.

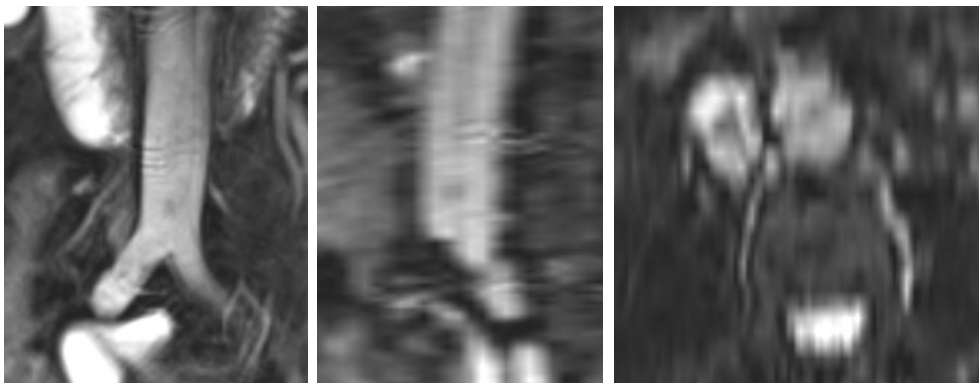
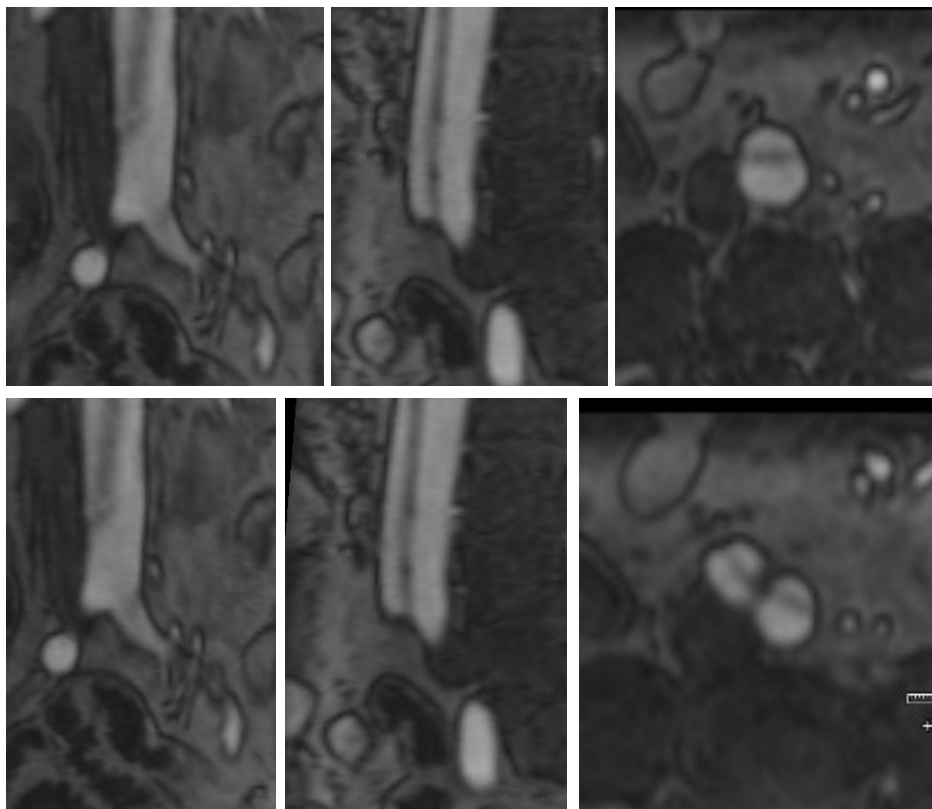


Abbildung 333: MPR-Rekonstruktion, SPACE-MRA, distaler Abschnitt der Pathologie, Pat. 7

links: cor. E., mittig: sag. E., rechts: tra. E.



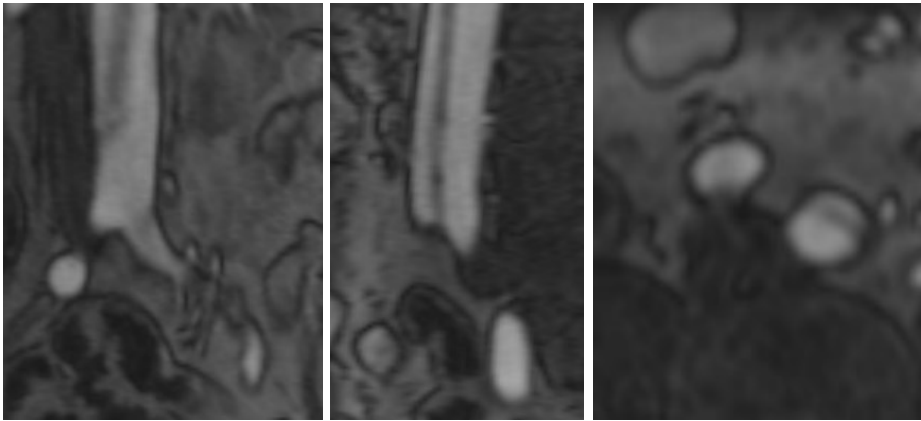


Abbildung 334: MPR-Rekonstruktion, CE-MRA, distaler Abschnitt der Pathologie, Pat. 7  
links: cor. E., mittig: sag. E., rechts: tra. E.

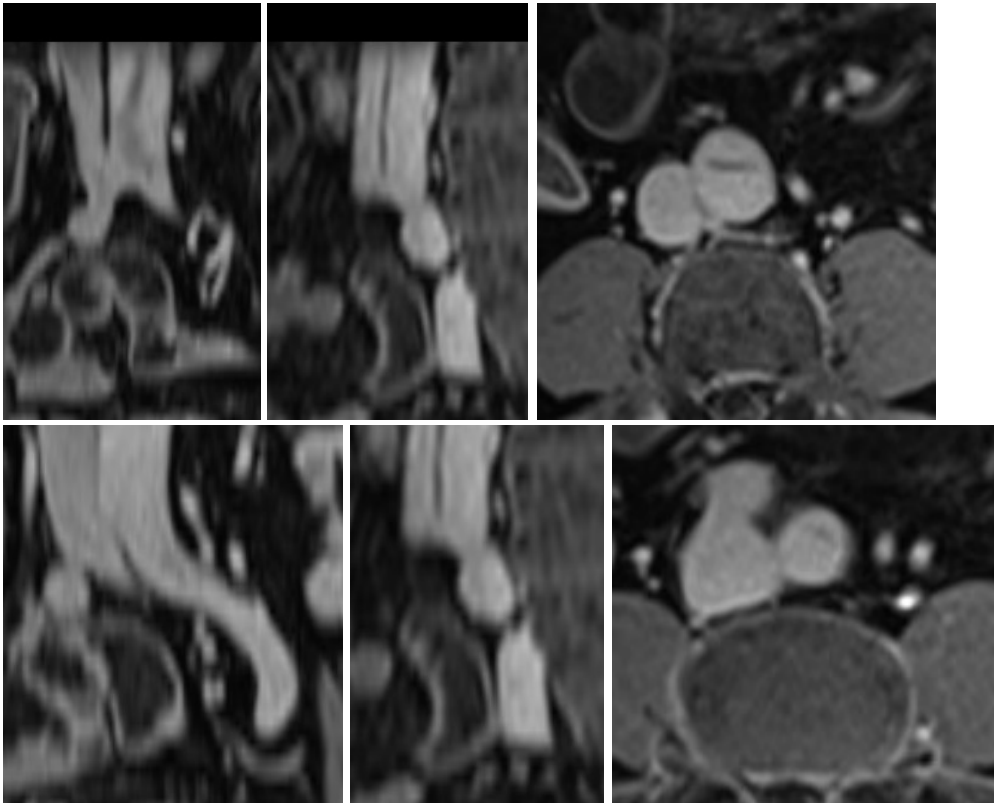


Abbildung 335: MPR-Rekonstruktion, VIBE-MRI, distaler Abschnitt der Pathologie, Pat. 7  
links: cor. E., mittig: sag. E., rechts: tra. E.

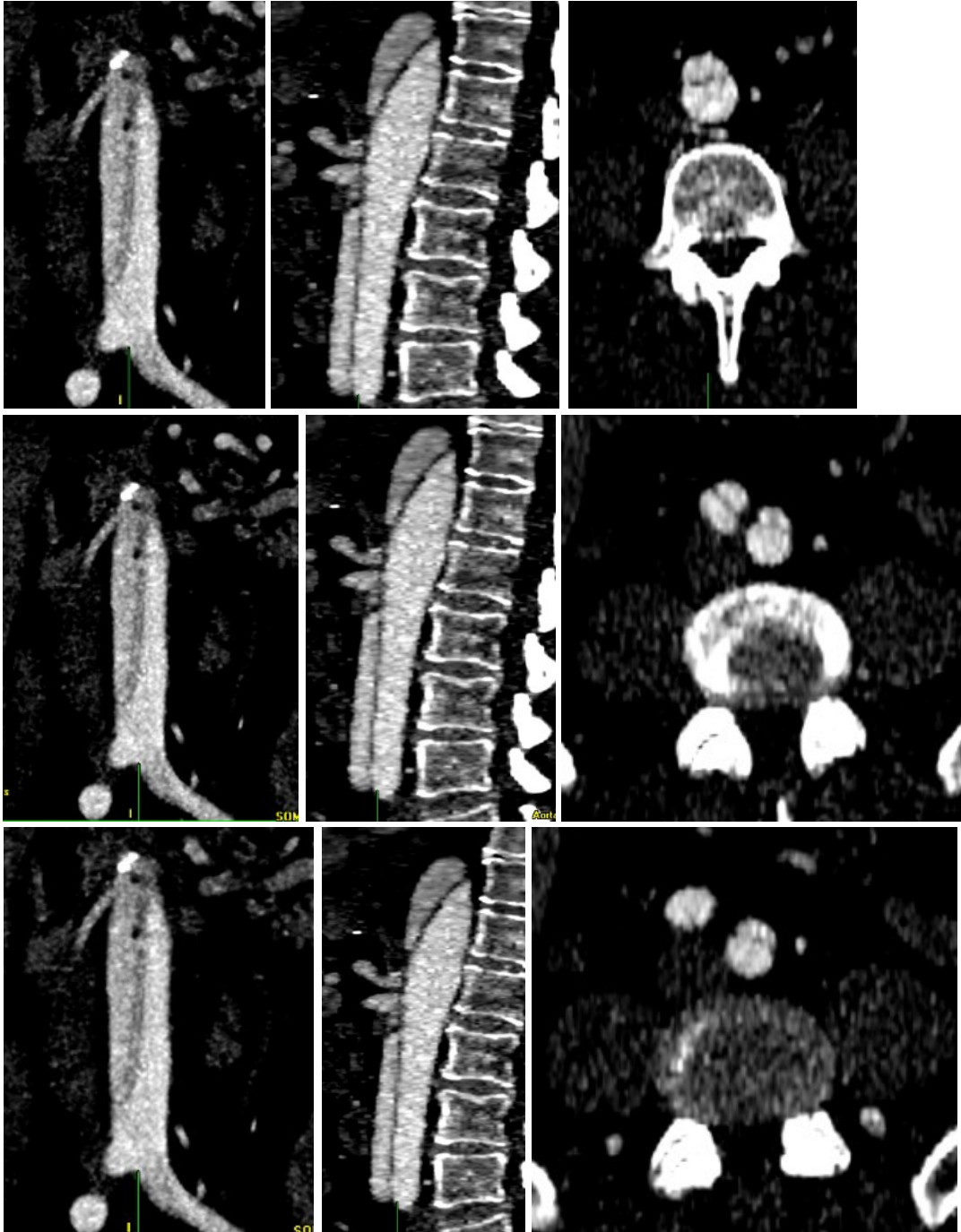


Abbildung 336: MPR-Rekonstruktion, CE-CTA, distaler Abschnitt der Pathologie, Pat. 7  
links: cor. E., mittig: sag. E., rechts: tra. E.

Die Qualität der SPACE-MRA-Aufnahme ist deutlich schlechter als die der CE-MRA, VIBE-MRI und CE-CTA. Zwar kann man die Dissektionsmembran erahnen, die Aortenwand ist aber schlecht abgrenzbar. In der CE-MRA-, VIBE-MRI- und CE-CTA-Sequenz kann weiter distal auch die in die Beckenarterien fortlaufende

Dissektionsmembran erkannt werden. Die Akquisition der SPACE-MRA erfolgte nur bis proximal der Aortenbifurkation, somit konnte anhand der SPACE-MRA-Bildgebungen keine Beurteilung der Iliakalarterien durchgeführt werden. Die in die Iliakalarterien fortgesetzte Dissektionsmembran erkennt man in der CE-MRA und CE-CTA am besten, in der VIBE-MRI ist sie nur leicht erkennbar.

Durchmesservergleich:

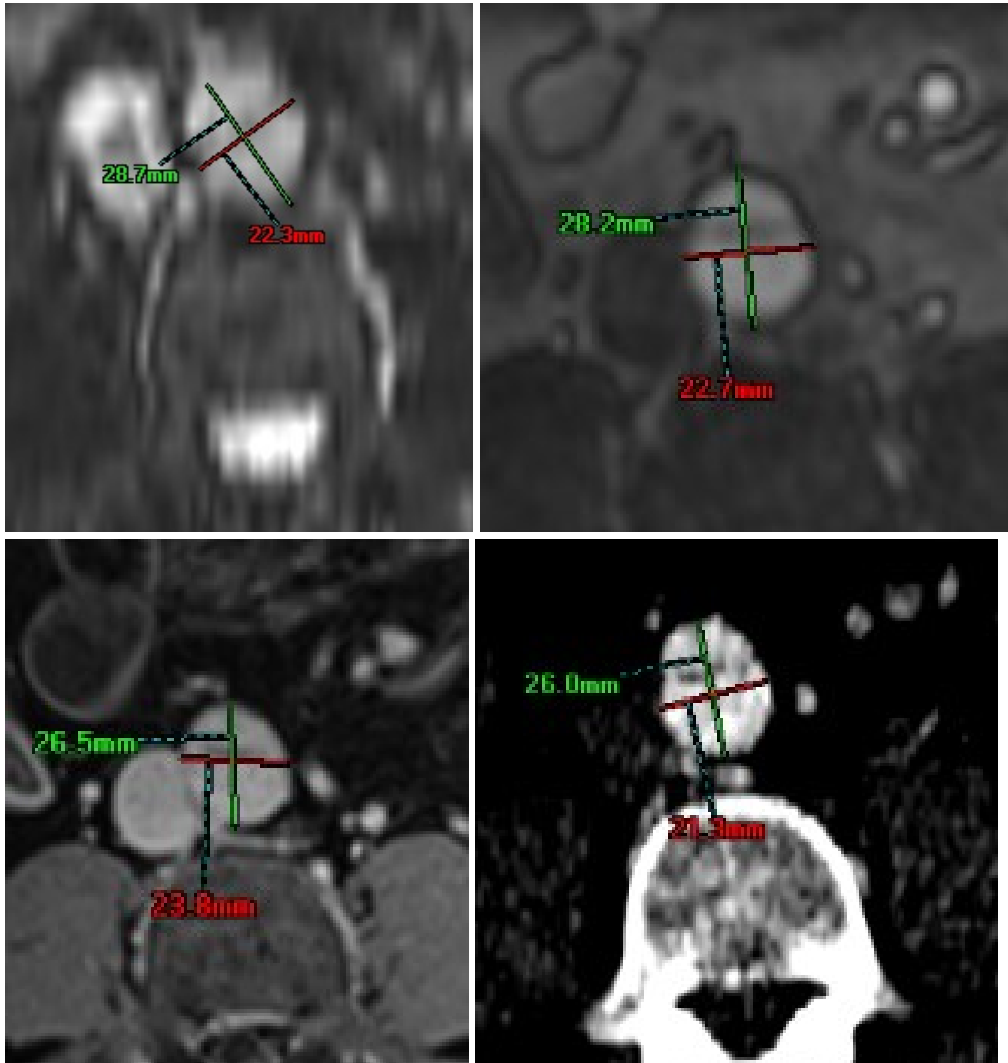


Abbildung 337: Durchmesser Aorta desc., distaler Abschnitt der Pathologie, QISS-MRA (l.-o.), SPACE-MRA (m.-o.), CE-MRA (r.-o.), VIBE-MRI (l.-u.), CE-CTA (r.-u.), (MPR-Rekonst.: transversal), Pat. 7

SPACE-MRA (l.-o.): 2,9 x 2,2cm, CE-MRA (r.-o.): 2,8 x 2,3cm

VIBE-MRI (l.-u.): 2,7 x 2,4cm, CE-CTA (r.-u.): 2,6 x 2,4cm

Bei der distalen Durchmesser-Messung wurde die letzte Ebene proximal der Aortenbifurkation als Messebene ausgewählt. Die Messwerte der SPACE- und CE-MRA sind nahezu identisch. Ein wenig nach unten abweichend sind die größeren der beiden Werte in der VIBE-MRI und CE-CTA. Die kleineren der beiden Werte weichen bei der VIBE-MRI und CE-CTA nach oben ab.

„Entries/Re-Entries“:

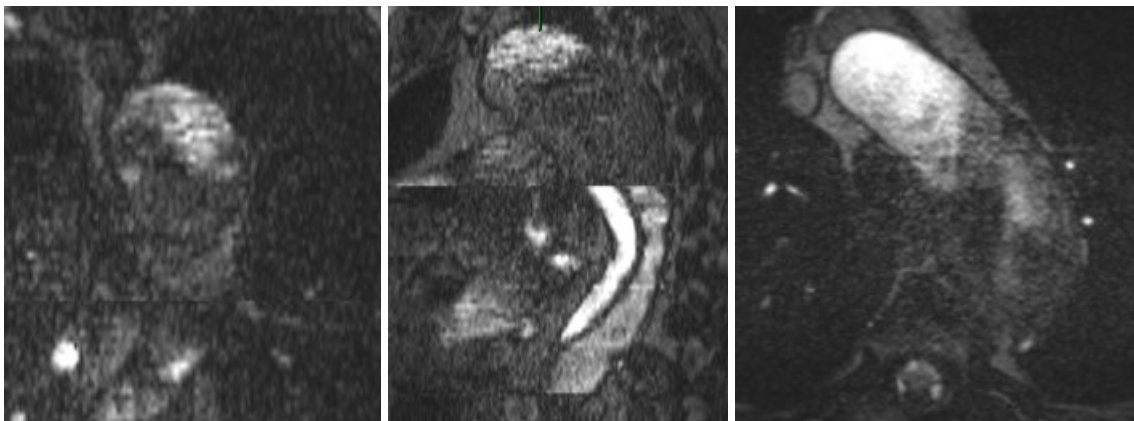


Abbildung 338: MPR-Rekonstruktion, QISS-MRA, Entry, Pat. 7  
links: cor. E., mittig: sag. E., rechts: tra. E.

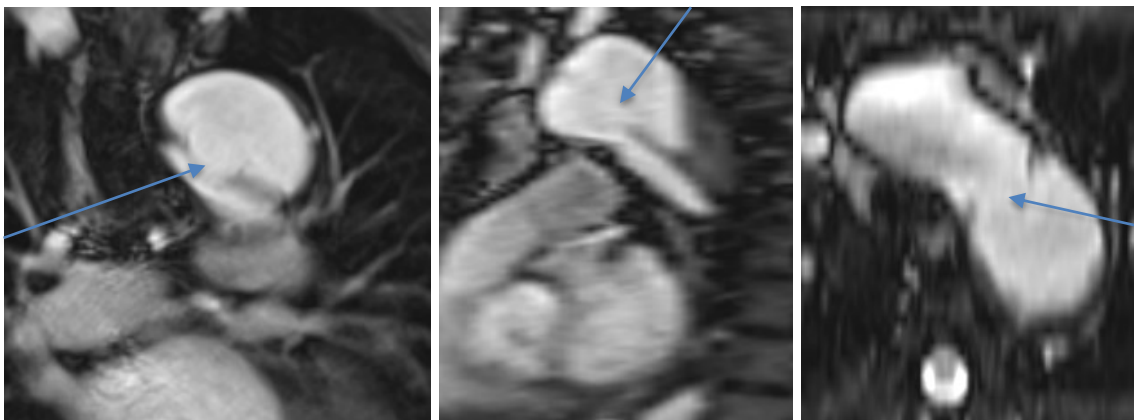


Abbildung 339: MPR-Rekonstruktion, SPACE-MRA, Entry, Pat. 7  
links: cor. E., mittig: sag. E., rechts: tra. E.

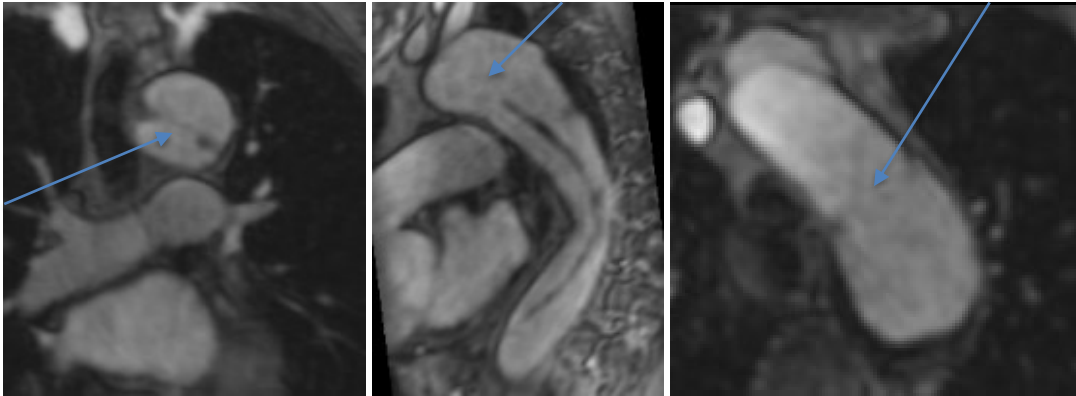


Abbildung 340: MPR-Rekonstruktion, CE-MRA, Entry, Pat. 7  
links: cor. E., mittig: sag. E., rechts: tra. E.

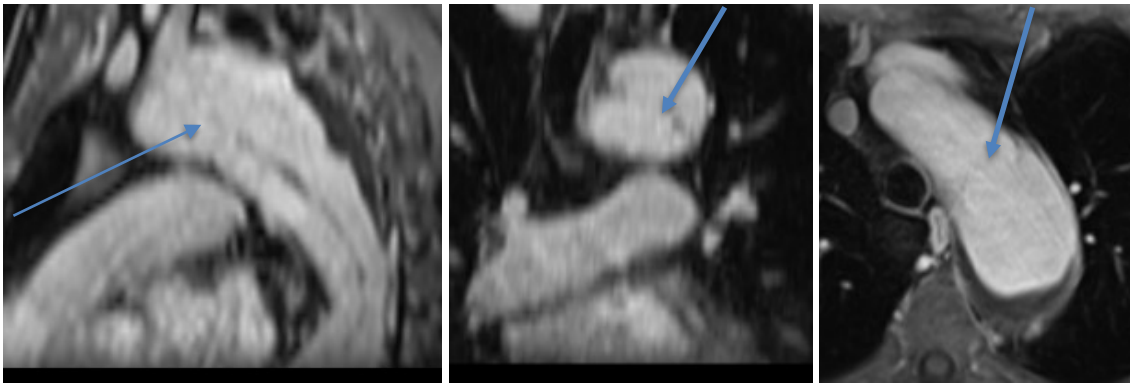


Abbildung 341: MPR-Rekonstruktion, VIBE-MRI, Entry, Pat. 7  
links: cor. E., mittig: sag. E., rechts: tra. E.

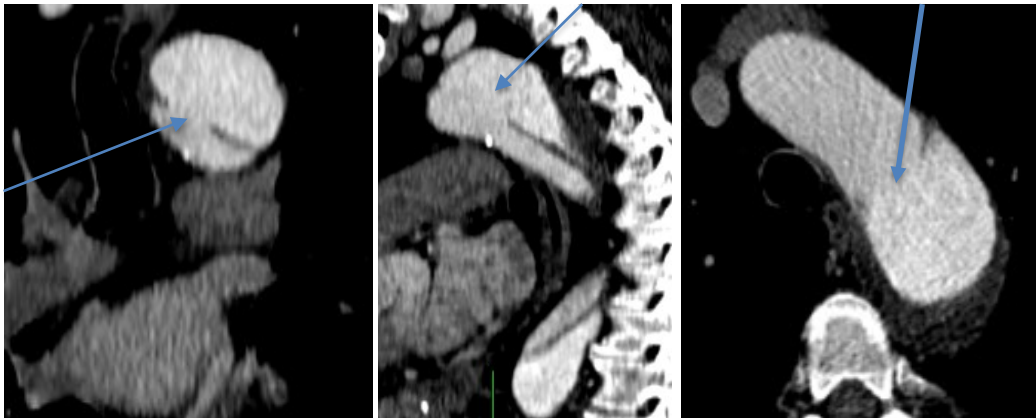


Abbildung 342: MPR-Rekonstruktion, CE-CTA, Entry, Pat. 7  
links: cor. E., mittig: sag. E., rechts: tra. E.

In allen Sequenzen außer der QISS-MRA, die durch Signalauslöschungen und Inhomogenitäten gezeichnet ist, kann ein Entry zum falschen Lumen hin gut erkannt werden (Pfeile).

„Wandthrombus“:

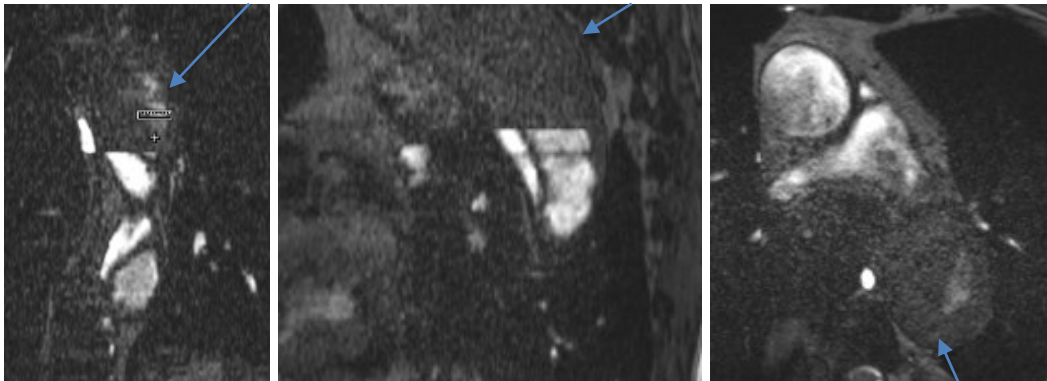


Abbildung 343: MPR-Rekonstruktion, QISS-MRA, Wandthrombus, Pat. 7  
links: cor. E., mittig: sag. E., rechts: tra. E.

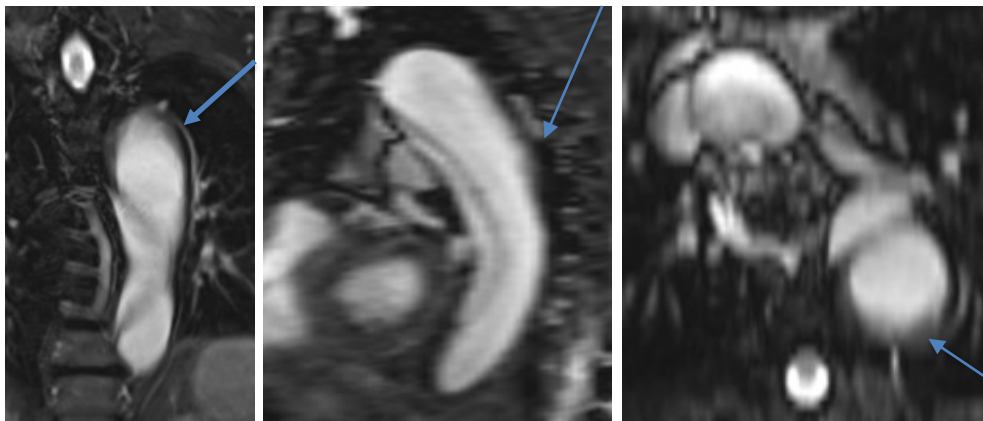


Abbildung 344: MPR-Rekonstruktion, SPACE-MRA, Wandthrombus, Pat. 7  
links: cor. E., mittig: sag. E., rechts: tra. E.

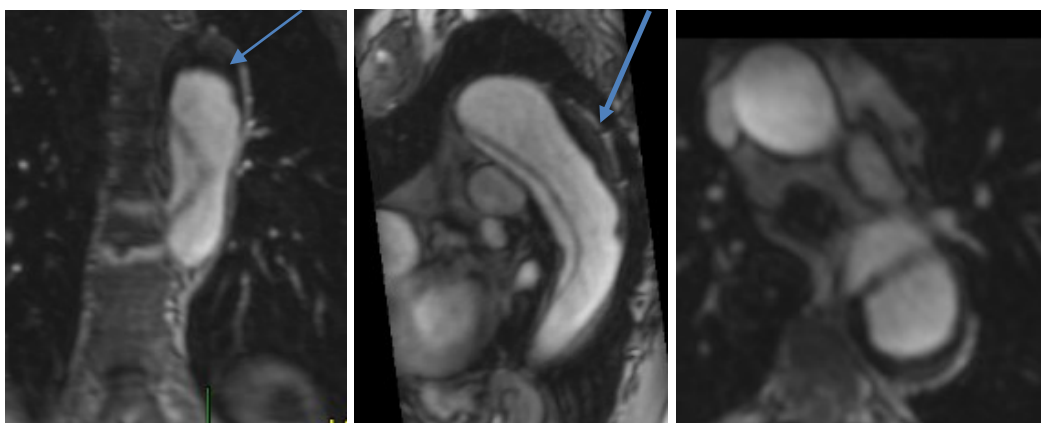


Abbildung 345: MPR-Rekonstruktion, CE-MRA, Wandthrombus, Pat. 7  
links: cor. E., mittig: sag. E., rechts: tra. E.

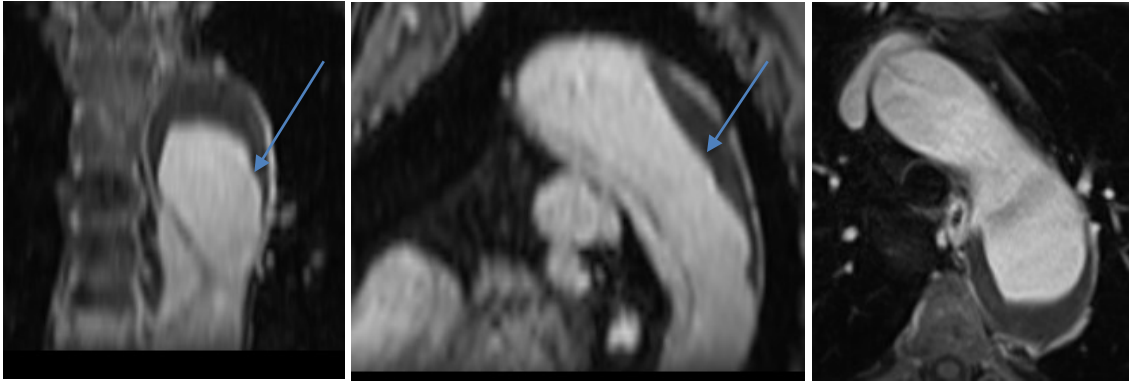


Abbildung 346: MPR-Rekonstruktion, VIBE-MRI, Wandthrombus, Pat. 7  
links: cor. E., mittig: sag. E., rechts: tra. E.



Abbildung 347: MPR-Rekonstruktion, CE-CTA, Wandthrombus, Pat. 7  
links: cor. E., mittig: sag. E., rechts: tra. E.

Hierbei ergibt sich ein ähnliches Ergebnis wie bei der „Entry/Re-Entry-Abklärung“. Die SPACE-, CE-MRA-, VIBE-MRI- und CE-CTA-Aufnahmen sind sehr gut zur Beurteilung des Wandthrombus geeignet (siehe Pfeile). In der QISS-Sequenz kann dieser nur erahnt werden, wenn er bereits bekannt ist (siehe Pfeile).

### 3.2 Quantitative Auswertung der 4D-flow-Aufnahmen

Mithilfe der Software cvi42 konnten die 4Dflow-Aufnahmen ausgewertet werden.

Dafür musste zunächst in der Segmentierung eine Centerline durch die Aorta gelegt werden. Der Beginn der Centerline wurde auf die Aortenklappe oder noch in die linke Kammer des Herzens gelegt. Das Ende der Centerline war meist durch das distale Ende der Aufnahme festgelegt, seltener durch schlechte Qualität in der Aufnahme der distalen Aorta.

Wie auch bei der qualitativen und quantitativen Auswertung der QISS-MRA-, SPACE-MRA-, CE-MRA-, VIBE-MRI- und CE-CTA-Aufnahmen beginnt die quantitative Analyse der 4D-Flow-Bilder mit der Aufarbeitung der Probandinnen-Daten.

Insgesamt wurden ähnliche Messebenen zur Analyse ausgewählt, wie in der Auswertung der anderen fünf MR-Sequenzen.

Für die Probandinnen wurden folgende Messebenen ausgewählt:

Flow1/WSS1/RPM1	Sinutubulärer Übergang
Flow2/WSS2/RPM2	Größter Durchmesser der Aorta ascendens
Flow3/WSS3/RPM3	Vor dem Abgang des Truncus brachiocephalicus
Flow4/WSS4/RPM4	Nach dem Abgang der A. subclavia sin.
Flow5/WSS5/RPM5	Größter Durchmesser der Aorta descendens (thorakal)
Flow6/WSS6/RPM6	Thorakoabdominaler Übergang der Aorta
Flow7/WSS7/RPM7	Vor den Abgängen der Viszeralarterien
Flow8/WSS8/RPM8	Nach den Abgängen der Viszeralarterien

E1	Flow1-Flow2
E2	Flow2-Flow3
E3	Flow3-Flow4
E4	Flow4-Flow5
E5	Flow5-Flow6
E6	Flow6-Flow8

Tabelle 1: Messebenen zur Auswertung der 4D-Flow-Aufnahmen, Probandinnen

Für Probandin 1 wurden folgende Bilder und Daten akquiriert:

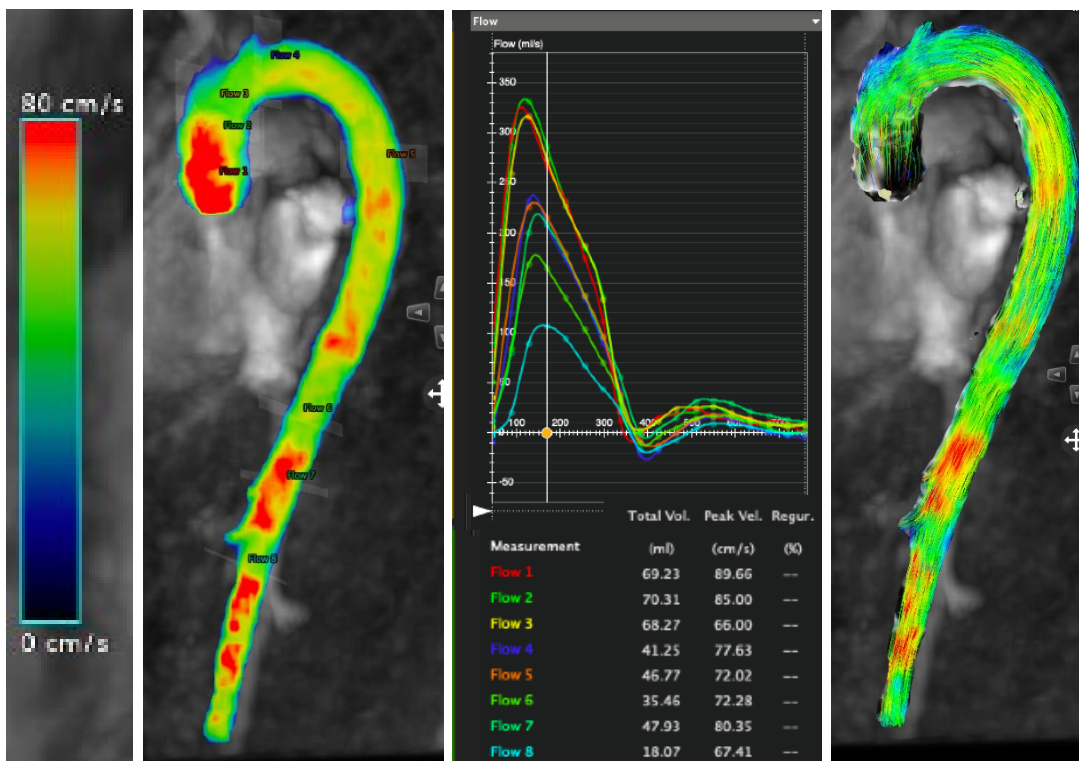


Abbildung 348: 4D-Flow, Flow - Strömungsgeschwindigkeit und Volumenstrom, Prob. 1

Für den Parameter Flow erhält man zwei verschiedene Auskünfte, zum einen die Strömungsgeschwindigkeit in cm/s (dargestellt in der Farbskala der Bildgebung und in der Tabelle angegeben) und zum anderen den Volumenstrom/-durchfluss in ml/s = cm<sup>3</sup>/s (dargestellt in der Kurve) (vgl. Schlobach, Martin 2021c; (27)).

Die Strömungsgeschwindigkeit  $\omega$  berechnet sich aus dem Volumenstrom  $\dot{V}$  und der Rohrquerschnittsfläche  $A$ ,  $\omega = \dot{V}/A$ . Der Volumenstrom ist das Volumen dividiert durch die Zeit. Die Rohrquerschnittsfläche berechnet sich aus  $\Pi \times r^2$  [cm<sup>2</sup>] (vgl. Schlobach, Martin 2021c; (27)). Sobald sich die Rohrquerschnittsfläche verändert, verändert sich auch die Strömungsgeschwindigkeit, der Volumenstrom aber bleibt unbeeinflusst von der Rohrquerschnittsfläche. Dies hängt mit der sogenannten Kontinuitätsgleichung zusammen:  $A_1 \times \omega_1 = A_2 \times \omega_2$  bzw.  $A_1/A_2 = \omega_2/\omega_1$ . Bei kleiner Rohrquerschnittsfläche erhöht sich die Geschwindigkeit und umgekehrt (Schlobach, Martin 2021a; (28)).

Die Kurve stellt mit ihrem Verlauf einen Herzschlag dar und zeigt den zunächst steil ansteigenden Volumenstrom in der Systole (Auswurf des Herzens), dann wird der Peak erreicht und anschließend nimmt der Volumenstrom so weit ab, dass nach dem Auswurf des Bluts aus dem Herzen während der Diastole ein Rückfluss zurück zum Herzen entsteht. Am Ende pendelt sich der Fluss bei circa 0ml/s ein, bis der nächste Herzschlag mit Auswurf beginnt.

Die rot markierten Areale weisen eine höhere Strömungsgeschwindigkeit (cm/s) als die gelben und die grünen Areale auf (siehe Skala links). In der Kurvendarstellung lautet die Einheit ml/s und wird in den verschiedenen Messebenen, die in der Tabelle 1 aufgelistet sind, gemessen. Dabei ist auf den ersten Blick ersichtlich, dass der Flow, also sowohl der Volumenstrom als auch die Strömungsgeschwindigkeit in der Aorta ascendens (Flow 1 und 2-Messebene) am höchsten ist, der Peak für den Volumenstrom liegt dort bei 330ml/s und die Strömungsgeschwindigkeit bei 89,66cm/s bzw. 85 cm/s. Nach dem Aortenbogen und in der Aorta descendens zeigt sich der Volumenstrom mit deutlich niedrigeren Peakwerten von 220ml/s bzw. weiter distal 100ml/s.

Wenn der Volumenstrom kleiner wird, sollte auch die Strömungsgeschwindigkeit im Verlauf der Aorta abnehmen. Die Strömungsgeschwindigkeit wird in der Aorta descendens aber erneut größer (rote Areale), da die Rohrquerschnittsfläche deutlich abnimmt im Verlauf.

Die hohe Strömungsgeschwindigkeit am Beginn der Aorta ascendens lässt sich durch den hohen Volumenstrom (im Zähler) und durch die Rohrquerschnittsfläche (im Nenner), die auf Höhe der Aortenklappe vermutlich kleiner ist als in der Mitte der Aorta ascendens, erklären.

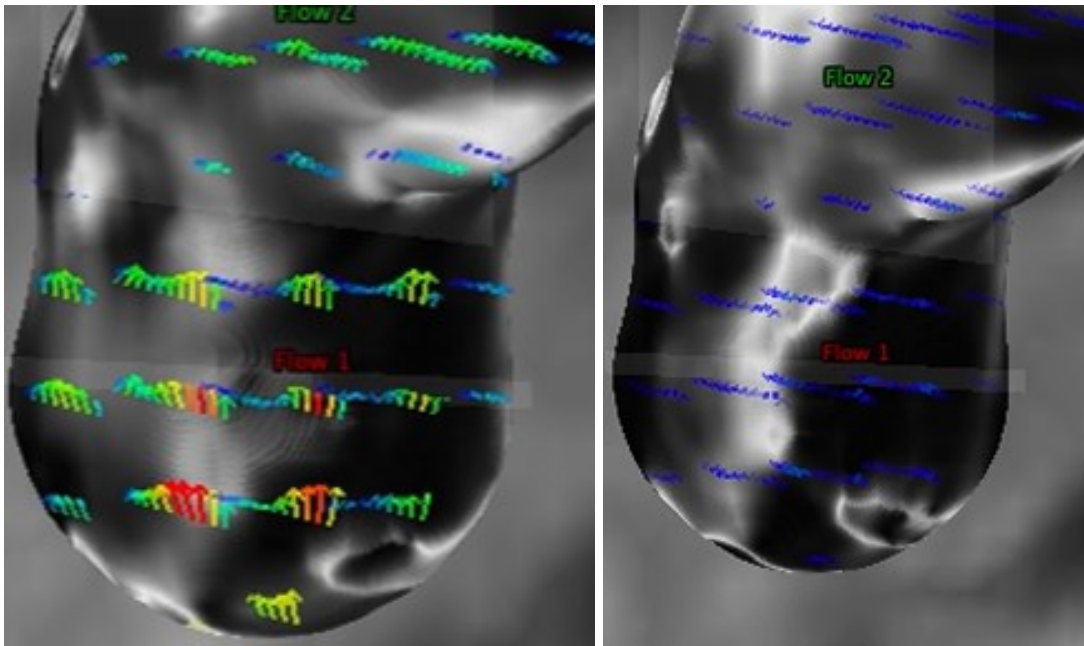


Abbildung 349: 4D-Flow, Flow (l.) und Backflow (r.), Prob. 1

Hier wird der zuvor beschriebene Ablauf bildlich dargestellt. Im cvi42-Programm kann die Flow-Darstellung auch in Form von Pfeilen erfolgen. So kann man anhand der farblich angepassten Pfeile genau erkennen, wann und wie schnell das Blut in welche Richtung fließt. Zunächst fließt es von der Aortenklappe weg in Richtung der Supraaortalen, danach gibt es bei manchen stärker, bei anderen schwächer den Rückfluss, der im rechten Bild durch die blauen Pfeile dargestellt wird. Dabei fließt also das Blut mit niedriger Geschwindigkeit (blau) wieder zurück in Richtung der Aortenklappe. Bei einem zu stark ausgeprägten Rückfluss in Richtung der Aortenklappe könnte der Verdacht einer Aortenklappeninsuffizienz entstehen. Somit kann man bei PatientInnen mit bekannten Aortenerkrankungen auch mögliche Begleiterkrankungen diagnostizieren.

Der zweite Parameter, der zur Auswertung der 4D-Flow-Aufnahmen verwendet wurde, ist der „wall shear stress“. Wörtlich übersetzt heißt „wall shear stress“ Wandscherspannung. Dies sind die Scherkräfte des Blutes, die auf die Aortenwand Druck ausüben. Dieser Parameter spielt bei Aortenerkrankungen, die die Aortenwand schwächen, eine enorm wichtige Rolle. Die Kenntnis darüber an welchen Positionen der Aorta PatientInnen eine erhöhte Wandscherspannung haben, könnte sowohl für die Prävention als auch für die Nachversorgung sehr gewinnbringend sein, dazu aber in der Diskussion mehr.

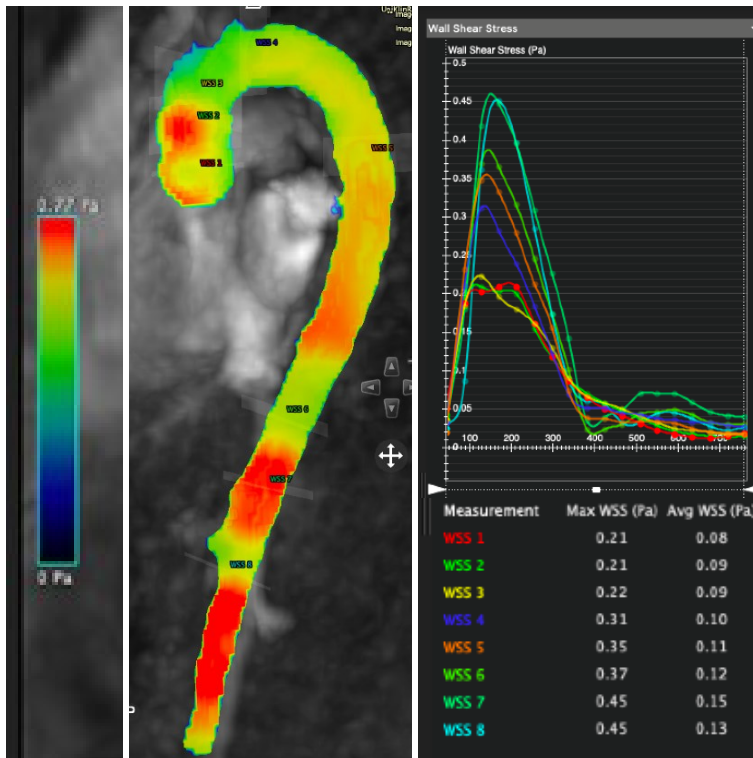


Abbildung 350: 4D-Flow, Wall Shear Stress, Prob. 1

Bei dieser Aufnahme sind die absoluten Wall shear stress Werte in Pascal [Pa] angegeben. Die Werte in der Aorta ascendens und dem Aortenbogen sind niedriger, die orangene, grüne und gelbe Kurve (Messebene 1, 2 und 3) zeigen Höchstwerte von 0,22Pa. In der distalen Aorta (geringerer Aortendurchmesser) nimmt der wall shear stress zu. Vor allem Messebene 6, 7 und 8 (Peak grün, grün und türkis) haben hohe wall shear stress Werte mit einem Peak von 0,45Pa. Die Wandscherspannung wird berechnet aus Blutviskosität multipliziert mit Strömungsgeschwindigkeit / Innerer Durchmesser. Sobald also in der Aorta descendens die Strömungsgeschwindigkeit zunimmt und der innere Durchmesser abnimmt, nimmt die Wandscherspannung auch zu. Die Blutviskosität bleibt unverändert.

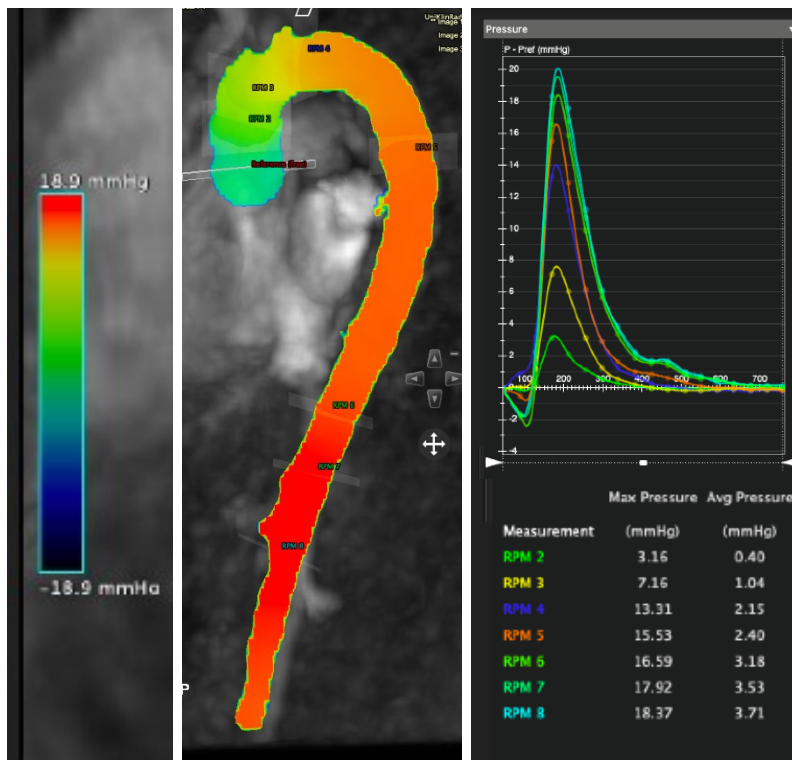


Abbildung 351: 4D-Flow, Blutdruckdifferenz, Prob. 1

Bei der Analyse des Drucks handelt es sich nicht um absolute Messwerte, sondern um relative Werte, die sich auf den in der Referenzebene gemessenen Druck beziehen. Für die Auswertung unserer Studienaufnahmen wurde die Referenzebene immer an den Beginn der Aorta gelegt. Hierbei wird auf den ersten Blick ersichtlich, dass sich die Druckwerte innerhalb der Aorta ascendens nur wenig unterscheiden. Die Differenz der Druckwerte zwischen der Referenzebene in der Aorta ascendens und der Messebene in der Aorta descendens wird nach distal immer größer. Hin zur letzten Messebene 8 entsteht eine Druckdifferenz von 20mmHg (Kurve türkis). Das heißt der Druck in der Aorta steigt vom Beginn der Aorta bis hin zum distalen Abschnitt der Aorta um 20mmHg. Der Druck in der Aorta verhält sich ähnlich wie Wandscherspannung. Druck und Querschnittsfläche (Durchmesser) verhalten sich umgekehrt proportional. Bei abnehmender Fläche wird der Druck größer und bei zunehmender Querschnittsfläche wird der Druck kleiner. Dies ist die Begründung dafür, dass der Druck in der Aorta descendens, wo der Durchmesser und damit auch die Querschnittsfläche der Aorta kleiner werden, größer wird.

Der vierte und damit letzte Parameter ist der Energieverlust. Anhand dieses Parameters kann man sehen, an welchen Stellen der Blutfluss in der Aorta den größten Energieverlust macht und ob ein möglicher Zusammenhang mit den anderen Parametern feststellbar ist.

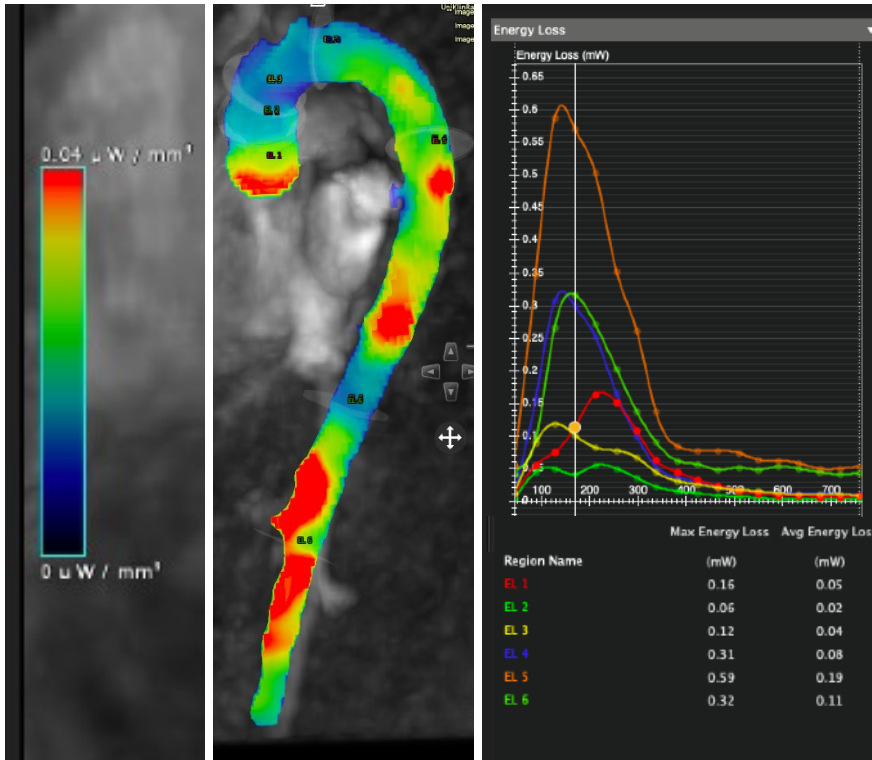


Abbildung 352: 4D-Flow, Energieverlust, Prob. 1

Die Auswertung dieses Parameters erfolgt in Abschnitten. Die einzelnen Abschnitte wurden zwischen die Messebenen gelegt, die für die anderen Parameter festgelegt wurden.

Der größte Energieverlust mit 0,6mW scheint bei Probandin 1 im Bereich der thorakalen Aorta descendens zu liegen.

Für die zweite Probandin konnten folgende Ergebnisse erzielt werden:

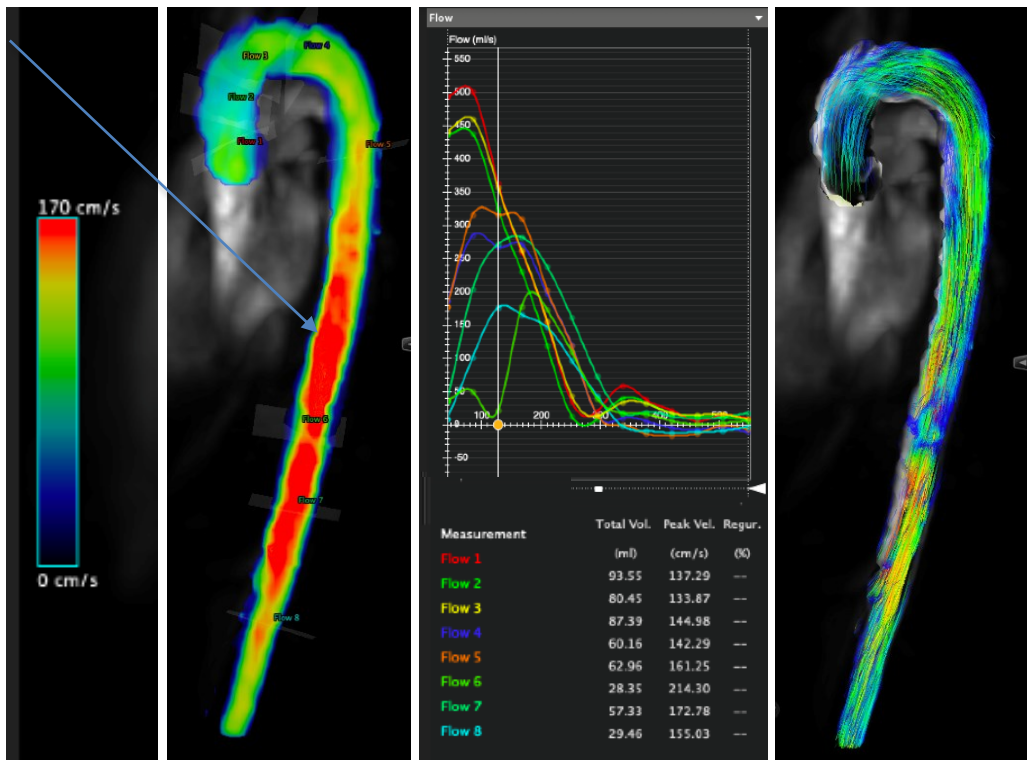


Abbildung 353: 4D-Flow, Flow - Strömungsgeschwindigkeit und Volumenstrom, Prob. 2

Wie auch bei der ersten Probandin ist laut Kurvenverlauf der Volumenstrom in der Aorta ascendens höher als im Aortenbogen oder in der Aorta descendens. Die Messebenen weisen Peaks von 450-500ml/s vor. In der Aorta descendens hingegen liegen die Werte bei 320ml/s und weiter distal sogar nur bei 170ml/s. Auffällig ist auch, dass der Peak bei den Messebenen in der Aorta descendens nicht nur niedriger, sondern auch breiter ist. Die Strömungsgeschwindigkeit ist eindeutig in der Aorta descendens am höchsten (Pfeil). Eine kleinere Rohrquerschnittsfläche führt zu einer höheren Strömungsgeschwindigkeit. Ebenfalls auf dem Bild zu sehen ist, dass die Strömungsgeschwindigkeit im Gefäß zur Mitte hin höher ist als am Rand, das ist ein klassisches Strömungsprofil.

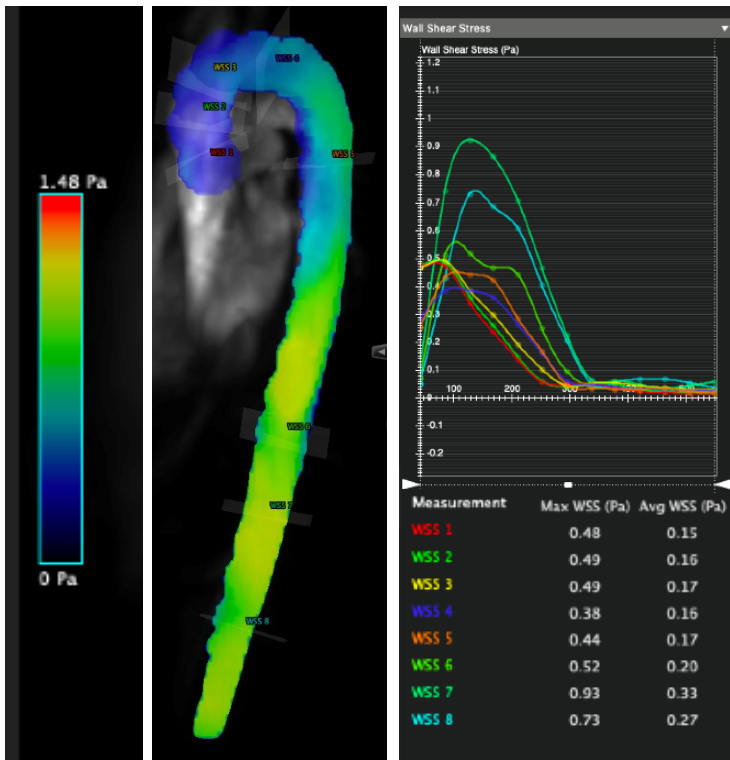


Abbildung 354: 4D-Flow, Wall Shear Stress, Prob. 2

Auch bei dieser Probandin steigt der Wall shear stress in der Aorta descendens im Vergleich zur Aorta ascendens. Die Werte der ersten drei Messebenen liegen circa bei 0,5Pa. Für die Messebenen in der distalen Aorta werden Werte von 0,7- 0,9Pa erreicht.

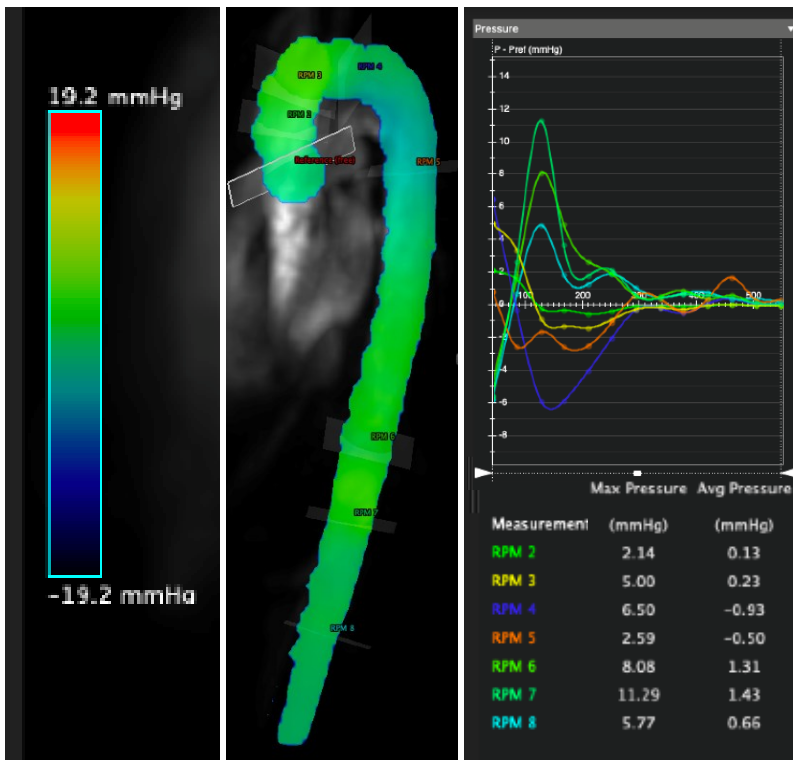


Abbildung 355: 4D-Flow, Blutdruckdifferenz, Prob. 2

In dieser Graphik und vor allem im Kurvenverlauf wird deutlich, dass es Messebenen in der Aorta gibt, wo der Druck im Vergleich zur Referenzebene in der Aorta ascendens niedriger ist. Betroffen sind die Messebenen 2-5, das heißt die Messebenen, die in der Aorta ascendens und dem Aortenbogen liegen. Für die Messebene 4, nach Abgang der Supraaortalen, liegt die Druckdifferenz bei -6mmHg. In der Aorta descendens hingegen sind die Peaks und Druckwerte wieder im positiven Bereich bei bis zu +11mmHg Druckdifferenz.

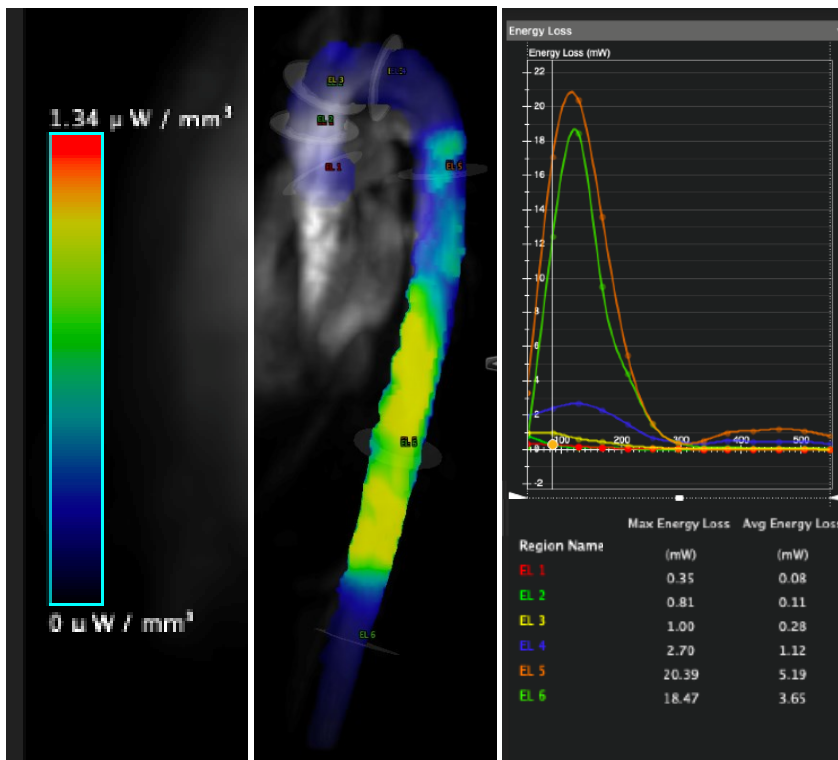


Abbildung 356: 4D-Flow, Energieverlust, Prob. 2

Diese Graphik zeigt, dass in der Aorta ascendens und im Aortenbogen fast kein Energieverlust entsteht, in der Aorta descendens hingegen hohe Energieverluste auftreten. Im 5. und 6. Abschnitt treten jeweils Energieverluste von 18-21mW auf.

Die Probandinnen wurden dafür eingesetzt, die Planung und Durchführung der Studiensequenzen zu üben, damit sie bei den PatientInnen möglichst reibungslos umgesetzt werden können. Bei der Probandin 3 ist ein Planungsfehler aufgetreten, sodass der Aortenbogen mit den Abgängen der Supraaortalen abgeschnitten war. Dies hat zur Folge, dass in diesem Bereich keine brauchbaren Messungen durchgeführt werden können. Die Ergebnisse für die Probandin 3 präsentieren sich also wie folgt:

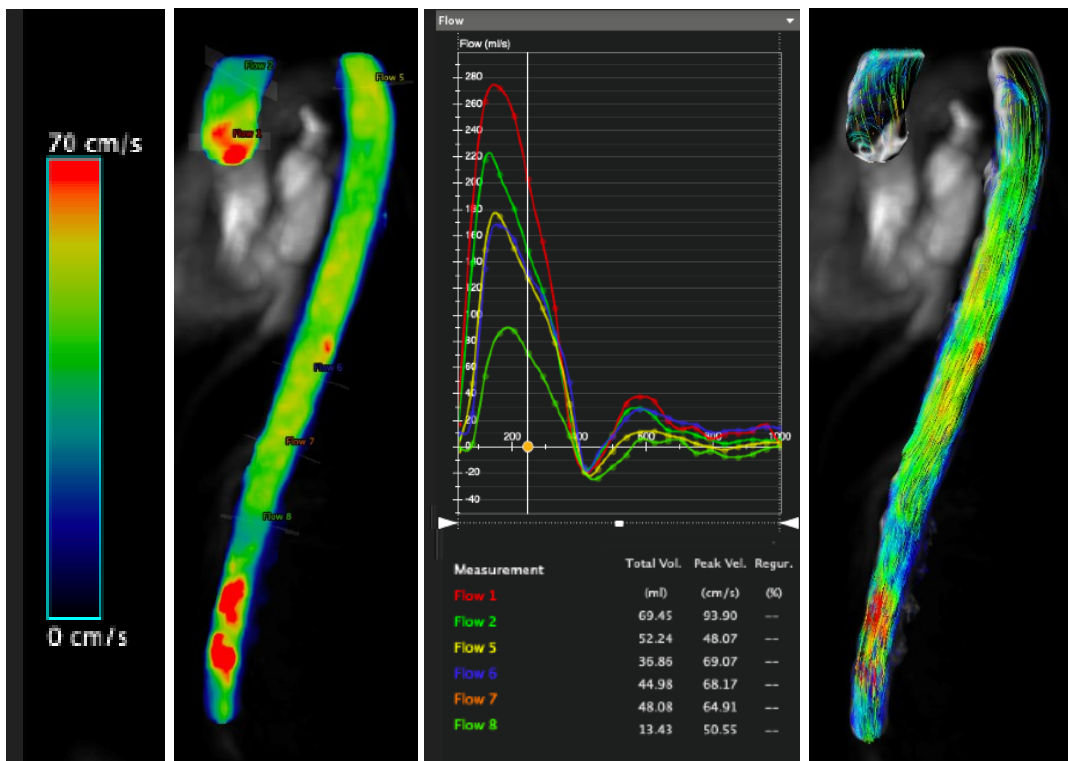


Abbildung 357: 4D-Flow, Flow - Strömungsgeschwindigkeit und Volumenstrom, Prob. 3

Der wieder mit Abstand höchste Volumenstrom ist mit 270ml/s bei der Ebene Flow 1 zu sehen, auch in der Bildgebung ist es eine rot eingefärbte Zone des Aortenlumens zu finden, dies spricht für eine hohe Strömungsgeschwindigkeit. Auch für die Ebene Flow 2 liegt der Wert mit 220ml/s noch recht hoch. In der Aorta descendens liegt der Peak im proximalen Bereich nur noch bei knapp 170ml/s und noch weiter distal bei 90ml/s. Die Strömungsgeschwindigkeit nimmt aufgrund des abnehmenden Durchmessers in der Aorta descendens auch wieder zu (begründbar mit dem Kontinuitätsgesetz).

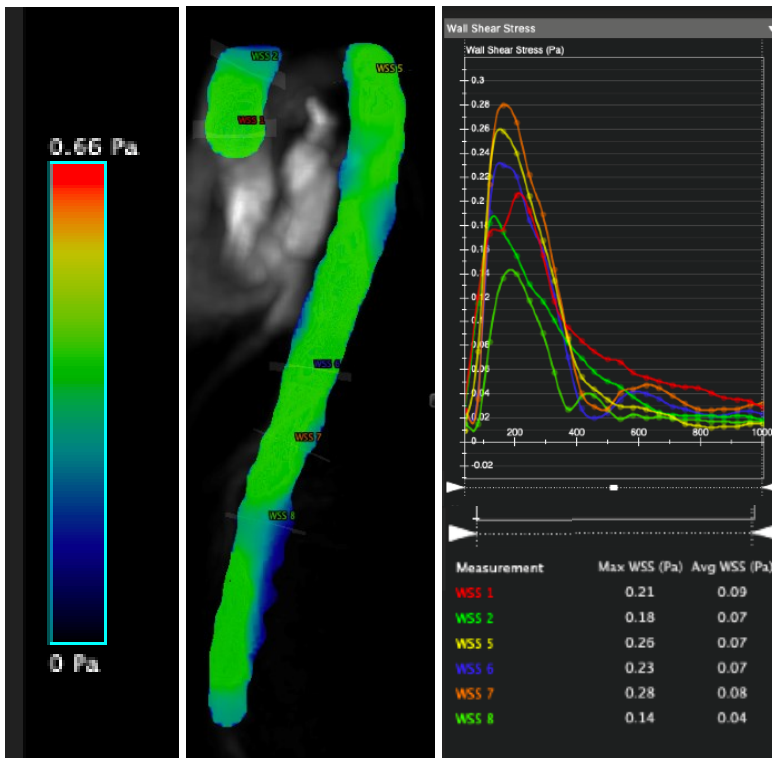


Abbildung 358: 4D-Flow, Wall Shear Stress, Prob. 2

Auch bei Probandin 3 liegen die höchsten Wall shear stress Werte in der Aorta descendens. Mit 0,28Pa hat die Messebene WSS5 den höchsten Peak, WSS6 und 7 aber weisen auch eine Wandscherspannung von 0,23-0,26Pa vor. Ganz distal in der Messebene WSS8 aber sind die wall shear stress Werte wieder niedriger als in der Aorta ascendens. Das könnte in diesem Fall auch damit zusammenhängen, dass die Qualität der Aufnahme in der Aorta descendens abnimmt.

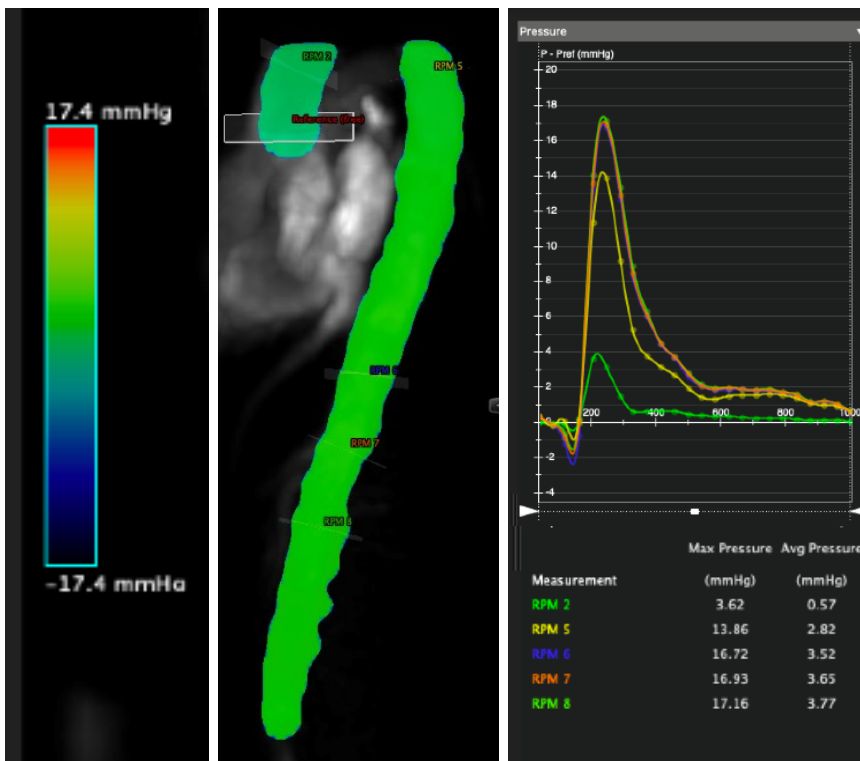


Abbildung 359: 4D-Flow, Blutdruckdifferenz, Prob. 3

Die Druckdifferenz von der Referenzebene direkt nach der Aortenklappe hin zu den Messebenen in der distalen Aorta beträgt bis zu 17mmHg. Aber auch schon zur Messebene RPM5, am Übergang zwischen Aortenbogen und Aorta descendens, liegt ein Druckunterschied von 14mmHg vor.

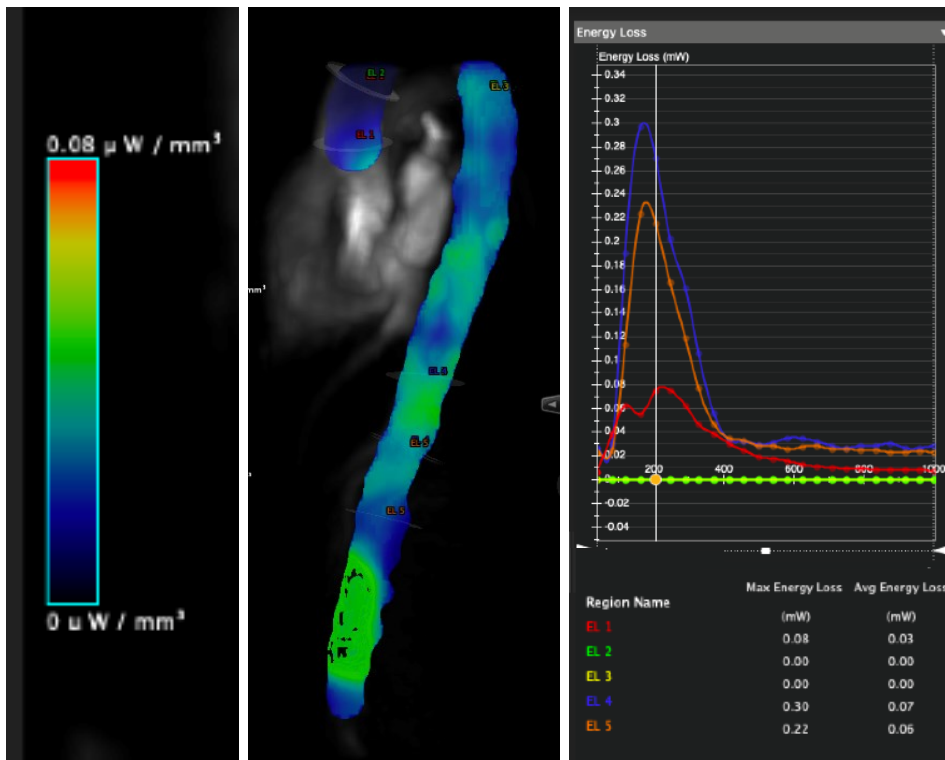


Abbildung 360: 4D-Flow, Energieverlust, Prob. 3

Der größte Energieverlust ist in den Abschnitten der distalen Aorta zu finden und liegt bei 0,23 und 0,3mW.

Zusammenfassend kann anhand der Probandinnen folgende Aussage über die Hämodynamik in der Aorta getätigt werden.

Die Strömungsgeschwindigkeit ist meist direkt nach der Aortenklappe und in der Aorta descendens am höchsten, wohingegen der Volumenstrom in der Aorta ascendens bis zum Abgang der Supraaortalen am höchsten ist. Der wall shear stress und die Druckdifferenz in der Aorta sind aufgrund des abnehmenden Durchmessers meist in der distalen Aorta descendens am höchsten und auch der Energieverlust ist in den Abschnitten der Aorta descendens am größten.

Mithilfe dieser Erkenntnisse können nun die Bilder, Kurven und Werte der PatientInnen mit Aortenpathologien betrachtet und beurteilt werden.

Für die erste Patientin liegt eine Besonderheit vor. Alle 4D-flow Aufnahmen außer die dieser Patientin wurden mithilfe von EKG-Triggerung aufgenommen. Da die EKG-Triggerung bei der Akquisition Probleme bereitete, musste bei dieser Patientin auf die Puls-Triggerung ausgewichen werden. Bei der Pulstriggerung erscheint der Kurvenverlauf dadurch versetzt, der Peak ist erst am Ende der Kurve zu sehen.

Die erste Patientin erlitt während der Entbindung eine Typ-B-Aortendissektion, die mittlerweile aber unter konservativer Therapie verheilt ist. Veränderungen der Aorta und der Aortenwand bleiben dennoch zurück. Die für die erste Patientin festgelegten Messebenen ähneln denen der Probandinnen:

Flow1/WSS1/RPM1	Sinutubulärer Übergang
Flow2/WSS2/RPM2	Größter Durchmesser der Aorta ascendens
Flow3/WSS3/RPM3	Vor dem Abgang des Truncus brachiocephalicus
Flow4/WSS4/RPM4	Nach dem Abgang der A. subclavia sin.
Flow5/WSS5/RPM5	Größter Durchmesser der Aorta descendens (thorakal)
Flow6/WSS6/RPM6	Thorakoabdominaler Übergang der Aorta
Flow7/WSS7/RPM7	Vor den Abgängen der Viszeralarterien
Flow8/WSS8/RPM8	Nach den Abgängen der Viszeralarterien
Flow 9/WSS9/RPM9	Engstelle der abdominalen Aorta (Die Messebenen WSS9 und RPM9 sind etwas weiter kaudal gelegt, da an der Engstelle eine Aussparung vorliegt (vermutlich mangelnde Daten). Um Messwerte zu erhalten, wurden die Messebenen etwas weiter kaudal gelegt, also nicht genau an der max. Engstelle gemessen!)

E1	Flow1-Flow2
E2	Flow2-Flow3
E3	Flow3-Flow4
E4	Flow4-Flow5
E5	Flow5-Flow6
E6	Flow6-Flow9

Tabelle 2: Messebenen zur Auswertung der 4D-Flow-Aufnahmen, Patientin 1

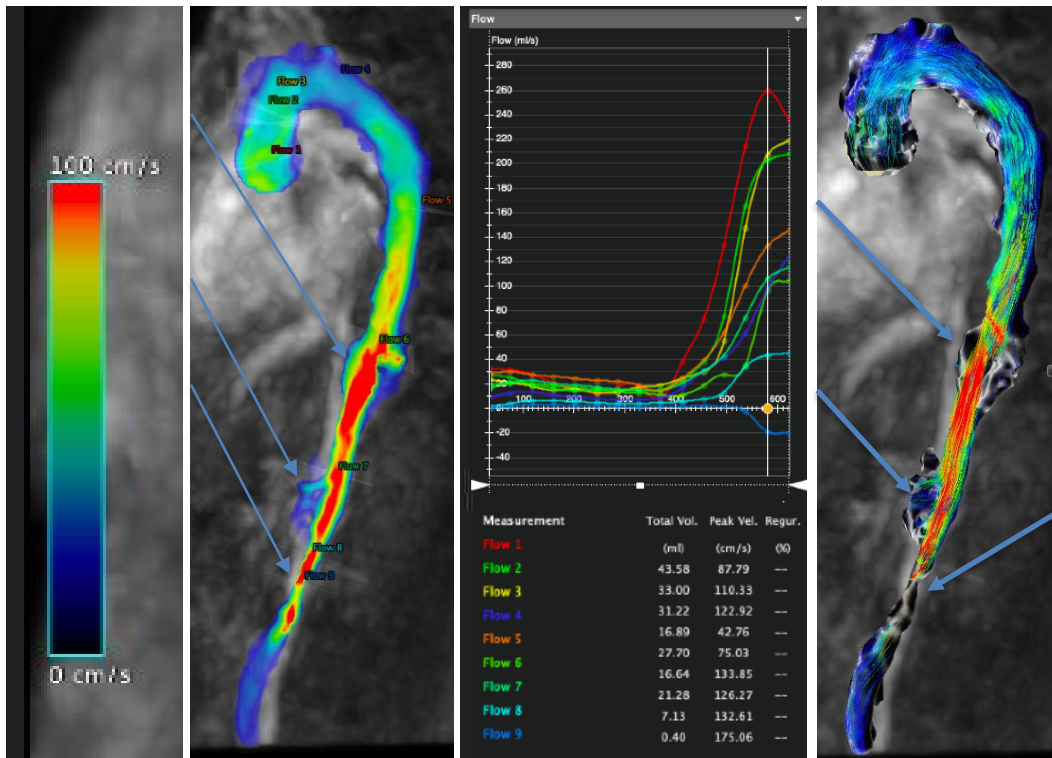


Abbildung 361: 4D-Flow, Flow - Strömungsgeschwindigkeit und Volumenstrom, Pat. 1

Wie auch bei der qualitativen Auswertung oder dem Durchmesservergleich unter Punkt 3.1 deutlich geworden ist, leidet die erste Patientin seit ihrer verheilten Aortendissektion an einer Engstelle (Pfeil) im Bereich der Aorta descendens. Diese ist auch in diesen Bildgebungen deutlich zu erkennen.

Bei dieser Patientin wird der Einfluss des Aortendurchmessers auf die Strömungsgeschwindigkeit besonders deutlich. Die Engstelle der Aorta descendens (Pfeil) führt zu einem starken Anstieg der Strömungsgeschwindigkeit. Sie liegt bei 100cm/s, wobei das Volumen, das pro Sekunde die Engstelle passiert gering ist. Die Abnahme des Volumenstroms im Laufe der Aorta hängt aber nicht mit dem Rohrquerschnitt zusammen, sondern vielmehr damit, dass sowohl an die Supraaortalen als auch an die Viszeralarterien Blutvolumen abgeht. Etwas weiter proximal ist eine unregelmäßig verheilte Stelle der Aorta sichtbar (Pfeil). Dort scheint das Lumen etwas ausgebeult zu sein, was wiederum zu Turbulenzen im Blutfluss führen kann.

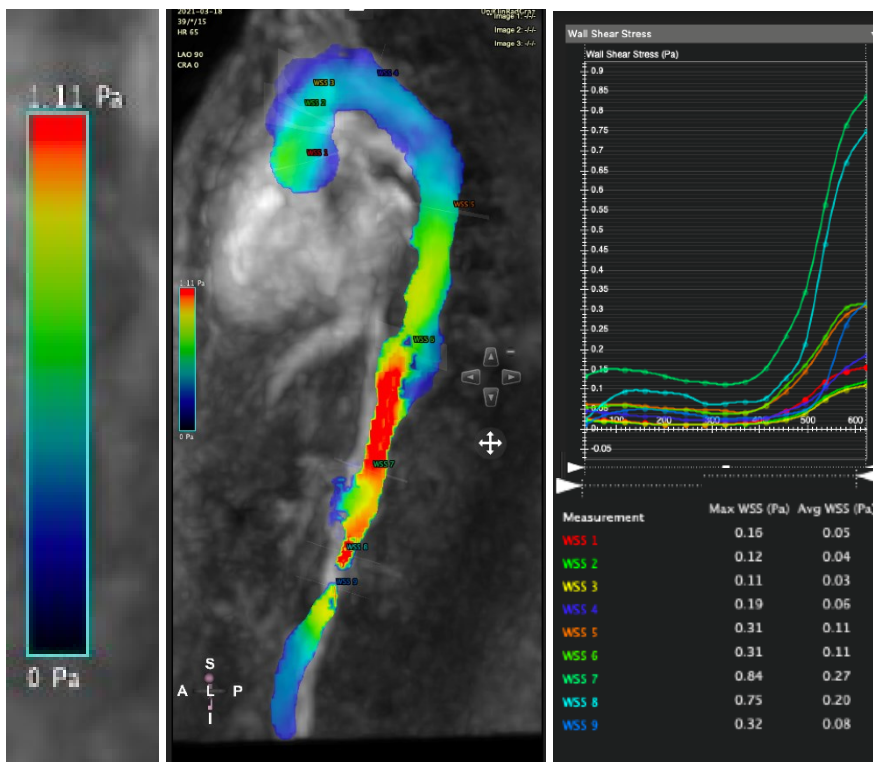


Abbildung 362: 4D-

Flow, Wall Shear Stress, Pat. 1

Wie in der Graphik und in der Kurve zu sehen ist, nimmt der wall shear stress vor allem im Bereich der Engstelle zu. In den Ebenen WSS7 und WSS 8 steigt der maximale WSS-Wert auf 0,84Pa und 0,75Pa. Dies lässt vermuten, dass dieser Abschnitt der Aorta, der nach der Pathologie zwar verheilt ist, dennoch aufgrund veränderter Wandstruktur eine Schwachstelle ist und ein erhöhter wall shear stress die Aortenwand stark belastet.

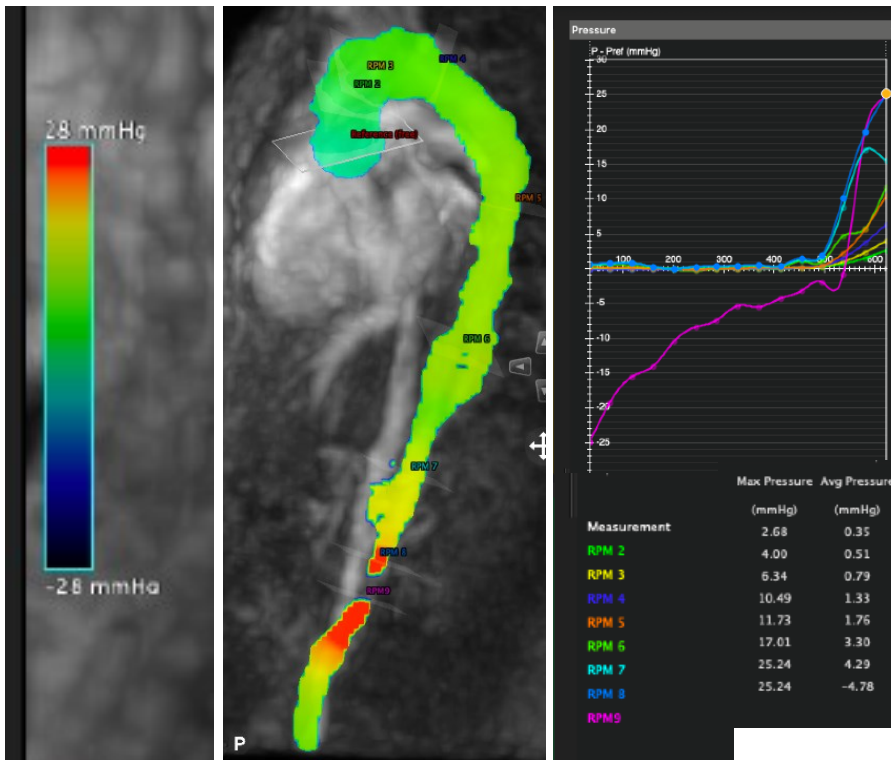


Abbildung 363: 4D-Flow, Blutdruckdifferenz, Pat. 1

Der bei den Probandinnen erklärte Zusammenhang zwischen dem Gefäßdurchmesser und dem Druck wird auch hier sehr deutlich. Die Engstelle der Aorta, die mit den anderen Studiensequenzen auf circa 1,1cm gemessen wurde erhöht den Druck im Lumen der Aorta extrem. Es kommt zu einer maximalen Druckdifferenz von +25,24Pa zur Referenzebene in der Aorta ascendens.

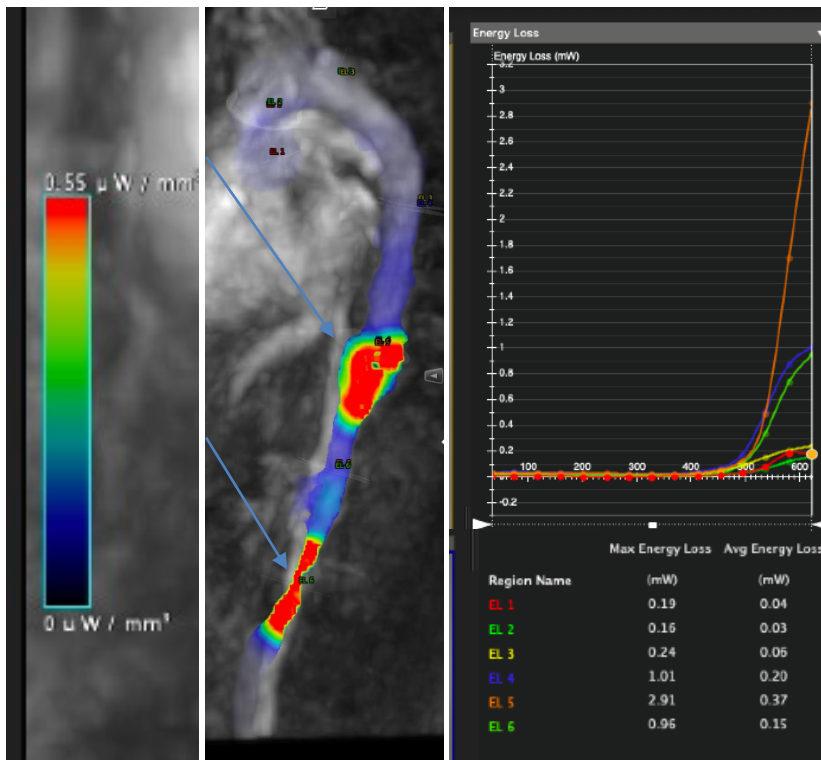


Abbildung 364: 4D-Flow, Energieverlust, Pat. 1

Für den Parameter Energieverlust werden die Stellen der Aorta descendens auffällig, die bereits beim Parameter Flow mit Pfeilen markiert wurden. Zum einen die Engstelle und zum anderen der schlecht verheilte Abschnitt der Aorta descendens, in dem das Lumen leicht ausgewölbt ist. Diese beiden Stellen sind prädestiniert dafür einen Energieverlust aufgrund von turbulenten Stromverhältnissen oder aufgrund von plötzlichen Durchmesseränderungen zu erzeugen. Im Abschnitt E6, der die Engstelle teilweise beinhaltet, kommt es zu einem Energieverlust von knapp 1mW. Im Abschnitt E5, der die gesamte ausgewölbte Stelle der Aorta descendens abdeckt, gehen sogar 2,91mW verloren.

Die zweite Patientin erlitt ebenfalls eine peripartale Aortendissektion, jedoch vom Typ A. Diese wurde mit einem Aorta ascendens Ersatz therapiert und wird aufgrund der bleibenden, nicht verheilten Dissektion in der Aorta descendens, die bis in die Beckenarterien verläuft, in regelmäßigen Abständen nachkontrolliert.

Für die Patientin 2 wurden die hämodynamischen Bildgebungen, Kurven und Messwerte anhand folgender Messebenen ausgewertet:

Flow1/WSS1/RPM1	Sinutubulärer Übergang
Flow2/WSS2/RPM2	Größter Durchmesser der Aorta ascendens
Flow3/WSS3/RPM3	Vor dem Abgang des Truncus brachiocephalicus
Flow4/WSS4/RPM4	Nach dem Abgang der A. subclavia sin.
Flow5/WSS5/RPM5	Vor Anfang der Pathologie (Dissektion)
Flow6/WSS6/RPM6	Nach Anfang der Pathologie (Dissektion)
Flow7/WSS7/RPM7	Größter Durchmesser der Aorta descendens (thorakal) Größter Durchmesser im Bereich der Pathologie
Flow8/WSS8/RPM8	Thorakoabdominaler Übergang der Aorta
Flow9/WSS9/RPM9	Vor den Abgängen der Viszeralarterien
Flow10/WSS10/RPM10	Nach den Abgängen der Viszeralarterien
Flow11/WSS11/RPM11	Vor der abdominellen Bifurcatio aortae

*(Nach kaudal hin kein Ende der Pathologie sichtbar in den Aufnahmen, Ende der Pathologie (Dissektion) erst in den Iliakalarterien)*

E1	Flow1-Flow2
E2	Flow2-Flow4
E3	Flow4-Flow6
E4	Flow6-Flow7
E5	Flow7-Flow8
E6	Flow8-Flow11

Tabelle 3: Messebenen zur Auswertung der 4D-Flow-Aufnahmen, Patientin 2

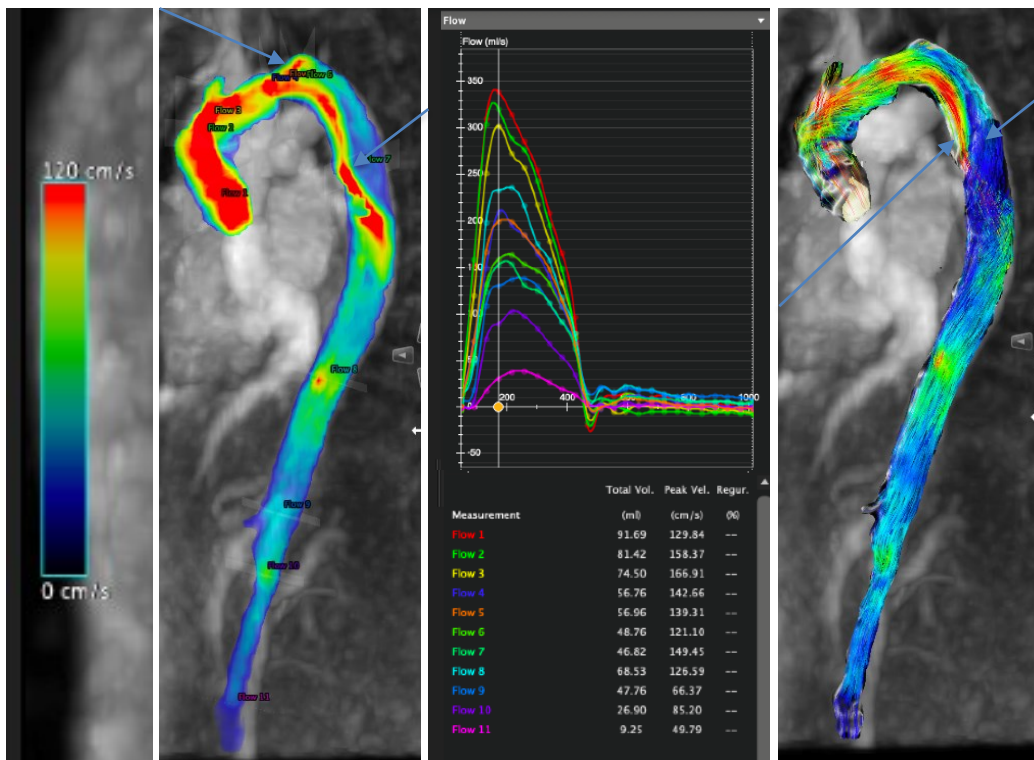


Abbildung 365: 4D-Flow, Flow - Strömungsgeschwindigkeit und Volumenstrom, Pat. 2

In den hämodynamischen Bildern sind sowohl die Dissektionsmembran (links, unterer Pfeil) als auch das Entry ins falsche Lumen (links, oberer Pfeil) sehr gut sichtbar. Das wahre und falsche Lumen können außerdem durch die Strömungsgeschwindigkeit gut unterschieden werden (rechts, Pfeile). Das wahre Lumen hat einen kleineren Durchmesser, aber eine deutlich höhere Strömungsgeschwindigkeit als das falsche Lumen, um das es sich herumwindet. Der durch die Pathologie entstandene kleine Durchmesser der Aorta ascendens und des wahren Lumens führen zu einer hohen Strömungsgeschwindigkeit von bis zu 167cm/s. Auch das durchs Entry fließende Blut hat aufgrund des kleinen Durchmessers des Lochs (Entry) eine hohe Geschwindigkeit. Die Messebene Flow 5 liegt knapp vor dem Entry und weist eine Strömungsgeschwindigkeit von 139cm/s vor. Im falschen Lumen fließt das Blut nur mit niedriger Strömungsgeschwindigkeit. Wie auch bei den Probandinnen ist der Volumenstrom in der Aorta ascendens am höchsten mit einem Peak von 300-330ml/s. Im Bereich des Dissektionsbeginns liegt der Volumenstrom bei circa 200-210ml/s. Die Strömungsgeschwindigkeit ist im falschen Lumen aufgrund des niedrigeren Volumenstroms niedrig.

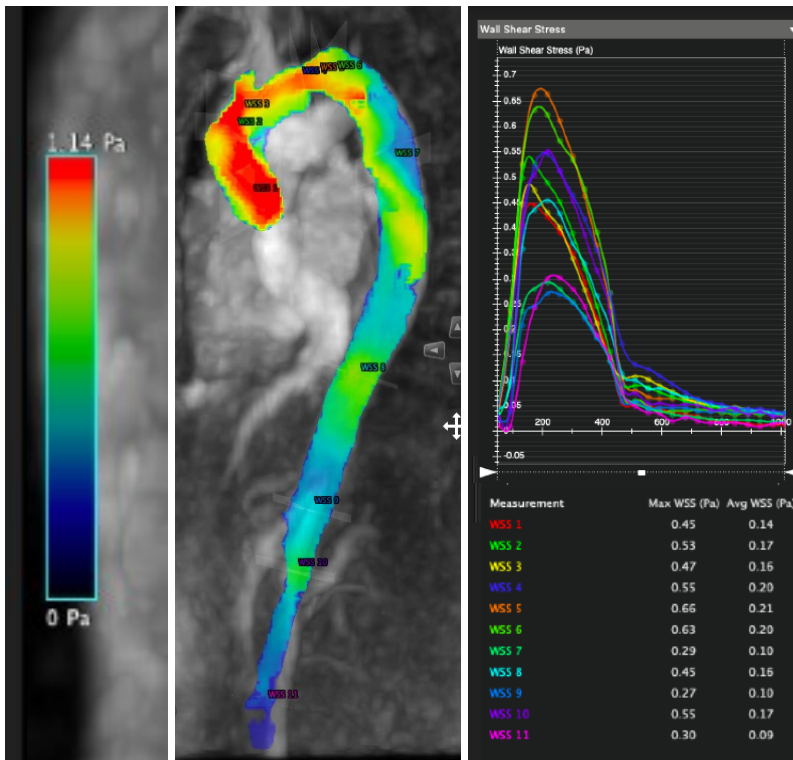


Abbildung 366: 4D-Flow, Wall Shear Stress, Pat. 2

Wie zu erwarten ist der Wall shear stress in den Bereichen, in denen das Lumen eingengt ist, erhöht. Vor allem am Beginn der Pathologie, wo das wahre Lumen und das Entry zum falschen Lumen sehr eingengt sind, ist die Wandscherspannung mit bis zu 0,63 und 0,66Pa erhöht. Die WSS-Werte in der Aorta ascendens liegen zwischen 0,45 und 0,53Pa.

Im weiteren Verlauf sinken die WSS-Werte wieder auf 0,27 bis 0,55. In den Analysen kann immer nur der Wall Shear stress, der über das gesamte Lumen der Aorta gemittelt ist, bestimmt werden. Man erhält somit keinen expliziten Wert für das wahre Lumen beziehungsweise umgekehrt für das falsche Lumen. Man geht aber davon aus, dass der Wall Shear Stress im wahren Lumen größer ist als im falschen Lumen, da in den Flow-Aufnahmen zu sehen ist, dass das Blutvolumen entsprechend auf das wahre Lumen verteilt ist.

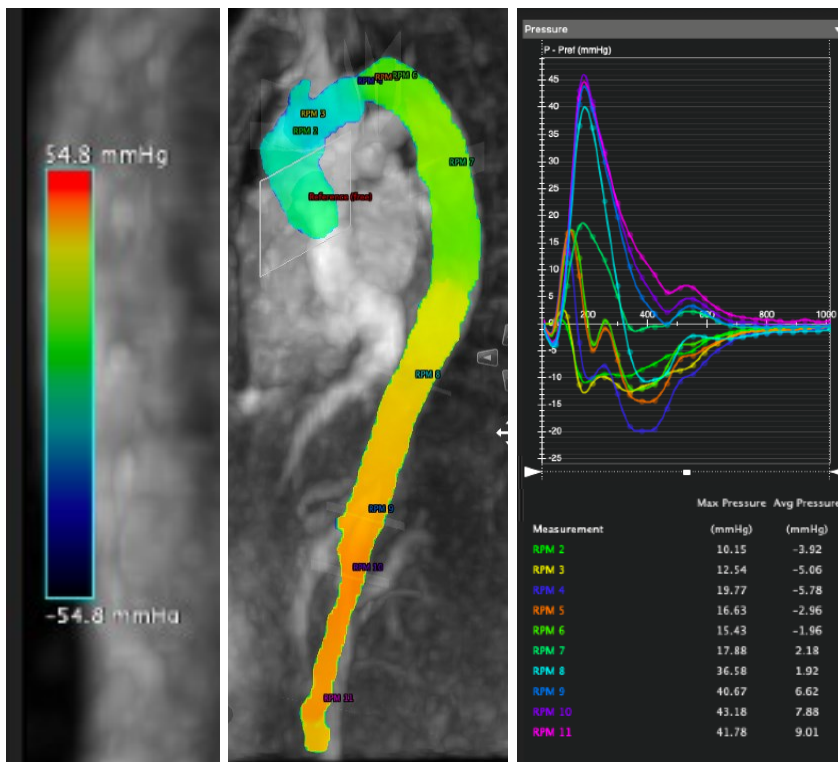


Abbildung 367: 4D-Flow, Blutdruckdifferenz, Pat. 2

Im Gegensatz zu den anderen Parametern wird in der Aufnahme der Blutdruckdifferenz nicht zwischen wahrem und falschem Lumen unterschieden, der Verlauf der Pathologie ist nicht ersichtlich. Im Bereich der Aorta ascendens und des Aortenbogens nimmt der Druck im Vergleich zur Referenzebene ab (bis zur Ebene RPM5, vor der Pathologie). Nach Beginn der Pathologie und in der Aorta descendens hingegen ist der Druck bezogen auf die Referenzebene im positiven Bereich. Es wird eine Druckdifferenz von bis zu 43mmHg (Messebene RPM10) gemessen. Die Aussagekraft über die hämodynamischen Verhältnisse im wahren Lumen bleibt eingeschränkt.

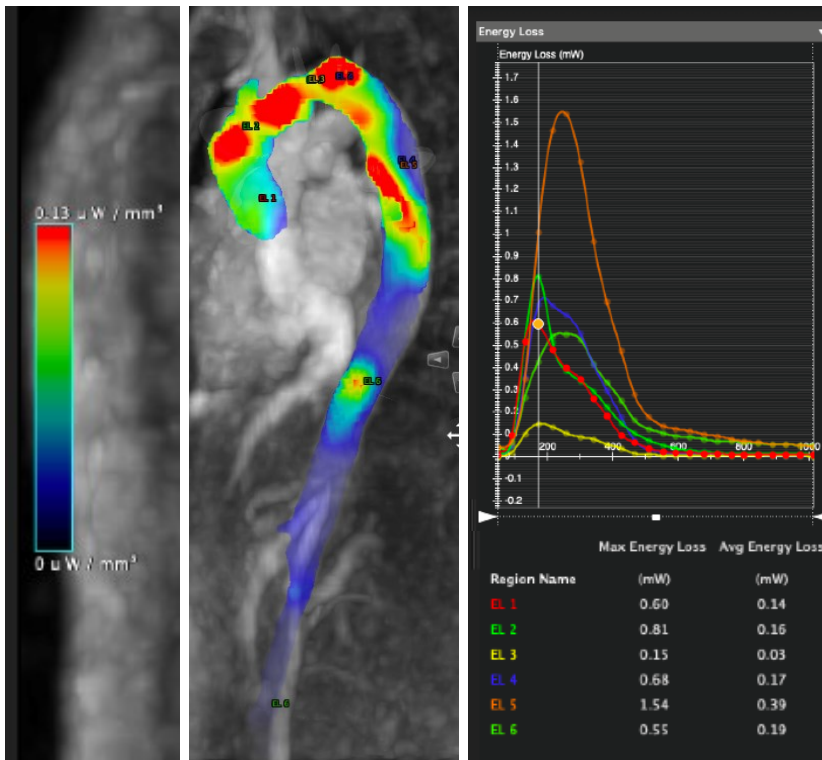


Abbildung 368: 4D-Flow, Energieverlust, Pat. 2

Im groß gewählten Abschnitt E5 der Aorta descendens geht im wahren Lumen der Aorta (rot eingefärbt) die meiste Energie verloren, 1,54mW. Der hämodynamischen Bildgebung entnehmend, geht verhältnismäßig viel Energie im Bereich der Aorta ascendens und beim Beginn der Aortendissektion verloren (rot eingefärbt). In dem Bereich sind die Messabstände deutlich kleiner gewählt und zeichnen Energieverluste von 0,6-0,8mW auf.

Die dritte Patientin leidet an einer Typ A-Dissektion, die mit einem Aortenklappen- und Aorta-ascendens-Ersatz therapiert wurde, und an einer distalen Typ B-Aortendissektion.

Folgende Ebenen wurden für die Auswertung ihrer 4D-Flow-Bildgebung verwendet:

Flow1/WSS1/RPM1	Sinutubulärer Übergang
Flow2/WSS2/RPM2	Größter Durchmesser der Aorta ascendens
Flow3/WSS3/RPM3	Vor dem Abgang des Truncus brachiocephalicus
Flow4/WSS4/RPM4	Nach dem Abgang der A. subclavia sin.
Flow5/WSS5/RPM5	Größter Durchmesser der Aorta descendens (thorakal)
Flow6/WSS6/RPM6	Thorakoabdominaler Übergang der Aorta
Flow7/WSS7/RPM7	Vor den Abgängen der Viszeralarterien
Flow8/WSS8/RPM8	Vor Beginn der Pathologie
Flow9/WSS9/RPM9	Nach den Abgängen der Viszeralarterien Nach Beginn der Pathologie
Flow10/WSS10/RPM10	Größter Durchmesser im Bereich der Pathologie
Flow11/WSS11/RPM11	Vor der abdominellen Bifurcatio aortae

*(Nach kaudal hin kein Ende der Pathologie sichtbar in den Aufnahmen)*

E1	Flow1-Flow2
E2	Flow2-Flow3
E3	Flow3-Flow4
E4	Flow4-Flow7
E5	Flow7-Flow9
E6	Flow9-Flow11

Tabelle 4: Messebenen zur Auswertung der 4D-Flow-Aufnahmen, Patientin 3

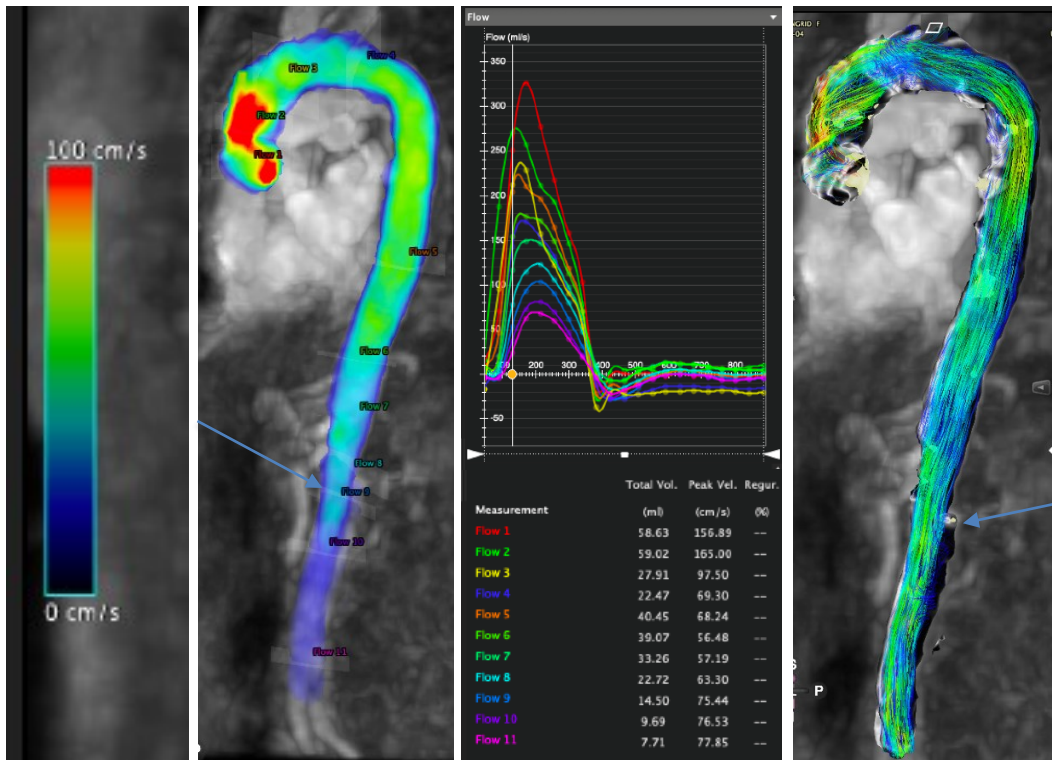


Abbildung 369: 4D-Flow, Flow - Strömungsgeschwindigkeit und Volumenstrom, Pat. 3

Bei dieser Patientin sind sowohl der Volumenstrom mit 330ml/s als auch die Strömungsgeschwindigkeit mit 165cm/s in der Aorta ascendens am höchsten. Bei genauerer Betrachtung des rechten Bildes sieht man die Verwirbelungen des Blutflusses in der Aorta ascendens. Diese könnten auf den Ersatz der Aortenklappe und der Aorta ascendens zurückgeführt werden. Die Strömungsgeschwindigkeit ist bei dieser Patientin nur in der Aorta asc. erhöht, in der Aorta descendens nimmt die Strömungsgeschwindigkeit nicht wie erwartet bei abnehmendem Durchmesser zu. Eine Vermutung dafür könnte die abnehmende Aufnahmequalität in der distalen Aorta desc. sein, die sich anhand der linken Aufnahme vermuten lässt. Auch der Beginn der distalen Typ B Aortendissektion ist schwer erkennbar (Pfeile). In der rechten Aufnahme ist es etwas besser sichtbar. Das falsche Lumen konnte mithilfe der Centerline leider nicht mit in den zu analysierenden Bereich einbezogen werden. Somit kann das falsche Lumen der distalen Aortendissektion nicht mitbeurteilt werden. Andererseits gut sichtbar sind die Strömungslinien, die teilweise als Entry ins falsche Lumen hineinziehen (Pfeil im rechten Bild).

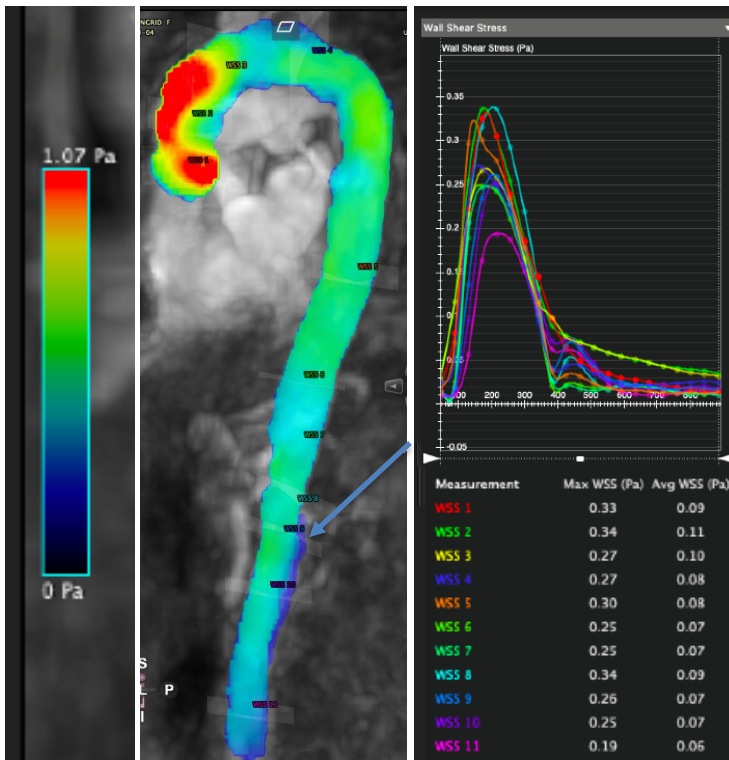


Abbildung 370: 4D-Flow, Wall Shear Stress, Pat. 3

Anhand der Messwerte ist nicht nur der im Bild rot eingefärbte Bereich der Aorta ascendens von einem hohen wall shear stress betroffen, sondern auch die Messebene WSS8 in der Aorta descendens. Der Grund für den WSS-Anstieg in der Aorta descendens ist das an der Stelle eingeeengte Lumen und der Übergang zur Typ B-Dissektion. Der Grund für die hohe Wandscherspannung in der Aorta ascendens ist vermutlich der veränderte Blutfluss mit Verwirbelungen aufgrund des Ersatzes der Aortenklappe und der Aorta ascendens. Vor allem der Übergang von der ersetzten Aorta ascendens zur körpereigenen Aorta ascendens stellt eine Schwachstelle da, die im Bezug auf den wall shear stress definitiv überwacht werden sollte.

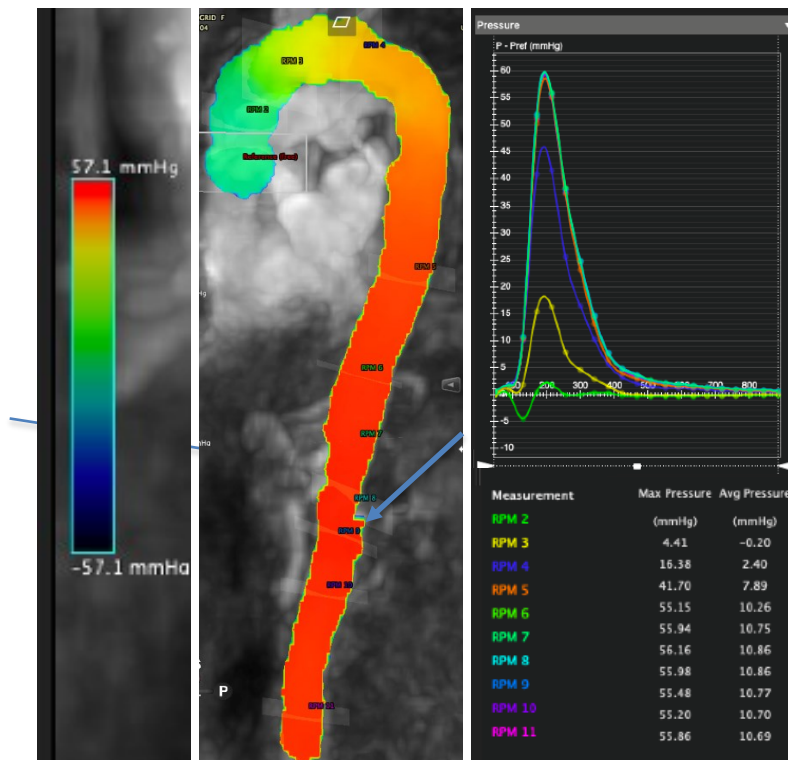


Abbildung 371: 4D-Flow, Blutdruckdifferenz, Pat. 3

Der Druck in der Aorta descendens ist annähernd gleichbleibend, von der Messebene RPM5 bis RPM11 liegen Druckgradienten von ungefähr 55-56mmHg vor. Dafür ist vermutlich der gleichbleibend kleine Durchmesser verantwortlich. In der Aufnahme wird im Bereich der distalen Aortendissektion erneut kein Unterschied bei der Darstellung des wahren und falschen Lumens gemacht. Der Bereich des falschen Lumens ist aber in die Messung inbegriffen und auch die Kante am Beginn der Aortendissektion ist gut sichtbar (Pfeil).

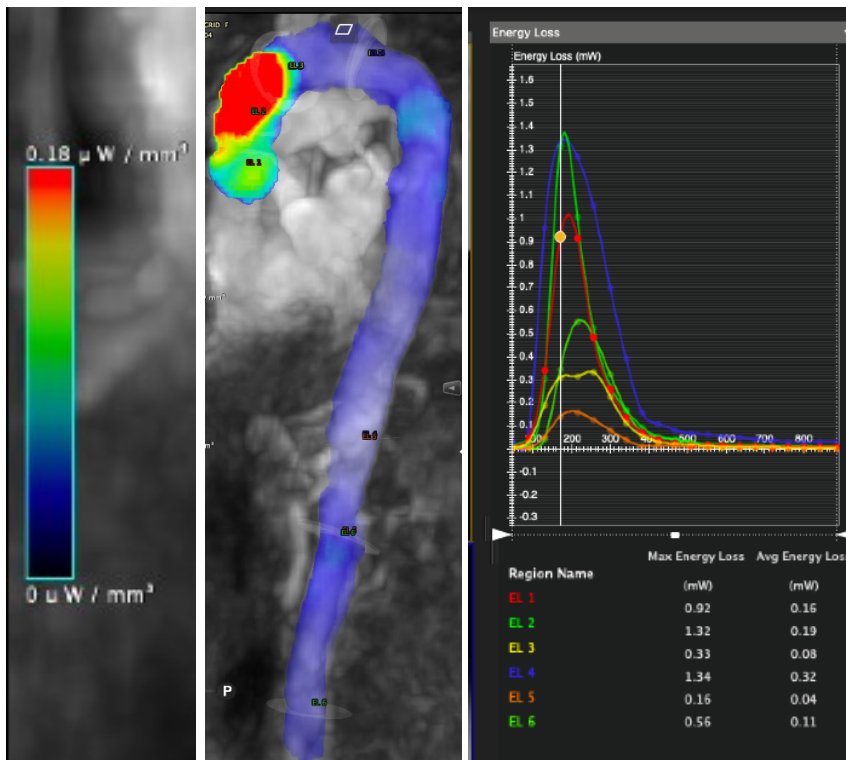


Abbildung 372: 4D-Flow, Energieverlust, Pat. 3

In der Bildgebung erscheint der Abschnitt E2 in der Aorta ascendens mit einem Energieverlust von 1,34mW als die Zone mit dem größten Energieverlust. Auch in der Aorta descendens im Abschnitt E4, der sich deutlich länger erstreckt, kommt es zu einem Energieverlust von 1,34mW. Der größere Energieverlust pro cm ist also definitiv im Abschnitt E2 in der Aorta ascendens lokalisiert.

Aufgrund eines Speicherfehlers wurden für den folgenden vierten Patienten zwei 4D-flow-Akquisitionen durchgeführt. Die zunächst falsch abgespeicherte Akquisition konnte wiederhergestellt werden, sodass nun zwei 4D-flow-Aufnahmen von demselben Patienten vorliegen, deren Ergebnisse gut verglichen werden können. Es liegen nur wenige Minuten zwischen den beiden Aufnahmen.

Der vierte Patient leidet nach wie vor an einer Dissektion des Typs A mit Zustand nach therapeutischer Versorgung mit einem Aorta ascendens- und einem Aortenklappenersatz. Für die Auswertung der 4D-flow-Bilder wurden in diesem Fall folgende Messebenen festgelegt:

Aufnahme 1:

Flow1/WSS1/RPM1	Sinutubulärer Übergang (Artefakt wegen AKE!)
Flow2/WSS2/RPM2	Größter Durchmesser der Aorta ascendens
Flow3/WSS3/	Vor dem Abgang des Truncus brachiocephalicus Vor Beginn der Pathologie
Flow4/WSS4/RPM4	Nach dem Abgang der A. subclavia sin. Nach Beginn der Pathologie
Flow5/WSS5/RPM5	Größter Durchmesser der Aorta descendens (thorakal) Größter Durchmesser im Bereich der Pathologie
Flow6/WSS6/RPM6	Thorakoabdominaler Übergang der Aorta
Flow7/WSS7/RPM7	Vor den Abgängen der Viszeralarterien Vor Ende der Pathologie
Flow8/WSS8/RPM8	Nach den Abgängen der Viszeralarterien Nach Ende der Pathologie
Flow9/WSS9/RPM9	Vor der abdominellen Bifurcatio aortae

E1	Flow1-Flow2
E2	Flow1-Flow3
E3	Flow1-Flow4
E4	Flow1-Flow5
E5	Flow1-Flow7
E6	Flow1-Flow9

Tabelle 5: Messebenen zur Auswertung der 4D-Flow-Aufnahmen, Patient 4, Aufnahme 1

Aufnahme 2:

Flow1/WSS1/RPM1	Sinutubulärer Übergang (Artefakt wegen AKE!)
Flow2/WSS2/RPM2	Größter Durchmesser der Aorta ascendens
Flow3/WSS3/RPM3	Vor dem Abgang des Truncus brachiocephalicus Vor Beginn der Pathologie
Flow4/WSS4/RPM4	Nach Beginn der Pathologie
Flow5/WSS5/RPM5	Nach dem Abgang der A. subclavia sin.
Flow6/WSS6/RPM6	Größter Durchmesser der Aorta descendens (thorakal) Größter Durchmesser im Bereich der Pathologie
Flow7/WSS7/RPM7	Thorakoabdominaler Übergang der Aorta
Flow8/WSS8/RPM8	Vor den Abgängen der Viszeralarterien Vor Ende der Pathologie
Flow9/WSS9/RPM9	Nach den Abgängen der Viszeralarterien Nach Ende der Pathologie
Flow10/WSS10/RPM10	Vor der abdominalen Bifurcatio aortae

*(Nach kaudal hin kein Ende der Pathologie sichtbar in den Aufnahmen)*

E1	Flow1-Flow2
E2	Flow2-Flow3
E3	Flow3-Flow5
E4	Flow5-Flow6
E5	Flow6-Flow7
E6	Flow7-Flow10

Tabelle 6: Messebenen zur Auswertung der 4D-Flow-Aufnahmen, Patient 4, Aufnahme 2

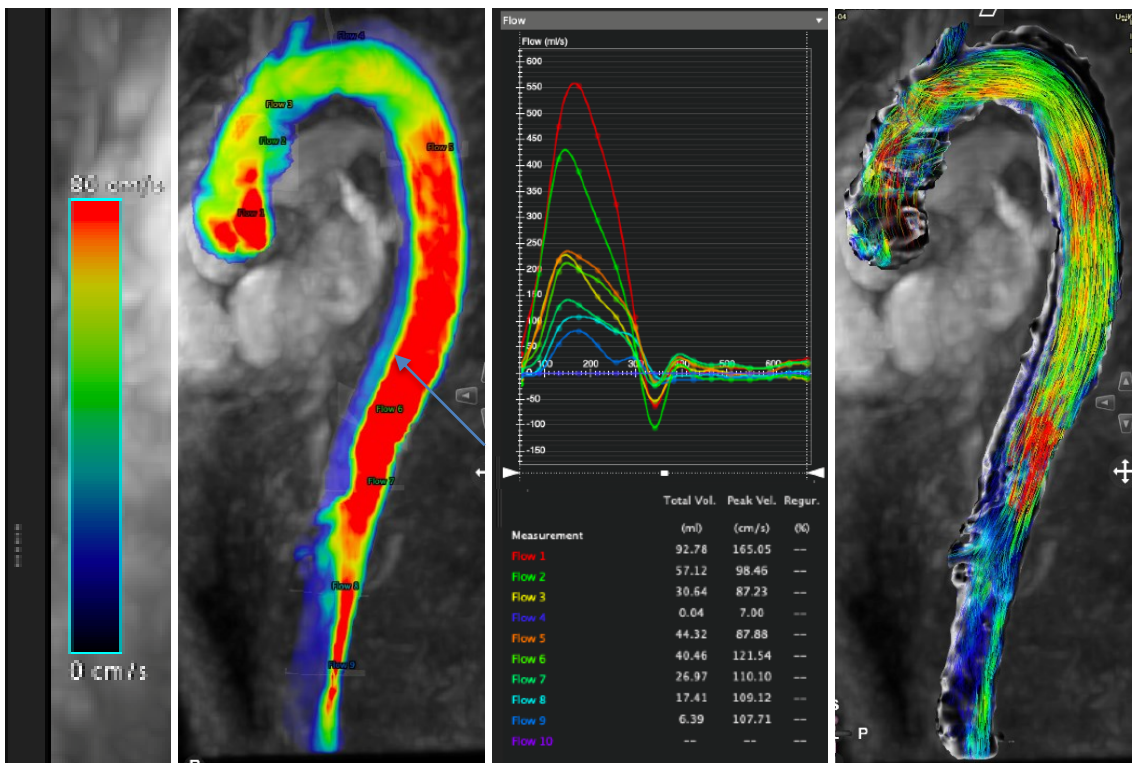


Abbildung 373: 4D-Flow, Flow - Strömungsgeschwindigkeit und Volumenstrom, Pat. 4, Aufnahme 1

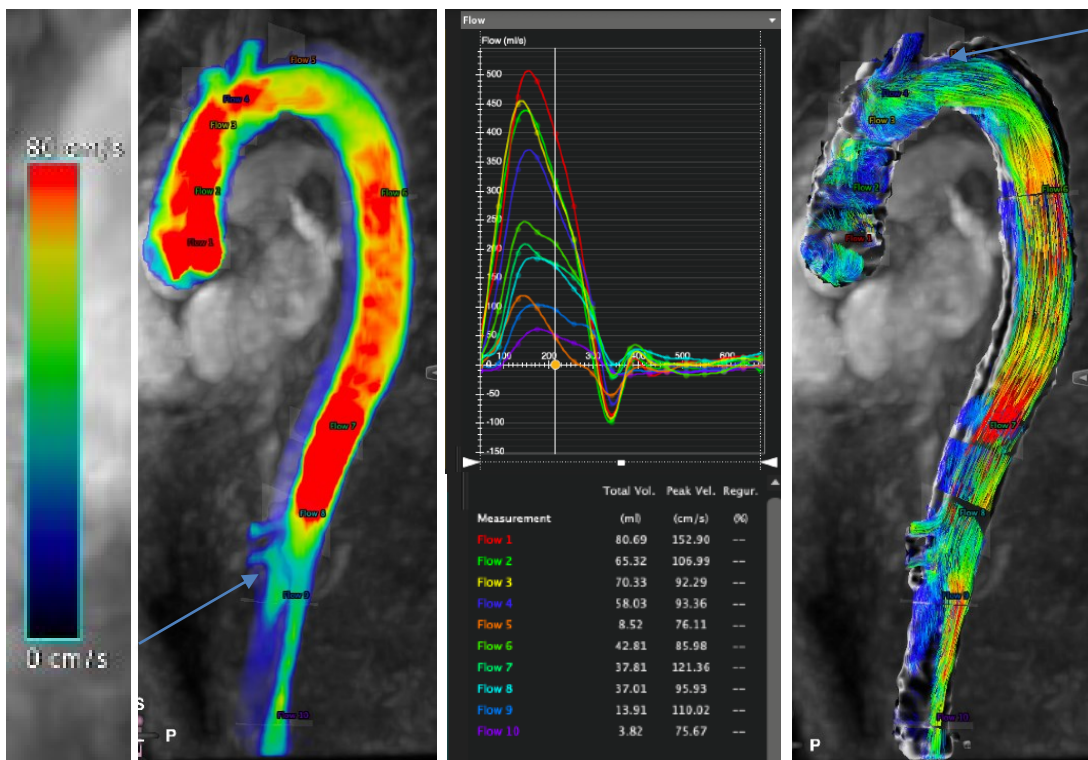


Abbildung 374: 4D-Flow, Flow - Strömungsgeschwindigkeit und Volumenstrom, Pat. 4, Aufnahme 2

Der Volumenstrom ist in der Aorta ascendens mit einem Peak von 500-550ml/s in der Ebene Flow 1 am höchsten. Auch in den Ebenen Flow 2, 3 und 4 ist der Volumenstrom noch hoch, nach den Gefäßabgängen aber sinkt er stark ab.

Die Strömungsgeschwindigkeit ist sowohl in der Aorta ascendens als auch in der Aorta descendens im wahren Lumen erhöht. In der Ebene Flow 1 liegt die Strömungsgeschwindigkeit bei 152-165 cm/s je nach SPACE-MRA-Aufnahme. Die Dissektion beginnt nach Abgang der Supraaortalen (oberer Pfeil) und hat die höhere Strömungsgeschwindigkeit im wahren Lumen. In der Aufnahme 2 liegt der Peak in der Ebene Flow 7 bei 121cm/s und in der Ebene Flow 9 bei 110cm/s. Im falschen Lumen hingegen ist der Flow blau also mit deutlich niedrigerer Strömungsgeschwindigkeit dargestellt. Die Bildgebung und die Strömungslinien lassen vermuten, dass eine der abgehenden Viszeralarterien aus dem falschen Lumen entspringt (unterer Pfeil). In der Aorta ascendens sind Verwirbelungen des Blutflusses erkennbar, die vermutlich durch den Aortenklappen- und Aorta ascendens-Ersatz bedingt sind (siehe rechte Aufnahme).

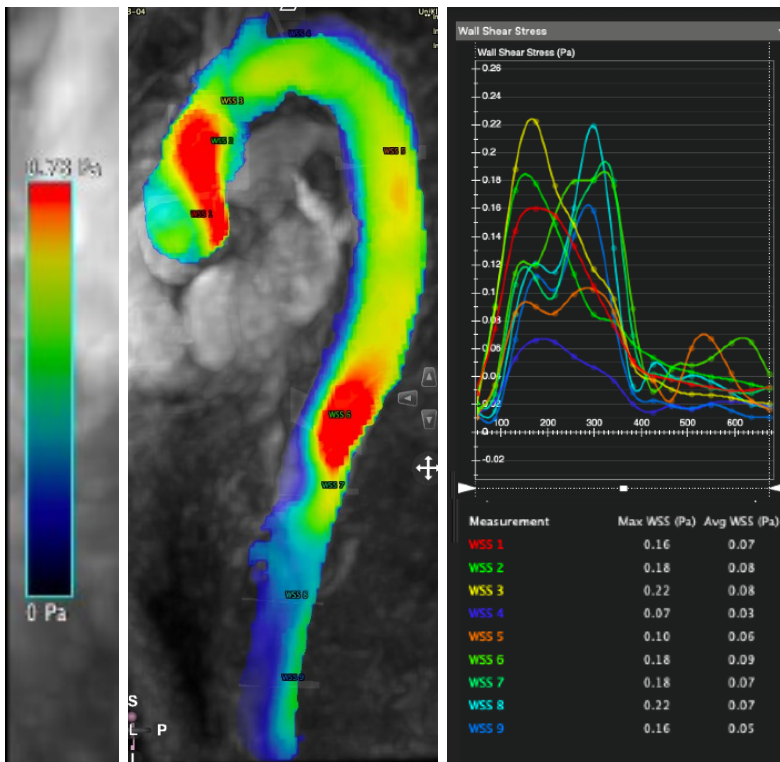


Abbildung 375: 4D-Flow, Wall Shear Stress, Pat. 4, Aufnahme 1

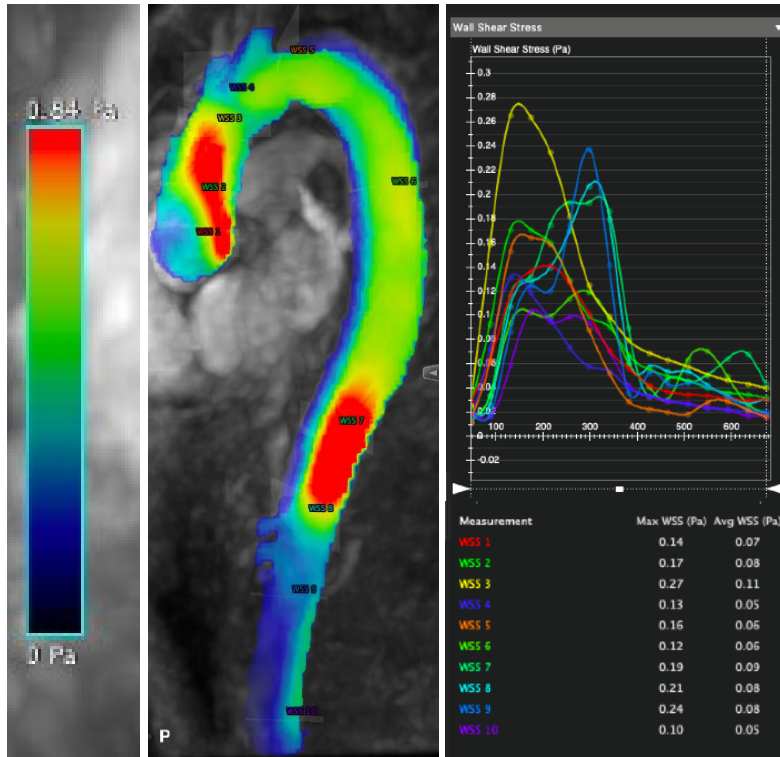


Abbildung 376: 4D-Flow, Wall Shear Stress, Pat. 4, Aufnahme 2

Die Aufnahmen zeigen auf den ersten Blick die gleichen Ergebnisse. In Beiden erscheint der wall shear stress in der Aorta ascendens und in der Aorta descendens auf Höhe der WSS6 bzw. WSS7 Ebene als erhöht. Für WSS 3 liegt der höchste Peak mit 0,22Pa bzw. 0,27Pa vor. Für WSS 7, 8 und 9 liegen die Werte zwischen 0,18 und 0,24Pa. Diese Wall Shear Stress-Werte gehen hauptsächlich vom wahren Lumen aus. Im falschen Lumen ist der WSS blau dargestellt und somit niedrig. Die hohe Wandscherspannung in der Aorta ascendens ist vermutlich dieselbe wie bei Patientin 3, da die Verwirbelungen im Blutfluss aufgrund des Aortenklappen- und Aorta ascendens-Ersatz zu einer erhöhten Wandscherspannung führen. Der Übergang der ersetzten Aorta ascendens zur körpereigenen Aorta ascendens ist eine Schwachstelle, die durch die Verwirbelungen des Blutflusses besonders gefährdet ist und bei den Auswertungen des Wall Shear Stress genau betrachtet werden sollte.

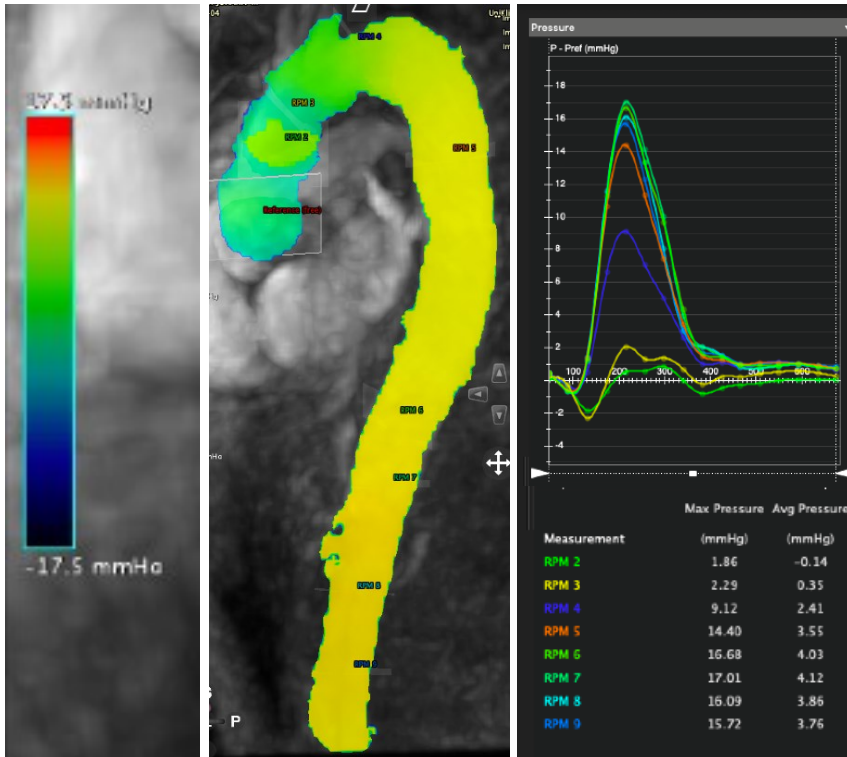


Abbildung 377: 4D-Flow, Blutdruckdifferenz, Pat. 4, Aufnahme 1

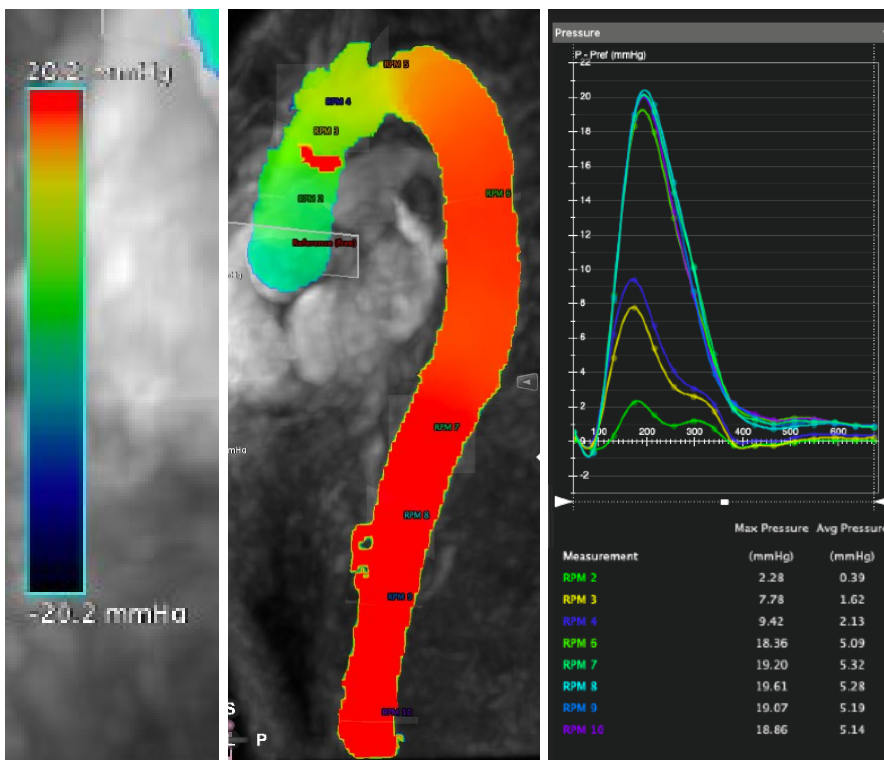


Abbildung 378: 4D-Flow, Blutdruckdifferenz, Pat. 4, Aufnahme 2

In beiden Aufnahmen wird klar, dass unabhängig von wahren oder falschem Lumen die Druckdifferenz zur Referenzebene in der Aorta descendens am höchsten ist. Für die Ebenen RPM 6-10 liegen die Werte zwischen 16 und 20mmHg Differenz zur Referenz in der Aorta ascendens. Der Grund für den Druckanstieg ist der kleiner werdende Durchmesser, vor allem der des wahren Lumens, durch den der Großteil des Blutvolumens durchfließt.

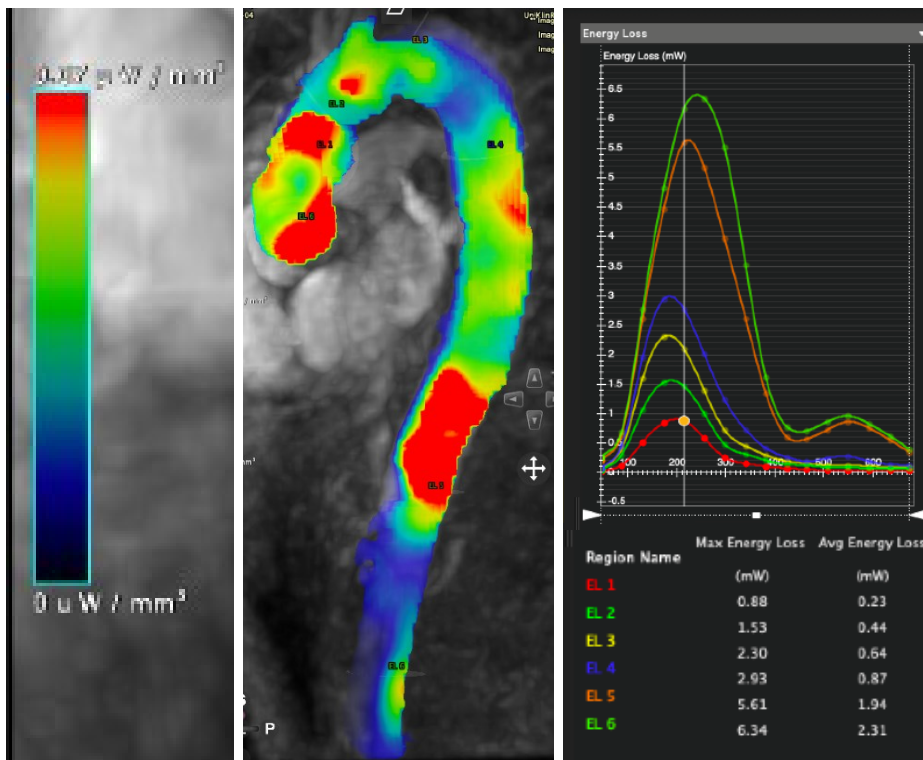


Abbildung 379: 4D-Flow, Energieverlust, Pat. 4, Aufnahme 1

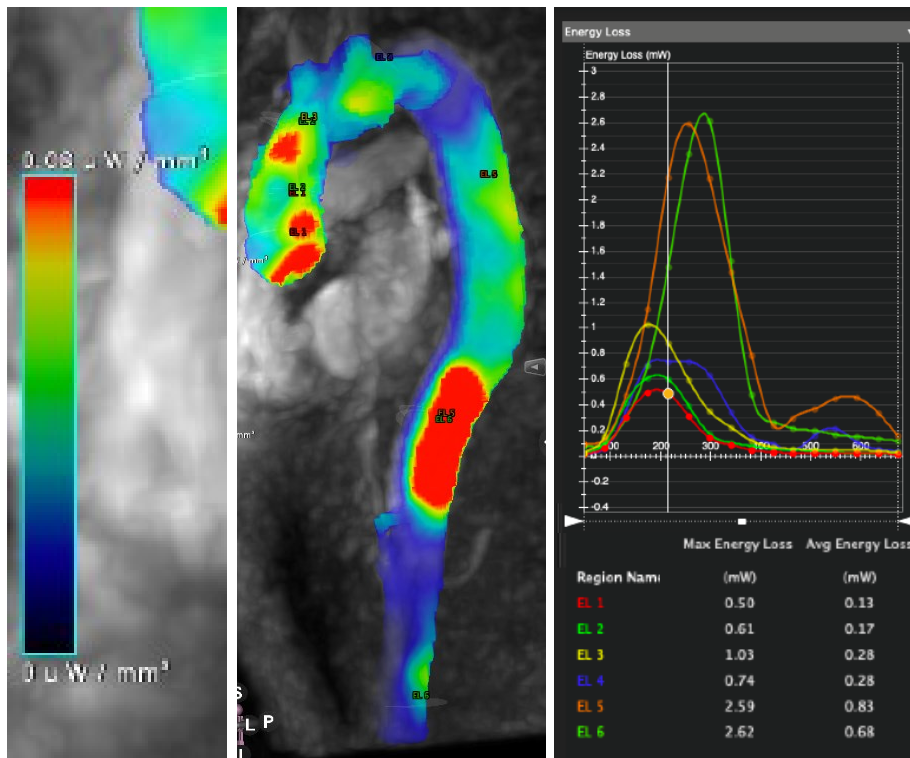


Abbildung 380: 4D-Flow, Energieverlust, Pat. 4, Aufnahme 2

Auch der Energieverlust zeigt sich in beiden Aufnahmen mit ähnlicher Einfärbung. Vor allem die Bereiche 4 und 5 (Aufnahme 2) in der Aorta descendens beinhalten den rot eingefärbten Abschnitt der Aorta und haben damit Energieverlustwerte von 2,5-2,6mW. In der ersten Aufnahme wurde der Energieverlust nicht zwischen den Messebenen bestimmt, sondern immer zu der Referenzebene, die direkt distal der Aortenklappe gelegt wurde. E1 war somit der kleinste Bereich und E6 der größte vom Anfang der Aorta bis zum distalen Ende der Aorta. Der Bereich, der die gesamte Aorta abdeckt weist schließlich einen Energieverlust von 6,34mW vor.

Die fünfte Patientin leidet an einer Ektasie der Aorta ascendens, die wegen möglicher Größenzunahme in regelmäßigen Abständen kontrolliert werden sollte. Sie wird derzeit weiterhin konservativ behandelt, da der Grenzwert für eine Operation noch nicht überschritten ist. Für die Untersuchung wurden folgende Messebenen ausgewählt, die ähnlich zu denen der Probandinnen sind:

Flow1/WSS1/RPM1	Sinutubulärer Übergang
Flow2/WSS2/RPM2	Größter Durchmesser der Aorta ascendens Größter Durchmesser im Bereich der Pathologie
Flow3/WSS3/RPM3	Vor dem Abgang des Truncus brachiocephalicus
Flow4/WSS4/RPM4	Nach dem Abgang der A. subclavia sin.
Flow5/WSS5/RPM5	Größter Durchmesser der Aorta descendens (thorakal)
Flow6/WSS6/RPM6	Thorakoabdominaler Übergang der Aorta
Flow7/WSS7/RPM7	Vor den Abgängen der Viszeralarterien
Flow8/WSS8/RPM8	Nach den Abgängen der Viszeralarterien

E1	Flow1-Flow3
E2	Flow3-Flow4
E3	Flow4-Flow5
E4	Flow5-Flow6
E5	Flow6-Flow7
E6	Flow7-Flow8

Tabelle 7: Messebenen zur Auswertung der 4D-Flow-Aufnahmen, Patientin 5

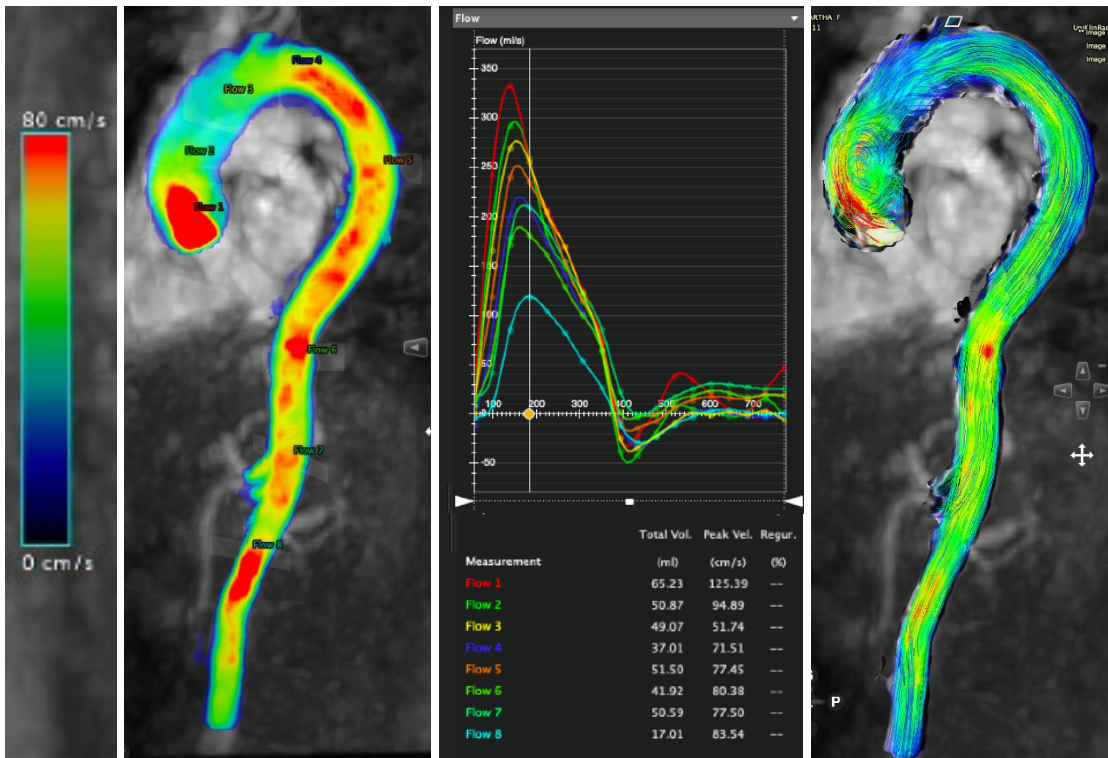


Abbildung 381: 4D-Flow, Flow - Strömungsgeschwindigkeit und Volumenstrom, Pat. 5

Der Volumenstrom ist in der Aorta ascendens am höchsten (330ml/s) und nimmt dann kontinuierlich immer weiter ab. Vor allem nach Abgang der Supraaortalen (Flow 4) und Abgang der Viszeralarterien (Flow 8) sinken die Peaks des Volumenstroms stärker ab.

Die Strömungsgeschwindigkeit ist wie bei den anderen Probandinnen und PatientInnen direkt nach der Aortenklappe mit 125cm/s erhöht und dann auch zentral im Lumen des Aortenbogens und der Aorta descendens, sobald der Durchmesser nach der Aortenektasie deutlich kleiner wird. Dann liegen die Werte zwischen 70 und 85cm/s.

Durch die Ektasie der Aorta ascendens entstehen Verwirbelungen des Blutflusses nach der Aortenklappe, diese sind in der rechten Aufnahme gut erkennbar.

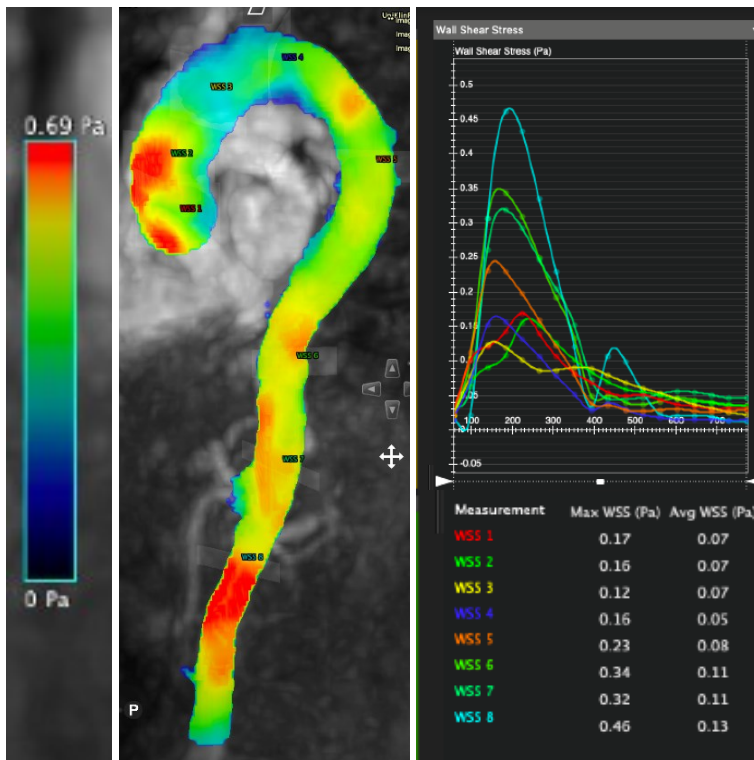


Abbildung 382: 4D-Flow, Wall Shear Stress, Pat. 5

Die höchste Wandscherspannung liegt mit 0,46Pa in der letzten Ebene WSS8 vor. Bereits bei den Aufnahmen der Probandinnen wurden die erhöhten Wall shear stress-Werte im distalen Bereich der Aorta descendens mit dem nach distal abnehmenden Aortendurchmesser erklärt. Diese Erklärung trifft auch bei den Aufnahmen und Werten dieser Patientin zu. Mit abnehmendem Durchmesser und zunehmender Strömungsgeschwindigkeit steigt die Wandscherspannung. Da nach der Aortenklappe eine hohe Strömungsgeschwindigkeit vorliegt und durch die Aortenektasie Verwirbelungen und Turbulenzen des Blutflusses entstehen, ist die farblich markierte Region mit erhöhtem Wall shear stress in der Aorta ascendens nachvollziehbar.

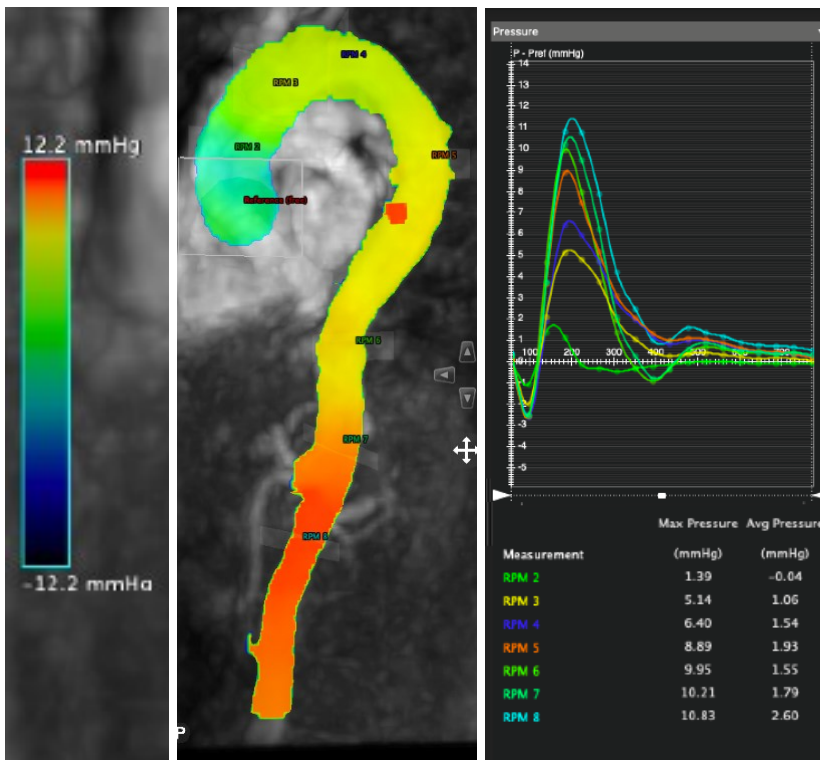


Abbildung 383: 4D-Flow, Blutdruckdifferenz, Pat. 5

Durch die Abnahme des Aortendurchmessers in der absteigenden Aorta nimmt der Druck beziehungsweise die Druckdifferenz zur Referenzebene stark zu. Vor allem in den distal gelegenen Ebenen RPM 7 und 8 liegt eine Druckdifferenz von 10,2-10,8mmHg im Vergleich zum Aortenbeginn vor. In der Aorta ascendens, die aufgrund der Aortenektasie einen größeren Durchmesser hat, liegt nur eine minimale Druckzunahme von 1,4mmHg zur Referenz vor.

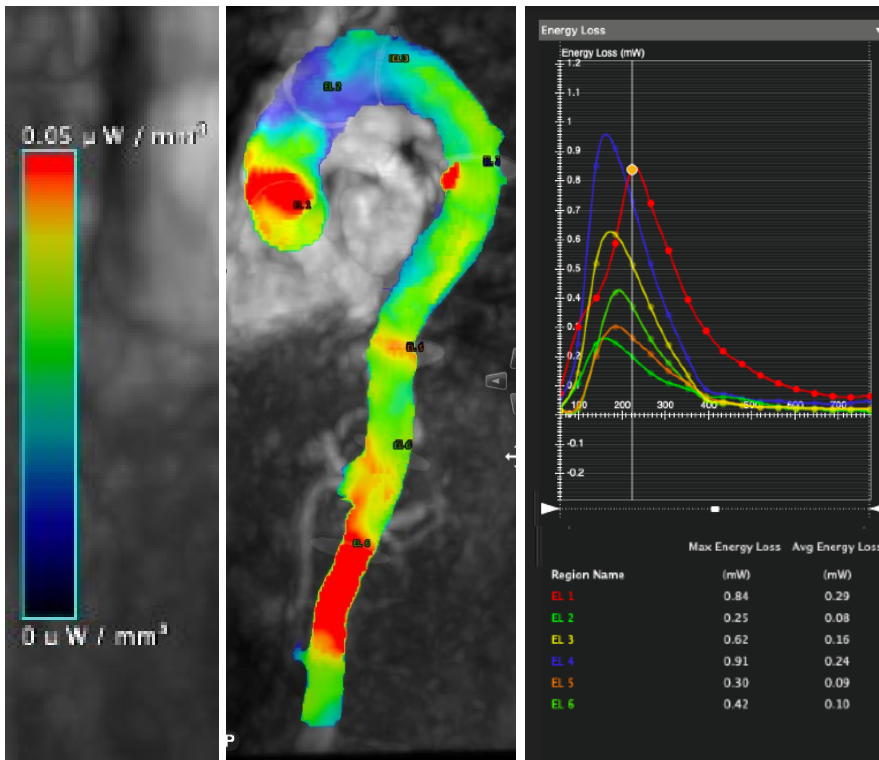


Abbildung 384: 4D-Flow, Energieverlust, Pat. 5

Ein hoher Energieverlust zeigt sich zum einen in der Region der Pathologie, der Aortenektasie, mit 0,84mW und zum anderen in der Region der proximalen Aorta descendens mit 0,91mW. Auch nach dem letzten Abschnitt E6 ist ein rot eingefärbter Bereich der Aorta descendens zu sehen, der einen weiteren hohen Energieverlust vermuten lässt, aber nicht mehr im gemessenen Bereich liegt.

Eine Patientin, die bereits mehrere Operationen hinter sich hat, bei denen bei Zustand nach Typ A Dissektion sowohl ein Aorta ascendens - Ersatz als auch eine Stentgrafteinsetzung durchgeführt wurde, ist Patientin Nummer 6. Da auch in diesen Aufnahmen keine Pathologie mehr sichtbar ist, ähneln die Messebenen denen der Probandinnen:

Flow1/WSS1/RPM1	Sinutubulärer Übergang
Flow2/WSS2/RPM2	Größter Durchmesser der Aorta ascendens Vor dem Abgang des Truncus brachiocephalicus
Flow3/WSS3/RPM3	Nach dem Abgang der A. subclavia sin.
Flow4/WSS4/RPM4	Relative Engstelle
Flow5/WSS5/RPM5	Größter Durchmesser der Aorta descendens (thorakal) Größter Durchmesser im Bereich der Prothese
Flow6/WSS6/RPM6	Thorakoabdominaler Übergang der Aorta
Flow7/WSS7/RPM7	Vor den Abgängen der Viszeralarterien
Flow8/WSS8/RPM8	Nach den Abgängen der Viszeralarterien
Flow9/WSS9/RPM9	Abdominelle Aorta in der chirurgischen Prothese Vor der abdominalen Bifurcatio aortae

E1	Flow1-Flow2
E2	Flow2-Flow3
E3	Flow3-Flow4
E4	Flow4-Flow6
E5	Flow6-Flow8
E6	Flow8-Flow9

Tabelle 8: Messebenen zur Auswertung der 4D-Flow-Aufnahmen, Patient 6

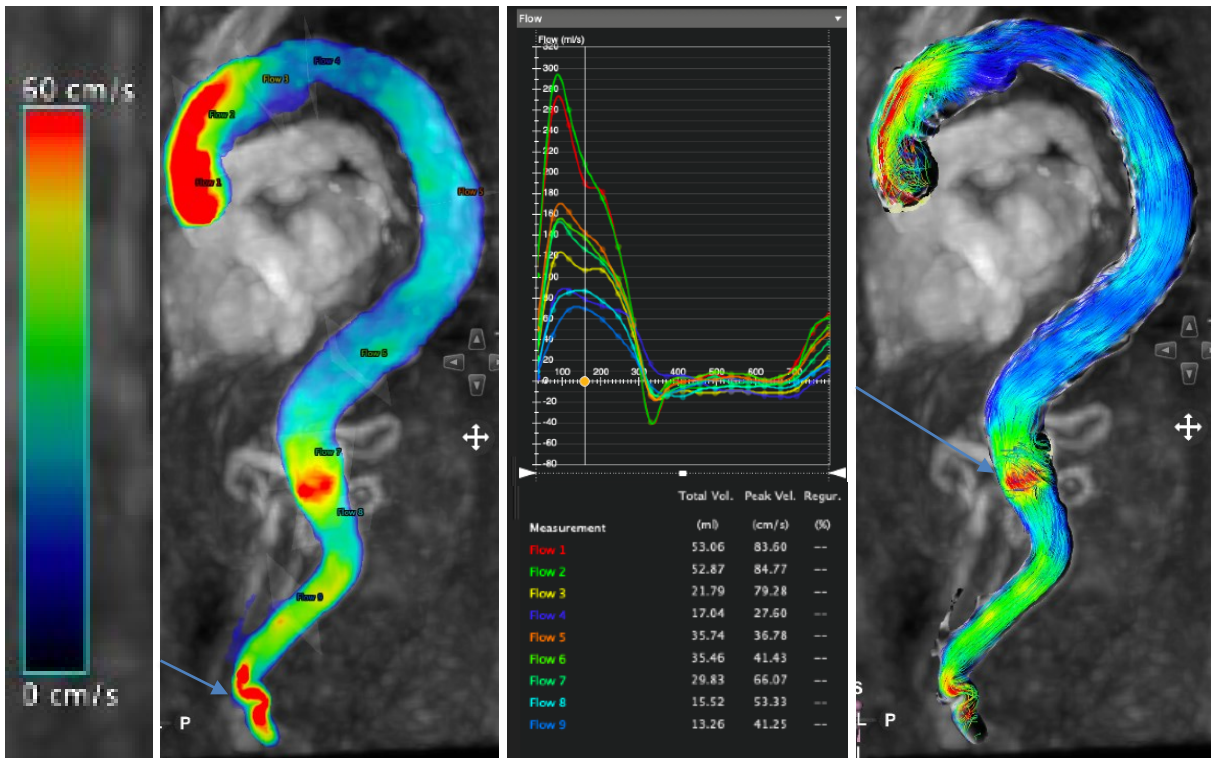


Abbildung 385: 4D-Flow, Flow - Strömungsgeschwindigkeit und Volumenstrom, Pat. 6

Der Volumenstrom ist wie bei den anderen Untersuchten auch vor den Gefäßabgängen am höchsten, 270-300ml/s. Der gemessene Volumenstrom in der Ebene Flow3 ist um die Hälfte niedriger als der Volumenstrom-Wert der Ebene Flow2 und passt somit nicht zu der Theorie, mit der man die gemessenen Werte versucht zu erklären, vermutlich handelt es sich um einen Messfehler. Die Strömungsgeschwindigkeit ist direkt nach der Aortenklappe mit 84cm/s am höchsten. Aber auch in der Aorta descendens ist die Strömungsgeschwindigkeit vor allem ganz distal durch die Durchmesserabnahme erhöht (Pfeil).

Der Blutfluss in der Aorta ascendens ist durch den Ersatz von Aortenklappe und Aorta ascendens von Verwirbelungen und Turbulenzen geprägt. Auch in der distalen Aorta descendens sind Blutfluss-Turbulenzen an den Übergängen zwischen Stent und natürlichem Aortenlumen zu sehen (Pfeil rechtes Bild)

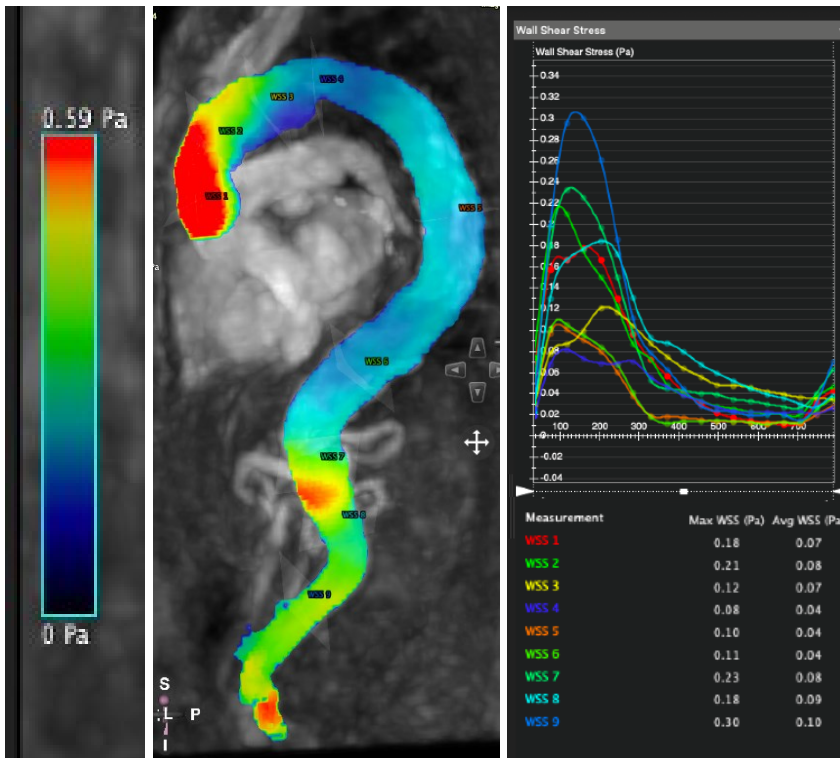


Abbildung 386: 4D-Flow, Wall Shear Stress, Pat. 6

Wie bei den anderen PatientInnen mit Aorta ascendens Ersatz auch, ist die Wandscherspannung nach der Aortenklappe durch die erhöhte Strömungsgeschwindigkeit und die gegen die Aortenwand gerichteten Turbulenzen mit 0,21Pa erhöht. Der höchste WSS-Wert liegt in der distalen Aorta descendens, da mit abnehmendem Durchmesser und zunehmender Strömungsgeschwindigkeit der Wall shear stress zunimmt, dort wird ein Wert von 0,23Pa in der Ebene WSS7 gemessen. Im Aortenbogen und in der proximalen Aorta descendens sind die Wandscherspannungen sehr niedrig. Da dort Schwachstellen durch den Übergang von Aorta ascendens-Ersatz und Aortenstentgraft vorliegen, ist dies ein recht guter Befund. Vor allem in der Messebene WSS4 liegt durch den Aorta ascendens-Ersatz und den Aortenstentgraft eine Engstelle oder Kante im Aortenverlauf vor, die es zu beobachten gilt.

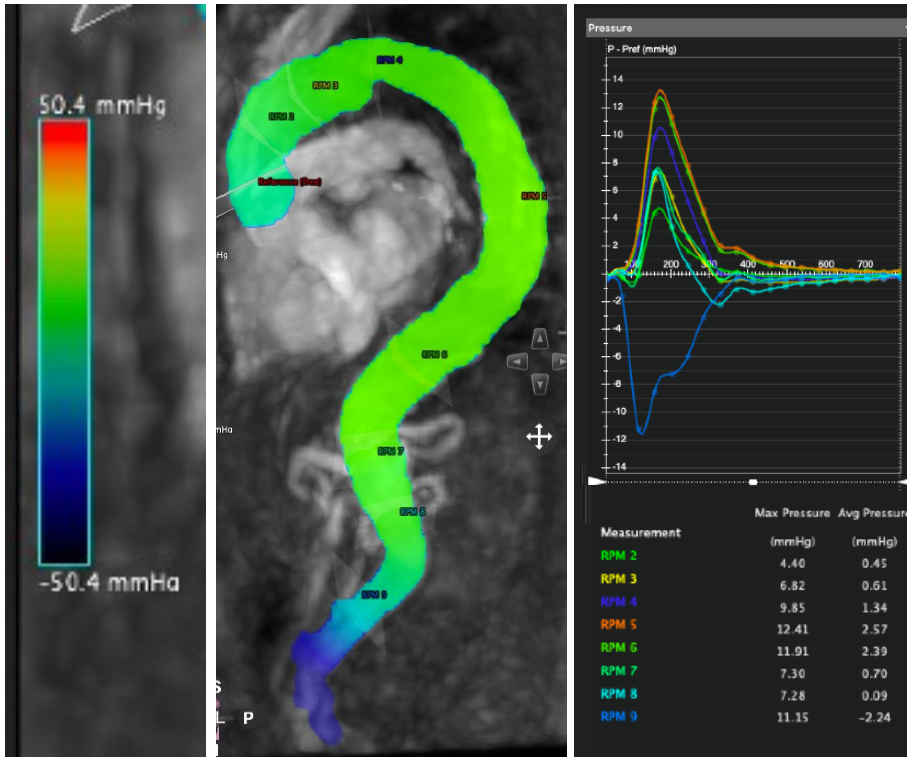


Abbildung 387: 4D-Flow, Blutdruckdifferenz, Pat. 6

Auf den ersten Blick wird ersichtlich, dass distal in der Aorta ein negativer Druck vorliegt. Dies scheint ein Messfehler zu sein, da in diesem Abschnitt eher ein massiver Anstieg des Drucks zu erwarten ist. Wie bereits erwähnt treten im distalen Bereich der Aorta immer wieder Akquisitionsprobleme auf, die die Aorta auch schwer von der Umgebung abgrenzbar machen und somit die Werte von der Realität abweichen lassen. In der Liste an Messwerten ist die höchste Druckdifferenz in den Ebenen RPM 5 und 6 zu finden. Diese befinden sich in der proximalen und mittleren Aorta descendens und zeigen Druckdifferenzwerte von 12,41mmHg und 11,91mmHg auf.

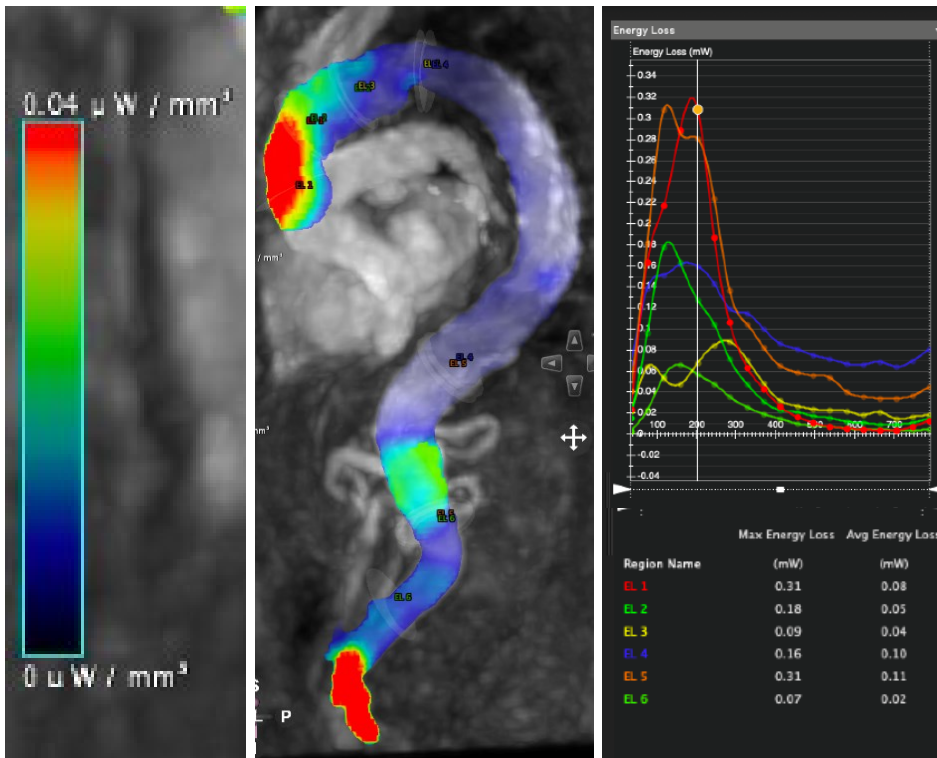


Abbildung 388: 4D-Flow, Energieverlust, Pat. 6

Die größten Energieverluste treten in der Aorta ascendens (E1), der mittleren Aorta descendens (E5) und der distalen Aorta descendens auf. Für die Abschnitte E1 und E5 liegt jeweils ein Energieverlust von 0,31mW vor. Für den letzten Abschnitt der distalen Aorta descendens, der rot eingefärbt ist, gibt es keinen Messwert, da er nicht mehr im Messbereich liegt.

Der siebte und damit letzte Patient unserer Studie leidet an einer Typ B Dissektion der Aorta thoracalis und abdominalis und wird konservativ behandelt.

Die Messebenen lauten wie folgt:

Flow1/WSS1/RPM1	Sinutubulärer Übergang
Flow2/WSS2/RPM2	Größter Durchmesser der Aorta ascendens Vor dem Abgang des Truncus brachiocephalicus
Flow3/WSS3/RPM3	Vor Beginn der Pathologie
Flow4/WSS4/RPM4	Nach dem Abgang der A. subclavia sin. Nach Beginn der Pathologie Größter Durchmesser im Bereich der Pathologie
Flow5/WSS5/RPM5	Größter Durchmesser im Bereich des Wandhämatoms
Flow6/WSS6/RPM6	Größter Durchmesser der Aorta descendens (thorakal)
Flow7/WSS7/RPM7	Thorakoabdominaler Übergang der Aorta
Flow8/WSS8/RPM8	Vor den Abgängen der Viszeralarterien
Flow9/WSS9/RPM9	Nach den Abgängen der Viszeralarterien
Flow10/WSS10/RPM10	Vor der abdominalen Bifurcatio aortae

*(Nach kaudal hin kein Ende der Pathologie sichtbar in den Aufnahmen)*

E1	Flow1-Flow2
E2	Flow2-Flow3
E3	Flow3-Flow4
E4	Flow4-Flow6
E5	Flow6-Flow7
E6	Flow7-Flow10

Tabelle 9: Messebenen zur Auswertung der 4D-Flow-Aufnahmen, Patient 7

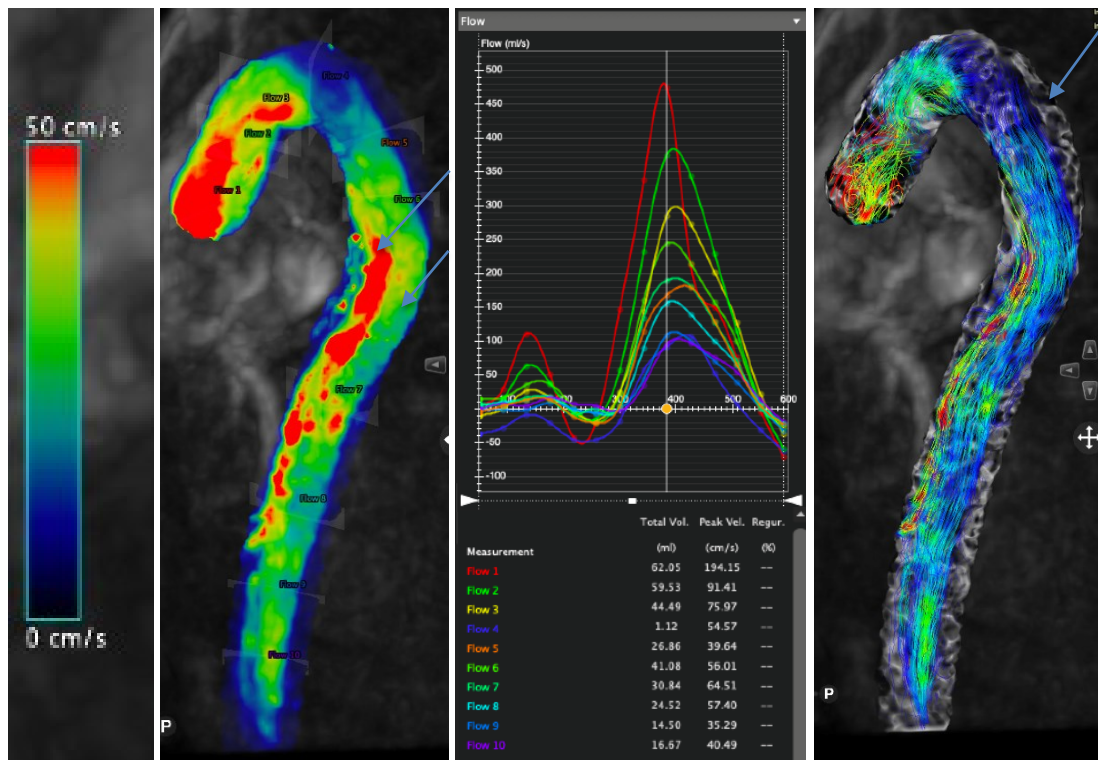


Abbildung 389: 4D-Flow, Flow - Strömungsgeschwindigkeit und Volumenstrom, Pat. 7

In der linken Aufnahme sind wahres Lumen (oberer Pfeil) und falsches Lumen (unterer Pfeil) markiert. In der rechten Aufnahme ist das Wandhämatom zu sehen (Pfeil). Dies ist allerdings nicht mit frischem Blut gefüllt, somit ist kein Flow wie im falschen Lumen zu sehen. Anders als bei den anderen PatientInnen mit Aortendissektion wird schnell ersichtlich, dass bei diesem Patienten auch im falschen Lumen das Blut mit erhöhter Strömungsgeschwindigkeit fließt. Zwar ist die Strömungsgeschwindigkeit geringer als die im wahren Lumen, aber dennoch ein eindeutiges Zeichen dafür, dass das falsche Lumen noch gut und stark per Entry durchblutet ist. Dies bedeutet eine größere Schwachstelle der Aorta, da die Aortenwand weiter stark belastet wird. Wie bei den Probandinnen und anderen PatientInnen auch ist in der Aorta ascendens der Volumenstrom mit 480ml/s am höchsten. Die Strömungsgeschwindigkeit ist nach der Aortenklappe und im wahren Lumen erhöht. Im Bereich nach der Aortenklappe liegt die Strömungsgeschwindigkeit bei 62cm/s und in Form von Turbulenzen und Verwirbelungen vor. In der Aorta descendens sind im wahren Lumen Werte von 45-50cm/s vorzufinden (Flow 6). Allerdings muss bei diesem Messwert beachtet werden, dass es ein gemittelter Wert für die Strömungsgeschwindigkeit in beiden Lumina ist.

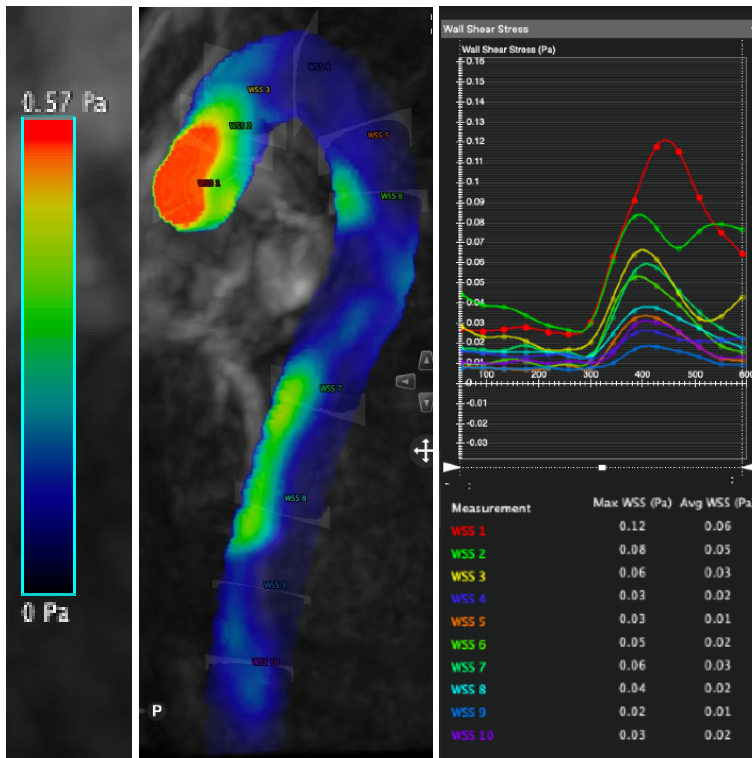


Abbildung 390: 4D-Flow, Wall Shear Stress, Pat. 7

Durch die hohe Strömungsgeschwindigkeit und die Turbulenzen in der Aorta ascendens ist dort der Wall shear stress mit 0,12 Pa erhöht. Entgegen der Erwartungen sind die WSS-Werte im wahren Lumen zwar leicht, aber nicht extrem erhöht, sie liegen bei circa 0,04Pa. Die Belastung der Aortenwand scheint also nicht so stark zu sein, wie anhand der Flow-Darstellung vermutet.

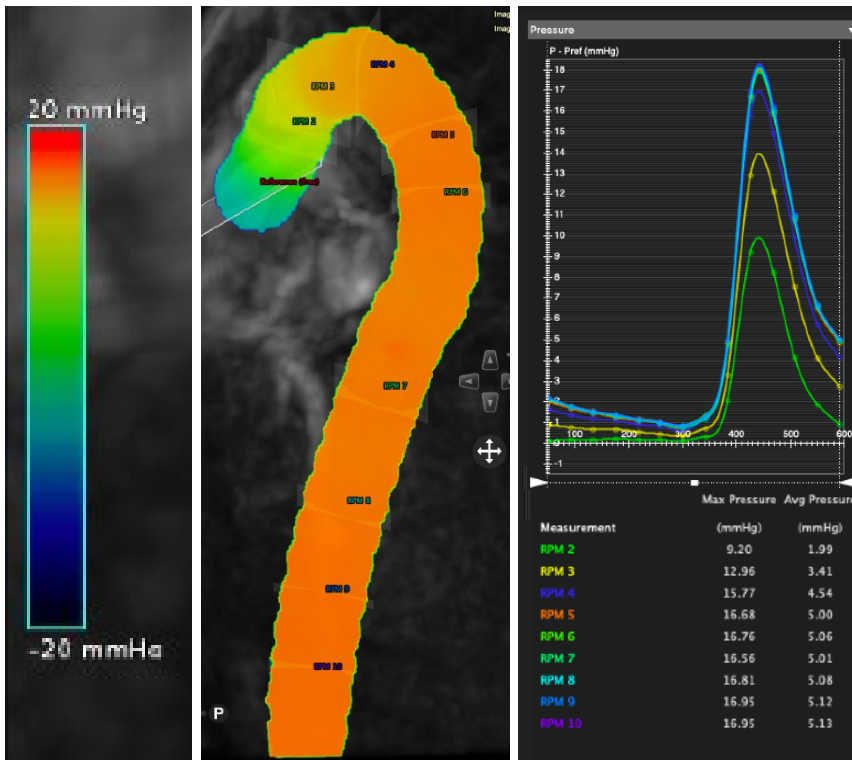


Abbildung 391: 4D-Flow, Blutdruckdifferenz, Pat. 7

Die höchste Druckdifferenz zur Referenzebene am Beginn der Aorta ascendens ist mit 15,7-16,9mmHg in der Aorta descendens zu finden. Durch den abnehmenden Durchmesser und die Spaltung in wahres und falsches Lumen steigt der Druck schon im Aortenbogen stark an. Dort beginnt auch die Dissektion. Zwar ist die Darstellung der Druckveränderungen in der Aorta nicht in wahres und falsches Lumen gesplittet, sondern eine Durchschnittsdarstellung, dennoch bestätigt sich hier die Vermutung, dass der Druck in der Aorta descendens durch die Dissektion und die beiden eingengten Lumina noch zusätzlich erhöht ist. Der Druckdifferenzwert ist ab der Ebene RPM4 (Beginn der Pathologie) fast bis zur Ebene RPM10 gleichbleibend hoch. Dies spricht für die Erklärung anhand der Pathologie.

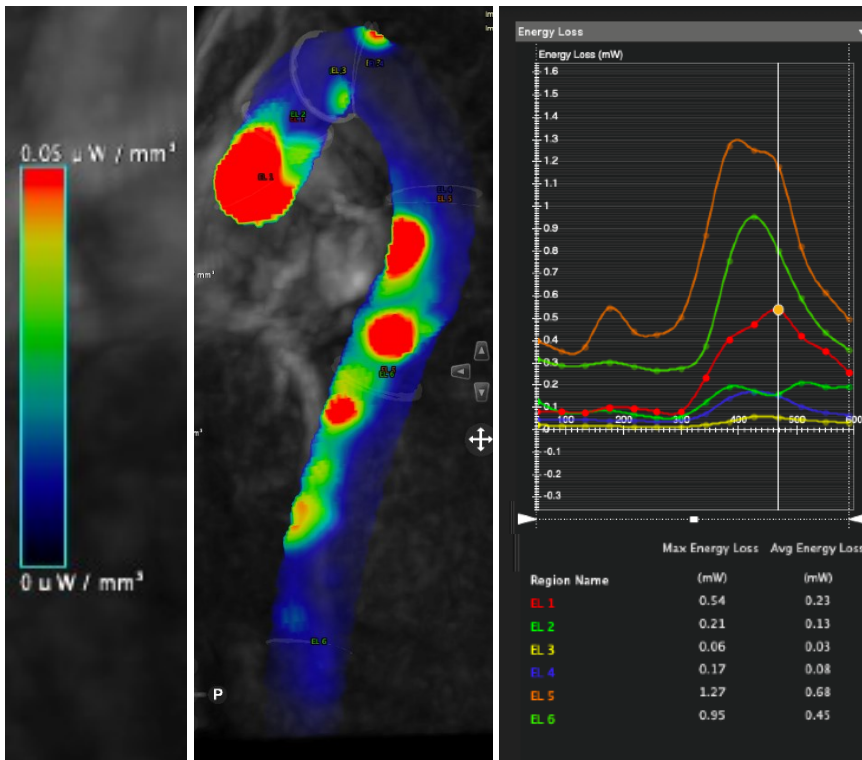


Abbildung 392: 4D-Flow, Energieverlust, Pat. 7

In diesem Fall treten die Energieverluste vor allem in der Aorta ascendens und im wahren Lumen der Aorta descendens auf. Im Abschnitt E1 tritt ein Energieverlust von 0,54mW, im Abschnitt E5 der Aorta descendens tritt der größte Energieverlust mit 1,27mW und weiter distal im Abschnitt E6 mit 0,95mW auf. Für das falsche Lumen hingegen werden in der Aufnahme keine Energieverluste verzeichnet.

## **4 Diskussion:**

### **4.1 Interpretation der Ergebnisse**

In diesem Kapitel werden die Erkenntnisse und Bewertungen der verschiedenen Sequenzen, vor allem die der Studiensequenzen, ausführlich dargestellt.

Da die QISS-Sequenz ursprünglich den Hauptteil bilden sollte, wird diese nun zuerst analysiert. Wie bereits erwähnt leidet die Qualität und die Anwendbarkeit der QISS-Sequenz sehr unter deren Signalauslöschungen und Inhomogenitäten, die vor allem bei den 3D-Rekonstruktionen aufgefallen sind. Sie machen verlässliche Befundungen teilweise unmöglich und führen zu nicht eindeutigen Bildgebungen. Auch für Nachkontrollen reicht es nicht aus, denn durch Inhomogenitäten kann man in gewissen Fällen nicht sicher beurteilen, ob es zu einer Veränderung der Pathologie gekommen ist oder nicht. Die Beurteilbarkeit eines Wandthrombus in der QISS-Sequenz ist ebenfalls eingeschränkt, da Inhomogenitäten oder komplette Signalauslöschungen die Beurteilung des Aortenlumens deutlich erschweren (vgl. Ergebnisse von Pat. 7).

In den Abschnitten, die frei von Inhomogenitäten und Signalauslöschungen sind, sind Pathologien der Aorta gut beurteilbar. Dissektionsmembranen können gut erkannt werden und auch die Aortenwand ist meist scharf abgegrenzt, sodass die Messung des Durchmessers auch genau möglich ist.

Für die SPACE-Sequenz gilt, dass keine Probleme mit Signalauslöschungen vorliegen, aber dennoch teilweise Inhomogenitäten, vor allem im Bereich des Aortenbogens, auftreten. Diese erschweren die Befundung und auch die Beurteilbarkeit, ob sich eine Pathologie verändert hat oder nicht. Abgesehen von den teilweise vorliegenden Inhomogenitäten ist die Beurteilbarkeit des Aortenlumens in der SPACE-Sequenz grundsätzlich besser möglich als in der QISS-Sequenz, als Nebenbefund der Studien-Untersuchungen lässt sich sagen, dass die Pulmonalarterien und -venen mittels SPACE-MRA auch bewertet werden können. Die Beurteilbarkeit eines Wandthrombus ist in der SPACE-MRA deutlich besser möglich als in der QISS-MRA, dennoch ermöglichen die CE-MRA, VIBE-MRI und CE-CTA eine noch bessere Beurteilung der Wandthromben.

Bei vielen der Studienaufnahmen war auffällig, dass die Sagittal- und Transversalebene eine schlechtere Qualität als die Coronalebene haben. Bei den

Ausmessungen der Durchmesser war die Aortenwand meist schlechter vom umliegenden Gewebe abgrenzbar, sodass teilweise eine hohe Messvariabilität aufgetreten ist. Wenn der Durchmesser der Aorta in der Coronalebene gemessen wurde, zum Beispiel bei der Messebene „Nach Abgang der Supraaortalen“, war die Messung des Durchmessers meist genauer, weil die Qualität der Aufnahme in der Coronalebene besser ist als in den anderen beiden Ebenen. Die SPACE-MRA-Sequenz ist nicht für 3D-Rekonstruktion und MPR ausgelegt.

Bei den 3D-Rekonstruktionen war die Aorta auch nicht immer sehr gut abgrenzbar vom Liquor. Für den groben Überblick und eine grobe Beurteilung der Pathologie und deren Veränderungen ist die SPACE-Sequenz besser geeignet als die QISS-Sequenz. Wenn es um genaue Messungen geht, ist die QISS-Sequenz, sofern keine Inhomogenität oder Signalauslöschung vorliegt, genauer und verlässlicher.

Um zunächst bei der qualitativen Auswertung zu bleiben, werden nun auch passende Bewertungen der VIBE-MRI, CE-MRA und CE-CTA aufgeführt.

Die VIBE-MRI war teilweise sehr schlecht kontrastiert, sodass zum Teil die Pathologien nicht gesehen und beurteilt werden konnten. Zur Beurteilung des Wandhämatoms aber konnte die VIBE-MRI gut eingesetzt werden, siehe Patient Nummer 7. Die 3D-Rekonstruktionen waren oftmals aber qualitativ sehr ungenügend, sodass sie nicht bei den Ergebnissen aufgeführt wurden. Der Einsatz der VIBE-MRI als einzige Sequenz kommt nicht in Frage. Als Ergänzung zur CE-MRA oder anderen flussgestützten Sequenzen aber kann sie nützliche Informationen, die die Aortenwand betreffen, liefern.

Die CE-MRA und CE-CTA waren bei der qualitativen Analyse die zuverlässigsten Sequenzen. Die CE-CTA-Aufnahmen waren teilweise zwar auch von Inhomogenitäten oder Artefakten eingeschränkt und die CE-MRA hatte teilweise auch unscharfe Aortenwandabgrenzungen. Aber es wurde noch einmal klarer, dass diese Sequenzen zur alleinigen Beurteilung einer Pathologie geeignet sind. Auch die Beurteilung eines Wandthrombus war neben der VIBE-MRI, vor allem in der CE-MRA- und CE-CTA-Aufnahme gut möglich, auch in der SPACE-MRA-Aufnahme konnte ein Wandthrombus gut beurteilt werden, im Gegensatz zu den Möglichkeiten in der QISS-MRA-Aufnahme.

Die Beurteilung einer Aortenpathologie ist mit keiner der drei Sequenzen QISS-, SPACE- oder VIBE-Sequenz allein möglich. Von diesen drei Sequenzen ist die SPACE-Sequenz aber diejenige, die vor allem im Vergleich zur QISS-Sequenz, relativ gut anwendbar ist, da sie nicht Atem-getriggert, sondern „nur“ EKG-getriggert ist. Außerdem hat sie keine vollkommen qualitätseinschränkenden Signalauslösungen, sodass sie für den Überblick und grobe Befundung durchaus gut einsetzbar ist als flussgestützte Sequenz, die nicht noch mehr Kontrastmittel verlangen würde.

Den Vergleich der Durchmessermessungen betreffend waren sich die Messwerte schon oft recht ähnlich. Wenn die Werte voneinander abgewichen sind, dann waren das oft die Werte der VIBE-MRI oder des CE-CTAs. Bei den Messungen war auffällig, dass die Aortenwand vor allem in der QISS-, VIBE-MR-Sequenz und der CE-CTA-Sequenz scharf abgrenzbar waren. In der CE-MRA- und SPACE-MRA-Sequenz waren die Aortenwand oder auch die Supraaortalen teilweise unscharf zur Umgebung abgegrenzt.

Bei den Probandinnen aber auch teilweise bei den PatientInnen konnte man feststellen, dass die Messwerte aus der SPACE-Sequenz meist größer ausfielen als die der QISS-Sequenz.

Aber nicht nur die Qualität der Sequenzen und Ergebnisse ist entscheidend dafür, ob eine Sequenz in die Standardsequenzen aufgenommen werden sollte, sondern auch das Akquisitionsverfahren und die Akquisitionszeit. Beispielhaft wurden dafür die Akquisitionszeiten des siebten Patienten analysiert. Die Akquisition der QISS-Sequenz erfolgt in drei Paketen à 1:26min, 1:40min und 1:26min. Für die SPACE-Akquisition wurden 7:53min benötigt. Die CE-MRA-Sequenz hingegen benötigt 13,7sec pro Aufnahme. Die 4D-flow-Aufnahmen erfolgen EKG-getriggert und benötigten für den Patienten 7 bei der Akquisition 12:44min. Die QISS-Sequenz wird mit EKG- und Atemtriggerung durchgeführt und die SPACE-Sequenz mit EKG-Triggerung. Die Akquisitionszeiten für die flussgestützten Sequenzen waren sowohl bei den Probandinnen als auch bei den PatientInnen immer in diesem zeitlichen Rahmen, somit konnte stellvertretend und als Beispiel ein Patient für die Analyse der Akquisitionszeit ausgewählt werden.

Auch für die quantitative Auswertung der 4D-flow-Sequenz können Aussagen zusammengefasst werden. Grundsätzlich ist die 4D-flow-Sequenz eine optimale Möglichkeit nicht-invasiv hämodynamische Parameter aus dem Inneren eines Gefäßes zu erhalten. Dazu gehören die Strömungsgeschwindigkeit, der Volumenstrom, die Wandscherspannung, der Druckgradient und der Energieverlust.

Wie in den Aufnahmen der Probandinnen und PatientInnen ersichtlich wurde, war der Volumenstrom in der proximalen Aorta ascendens immer am höchsten und hat dann durch die Gefäßabgänge abgenommen. Die Strömungsgeschwindigkeit war meist direkt nach der Aortenklappe erhöht und dann bei eingengten Lumina oder in der distalen Aorta descendens wegen der Abnahme des Durchmessers erhöht. Auch die Wall shear stress Werte hingen oft mit erhöhter Strömungsgeschwindigkeit und eingengtem Lumen zusammen. Bei PatientInnen mit AK- und Aorta ascendens-Ersatz aber trat ein erhöhter Wall shear stress auch meist schon in der proximalen Aorta ascendens auf, da dort sehr viele Turbulenzen oder Verwirbelungen auftreten, die den Blutfluss auf die Aortenwand lenken. Der Druckgradient von der Referenzebene in der Aorta ascendens hin zur distalen Aorta descendens war meist am größten, da bei abnehmender Querschnittsfläche auch der Druck im Gefäß ansteigt, da das Blutvolumen bis auf das über die Gefäßabgänge abfließende Volumen unverändert bleibt.

Der Energieverlust hat oft mit einem erhöhten wall shear stress oder mit Stellen, an denen der Blutfluss nicht laminar, sondern turbulent verlief, korreliert.

Die wichtigsten hämodynamischen Parameter für eine Nachkontrolle der Aortenpathologien mithilfe des 4D-Flows sind der Flow und der Wall shear stress. Anhand der Flow-Aufnahmen kann man genaustens den Verlauf des Blutflusses verfolgen und auch Entrys und Reentrys zwischen wahren und falschem Lumen oder Turbulenzen und Verwirbelungen erkennen, die womöglich der Grund für einen erhöhten wall shear stress sind. Der Parameter wall shear stress ist vor allem entscheidend, um bereits bekannte Schwachstellen zu beobachten oder neue Schwachstellen zu entdecken, bei denen der wall shear stress und somit die Kraftausübung auf die Wand erhöht sind.

## 4.2 Vergleich der Ergebnisse unserer Studie mit den Ergebnissen anderer Publikationen

### Vergleich 1 (7):

Salehi Ravesh M, Langguth P, Pfarr JA, Schupp J, Trentmann J, Koktzoglou I, Edelman RR, Graessner J, Greiser A, Hautemann D, Hennemuth A, Both M, Jansen O, Hövener JB, Schäfer JP. Non-contrast-enhanced magnetic resonance imaging for visualization and quantification of endovascular aortic prosthesis, their endoleaks and aneurysm sacs at 1.5 T. *Magn Reson Imaging*. 2019 Jul;60:164-172. doi: 10.1016/j.mri.2019.05.012. Epub 2019 May 7. PMID: 31075419.

In dieser Publikation wurde eine Studie mit PatientInnen, die ein Aortenaneurysma in der Aorta ascendens oder descendens erlitten, bezüglich der Qualität der Nachkontrolle mithilfe von QISS- und 4D-flow-MRA-Sequenzen beschrieben. Ziel der Studie war es herauszufinden, ob mithilfe dieser Sequenzen die endovaskuläre Prothese und mögliche Endoleaks, die weiterhin zu einem Blutaustausch in den Aneurysmasack führen würden, beurteilt werden können.

Die Ergebnisse der Studie waren, dass mithilfe der QISS-Sequenz die Darstellung der Endoleaks und Quantifizierung des Aortendurchmessers gut möglich sei.

Prinzipiell bestätigt die in dieser Diplomarbeit beschriebene Studie, dass die Messung des Aortendurchmessers mit der QISS-Sequenz gut möglich ist, aber nur sofern keine Inhomogenitäten oder Signalauslöschungen vorliegen. Die Darstellung der Endoleaks in den QISS-Sequenz-Aufnahmen kann anhand der Studie, die in dieser Diplomarbeit beschrieben wurde, nicht gut beurteilt werden, da zu wenige PatientInnen ein Endoleak hatten, das untersucht werden konnte, und da die QISS-Sequenz nicht bei allen PatientInnen eingesetzt und getestet wurde.

In der Publikation wird ebenfalls als Ergebnis angeführt, dass die 4D-flow-Aufnahmen zusätzliche Informationen bezüglich des wall shear stress liefern, die man über eine DSA-Aufnahme nicht erhalten würden. Dem kann man anhand der Studie, die in dieser Diplomarbeit erläutert wurde, auch zustimmen. Zwar wurde in dieser kein Vergleich zwischen den 4D-flow-Aufnahmen und den DSA-Aufnahmen durchgeführt, aber bei der Analyse der 4D-flow-Aufnahmen wird klar, dass sie

wertvolle hämodynamische Parameter und vor allem Veränderungen dieser Parameter im Falle einer Pathologie liefern können.

In der Conclusio werden die untersuchten MR-Sequenzen als Sequenzen beschrieben, die verbesserte anatomische und funktionelle Information über Endoprothesen und Endoleaks liefern. Neben den über die 4D-flow-Aufnahmen gelieferten hämodynamischen Parameter, sei es mithilfe dieser Sequenzen auch möglich die Beschaffenheit des Inhalts und die Heterogenitäten in dem Aneurysmasack genauer zu beschreiben. Dafür seien aber auch die non-CE-T1-/T2-mapping-MRI-Sequenzen notwendig.

#### Vergleich 2 (29):

Edelman RR, Carr M, Koktzoglou I. Advances in non-contrast quiescent-interval slice-selective (QISS) magnetic resonance angiography. *Clin Radiol.* 2019 Jan;74(1):29-36. doi: 10.1016/j.crad.2017.12.003. Epub 2018 Jan 12. PMID: 29336780; PMCID: PMC6043418.

In dieser Publikation wird beschrieben, dass die QISS-Sequenz bei ihrer Aktivierung akkurater und einfacher sei sowie einen effizienteren Workflow bieten würde als die CE-MRA-Sequenz. Dieser Aussage kann anhand der Erfahrungen, die während der Studie für diese Diplomarbeit gemacht wurden, nicht ganz zugestimmt werden. Vor allem aufgrund der EKG-Triggerung gab es wegen Signalunterbrechungen immer wieder Probleme bei den Aufzeichnungen. Auch die Atemtriggerung erschwerte die Bildgebung mithilfe der QISS-Sequenz erheblich. Zudem ist die mit der QISS-Sequenz verbundene Akquisitionszeit im Vergleich zu der der CE-MRA hoch. Dies widerspricht wiederum auch der Aussage in der Publikation, dass mithilfe der QISS-Sequenz eine schnelle Bildgebung von Koronar-, Renal- und Pulmonalarterien durchgeführt werden kann.

#### Vergleich 3 (30):

Kazemtash, Majid/Marc Harth/Wojciech Derwich/Axel Thalhammer/Thomas Schmitz-Rixen/Michael Keese (2021): Quiescent-Interval Slice Selective Magnetic Resonance Angiography for Abdominal Aortic Aneurysm Treatment Planning, in: *Journal of Endovascular Therapy*, SAGE Publishing, Bd. 28, Nr. 3, S. 393–398, [online] doi:10.1177/1526602821989341

In der Conclusio dieser genannten Studie wird die QISS-MRA-Sequenz als potenzielle Alternative zur CE-MRA- und CE-CTA-Aufnahme beschrieben, wenn es um die Therapieplanung von abdominellen Aortenaneurysmen geht. Die QISS-MRA sei vor allem bei den PatientInnen vielversprechend, bei denen jodhaltiges oder gadoliniumbasiertes Kontrastmittel kontraindiziert sind.

Laut der angeführten Studie sei die QISS-MRA nicht geeignet, um Verkalkungen oder Thrombusbildungen im abdominellen Aortenaneurysma zu untersuchen, die Messung des Gefäßdurchmessers und der Aneurysmalänge aber sei gut möglich. Zur Beurteilung von Verkalkungen und Thrombusbildungen könne man die QISS-MRA mit anderen flussgestützten CT- oder MR-Untersuchungen kombinieren, dafür seien aber noch weitere Studien notwendig.

Der Conclusio dieser angeführten Studie kann mit den Ergebnissen der Diplomarbeitstudie nur zugestimmt werden. Die Beurteilung von Verkalkungen und Wandthromben ist anhand der QISS-Sequenz nicht möglich.

Die Messung des Aortendurchmessers ist mithilfe der QISS-Sequenz gut möglich, solange keine komplette Signalauslöschung dazu führt, dass die Aorta und die Aortenwand nicht zum umliegenden Gewebe abgrenzbar sind.

Dass eine Kombination aus verschiedenen Sequenzen notwendig sein wird, um die Beurteilung und Therapieplanung von Aortenerkrankungen vollständig abzudecken, kann anhand der Ergebnisse der Diplomarbeitstudie auch bestätigt werden. Das Ziel wäre natürlich ein Protokoll für Aortenerkrankungen aufzustellen, das nur flussgestützte MR-Sequenzen enthält, sodass die Untersuchung frei von ionisierender Strahlung und Kontrastmittel ist.

#### Vergleich 4 (31):

Markl, Michael/Alex Frydrychowicz/Sebastian Kozerke/Mike Hope/Oliver Wieben (2012): 4D flow MRI, in: *Journal of Magnetic Resonance Imaging*, Wiley-Blackwell, Bd. 36, Nr. 5, S. 1015–1036, [online] doi:10.1002/jmri.23632

In der angeführten Literatur wird die 4D-Flow-Sequenz als vielversprechende MR-Sequenz zur Bestimmung hämodynamischer Parameter beschrieben. Informationen über den Blutfluss könne man über standardmäßige 2D-CINE-PC-

Techniken auch erhalten, die während eines Atemstillstands angewendet werden können. Die 4D-Flow-Technik aber ermöglicht, dass ein Blutfluss an jeder beliebigen Lokalisation in der Aorta oder anderen Gefäßen innerhalb des 3D-Volumens retrospektiv quantitativ bewertet werden kann, ohne das ein Atemstillstand notwendig ist.

Derzeit seien die Limitationen der 4D-Flow-Sequenz vor allem die lange Scanzeit und die mangelnde räumliche Auflösung bei Strömungsanalysen in kleinen Gefäßen.

Laut der Literatur gibt es neue Entwicklungen, wie zum Beispiel spärliche Sampling-Techniken oder multidimensionale Parallel-Bildgebungen, die das Potential haben, die 4D-Flow-Bilderfassungszeit erheblich zu verkürzen. Erste Ergebnisse der entsprechenden Studien zeigen eine 4- bis 6-fache Beschleunigung.

Eine weitere Limitation, die dazu beiträgt, dass die 4D-Flow-Bildgebung noch nicht mehr in Routineprotokolle integriert ist, ist die derzeit noch fehlende standardisierte Planungs- und Auswertungssoftware.

Den Diskussionspunkten der angeführten Studie kann anhand der Ergebnisse der Diplomarbeitsstudie zugestimmt werden. Die Gewinnung hämodynamischer Daten über eine retrospektive Analyse ist vielversprechend, bedarf aber noch einigen Verbesserungen, bevor eine Einbettung in Routineprotokolle im klinischen Alltag möglich ist. Die Diplomarbeitsstudie ergab ebenfalls die Limitation aufgrund der zu langen und vor allem auch zu instabilen Akquisitionszeit.

Die Auswertung der 4D-Flow-Daten mithilfe der Software cvi42 ist in der Diplomarbeitsstudie ohne Probleme und Limitationen möglich gewesen. Dass eine Standardisierung in dieser Hinsicht aber notwendig ist, um eine Routineanwendung im klinischen Alltag zu ermöglichen, ist nachvollziehbar.

Vor allem im Hinblick auf die in der angeführten Studie genannten Entwicklungen zur Beschleunigung der 4D-Flow-Akquisition, kann man dem nur zustimmen, dass sehr viel Potential in dieser Bildgebung steckt.

### Vergleich 5 (32):

Catapano, Federica/Giacomo Pambianchi/Giulia Cundari/João Rebelo/Francesco Cilia/Iacopo Carbone/Carlo Catalano/Marco Francone/Nicola Galea (2020): 4D flow imaging of the thoracic aorta: is there an added clinical value?, in: *Cardiovascular diagnosis and therapy*, [online] doi:10.21037/cdt-20-452.

In dieser Publikation wird die Anwendbarkeit der 4D-Flow Sequenz im klinischen Alltag, unter anderem in postoperativen Settings, getestet und die Conclusio fällt ähnlich aus wie bei dieser Diplomarbeiten-Studie. Es wurde ebenfalls die thorakale Aorta als Areal gewählt und die zu untersuchenden Krankheitsbilder waren das Aortenaneurysma, die Aortenisthmusstenose und die Aortendissektion sowie verschiedene Aortenklappenerkrankungen. Bei den post-operativen Bildgebungen mit der 4D-Flow-Sequenz werden vor allem die Kombination aus beurteilbarem anatomischem-chirurgischem Ergebnis und post-operativen hämodynamischen Messwerten als vielversprechende Neuheit beschrieben, die im klinischen Alltag die Nachkontrollen und vor allem auch die Prävention deutlich verbessern können.

Der Fokus bei der 4D-Flow-Sequenz in der Diplomarbeiten-Studie wurde zwar mehr auf die Hämodynamik als auf die Beurteilbarkeit der Morphologie gelegt. Aber anhand der unter Punkt 3.2 angeführten Aufnahmen, in denen die Morphologie der Pathologie gut erkennbar ist, kann diesen Aussagen nur zugestimmt werden. Der Fokus auf die Hämodynamik bei der 4D-Flow-Sequenz liegt daran, dass in der Diplomarbeiten-Studie auch andere flussgestützte Sequenzen getestet wurden, bei denen es nur um die Beurteilbarkeit der Morphologie ging.

Vor allem auch die Herzklappen mit veränderten Strömungsmustern sowie veränderte Aortenströmungen könne man mithilfe der 4D-Flow gut darstellen. Auch dies bestätigt sich anhand der unter Punkt 3.2 analysierten Aufnahmen.

Um den Zusammenhang zwischen veränderter Hämodynamik und der Progression von Gefäßerkrankungen genauer zu beschreiben, werden noch mehr Studien notwendig sein. Sowohl in der Conclusio der Publikation als auch in jener dieser Diplomarbeit wird beschrieben, dass mithilfe des 4D-Flows eine Charakterisierung der Aortenerkrankungen erfolgen kann, mit der die Vorhersage von Erkrankungen sowie die Entscheidungsfindung und Personalisierung einer Therapie ermöglicht werden kann.

### 4.3 Limitationen der Studie

Eine der größten Limitationen dieser Studie war die Akquisition mithilfe der EKG-Triggerung. Eine MR-Aufnahme mit Anwendung der EKG-Triggerung ist sehr instabil, da die EKG-Übertragung oft abgebrochen ist oder das Signal nicht stark genug war. Durch den teilweise schlechten Empfang des EKG-Signals, wird bei der EKG-Triggerung nur jede zweite EKG-Kurve zur Triggerung verwendet, sodass sich die Akquisitionszeit natürlich verlängert bis sogar verdoppelt.

Wie oben deutlich wird, sind die Akquisitionszeiten der QISS-, SPACE- und 4D-flow-Sequenz deutlich länger als die der CE-MRA und auch die der CE-CTA. PatientInnen mit Aortenpathologien haben meist größere Schwierigkeiten beim Atmen und vor allem bei der Atemanhaltung, wenn sie lange in der MR-Röhre liegen bleiben müssen. Die Kombination von Standard-MR-Sequenzen und den drei Studiensequenzen führt zeitlich zu bis zu einer Stunde Akquisitionszeit. Diese Zeit ist für Aortenpathologie-PatientInnen nicht immer zumutbar. Die PatientInnen der vorliegenden Studie haben sich dazu bereit erklärt, diese MR-Untersuchung, die für die Studie und Forschungszwecke adaptiert wurde, trotz verlängerter Akquisitionszeit durchführen zu lassen. Die PatientInnen wurden darüber aufgeklärt, dass sie unter ständiger Beobachtung durch das Studienpersonal sind und jederzeit die Möglichkeit besteht, mithilfe des Notfallballs die MR-Untersuchung zu unterbrechen. Für Standarduntersuchungsverfahren ist diese Gesamtzeit aber deutlich zu hoch.

Nicht nur die EKG-Triggerung, sondern auch die Atemtriggerung, die für die QISS-Sequenz benötigt wird, ist eine deutliche Erschwernis für erkrankte Personen. In dem Fall, wenn die EKG-Triggerung nicht möglich ist, greift man auf die Pulstriggerung zurück. Dies wurde bei der ersten Patientin durchgeführt und lieferte einen versetzten Kurvenverlauf bei den entsprechenden Parametern der 4D-flow-Aufnahme.

## 4.4 Conclusio

Abschließend lässt sich sagen, dass keine der flussgestützten Sequenzen alleine ausreicht, um die kontrastgestützten Sequenzen zu ersetzen. Die QISS-Sequenz ist aufgrund der bei allen Probandinnen und PatientInnen aufgetretenen Signalauslöschungen zu unzuverlässig. Die SPACE-Sequenz ist für die grobe Beurteilung der Pathologie und als Ergänzung zu den kontrastgestützten Sequenzen gut geeignet, aber durch die Qualitätseinschränkung der Sagittal- und Transversalebene mit unscharf abgegrenzter Aortenwand und Inhomogenitäten im Aortenbogenbereich nicht als alleinige Sequenz durchführbar. Wenn allerdings eine relative Kontrastmittelkontraindikation vorliegt, zum Beispiel wegen einer allergischen Kontrastmittelreaktion, dann sollte die SPACE-Sequenz durchgeführt werden, um die Pathologie weiter nachkontrollieren zu können. Sie ist zwar durch oben beschriebene Faktoren eingeschränkt, aber in Ausnahmefällen reicht sie als Informationsquelle durchaus aus. Auffallend waren vor allem die Ergebnisse des 4D-Flows, da diese so bisher mit keiner anderen Sequenz gewonnen werden konnten. Diese 4D-Flow-Sequenz allein reicht zur Beurteilung der Pathologie aber nicht aus, da sie nur über die Hämodynamik aussagekräftig ist und nicht über die Morphologie der Aorta und der Pathologie. Auch die Durchmessermessungen sind in den 4D-flow-Aufnahmen schwer. Die Pathologie kann in den Aufnahmen zwar oft im Ansatz erkannt werden, Veränderungen der Pathologie aber können damit nicht beurteilt werden.

Als Ergänzung bei Nachkontrollen, OP-Planungen oder Screenings, zum Beispiel wenn Bindegewebserkrankungen in der Familie vorkommen, ist die 4D-flow-Sequenz gut einsetzbar. Sie liefert Daten und Messwerte, die bis dato eigentlich nur invasiv gemessen werden konnten. Für genauere Aussagen über die Bedeutsamkeit dieser hämodynamischen Daten müsste eine Studie im größeren Stil und mit Fokussierung auf die 4D-Flow-Sequenz durchgeführt werden. Man müsste herausfinden, ob die Lokalisationen in der Aorta, die zum Beispiel durch erhöhten wall shear stress oder Turbulenzen belastet sind, tatsächlich auch morphologische Schwachstellen sind, die für mögliche weitere Pathologien die Grundlage bilden könnten. Die Durchführung der 4D-flow-Sequenz bietet hämodynamische Ergebnisse, die die Therapiewahl oder Präventionsmaßnahmen durchaus stark beeinflussen könnten.

## Literaturverzeichnis

- (1) Erkrankungen der thorakalen Aorta - Innere Medizin - Georg Thieme Verlag KG (o. D.): Thieme, [online] <https://www.thieme.de/de/innere-medizin/erkrankungen-thorakale-aorta-96987.htm> [abgerufen am 09.10.2022]
- (2) Michaely, Henrik/Peter Reimer/Stefan Schönberg (2015): *Atlas der MR-Angiographie: Techniken und klinische Anwendung*, New York, Vereinigte Staaten: Springer Publishing [abgerufen am 09.10.2022]
- (3) Antwerpes, Frank/Hoda Rezaie/Med. Ibrahim Güler (o. D.): Aortenaneurysma, DocCheck Flexikon, [online] <https://flexikon.doccheck.com/de/Aortenaneurysma> [abgerufen am 09.10.2022]
- (4) Decker, Josua/Frank Antwerpes/Josua Decker (o. D.): Penetrierendes Aortenulkus, DocCheck Flexikon, [online] [https://flexikon.doccheck.com/de/Penetrierendes\\_Aortenulkus](https://flexikon.doccheck.com/de/Penetrierendes_Aortenulkus) [abgerufen am 09.10.2022]
- (5) Communications, Ebcont (o. D.): Intramurale Hämatome, [online] <https://eref.thieme.de/cockpits/clRadio0001/0/coRadOGW00222/4-15772> [abgerufen am 09.10.2022a].
- (6) Raab, R.-W. (2001b): Intramurale Hämatome der Aorta, SpringerLink, [online] [https://link.springer.com/article/10.1007/s001170170114?error=cookies\\_not\\_supported&code=5e016ab9-2772-4b59-832f-c40040a0023d](https://link.springer.com/article/10.1007/s001170170114?error=cookies_not_supported&code=5e016ab9-2772-4b59-832f-c40040a0023d) [abgerufen am 09.10.2022].
- (7) Salehi Ravesh M, Langguth P, Pfarr JA, Schupp J, Trentmann J, Koktzoglou I, Edelman RR, Graessner J, Greiser A, Hautemann D, Hennemuth A, Both M, Jansen O, Hövener JB, Schäfer JP. Non-contrast-enhanced magnetic resonance imaging for visualization and quantification of endovascular aortic prosthesis, their endoleaks and aneurysm sacs at 1.5 T. *Magn Reson Imaging*. 2019 Jul;60:164-172. doi: 10.1016/j.mri.2019.05.012. Epub 2019 May 7. PMID: 31075419 [abgerufen am 15.11.2020].

- (8) Die Aorta • Funktion, Erkrankungen und Behandlungen (o. D.): DHZB, [online]  
<https://www.dhzb.de/ratgeber/aorta> [abgerufen am 09.10.2022].
- (9) Arterien (o. D.): E-Learning mit Lecturio, [online]  
<https://www.lecturio.de/artikel/medizin/arterien/> [abgerufen am 09.10.2022].
- (10) Hombach, Vinzenz (2009): *Kardiovaskuläre Magnetresonanztomographie: Atlas und DVD*, 1. Aufl., Schattauer [abgerufen am 09.10.2022].
- (11) Operative und interventionelle Gefäßmedizin (o. D.): SpringerLink, [online]  
[https://link.springer.com/book/10.1007/978-3-662-533802?error=cookies\\_not\\_supported&code=d6e3d9f8-de8a-4444-a438-da489b4a7ead](https://link.springer.com/book/10.1007/978-3-662-533802?error=cookies_not_supported&code=d6e3d9f8-de8a-4444-a438-da489b4a7ead) [abgerufen am 29.10.2022].
- (12) Chirurgie der thorakalen Hauptschlagader – aktuelle Konzepte (o. D.): Ärzteblatt Sachsen-Anhalt, [online] <https://www.aerzteblatt-sachsen-anhalt.de/ausgabe/fachartikel/512-fachartikel-11-2018/2434-chirurgie-der-thorakalen-hauptschlagader-aktuelle-konzepte.html> [abgerufen am 09.10.2022].
- (13) Fenestrated Endovascular Repair (o. D.): UCLA Health, [online]  
<https://www.uclahealth.org/medical-services/heart/aortic/diagnosis-and-treatment/fenestrated-endovascular-repair#:~:text=Fenestrated%20Endovascular%20Aortic%20Repair%2C%20also,your%20kidneys%20and%20other%20organs> [abgerufen am 10.10.2022].
- (14) Torsello, Giovanni/Martin Czerny/Reinhart T. Grundmann/Hans Krankenberg/Sigrid Nikol/Ralf Puls/Alexander Raddatz/Hubert Schelzig/Roland E. Schmieder/Ralf Zahn (2018): S2k-Leitlinie zur Diagnostik und Therapie der Typ-B-Aortendissektion, in: *Gefasschirurgie*, Springer Nature, Bd. 23, Nr. 7, S. 513–518, [online] doi:10.1007/s00772-018-0455-z [abgerufen am 12.05.2023].

- (15) Grabenwöger, Martin/Markus Mach/Heinrich Mächler/Zsuzsanna Arnold/Harald Pisarik/Sandra Folkmann/Marie I. Harrer/Daniela A. Geisler/Reinhard Moidl/Bernhard Winkler/Johannes Bonatti/Martin Czerny/Gabriel Weiss (2021): Taking the frozen elephant trunk technique to the next level by a stented side branch for a left subclavian artery connection: a feasibility study, in: *European Journal of Cardio-Thoracic Surgery*, Oxford University Press, Bd. 59, Nr. 6, S. 1247–1254, [online] doi:10.1093/ejcts/ezaa486 [abgerufen am 12.05.2023].
- (16) Lombardi, Joseph M./Richard P. Cambria/Christoph A. Nienaber/Roberto Chiesa/Peter Mossop/Stéphan Haulon/Qing Zhou/Feiyi Jia (2014): Aortic remodeling after endovascular treatment of complicated type B aortic dissection with the use of a composite device design, in: *Journal of Vascular Surgery*, Elsevier BV, Bd. 59, Nr. 6, S. 1544–1554, [online] doi:10.1016/j.jvs.2013.12.038 [abgerufen am 12.05.2023].
- (17) Bartel, T. (2006): Rekonstruktion der thorakalen Aorta descendens: endovaskuläre Aortenstentimplantation, in: <http://universimed.com> [abgerufen am 12.05.2023].
- (18) Erbel, Raimund/Aboyans/Catherine Boileau/Eduardo Bossone/Roberto Di Bartolomeo/Holger Eggebrecht/Artur Evangelista/Falk/Herbert Frank/Oliver Gaemperli/Martin Grabenwöger/Axel Haverich/Bernard Iung/Athanasios J. Manolis/Folkert J. Meijboom/Christoph A. Nienaber/Marco Roffi/Hervé Rousseau/Udo Sechtem/Per Anton Sirnes/Allmen Rs/C.J. Vrints (2014): 2014 ESC Guidelines on the diagnosis and treatment of aortic diseases, in: *European Heart Journal*, Oxford University Press, Bd. 35, Nr. 41, S. 2873–2926, [online] doi:10.1093/eurheartj/ehu281 [abgerufen 12.05.2023].
- (19) Communications, Ebcont (o. D.): Intramurales Hämatom der Aorta (Thorax), [online] <https://eref.thieme.de/cockpits/clRadio0001/0/coRadOGW00222/0?context=search> [abgerufen am 09.10.2022b].
- (20) Communications, Ebcont (o. D.): Penetrierendes Aortenulkus (Thorax), [online] <https://eref.thieme.de/cockpits/0/0/coRadOGW00382/0> [abgerufen am 09.10.2022c].

- (21) MAGNETOM Flash (o. D.): [online] <https://www.magnetomworld.siemens-healthineers.com/publications/magnetom-flash> [abgerufen am 10.10.2022b].
- (22) MRI sequences | T1 weighted mri pulse sequence | MRI Glossary | T2 vs T1 MRI (o. D.): [online] <https://mrimaster.com/index-2.html> [abgerufen am 10.10.2022].
- (23) Dyverfeldt, Petter (2015): 4D flow cardiovascular magnetic resonance consensus statement - Journal of Cardiovascular Magnetic Resonance, BioMed Central, [online] <https://jcmr-online.biomedcentral.com/articles/10.1186/s12968-015-0174-5> [abgerufen am 10.10.2022].
- (24) MAGNETOM Prisma (o. D.): MRI Scanner, [online] <https://www.siemens-healthineers.com/at/magnetic-resonance-imaging/3t-mri-scanner/magnetom-prisma> [abgerufen am 11.10.2022].
- (25) HealthManagement.org (2022): Consumer and Professional Ratings Differ for Mental Health Apps, HealthManagement.org, [online] <https://healthmanagement.org/> [abgerufen am 11.10.2022].
- (26) Help Centre – Circle Cardiovascular Imaging (o. D.): [online] <https://www.circlecvi.com/help-centre/> [abgerufen am 11.10.2022].
- (27) Schlobach, Martin (2021c): Volumenstrom und Strömungsgeschwindigkeit, Haustechnik Verstehen, [online] [https://www.haustechnikverstehen.de/volumenstrom-und-stroemungsgeschwindigkeit/#Die\\_Stroumlmungsgeschwindigkeit](https://www.haustechnikverstehen.de/volumenstrom-und-stroemungsgeschwindigkeit/#Die_Stroumlmungsgeschwindigkeit) [abgerufen am 14.10.2022].
- (28) Schlobach, Martin (2021a): Das Kontinuitätsgesetz mit Beispielrechnung, Haustechnik Verstehen, [online] <https://www.haustechnikverstehen.de/das-kontinuitaetsgesetz/> [abgerufen am 14.10.2022].

- (29) Edelman RR, Carr M, Koktzoglou I. Advances in non-contrast quiescent-interval slice-selective (QISS) magnetic resonance angiography. *Clin Radiol*. 2019 Jan;74(1):29-36. doi: 10.1016/j.crad.2017.12.003. Epub 2018 Jan 12. PMID: 29336780; PMCID: PMC6043418 [abgerufen: 15.10.2022].
- (30) Kazemtash, Majid/Marc Harth/Wojciech Derwich/Axel Thalhammer/Thomas Schmitz-Rixen/Michael Keese (2021): Quiescent-Interval Slice Selective Magnetic Resonance Angiography for Abdominal Aortic Aneurysm Treatment Planning, in: *Journal of Endovascular Therapy*, SAGE Publishing, Bd. 28, Nr. 3, S. 393–398, [online] doi:10.1177/1526602821989341 [abgerufen am 17.1.2021].
- (31) Markl, Michael/Alex Frydrychowicz/Sebastian Kozerke/Mike Hope/Oliver Wieben (2012): 4D flow MRI, in: *Journal of Magnetic Resonance Imaging*, Wiley-Blackwell, Bd. 36, Nr. 5, S. 1015–1036, [online] doi:10.1002/jmri.23632 [abgerufen am 15.1.2021].
- (32) Catapano, Federica/Giacomo Pambianchi/Giulia Cundari/João Rebelo/Francesco Cilia/Iacopo Carbone/Carlo Catalano/Marco Francone/Nicola Galea (2020): 4D flow imaging of the thoracic aorta: is there an added clinical value?, in: *Cardiovascular diagnosis and therapy*, [online] doi:10.21037/cdt-20-452 [abgerufen: 15.10.2022].
- (33) Saini, Aman/Alex Wallace/Hassan Albadawi/Sailendra Naidu/Sadeer Alzubaidi/M. Grace Knuttinen/Anshuman Panda/Rahmi Oklu (2018): Quiescent-Interval Single-Shot Magnetic Resonance Angiography, in: *Diagnostics*, MDPI, Bd. 8, Nr. 4, S. 84, [online] doi:10.3390/diagnostics8040084 [abgerufen am 18.1.2021].
- (34) Partovi, Sasan/Thomas Trischman/Vasileios Rafailidis/Suvranu Ganguli/Fabian Rengier/Harold Goerne/Prabhakar Rajiah/Daniel Staub/Indravadan Patel/George Laylson Da Silva Oliveira/Brian B. Ghoshhajra (2018): Multimodality imaging assessment of endoleaks post-endovascular aortic repair, in: *British Journal of Radiology*, British Institute of Radiology, S. 20180013, [online] doi:10.1259/bjr.20180013 [abgerufen am 17.1.2021].

- (35) Beck, Leyla/Abdi-Aziz Mohamed/W. Strugnell/Harry Bartlett/Viviana Rodriguez/Christian Hamilton-Craig/Richard A. Slaughter (2018): MRI measurements of the thoracic aorta and pulmonary artery, in: *Journal of Medical Imaging and Radiation Oncology*, Wiley-Blackwell, [online] doi:10.1111/1754-9485.12637 [abgerufen am 20.1.2021].
- (36) Van Hout, Max J P/Arthur J.H.A. Scholte/Joe F. Juffermans/Jos J.M. Westenberg/Liang Zhong/Xuhui Zhou/Simon Schalla/Michael D. Hope/Jens Bremerich/Christopher M. Kramer/Marc Dewey/Karen G. Ordovas/David A. Bluemke/Hildo J. Lamb (2020): How to Measure the Aorta Using MRI: A Practical Guide, in: *Journal of Magnetic Resonance Imaging*, Wiley-Blackwell, Bd. 52, Nr. 4, S. 971–977, [online] doi:10.1002/jmri.27183 [abgerufen am 20.1.2021].
- (37) Jian-ping Guo/Xin Jia/Zhe Sai/Yang-yang Ge/Sen Wang/Wei Guo (2016): Thoracic Aorta Dimension Changes During Systole and Diastole: Evaluation with ECG-Gated Computed Tomography, in: *Annals of Vascular Surgery*, [online] <https://www-1sciencedirect-1com-10013b5ud00b0.han.medunigraz.at/science/article/abs/pii/S0890509616303946?via%3Dihub> [abgerufen am 20.1.2021].
- (38) Korepta, Lindsey M./Bernadette Aulivola (2019): Aortic Intramural Hematomas and Penetrating Aortic Ulcerations: Indication for Treatment versus Surveillance, in: *Endovascular Today Europe*, Bd. Volume 8, Number 7 [abgerufen am 20.1.2021].
- (39) Soulat, Gilles/Patrick M. McCarthy/Michael Markl (2020): 4D Flow with MRI, in: *Annual Review of Biomedical Engineering*, Annual Reviews, Bd. 22, Nr. 1, S. 103–126, [online] doi:10.1146/annurev-bioeng-100219-110055 [abgerufen am 17.1.2021].
- (40) Sierra-Galan, Lilia M./Christopher J. François (2019): Clinical Applications of MRA 4D-Flow, in: *Current Treatment Options in Cardiovascular Medicine*, Springer Science+Business Media, Bd. 21, Nr. 10, [online] doi:10.1007/s11936-019-0758-8 [abgerufen am 18.1.2021].

- (41) Sträter, Alexandra S./Armin Huber/Jan Daniel Rudolph/Maria Berndt/Michael Rasper/Ernst J. Rummeny/Jonathan Nadjiri (2018): 4D-Flow MRI: Technique and Applications, in: *RöFo*, Thieme Medical Publishers (Germany), Bd. 190, Nr. 11, S. 1025–1035, [online] doi:10.1055/a-0647-2021 [abgerufen am 17.1.2021].
- (42) Allen, Bradley D./Pascale Aouad/Nicholas S. Burris/Amir Ali Rahsepar/Kelly Jarvis/Christopher J. François/Alex J. Barker/S. Chris Malaisrie/James C. Carr/Jeremy D. Collins/Michael Markl (2019): Detection and Hemodynamic Evaluation of Flap Fenestrations in Type B Aortic Dissection with 4D Flow MRI: Comparison with Conventional MRI and CT Angiography, in: *Radiology*, Radiological Society of North America, Bd. 1, Nr. 1, S. e180009, [online] doi:10.1148/ryct.2019180009 [abgerufen am 19.1.2021].

# Anhang

## Aufklärungsbogen MR-Untersuchung:

### INFORMATION FÜR PATIENTEN UND PATIENTINNEN über Untersuchungen im Magnetfeld

Die MR-Untersuchung ist ein diagnostisches, bildgebendes Verfahren, welches die Anfertigung von Schnittbildern aller Körperregionen ermöglicht. Die Untersuchungsmethode ist nach heutigem Stand des Wissens in den verwendeten Feldstärken mit keinem Risiko einer biologischen Schädigung verbunden. Bestimmte Vorsichtsmaßnahmen (siehe unten) müssen aber eingehalten werden.

Das Verfahren verwendet weder ionisierende Strahlen noch radioaktive Substanzen. Die Bilder entstehen durch Signale von Wasserteilchen des Körpers, die mit Hilfe eines starken Magneten und von Hochfrequenzimpulsen (Radiowellen) erzeugt werden.

#### Untersuchungsablauf:

Die Untersuchungszeit beträgt, je nach Körperregion, zwischen 30 Minuten und 1 Stunde, bei Untersuchungen des Herzens sind eventuell längere Aufnahmezeiten erforderlich.

Um eine qualitativ hochwertige Untersuchung zu erzielen, ist es notwendig, dass Sie während der gesamten Zeit möglichst ruhig im Gerät liegen. Andernfalls könnte eine Wiederholung der Aufnahmen und damit eine längere Untersuchungszeit notwendig werden. Bitte kreuzen Sie keinesfalls Arme oder Beine! Dies könnte durch Haut- zu Haut-Kontakt (selten) zu oberflächlichen Verbrennungen führen.

Über eine im Gerät installierte Gegensprechanlage können Sie im Bedarfsfall auch während der Untersuchung jederzeit Sprechkontakt halten. Sofern Sie keine Beschwerden haben, sollten Sie dies aber vermeiden, um nicht dadurch eine Beeinträchtigung der Bildqualität herbeizuführen.

Während der Untersuchung entsteht ein lautes, klopfendes Geräusch im Gerät!

Da Sie sich während der Untersuchung in einem starken Magnetfeld befinden, ist es von besonderer Wichtigkeit, dass keine metallischen Gegenstände (Schlüssel, Kugelschreiber, etc.) oder Kredit- und Bankomatkarten (werden gelöscht) in den Untersuchungsraum mitgebracht werden. Verschiedene Make-ups enthalten ebenfalls Eisenbestandteile, weshalb wir Sie bitten, die Gesichtsschminke soweit wie möglich zu entfernen.

#### Kontrastmittel

***In manchen Fällen kann die diagnostische Aussage durch Verabreichen einer Kontrastmittelinjektion erweitert und verbessert werden.***

Wissenschaftliche Untersuchungen zeigen, dass bei ca. 99% der Patienten keine Nebenwirkungen nach Kontrastmittel-Verabreichung auftreten. Wie bei fast jedem medizinisch notwendigen diagnostischen Eingriff ist eine lebensbedrohliche Komplikation möglich, jedoch äußerst unwahrscheinlich. Schwere Komplikationen treten sehr selten auf (1:10.000), sodass das Risiko der Untersuchung, im Vergleich zum erzielten Nutzen, sehr klein ist.

#### Vorsicht bei Allergien

Bei einer bestehenden Allergie (z.B. auf Medikamente, Pollen etc.) oder einer bekannten Überempfindlichkeit auf Kontrastmittel können durch die Gabe eines MR-Kontrastmittels vorübergehend Schwellung, Juckreiz, Niesen, Hautausschlag, Schwindel oder Erbrechen und ähnliche leichtere Reaktionen auftreten. Schwerwiegende Komplikationen im Bezug auf lebenswichtige Funktionen (Herz, Kreislauf, Atmung, Nieren) und bleibende Schäden (z.B. Organversagen, Lähmungen) sind extrem selten.

Bei vorgeschädigter Niere kann es durch Verabreichung eines Kontrastmittels zu schweren Entzündungen von Haut und Bindegewebe mit Gelenkversteifung und Narbenbildung kommen.

**Für die Vorbereitung der Untersuchung und um Vorsichtsmaßnahmen ergreifen zu können, bitten wir Sie um gewissenhafte Beantwortung folgender Fragen:**

- |   | JA                       | NEIN                     |
|---|--------------------------|--------------------------|
| 1. Haben Sie schon einmal eine MRT-Untersuchung gehabt?<br>Wenn ja, wann und wo? _____  | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| 2. Leiden Sie unter Platzangst?   | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| 3. Haben Sie Allergien, Asthma oder Medikamentenunverträglichkeiten?<br>Allergische Reaktionen auf MR-Kontrastmittel sind bisher extrem selten beobachtet worden. Jodallergien spielen bei dieser Untersuchung keine Rolle. | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| 4. Haben Sie einen Herzschrittmacher, eine Insulin-Pumpe, metallische Prothesen oder andere Implantate wie z.B. Mittelohrimplantate, Hörgeräte, Herzklappen- oder Hüftprothesen, Zahnprothese (mit Magnethaftung?)          | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| 5. Haben Sie Metallteile oder Metallsplitter im Körper (Piercing, Marknagel)?<br>Tattoos, Permanent-Make-up, Schmerzpflaster, Akupunkturnadeln?   | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| 6. Wurde bei Ihnen eine Operation am Herzen oder Kopf durchgeführt?   | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| 7. Besteht bei Ihnen eine Funktionseinschränkung der Nieren?  | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| 8. Wenn ja, haben Sie innerhalb der letzten 7 Tage ein MR-Kontrastmittel erhalten?  | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| 9. Körpergewicht _____ kg      Körpergröße _____ cm   |                          |                          |

**Für Frauen:**

10. Besteht eine Schwangerschaft (in welcher Woche?) bzw. könnten Sie schwanger sein?

**Nach der Untersuchung**

Wurde ein **Kontrastmittel** verabreicht, bitte **reichlich trinken** (z.B. Tee, Mineralwasser, Saft), sofern Ihre Ärztin / Ihr Arzt nichts anderes verordnet hat.  
Wenn Sie ein **Beruhigungsmittel** erhalten, sollten Sie in den nächsten 12 bis 24 Stunden **kein Kraftfahrzeug steuern** und **nicht an gefährlichen Maschinen arbeiten**.

Ich bestätige, dass ich den Text gelesen, verstanden und die mich betreffenden Fragen nach bestem Gewissen beantwortet habe. Ich stimme der Durchführung der vorgeschlagenen MRT-Untersuchung und Kontrastmittelgabe – wenn erforderlich - zu. In einem persönlichen Gespräch sind meine Fragen ausreichend beantwortet worden.

Name und Geburtsdatum  
der/des Patientin/en:

\_\_\_\_\_  
Unterschrift der/des Patientin/en  
bzw. der Eltern oder des gesetzlichen Vertreters

\_\_\_\_\_  
Name der RT / des RT

\_\_\_\_\_  
Datum

\_\_\_\_\_  
Name der Ärztin / des Arztes

# Aufklärungsbogen Probandinnen:

## ProbandInneninformation und Einwilligungserklärung zur Teilnahme an der klinischen Studie

### QISS-MRA zur Darstellung und Quantifizierung<sup>1</sup> der Aorta thoracalis nach erfolgter Therapie

Sehr geehrte Teilnehmerin, sehr geehrter Teilnehmer!

Wir laden Sie ein an der oben genannten klinischen Studie teilzunehmen. Die Aufklärung darüber erfolgt in einem ausführlichen ärztlichen Gespräch.

Ihre Teilnahme an dieser klinischen Studie erfolgt freiwillig. Sie können jederzeit ohne Angabe von Gründen aus der Studie ausscheiden. Die Ablehnung der Teilnahme oder ein vorzeitiges Ausscheiden aus dieser Studie hat keine nachteiligen Folgen für Ihre medizinische Betreuung.

Klinische Studien sind notwendig, um verlässliche neue medizinische Forschungsergebnisse zu gewinnen. Unverzichtbare Voraussetzung für die Durchführung einer klinischen Studie ist jedoch, dass Sie Ihr Einverständnis zur Teilnahme an dieser klinischen Studie schriftlich erklären. Bitte lesen Sie den folgenden Text als Ergänzung zum Informationsgespräch mit Ihrer Ärztin/Ihrem Arzt sorgfältig durch und zögern Sie nicht Fragen zu stellen.

Bitte unterschreiben Sie die Einwilligungserklärung nur

- wenn Sie Art und Ablauf der klinischen Studie vollständig verstanden haben,
- wenn Sie bereit sind, der Teilnahme zuzustimmen und
- wenn Sie sich über Ihre Rechte als TeilnehmerIn an dieser klinischen Studie im Klaren sind.

Zu dieser klinischen Studie, sowie zur ProbandInneninformation und Einwilligungserklärung wurde von der zuständigen Ethikkommission eine befürwortende Stellungnahme abgegeben.

#### 1. Was ist der Zweck der klinischen Studie?

Ergänzend zu den Routine-MR-Sequenzen<sup>2</sup> bei der Nachkontrolle einer therapierten Aorta thoracalis wollen wir mit den zusätzlichen flussgestützten<sup>3</sup> Aufnahmen mehr Informationen über den Blutfluss in der Hauptschlagader und die Wandbeschaffenheit der Aorta bekommen.

<sup>1</sup> Bei den anhand der Sequenzen entstandenen Aufnahmen/Bilder werden Analysen und Messungen durchgeführt, zum Beispiel der Durchmesser der Aorta.

<sup>2</sup> Eine MRT Sequenz ist eine vom MR-Gerät erzeugte elektromagnetische Sequenz, die Schnittbilder erzeugen kann. Bei einer Sequenz handelt es sich um eine zeitliche und räumliche Abfolge von unterschiedlichen Einheiten.

<sup>3</sup> Bei einer flussgestützten Aufnahme handelt es sich um eine flusssensitive Aufnahme, die die Fließeigenschaften einer Körperflüssigkeit, in diesem Fall Blut, auch ohne Kontrastmittel erfassen kann.

## 2. Wie läuft die klinische Studie ab?

Diese klinische Studie wird an unserer Klinik durchgeführt, und es ist vorgesehen, dass 9 Personen an dieser Studie teilnehmen, darunter 3 Probandinnen und 6 PatientInnen. Ihre Teilnahme als ProbandIn ist für unsere Studie essentiell, da die beiden Sequenzen anhand von drei ProbandInnen, die keine wissentliche Pathologie vorweisen, eingespielt und eingestellt werden müssen.

Diese beiden Sequenzen sollen dann an 6 PatientInnen auf ihre Anwendbarkeit getestet werden. Dazu werden sie im Anschluss an die Routine-Nachkontrollen bei therapierter Aorta thoracalis ergänzt.

Die Dauer der durchzuführenden Sequenzen liegt bei 8 bis 12 min bzw. bei 5 bis 15 min, abhängig vom individuellen Herzschlag. Die Untersuchung wird also maximal 30 min dauern.

Ihre Teilnahme an dieser klinischen Studie wird voraussichtlich nur einen Termin betreffen.

Die Abklärung der Kontraindikationen und die Aufklärung erfolgen zusätzlich mit dem im Routinebetrieb verwendeten Anamnese- und Aufklärungsblatt.

## 3. Worin liegt der Nutzen einer Teilnahme an der Klinischen Studie?

Es ist nicht zu erwarten, dass Sie aus Ihrer Teilnahme an dieser klinischen Studie gesundheitlichen Nutzen ziehen werden.

## 4. Gibt es Risiken, Beschwerden und Begleiterscheinungen?

Zu den Unannehmlichkeiten zählen in dieser Studie die Lärmbelastung und das Stillliegen.

## 5. Was ist zu tun beim Auftreten von Symptomen, Begleiterscheinungen und/oder Verletzungen?

Es ist nicht mit dem Auftreten von Symptomen oder Begleiterscheinungen zu rechnen. Bei Unwohlsein können Sie die Untersuchung jederzeit mittels Drücken des Signalballs unterbrechen oder beenden.

## 6. Wann wird die klinische Studie vorzeitig beendet?

Sie können jederzeit auch ohne Angabe von Gründen, Ihre Teilnahmebereitschaft widerrufen und aus der klinischen Studie ausscheiden.

## 7. Datenschutz

Bei den Daten, die über Sie im Rahmen dieser klinischen Studie erhoben und verarbeitet werden, ist grundsätzlich zu unterscheiden zwischen

- 1) jenen personenbezogenen Daten, anhand derer Sie direkt identifizierbar sind (z.B. Name, Geburtsdatum, Adresse, Bildaufnahmen...),
- 2) pseudonymisierten (verschlüsselten) personenbezogenen Daten, bei denen alle Informationen, die direkte Rückschlüsse auf Ihre Identität zulassen, durch einen Code (z. B. eine Zahl) ersetzt bzw. (z.B. im Fall von Bildaufnahmen) unkenntlich gemacht werden. Dies bewirkt, dass die Daten ohne Hinzuziehung zusätzlicher Informationen und ohne unverhältnismäßig großen Aufwand nicht mehr Ihrer Person zugeordnet werden können und
- 3) anonymisierten Daten, bei denen eine Rückführung auf Ihre Person nicht mehr möglich ist.

Der Code zur Verschlüsselung wird von den verschlüsselten Datensätzen streng getrennt und nur an Ihrem Prüfzentrum aufbewahrt.

Zugang zu Ihren nicht verschlüsselten Daten haben die Prüferin/der Prüfer und andere MitarbeiterInnen des Studienzentrums, die an der klinischen Studie oder Ihrer medizinischen Versorgung mitwirken. Die Daten sind gegen unbefugten Zugriff geschützt. Zusätzlich können Beauftragte von in- und/oder ausländischen Gesundheitsbehörden und jeweils zuständige Ethikkommissionen in die nicht verschlüsselten Daten Einsicht nehmen, soweit dies für die Überprüfung der ordnungsgemäßen Durchführung der klinischen Studie notwendig bzw. vorgeschrieben ist.

Für Publikationen werden nur die verschlüsselten oder anonymisierten Daten verwendet.

Sämtliche Personen, die Zugang zu Ihren verschlüsselten und nicht verschlüsselten Daten erhalten, unterliegen im Umgang mit den Daten der Datenschutz-Grundverordnung (DSGVO) sowie den österreichischen Anpassungsvorschriften in der jeweils gültigen Fassung.

Im Rahmen dieser klinischen Studie ist keine Weitergabe von Daten in Länder außerhalb der EU vorgesehen.

Sie können Ihre Einwilligung zur Erhebung und Verarbeitung Ihrer Daten jederzeit widerrufen. Nach Ihrem Widerruf werden keine weiteren Daten mehr über Sie erhoben. Die bis zum Widerruf erhobenen Daten können allerdings weiter im Rahmen dieser klinischen Studie verwendet werden.

Aufgrund der gesetzlichen Vorgaben haben Sie außerdem, sofern dies nicht die Durchführung der klinischen Studie voraussichtlich unmöglich macht oder ernsthaft beeinträchtigt, das Recht auf Einsicht in die Ihre Person betreffenden Daten und die Möglichkeit der Berichtigung, falls Sie Fehler feststellen.

Sie haben auch das Recht, bei der österreichischen Datenschutzbehörde eine Beschwerde über den Umgang mit Ihren Daten einzubringen ([www.dsb.gv.at](http://www.dsb.gv.at)).

Die voraussichtliche Dauer der klinischen Studie beträgt 1,5 Jahre. Die Dauer der Speicherung Ihrer Daten über das Ende der klinischen Studie hinaus ist durch

Rechtsvorschriften geregelt. Falls Sie Fragen zum Umgang mit Ihren Daten in dieser klinischen Studie haben, wenden Sie sich zunächst an Ihre Prüferin/Ihren Prüfer. Diese/r kann Ihr Anliegen ggf. an die Personen, die am Studienzentrum für den Datenschutz verantwortlich sind, weiterleiten.

Datenschutzbeauftragte/r:

Kontakt Datenschutzbeauftragte/r Medizinische Universität Graz:

Email: [datenschutz@medunigraz.at](mailto:datenschutz@medunigraz.at)

Kontakt Datenschutzbeauftragte/r Krankenhausträger KAGES:

Email: [datenschutz@kages.at](mailto:datenschutz@kages.at)

**8. Entstehen für die TeilnehmerInnen Kosten? Gibt es einen Kostenersatz oder eine Vergütung?**

Durch Ihre Teilnahme an dieser klinischen Studie entstehen für Sie keine zusätzlichen Kosten.

Für die Teilnahme an der klinischen Studie ist keine Vergütung vorgesehen.

**9. Möglichkeit zur Diskussion weiterer Fragen**

Für weitere Fragen im Zusammenhang mit dieser klinischen Studie stehen Ihnen Ihre Studienärztin/Ihr Studienarzt und ihre/seine MitarbeiterInnen gern zur Verfügung. Auch Fragen, die Ihre Rechte als ProbandIn und TeilnehmerIn an dieser klinischen Studie betreffen, werden Ihnen gerne beantwortet. Sobald allgemeine Ergebnisse dieser klinischen Studie vorliegen, können Sie ebenfalls darüber informiert werden, falls Sie dieses wünschen.

Name der Kontaktperson: Manuela Aschauer

Erreichbar unter: +43(316)385-13271 (Sekretariat Radiologie)

Name der Kontaktperson: Ingeborg Keeling

Erreichbar unter: +43 (316) 385-82820 (Sekretariat Herzchirurgie)

**10. Einwilligungserklärung**

Name der Probandin/des Probanden:

Geb. Datum:

Ich erkläre mich bereit, an der klinischen Studie „QISS-MRA zur Darstellung und Quantifizierung der Aorta thoracalis nach erfolgter Therapie“ teilzunehmen.

Ich bin von Herrn/Frau .....  
ausführlich und verständlich über die klinische Studie, mögliche Belastungen und Risiken,  
sowie über Wesen, Bedeutung und Tragweite der klinischen Studie, sich für mich daraus  
ergebenden Anforderungen aufgeklärt worden. Ich habe darüber hinaus den Text dieser  
ProbandInnenaufklärung und Einwilligungserklärung, die insgesamt 5 Seiten umfasst gelesen.  
Aufgetretene Fragen wurden mir von der Studienärztin/vom Studienarzt verständlich und  
genügend beantwortet. Ich hatte ausreichend Zeit, mich zu entscheiden. Ich habe zurzeit keine  
weiteren Fragen mehr.

Ich werde den ärztlichen Anordnungen, die für die Durchführung der klinischen Studie  
erforderlich sind, Folge leisten, behalte mir jedoch das Recht vor, meine freiwillige Mitwirkung  
jederzeit zu beenden, ohne dass mir daraus Nachteile für meine weitere medizinische Betreuung  
entstehen.

Ich stimme ausdrücklich zu, dass meine im Rahmen dieser klinischen Studie erhobenen Daten  
wie im Abschnitt „Datenschutz“ dieses Dokuments beschrieben verwendet werden.

Eine Kopie dieser ProbandInneninformation und Einwilligungserklärung habe ich erhalten.  
Das Original verbleibt bei der Studienärztin/beim Studienarzt.

.....  
(Datum, Name und Unterschrift der Probandin/des Probanden)

.....  
(Datum, Name und Unterschrift der verantwortlichen Prüferärztin/des verantwortlichen Prüferarztes)

# Aufklärungsbogen PatientInnen:

## PatientInneninformation und Einwilligungserklärung zur Teilnahme an der klinischen Studie

### QISS-MRA zur Darstellung und Quantifizierung<sup>1</sup> der Aorta thoracalis nach erfolgter Therapie

Sehr geehrte Teilnehmerin, sehr geehrter Teilnehmer!

Wir laden Sie ein an der oben genannten klinischen Studie teilzunehmen. Die Aufklärung darüber erfolgt in einem ausführlichen ärztlichen Gespräch.

**Ihre Teilnahme an dieser klinischen Studie erfolgt freiwillig. Sie können jederzeit ohne Angabe von Gründen aus der Studie ausscheiden. Die Ablehnung der Teilnahme oder ein vorzeitiges Ausscheiden aus dieser Studie hat keine nachteiligen Folgen für Ihre medizinische Betreuung.**

Klinische Studien sind notwendig, um verlässliche neue medizinische Forschungsergebnisse zu gewinnen. Unverzichtbare Voraussetzung für die Durchführung einer klinischen Studie ist jedoch, dass Sie Ihr Einverständnis zur Teilnahme an dieser klinischen Studie schriftlich erklären. Bitte lesen Sie den folgenden Text als Ergänzung zum Informationsgespräch mit Ihrer Ärztin/Ihrem Arzt sorgfältig durch und zögern Sie nicht Fragen zu stellen.

Bitte unterschreiben Sie die Einwilligungserklärung nur

- wenn Sie Art und Ablauf der klinischen Studie vollständig verstanden haben,
- wenn Sie bereit sind, der Teilnahme zuzustimmen und
- wenn Sie sich über Ihre Rechte als TeilnehmerIn an dieser klinischen Studie im Klaren sind.

Zu dieser klinischen Studie, sowie zur PatientInneninformation und Einwilligungserklärung wurde von der zuständigen Ethikkommission eine befürwortende Stellungnahme abgegeben.

#### 1. Was ist der Zweck der klinischen Studie?

Ergänzend zu den bisher durchgeführten und auch heute geplanten Sequenzen<sup>2</sup> wollen wir mit den zusätzlichen flussgestützten<sup>3</sup> Aufnahmen mehr Informationen über den Blutfluss in der Hauptschlagader und die Wandbeschaffenheit der Aorta bekommen.

<sup>1</sup> Bei den anhand der Sequenzen entstandenen Aufnahmen/Bilder werden Analysen und Messungen durchgeführt, zum Beispiel der Durchmesser der Aorta.

<sup>2</sup> Eine MRT Sequenz ist eine vom MR-Gerät erzeugte elektromagnetische Sequenz, die Schnittbilder erzeugen kann. Bei einer Sequenz handelt es sich um eine zeitliche und räumliche Abfolge von unterschiedlichen Einheiten.

<sup>3</sup> Bei einer flussgestützten Aufnahme handelt es sich um eine flusssensitive Aufnahme, die die Fließeigenschaften einer Körperflüssigkeit, in diesem Fall Blut, auch ohne Kontrastmittel erfassen kann.

## **2. Wie läuft die klinische Studie ab?**

Diese klinische Studie wird an unserer Klinik durchgeführt und es ist vorgesehen, dass 9 Personen an dieser Studie teilnehmen, darunter 3 Probandinnen und 6 PatientInnen. Probandinnen sind die beiden Studienärztinnen und die Studentin. Diese werden hinzugezogen, um die beiden Sequenzen für die Studie einzuspielen und einzustellen. Grundsätzlich werden für Sie die gleichen Vorkehrungen getroffen, wie bei Ihrer bekannten Routine-Nachkontrolle, über die Sie im Vorfeld bereits aufgeklärt wurden. Auch die Risikofaktoren sind entsprechend unverändert.

Die Dauer der zusätzlich durchzuführenden Sequenzen liegt bei 8 bis 12 min bzw. bei 5 bis 15 min, abhängig von ihrem individuellen Herzschlag. Die Routineuntersuchung wird sich damit um maximal 30 min verlängern.

Ihre Teilnahme an dieser klinischen Studie wird voraussichtlich nur Ihren regulären Nachkontrolltermin betreffen.

Die Einhaltung der Besuchstermine, einschließlich der Anweisungen der Studienärztin/des Studienarztes ist von entscheidender Bedeutung für den Erfolg dieser klinischen Studie.

## **3. Worin liegt der Nutzen einer Teilnahme an der Klinischen Studie?**

Es ist nicht zu erwarten, dass Sie aus Ihrer Teilnahme an dieser klinischen Studie gesundheitlichen Nutzen ziehen werden. Allerdings kann diese Ergänzung für Sie von Vorteil sein, weil Ihre Untersuchung an einem technisch besser ausgestatteten MR-Gerät durchgeführt wird, da man u.a. die gesamte zu untersuchende Region mit einem Untersuchungsfeld abdecken kann. Außerdem erzeugt dieses MR Gerät eine bessere Abbildung, vor allem an den Bildrändern, u.a. da die Röhre schmaler ist. Möglicherweise kann in einer weiteren Routinekontrolle dann manchmal auf die Kontrastmittelapplikation verzichtet werden.

## **4. Gibt es Risiken, Beschwerden und Begleiterscheinungen?**

Zu den Unannehmlichkeiten zählen in dieser Studie die längere Lärmbelastung und das längere Stillliegen. Grundsätzlich wird man zuerst die Routine-MR-Untersuchung durchführen, damit die Daten, um Sie weiter behandeln zu können, vorliegen. Würde man in der nachfolgenden zusätzlichen MR-Untersuchungszeit diese abbrechen, so gehen nur die Studiendaten verloren.

## **5. Was ist zu tun beim Auftreten von Symptomen, Begleiterscheinungen und/oder Verletzungen?**

Es ist nicht mit dem Auftreten von Symptomen oder Begleiterscheinungen zu rechnen. Bei Unwohlsein können Sie die Untersuchung jederzeit mittels Drücken des Signalballs unterbrechen oder beenden.

## 6. Wann wird die klinische Studie vorzeitig beendet?

Sie können jederzeit auch ohne Angabe von Gründen, Ihre Teilnahmebereitschaft widerrufen und aus der klinischen Studie ausscheiden, ohne dass Ihnen dadurch irgendwelche Nachteile für Ihre weitere medizinische Betreuung entstehen.

Ihre Studienärztin/Ihr Studienarzt wird Sie über alle neuen Erkenntnisse, die in Bezug auf diese klinische Studie bekannt werden, und für Sie wesentlich werden könnten, umgehend informieren.

## 7. Datenschutz

Bei den Daten, die über Sie im Rahmen dieser klinischen Studie erhoben und verarbeitet werden, ist grundsätzlich zu unterscheiden zwischen

- 1) jenen personenbezogenen Daten, anhand derer Sie direkt identifizierbar sind (z.B. Name, Geburtsdatum, Adresse, Bildaufnahmen...),
- 2) pseudonymisierten (verschlüsselten) personenbezogenen Daten, bei denen alle Informationen, die direkte Rückschlüsse auf Ihre Identität zulassen, durch einen Code (z. B. eine Zahl) ersetzt bzw. (z.B. im Fall von Bildaufnahmen) unkenntlich gemacht werden. Dies bewirkt, dass die Daten ohne Hinzuziehung zusätzlicher Informationen und ohne unverhältnismäßig großen Aufwand nicht mehr Ihrer Person zugeordnet werden können und
- 3) anonymisierten Daten, bei denen eine Rückführung auf Ihre Person nicht mehr möglich ist.

Der Code zur Verschlüsselung wird von den verschlüsselten Datensätzen streng getrennt und nur an Ihrem Prüfzentrum aufbewahrt.

Zugang zu Ihren nicht verschlüsselten Daten haben die Prüferin/der Prüfer und andere MitarbeiterInnen des Studienzentrums, die an der klinischen Studie oder Ihrer medizinischen Versorgung mitwirken. Die Daten sind gegen unbefugten Zugriff geschützt. Zusätzlich können Beauftragte von in- und/oder ausländischen Gesundheitsbehörden und jeweils zuständige Ethikkommissionen in die nicht verschlüsselten Daten Einsicht nehmen, soweit dies für die Überprüfung der ordnungsgemäßen Durchführung der klinischen Studie notwendig bzw. vorgeschrieben ist.

Für Publikationen werden nur die verschlüsselten oder anonymisierten Daten verwendet.

Sämtliche Personen, die Zugang zu Ihren verschlüsselten und nicht verschlüsselten Daten erhalten, unterliegen im Umgang mit den Daten der Datenschutz-Grundverordnung (DSGVO) sowie den österreichischen Anpassungsvorschriften in der jeweils gültigen Fassung.

Im Rahmen dieser klinischen Studie ist keine Weitergabe von Daten in Länder außerhalb der EU vorgesehen.

Sie können Ihre Einwilligung zur Erhebung und Verarbeitung Ihrer Daten jederzeit widerrufen. Nach Ihrem Widerruf werden keine weiteren Daten mehr über Sie erhoben. Die bis zum Widerruf erhobenen Daten können allerdings weiter im Rahmen dieser klinischen Studie verwendet werden.

Aufgrund der gesetzlichen Vorgaben haben Sie außerdem, sofern dies nicht die Durchführung der klinischen Studie voraussichtlich unmöglich macht oder ernsthaft beeinträchtigt, das Recht auf Einsicht in die Ihre Person betreffenden Daten und die Möglichkeit der Berichtigung, falls Sie Fehler feststellen.

Sie haben auch das Recht, bei der österreichischen Datenschutzbehörde eine Beschwerde über den Umgang mit Ihren Daten einzubringen ([www.dsb.gv.at](http://www.dsb.gv.at)). Die voraussichtliche Dauer der klinischen Studie beträgt 1,5 Jahre. Die Dauer der Speicherung Ihrer Daten über das Ende der klinischen Studie hinaus ist durch Rechtsvorschriften geregelt. Falls Sie Fragen zum Umgang mit Ihren Daten in dieser klinischen Studie haben, wenden Sie sich zunächst an Ihre Prüferin/Ihren Prüfer. Diese/r kann Ihr Anliegen ggf. an die Personen, die am Studienzentrum für den Datenschutz verantwortlich sind, weiterleiten.

Datenschutzbeauftragte/r:

Kontakt Datenschutzbeauftragte/r Medizinische Universität Graz:

Email: [datenschutz@medunigraz.at](mailto:datenschutz@medunigraz.at)

Kontakt Datenschutzbeauftragte/r Krankenhausträger KAGES:

Email: [datenschutz@kages.at](mailto:datenschutz@kages.at)

#### **8. Entstehen für die TeilnehmerInnen Kosten? Gibt es einen Kostenersatz oder eine Vergütung?**

Durch Ihre Teilnahme an dieser klinischen Studie entstehen für Sie keine zusätzlichen Kosten.

Für die Teilnahme an der klinischen Studie ist keine Vergütung vorgesehen.

#### **9. Möglichkeit zur Diskussion weiterer Fragen**

Für weitere Fragen im Zusammenhang mit dieser klinischen Studie stehen Ihnen Ihre Studienärztin/Ihr Studienarzt und ihre/seine MitarbeiterInnen gern zur Verfügung. Auch Fragen, die Ihre Rechte als PatientIn und TeilnehmerIn an dieser klinischen Studie betreffen, werden Ihnen gerne beantwortet. Sobald allgemeine Ergebnisse dieser klinischen Studie vorliegen, können Sie ebenfalls darüber informiert werden, falls Sie dieses wünschen.

Name der Kontaktperson: Manuela Aschauer

Erreichbar unter: +43(316)385-13271 (Sekretariat Radiologie)

Name der Kontaktperson: Ingeborg Keeling

Erreichbar unter: +43 (316) 385-82820 (Sekretariat Herzchirurgie)

**10. Sollten andere behandelnde Ärztinnen/Ärzte von der Teilnahme an der klinischen Studie informiert werden?**

Die entsprechenden behandelnden HerzchirurgInnen werden krankenhausintern über die Ergebnisse der Studie und Ihre Befunde informiert. Außerdem wird Ihre Hausärztin/ihr Hausarzt über Ihre Befunde informiert.

**11. Einwilligungserklärung**

Name der Patientin/des Patienten:

Geb.Datum:

Ich erkläre mich bereit, an der klinischen Studie „QISS-MRA zur Darstellung und Quantifizierung der Aorta thoracalis nach erfolgter Therapie“ teilzunehmen.

Ich bin von Herrn/Frau ..... ausführlich und verständlich über die klinische Studie, mögliche Belastungen und Risiken, sowie über Wesen, Bedeutung und Tragweite der klinischen Studie, sich für mich daraus ergebenden Anforderungen aufgeklärt worden. Ich habe darüber hinaus den Text dieser PatientInnenaufklärung und Einwilligungserklärung, die insgesamt 5 Seiten umfasst gelesen. Aufgetretene Fragen wurden mir von der Studienärztin/vom Studienarzt verständlich und genügend beantwortet. Ich hatte ausreichend Zeit, mich zu entscheiden. Ich habe zurzeit keine weiteren Fragen mehr.

Ich werde den ärztlichen Anordnungen, die für die Durchführung der klinischen Studie erforderlich sind, Folge leisten, behalte mir jedoch das Recht vor, meine freiwillige Mitwirkung jederzeit zu beenden, ohne dass mir daraus Nachteile für meine weitere medizinische Betreuung entstehen.

Ich stimme ausdrücklich zu, dass meine im Rahmen dieser klinischen Studie erhobenen Daten wie im Abschnitt „Datenschutz“ dieses Dokuments beschrieben verwendet werden.

Eine Kopie dieser PatientInneninformation und Einwilligungserklärung habe ich erhalten. Das Original verbleibt bei der Studienärztin/beim Studienarzt.

.....  
(Datum, Name und Unterschrift der Patientin/des Patienten)

.....  
(Datum, Name und Unterschrift der verantwortlichen Prüferin/des verantwortlichen Prüfers)