

Kardiologie 2024 · 18:470–475
<https://doi.org/10.1007/s12181-024-00706-8>
Angenommen: 19. August 2024
Online publiziert: 24. September 2024
© Deutsche Gesellschaft für Kardiologie - Herz- und Kreislaufforschung e.V. Published by Springer Medizin Verlag GmbH, ein Teil von Springer Nature
- all rights reserved 2024



TEE, 3D- und interventionelle Echokardiographie

Andreas Franke

Abteilung Kardiologie, Rhythmologie und internistische Intensivmedizin, KRH Klinikum Siloah, Hannover, Deutschland

Zusammenfassung

Die transösophageale Echokardiographie (TEE) hat seit ihren ersten noch eher experimentellen Anwendungen Ende der 1970er und Anfang der 1980er-Jahre im Zuge der technischen Weiterentwicklungen aufgrund der Vorteile ihres nahezu unbehinderten Ultraschallfensters mit ihren vielfältigen Modalitäten einen festen Stellenwert in der kardialen Bildgebung erlangt. Der Beitrag beschreibt insbesondere auch die prägenden Einflüsse und Entwicklungen deutscher Kardiologen in diesem echokardiographischen Teilbereich über die vergangenen Jahrzehnte – von der monoplanen TEE bis hin zum periinterventionellen Monitoring mittels dreidimensionaler TEE.

Schlüsselwörter

Diagnostik · Strukturelle Herzerkrankungen · Endokarderkrankungen · Herzklappenerkrankungen · Herzklappenersatz

Video Online

Die Online-Version dieses Beitrags (<https://doi.org/10.1007/s12181-024-00706-8>) enthält zusätzliche Videos.

Der Verlag veröffentlicht die Beiträge in der von den Autorinnen und Autoren gewählten Genderform. Bei der Verwendung des generischen Maskulinums als geschlechtsneutrale Form sind alle Geschlechter impliziert.



Zusatzmaterial online – bitte QR-Code scannen

Transösophageale Echokardiographie

Im Laufe der vergangenen Jahrzehnte waren technische Neuerungen und Erweiterungen der diagnostischen Ultraschall Modalitäten in der Regel selbstverständlich nicht auf einzelne Personen oder Nationalitäten begrenzt, sondern beruhten meist auf engen internationalen Kooperationen. Unbestreitbar war aber gerade auf dem Feld der transösophagealen Echokardiographie (TEE) der Beitrag deutscher Arbeitsgruppen groß und prägend. Die Bemühungen, Thoraxwand-ferne kardiiale Strukturen detaillierter analysieren zu können, führten Ende der 1970er- und Anfang der 1980er-Jahre zu ersten experimentellen intraoperativen Einsätzen transösophagealer M-Mode-Sonden. Die Nutzung dieses neuen Ultraschallfensters zum Herzen nahm durch die Entwicklung von zweidimensionalen „phased array“ Schallköpfen deutlich Fahrt auf. Diese technische Neuerung entsprang schließlich einer Kooperation der Gruppe um Peter Hanrath [1] mit Ingenieuren wie Jacques Souquet der

Firma ATL (Advanced Technology Laboratories) und erwies sich rasch als klinisch höchst wertvolle Modalität in der Diagnostik von Vitien, insbesondere der Mitralklappe, und von pathologischen Veränderungen der großen thorakalen Gefäße sowie in der Suche nach Zusatzstrukturen bei Endokarditis oder intrakardialen Thromben. Gerade der Hamburger Arbeitsgruppe Hanraths wie Masayuki Matsumoto, der sich dieser Arbeitsgruppe anschloss, sowie Peter Kremer und Michael Schlüter, zusammen mit Michael Cahalan in San Francisco [2] kommt der Verdienst zu, in Pionierarbeiten den Wert der transösophagealen Anlotung erkannt und schließlich auch zur Etablierung der intraoperativen transösophagealen Echokardiographie insbesondere bei Klappeneingriffen beigetragen zu haben.

Erste transösophageale Sonden waren auf eine (monoplan) oder später 2 senkrecht stehende 2D-Schnittebenen beschränkt (biplan; Kölner Arbeitsgruppe, u.a. [3]). Bei der Entwicklung einer multiplanen transösophagealen Sonde waren Peter Hanrath mit seiner Arbeits-

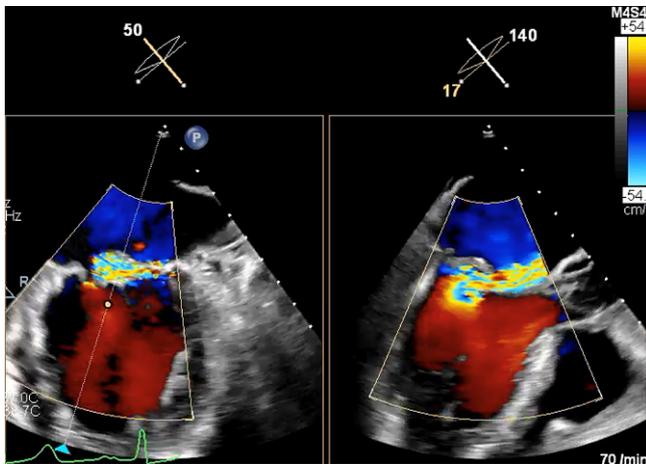


Abb. 1 ▲ Biplane Farb-Doppler-TEE(transösophageale Echokardiographie)-Darstellung einer schweren Mitralinsuffizienz (MI) aufgrund eines „flail leaflet“ des Segments P2 des posterioren Mitralsegels; *links* interkommissurale Schnittebene, *rechts* longitudinale Schnittebene mit erkennbar exzentrischem, breiten MI-Jet. Die zugehörigen Videos 1a und 1b finden Sie im Zusatzmaterial online



Abb. 2 ▲ Biplane Darstellung einer endokarditisch veränderten Aortenklappe. *Links* kurze Achse der Aortenklappe bei ca. 50 Grad Rotation, sowohl an der akoronaren als auch an der rechtskoronaren Tasche sind verdickte Zusatzstrukturen erkennbar. *Rechts* Längsschnitt der Aortenklappe mit großen, ventrikelseitigen und hypermobilen Vegetationen. Das zugehörige Video 2 finden Sie im Zusatzmaterial online

gruppe in Aachen und die Rotterdamer Arbeitsgruppe um Nicolaas Bom und Jos Roelandt erneut Pioniere einer Technik, die sich aufgrund ihrer unbestrittenen Vorteile als Standardtechnik rasch weltweit durchsetzte [4].

Die Essener Gruppe von Raimund Erbel veröffentlichte grundlegende Arbeiten zur Diagnose der Aortendissektion [5] und des intramuralen aortalen Hämatoms [6] sowie zur Endokarditisiagnostik. Ursprünglich in Hannover widmeten sich Werner Daniel (später Erlangen) und Andreas Mügge (dann Bochum) insbesondere der Abszessdiagnostik bei Endokarditis [7], der prognostischen Bedeutung der Vegetationsgröße [8] und der Rolle der Flussgeschwindigkeit im linken Herzohr bei Vorhofflimmern.

Im Laufe der folgenden Jahrzehnte wurde die TEE ein etablierter Standard für eine Vielzahl differenzierter diagnostischer Fragestellungen wie z.B. bei AV(atrioventrikulär)-Klappen-Pathologien (▣ **Abb. 1**: Mitralklappeninsuffizienz; die zugehörigen Videos 1a und 1b im Zusatzmaterial online), bei der Endokarditis (▣ **Abb. 2** und Video 2 im Zusatzmaterial online), der Thrombenseuche sowie der Untersuchung der großen intrathorakalen Gefäße, was Niederschlag in den internationalen Empfehlungen zum Einsatz der TEE geführt hat [9, 10]. Letztlich wurde die TEE zudem die Basis für dreidimensionale

Verfahren und für periinterventionelles und intraoperatives Monitoring.

3D-Echokardiographie

Die Erfassung der Dreidimensionalität des Herzens war und ist insbesondere bei komplexen anatomischen Strukturen ein Ziel der meisten bildgebenden Verfahren – so auch der Echokardiographie.

Erste Bemühungen verwendeten manuell segmentierte Konturen verschiedener zweidimensional und seriell transthorakal erhobener Bilddaten, die mittels elektromagnetischer Sensoren in ihrer räumlichen Orientierung registriert und später separat im Rechner zu einem 3D Modell zusammengefügt wurden. Solche *Verfahren der 3D-Rekonstruktion*, die in der Folge auch aus Farb-Doppler-Bildern und transösophagealen Bilddaten generiert wurden, waren naturgemäß zeit- und rechenaufwendig. Eine Aufnahme benötigte typischerweise zwischen 2 und 5 min, die Analyse je nach Aufwand bis zu 90 min. Ein einmal aufgenommener Datensatz erlaubte es aber auch, später andere Strukturen oder beliebige Schnittebenen und Perspektiven herzustellen, soweit diese im ursprünglichen Datensatz mit enthalten waren.

Die Freiburger Gruppe um Anette Geibel und Helmut Wollschläger setzten schon Ende der 1980er-Jahre eine

spezielle TEE-Sonde ein, die im Rückzug EKG(Elektrokardiogramm)-getriggerte parallele 2D-Schnittbilder aufnahm und zu einem 3D-Datensatz zusammenfügte („Echo-CT“; [11]). In Analogie dazu setzten Arbeitsgruppen in Boston mit deutscher Beteiligung ([12] mit Wollschläger und Bernhard Mumm), München [13], Essen [14] und Berlin [15] transthorakale Sonden ein, die in parallelem Rückzug eine Serie von 2D-Bildern aufnahmen und daraus die 3D-Rekonstruktion erstellte. Naturgemäß war für die Erstellung dieser Daten die transthorakale Bildqualität eine wesentliche Limitation. Auch deswegen wurde die Methode ganz überwiegend bei jungen Patienten mit angeborenen Herzfehlern und guter Schallqualität eingesetzt. Die enge Kooperation mit Ingenieuren eines damals deutschen Start-up-Unternehmens, das sich mit Hard- und Softwareerstellung befasste (Tom-Tec, Unterschleißheim), förderte an vielen deutschen universitären Standorten die intensive wissenschaftliche Beschäftigung mit diesem Thema.

Die schon erwähnte Entwicklung multiplaner TEE-Sonden war in diesem Zusammenhang ein wesentlicher Schritt hin zu automatisierten, EKG-getriggerten seriellen Aufnahme von 60–90 Schnittebenen, die, rotiert um die zentrale Achse, registriert und in der Folge offline analysiert werden konnten. Hier waren die Arbeits-



Abb. 3 ▲ Dreidimensionale Darstellung eines ausgerissenen Carpentier-Mitralrings: Plastisch gerendeter Blick vom linken Vorhof aus in Richtung Mitralklappe. Bei 17 Uhr Querschnitt der Aortenwurzel. Gut erkennbar ist der zwei Drittel der Zirkumferenz betreffende Ausriss des Mitralrings mit seiner stark vermehrten Beweglichkeit. Das zugehörige Video 3 finden Sie im Zusatzmaterial online

gruppen um Frank Flachskampf, Andreas Franke und Harald Kühl in Aachen [16, 17] und um Thomas Buck, Thomas Bartel und Silvana Müller in Essen mit einer Reihe von Validierungsarbeiten bereits früh aktiv [18].

Ähnliche Aufnahmetechniken ließen sich auch transthorakal anwenden, konnten sich aber einerseits wegen der begrenzten Bildqualität, andererseits wegen der aufkommenden 3D-Echtzeit-Technologie nicht durchsetzen, auch wenn ihre daraus abgeleiteten quantitativen Daten gegen andere bildgebende Verfahren wie MR(Magnetresonanz)- und 2D-Echokardiographie validiert worden waren [19].

Die durch die Arbeitsgruppe der Duke University um den Kanadier Olaf von Ramm und Joe Kisslo erstmals Ende der 1990er-Jahre entwickelten Matrix-Schallköpfe erlaubten schließlich die Aufnahme eines pyramidenförmigen 3D-Ultraschallsektors in Echtzeit und benötigten nun idealerweise nur einen einzigen Herzschlag für die Aufnahme.

Die *Echtzeit-3D-Echokardiographie* mit einer höheren Bildqualität und mehr als 3000 aktiven Elementen war zunächst nur mittels relativ großer Ultraschallsonden transthorakal verfügbar, wurde aber innerhalb weniger Jahre von verschiedenen Herstellern als Erweiterung von high-end Echokardiographiegeräten kommerziell verfügbar. Diese neue Technologie wurde in Europa früh durch verschiedene internationale Zentren – so z. B. in Rotter-

dam, Madrid und Rom – aber auch von Arbeitsgruppen in Aachen, Essen, Köln, Leipzig und Mainz aufgenommen.

Damit hielt eine einfach einsetzbare, weil verzögerungsfreie Methode Einzug in die klinische Routine. Neben der morphologisch-qualitativen Beurteilung im Sinne einer plastischen Darstellung kardialer Strukturen, beispielsweise der AV-Klappen, sind vor allem quantitative Analysemöglichkeiten, z. B. der Ventrikelvolumina, bei Verlaufskontrollen von großem klinischem Wert.

Auch hier gingen Validierungsarbeiten der erhobenen 3D-echokardiographischen Daten gegen Goldstandards wie die Magnetresonanztomographie [20, 21] klinischen Studien zum Wert der 3D-Echokardiographie im Vergleich zu konventionellen Techniken voraus. Sie belegten den wesentlichen Vorteil der quantitativen 3D-Echokardiographie mit einer deutlich größeren Genauigkeit, einer besseren Reproduzierbarkeit und geringeren Untersuchervariabilität bei Volumen- und Massenbestimmungen. Inzwischen sind moderne Bildanalysealgorithmen in der Lage, auf dem Boden vorher hinterlegter Datenbanken verschiedener Morphologien des linken Ventrikels und durch adaptive Verfahren der Endokarderkenntnis – ohne manuelle Interaktion durch den Untersucher – Grenzflächen des linken Vorhofes und Ventrikels zu bestimmen und Volumina zu errechnen.

Durch weitere Miniaturisierung ist die Echtzeit-3D-Echokardiographie seit 2006/2007 auch für den transösophagealen Einsatz verfügbar. Arbeitsgruppen wie die in Mainz (Stephan von Bardeleben) ebenso wie Essen (Thomas Buck), Aachen (Andreas Franke) sowie Köln (Wolfgang Fehske) und Leipzig (Andreas Hagendorff) konnten bereits früh – wie auch internationale Gruppen in London (Mark Monaghan) und Rotterdam (Jos Roelandt) – hier erste klinische Untersuchungen zum Wert der Methode durchführen.

Gerade die exakte Analyse der Mitralklappe, ihrer Pathologien und der Schweregradeinschätzung insbesondere der Mitralklappeninsuffizienz waren Schwerpunkte der Arbeiten u. a. in Essen [22], während die quantitative Beurteilung der Aortenklappe und der Aorta ascendens vor allem auch im Hinblick auf operative und interventionelle Verfahren durch die Gruppen von Andreas Hagendorff und Wolfgang Fehske bearbeitet wurden ([23]; ■ **Abb. 3**: Ausriss eines Carpentier-Mitralrings und zugehöriges Video 3 im Zusatzmaterial online).

Die sich rasch entwickelnden Möglichkeiten der beschleunigten und umfassenderen Datenverarbeitung, die Kombination u. a. auch mit der Farb-Doppler-Echokardiographie sowie die Miniaturisierung der Sonden führte zu einer Integration der 3D-Echokardiographie in die klinische Routine, sodass mittlerweile verschiedene Fachgesellschaften unter Beteiligung deutscher Autoren Empfehlungen für ihren Einsatz herausgegeben haben [10, 24, 25].

Die TEE – insbesondere in Kombination mit der Echtzeit-3D-Technik – machte zudem eine noch umfassendere perioperative und vor allem nun auch periinterventionelle Therapiekontrolle und -steuerung möglich (■ **Abb. 4** und die zugehörigen Videos 4a bis 4c im Zusatzmaterial online).

Interventionelle Echokardiographie

Historisch waren erste „interventionelle“ Echokardiographien bei der Perikardpunktion als M-Mode, später in 2D-Technik durchgeführt worden. Mit Entwicklung der transösophagealen Sonden wurden in den 1990er-Jahren dann intraoperativ bei der Mitralklappen-Rekonstruktion

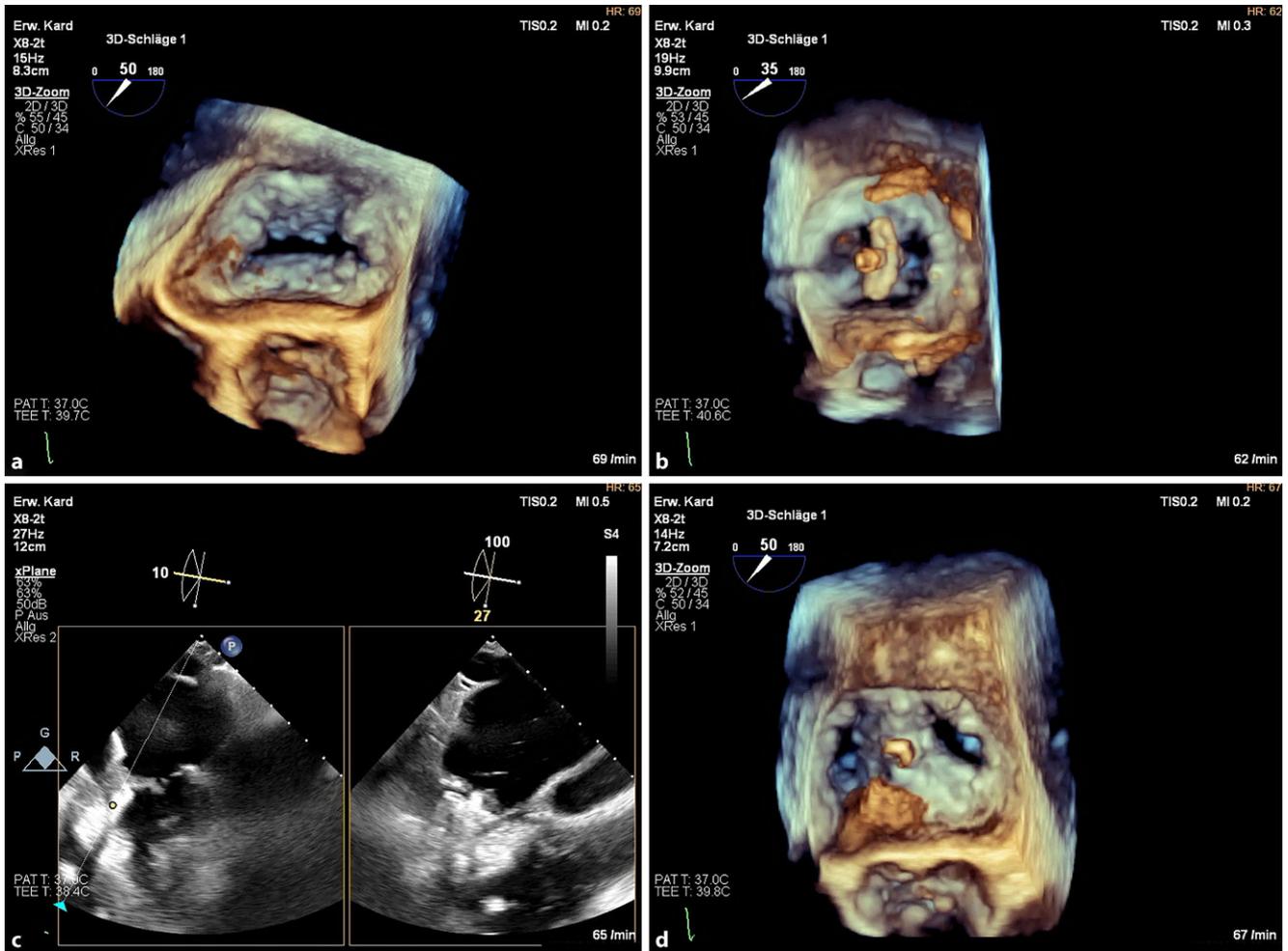


Abb. 4 ▲ Dreidimensionale Darstellung der präinterventionellen Situation vor Clipping Prozedur eines „flail leaflet“ des Segments P2 (Video 1 im Zusatzmaterial online). Blick vom linken Vorhof aus in den Mitralklappentrichter. Anteriores Segel unten im Bild, P2 Segment in der Systole auf den Betrachter hin gewölbt (a; das zugehörige Video 4a finden Sie im Zusatzmaterial online). 3D-Darstellung des geöffneten Mitral-Clips noch im linken Vorhof vor Abtauchen in den linken Ventrikel. Die Orientierung des Clips im Verhältnis zur Koaptationslinie der Mitralklappe wird gut erkennbar (b; das zugehörige Video 4b finden Sie im Zusatzmaterial online). Videosequenz einer periinterventionellen Monitorings beim Greifen eines „flail leaflet“ der Mitralklappe bei der Mitral-Clipping-Prozedur. Biplane Ausrichtung und Darstellung wie in Video 1 des Zusatzmaterials online. Allmähliches Nähern der noch geöffneten Clips von ventrikulär an die Klappe und Aufnehmen der Segel sowie Einfangen zum Ende des Videos (c, das zugehörige Video 4c finden Sie im Zusatzmaterial online). 3D-Darstellung der Situation nach Clipping, Blick vom linken Vorhof aus in Richtung Mitralis. Durch die Implantation des Clips sind nun 2 Mitralöffnungen („double orifice“) entstanden (d; das zugehörige Video 4d finden Sie im Zusatzmaterial online)

echokardiographische Verlaufskontrollen zur Überprüfung des Operationserfolgs durchgeführt. Ein wirkliches Monitoring des Eingriffes in Echtzeit stellte dies naturgemäß nicht dar.

Im Zuge der sich in den letzten Jahren extrem dynamisch entwickelnden katheterinterventionellen Verfahren u.a. bei der Implantation von Okkludern des Vorhofseptums und des Vorhofsohres sowie der AV-Klappenrekonstruktion hat die simultane TEE eine große Bedeutung als im engeren Sinne „interventionelle Echokardiographie“ erlangt. Eine exakte echokar-

diographische Darstellung der kardialen Strukturen und der Blutflüsse spielt nicht nur bei der Patientenselektion, sondern auch periinterventionell eine Schlüsselrolle zur Steuerung der Intervention und zur unmittelbaren Erfolgskontrolle. Erst die Anwendung der *transösophagealen Echtzeit-3D-Echokardiographie mittels Matrix-Schallköpfen* seit 2007 eröffnete darüber hinaus auch den Weg des biplanen oder gar dreidimensionalen Monitorings.

Die Arbeitsgruppen in Mainz (Stephan von Bardeleben, Felix Kreidel), Leipzig (Andreas Hagendorff) sowie in Berlin (Adrian

Borges, Fabian Knebel) und Essen (Thomas Buck) sowie Aachen (Harald Kühl, Jan Balzer, Ertunc Altioik) untersuchten den Wert der periinterventionellen 3D-Echokardiographie beim Verschluss von Vorhofseptumdefekten [26, 27], der transkutanen Implantation von Aortenklappenprothesen [28, 29] und von Vorhofsohr-Okkludern [30] bei interventionellen elektrophysiologischen Verfahren [31] sowie auch der kathetertechnischen Behandlung der Mitralklappen- und Trikuspidalklappeninsuffizienz [32–35].

Dabei ermöglicht die 3D-Bildgebung insbesondere bei räumlich komplexen Vorgängen (End-zu-End-Rekonstruktion der Mitral- und der Trikuspidalklappe) überhaupt erst eine erfolgreiche Durchführung der Methode sowie eine größere Sicherheit interventionell [36].

Die in den vergangenen Jahren erheblich steigende Zahl von Katheterinterventionen an den AV-Klappen gerade in Deutschland wäre ohne eine entsprechende periinterventionelle Bildgebung sicherlich nicht vorstellbar gewesen. Die Abhängigkeit des Therapieerfolges von einer kompetenten Bildgebung mündete nicht zuletzt auch in der Erstellung eines Curriculums der Deutschen Gesellschaft für Kardiologie zur Sachkunde in der Interventionellen Echokardiographie [37].

Korrespondenzadresse



Prof. Dr. Andreas Franke

Abteilung Kardiologie, Rhythmologie und internistische Intensivmedizin, KRH Klinikum Siloah
Stadionbrücke 4, 30459 Hannover, Deutschland
andreas.franke@krh.eu

Einhaltung ethischer Richtlinien

Interessenkonflikt. A. Franke gibt an, dass kein Interessenkonflikt besteht.

Für diesen Beitrag wurden von den Autor/-innen keine Studien an Menschen oder Tieren durchgeführt. Für die aufgeführten Studien gelten die jeweils dort angegebenen ethischen Richtlinien.

Literatur

- Schlüter M, Langenstein BA, Polster J, Kremer P, Souquet J, Engel S, Hanrath P (1982) Transoesophageal cross-sectional echocardiography with a phased array transducer system. Technique and initial clinical results. *Br Heart J* 48(1):67–72
- Kremer P, Cahalan M, Beaupre P, Schröder E, Hanrath P, Heinrich H, Ahnefeld FW, Bleifeld W, Hamilton W (1985) Intraoperative Überwachung

- mittels transoesophagealer zweidimensionaler Echokardiographie. *Anaesthesist* 34:111–117
- Leischik R, Curtius JM, Deutsch HJ, Arnold G, Sander C, de Vivie ER, Hilger HH (1990) Vorteile der biplane transoesophagealen Echokardiographie. *Z Kardiol* 79:850–857
- Flachskampf FA, Hoffmann R, Verlande M, Schneider W, Ameling W, Hanrath P (1992) Initial experience with a multiplane transoesophageal echo-transducer: assessment of diagnostic potential. *Eur Heart J* 13(9):1201–1206
- Erbel R, Börner N, Steller D, Brunier J, Thelen M, Pfeiffer C, Mohr-Kahaly S, Iversen S, Oelert H, Meyer J (1987) Detection of aortic dissection by transoesophageal echocardiography. *Br Heart J* 58:45–51
- Mohr-Kahaly S, Erbel R, Kearney P, Puth M, Meyer J (1994) Aortic intramural hemorrhage visualized by transoesophageal echocardiography: findings and prognostic implications. *J Am Coll Cardiol* 23:658–664
- Daniel WG, Mügge A, Martin RP, Lindert O, Hausmann D, Nonnast-Daniel B, Laas J, Lichtlen PR (1991) Improvement in the diagnosis of abscesses associated with endocarditis by transoesophageal echocardiography. *N Engl J Med* 324:795–800
- Mügge A, Daniel WG, Frank G, Lichtlen PR (1989) Echocardiography in infective endocarditis: reassessment of prognostic implications of vegetation size determined by the transthoracic and the transoesophageal approach. *J Am Coll Cardiol* 14:631–638
- Flachskampf FA, Badano L, Daniel WG, Feneck RO, Fox KF, Fraser AG, Pasquet A, Pepi M, de Perez Isla L, Zamorano JL, European Association of Echocardiography, Echo Committee of the European Association of Cardiothoracic Anaesthesiologists, Roelandt JR, Piérard L (2010) Recommendations for transoesophageal echocardiography: update 2010. *Eur J Echocardiogr* 11:557–576
- Flachskampf FA, Wouters PF, Edvardsen T, Evangelista A, Habib G, Hoffman P, Hoffmann R, Lancellotti P, Pepi M (2014) Recommendations for transoesophageal echocardiography: EACVI update 2014. *Eur Heart J Cardiovasc Imaging* 15:353–365
- Wollschläger H, Zeiher AM, Klein HP (1989) Transoesophageal echo computer tomography: a new method for dynamic 3-D imaging of the heart. *Biomed Tech* 34:10–11
- Pandian NG, Nanda NC, Schwartz SL, Fan P, Cao QL, Sanyal R, Hsu TL, Mumm B, Wollschläger H, Weintraub A (1992) Three-dimensional and four-dimensional transoesophageal echocardiographic imaging of the heart and aorta in humans using a computed tomographic imaging probe. *Echocardiography* 9(6):677–687
- Vogel M, Löscher S (1994) Dynamic three-dimensional echocardiography with a computed tomography imaging probe: initial clinical experience with transthoracic application in infants and children with congenital heart defects. *Br Heart J* 71:462–467
- Bartel T, Müller S, Erbel R (1998) Dynamic three-dimensional echocardiography using parallel slicing: A promising diagnostic procedure in congenital heart disease in adults. *Cardiology* 89:140–147
- Borges AC, Bartel T, Müller S et al (1995) Dynamic three-dimensional transoesophageal echocardiography using a computed tomographic imaging probe—clinical potential and limitation. *Int J Card Imaging* 11:247–254
- Franke A, Flachskampf FA, Kühl HP et al (1995) Dreidimensionale Rekonstruktion transoesophagealer echokardiographischer Schnittbilder: Ein Methodenbericht mit Fallbeispielen. *Z Kardiol* 84:633–642
- Kühl HP, Bücken A, Franke A, Maul S, Nolte-Ernsting C, Reineke T, Hoffmann R, Günther RW, Hanrath P (2000) Transoesophageal 3-dimensional echocardiography: in vivo determination of left ventricular mass in comparison with magnetic resonance imaging. *J Am Soc Echocardiogr* 13:205–215
- Müller S, Bartel T, Cao QL, Marsani ND, Yao J, Arsenault M, Erbel R, Pandian NG (1997) Three-dimensional echocardiography: In vivo validation of volumetry using simultaneous thermal dilution. *J Am Soc Echocardiogr* 10:410
- Buck T, Hunold P, Wentz KU, Tkalec W, Nesser HJ, Erbel R (1997) Tomographic three-dimensional echocardiographic determination of chamber size and systolic function in patients with left ventricular aneurysm: comparison to magnetic resonance imaging, cineventriculography, and two-dimensional echocardiography. *Circulation* 96:4286–4297
- Kühl HP, Schreckenberg M, Rulands D et al (2004) High-resolution transthoracic real-time three-dimensional echocardiography: quantitation of cardiac volumes and function using semi-automatic border detection and comparison with cardiac magnetic resonance imaging. *J Am Coll Cardiol* 43(11):2083–2090
- Mor-Avi V, Jenkins C, Kuhl HP, Nesser HJ, Marwick T, Franke A, Ebner C, Freed BH, Steringer-Mascherbauer R, Pollard H, Weinert L, Niel J, Sugeng L, Lang RM (2008) Real-time 3-dimensional echocardiographic quantification of left ventricular volumes: multicenter study for validation with magnetic resonance imaging and investigation of sources of error. *JACC Cardiovasc Imaging* 1:413–423
- Kahlert P, Plicht B, Schenk IM, Janosi RA, Erbel R, Buck T (2008) Direct assessment of size and shape of noncircular vena contracta area in functional versus organic mitral regurgitation using real-time three-dimensional echocardiography. *J Am Soc Echocardiogr* 21:912–921
- Hagendorff A, Evangelista A, Fehske W, Schäfers HJ (2019) Improvement in the assessment of aortic valve and aortic aneurysm repair by 3-dimensional echocardiography. *JACC Cardiovasc Imaging* 12:2225–2244
- Hagendorff A, Fehske W, Flachskampf FA, Helfen A, Kreidel F, Kruck S, La Rosée K, Tiemann K, Voigt JU, von Bardeleben RS, Zahn R, Knebel F (2020) Manual zur Indikation und Durchführung der Echokardiografie – Update 2020 der Deutschen Gesellschaft für Kardiologie. *Kardiologe* 14:396–431
- Lang RM, Badano LP, Tsang W, Adams DH, Agricola E, Buck T, Faletra FF, Franke A, Hung J, de Isla LP, Kamp O, Kasprzak JD, Lancellotti P, Marwick TH, McCulloch ML, Monaghan MJ, Nihoyannopoulos P, Pandian NG, Pellikka PA, Pepi M, Roberson DA, Sherman SK, Shirali GS, Sugeng L, Ten CFJ, Vannan MA, Zamorano JL, Zoghbi WA, American Society of Echocardiography, European Association of Echocardiography (2012) EAE/ASE recommendations for image acquisition and display using three-dimensional echocardiography. *Eur Heart J Cardiovasc Imaging* 13:1–46
- Knebel F, Glichev V, Walde T et al (2004) Percutaneous closure of interatrial communications in adults—prospective embolism prevention study

- with two- and three-dimensional echocardiography. *Cardiovasc Ultrasound* 2:5
27. Balzer J, van Hall S, Rassaf T, Böring YC, Franke A, Lang RM, Kelm M, Kühl HP (2010) Feasibility, safety, and efficacy of real-time three-dimensional transesophageal echocardiography for guiding device closure of interatrial communications: initial clinical experience and impact on radiation exposure. *Eur J Echocardiogr* 11(1):1–8
 28. Janosi RA, Kahlert P, Plicht B, Böse D, Wendt D, Thielmann M, Jakob H, Eggebrecht H, Erbel R, Buck T (2009) Guidance of percutaneous transcatheter aortic valve implantation by real-time three-dimensional transesophageal echocardiography – A single-center experience. *Minim Invasive Ther Allied Technol* 1:142–148
 29. Hagendorff A, Stoebe S, Tayal B (2018) A systematic approach to 3D echocardiographic assessment of the aortic root. *Glob Cardiol Sci Pract* 12:
 30. Schmidt-Salzmann M, Meincke F, Kreidel F, Spangenberg T, Ghanem A, Kuck KH, Bergmann MW (2017) Improved Algorithm for Ostium Size Assessment in Watchman Left Atrial Appendage Occlusion Using Three-Dimensional Echocardiography. *J Invasive Cardiol* 29(7):232–238
 31. Balzer J, Kühl H, Rassaf T, Schauerer P, Hoffmann R, Kelm M, Franke A (2008) Real-time trans-esophageal three-dimensional echocardiography for guidance of percutaneous cardiac interventions: first experience. *Clin Res Cardiol* 97:565–574
 32. Altiok E, Hamada S, Brehmer K, Kuhr K, Reith S, Becker M et al (2012) Analysis of procedural effects of percutaneous edge-to-edge mitral valve repair by 2D and 3D echocardiography. *Circ Cardiovasc Imaging* 5:748–755
 33. Geyer M, Sotiriou E, Tamm AR, Ruf TF, Kreidel F, Yang Y, Emrich T, Beiras-Fernandez A, Gori T, Münzel T, Schulz E, von Bardeleben RS (2019) Advanced Protocol for Three-Dimensional Transesophageal Echocardiography Guidance Implementing Real-Time Multiplanar Reconstruction for Transcatheter Mitral Valve Repair by Direct Annuloplasty. *J Am Soc Echocardiogr* 32(10):1359–1365
 34. Geyer M, Sotiriou E, Keller K, Tamm AR, Ruf TF, Kreidel F, Beiras-Fernandez A, Kornberger A, Yang Y, Emrich T, Schulz E, Münzel T, von Bardeleben RS (2020) Feasibility of a MPR-based 3DTEE guidance protocol for transcatheter direct mitral valve annuloplasty. *Echocardiography* 37(9):1436–1442
 35. da Rocha E Silva JG, Ruf TF, Hell MM, Tamm A, Geyer M, Münzel T, von Bardeleben RS, Kreidel F (2021) Transgastric imaging-The key to successful periprocedural TEE guiding for edge-to-edge repair of the tricuspid valve. *Echocardiography* 38(11):1948–1958
 36. von Bardeleben RS, Hobohm L, Kreidel F, Ostad MA, Schulz E, Konstantinides S, Lankeit M, Feldman T, Münzel T, Keller K (2019) Incidence and in-hospital safety outcomes of patients undergoing percutaneous mitral valve edge-to-edge repair using MitraClip: five-year German national patient sample including 13,575 implants. *EuroIntervention* 14(17):1725–1732
 37. Rudolph V, von Bardeleben RS, Hagendorff A et al (2022) Sachkunde Interventionelle Echokardiographie. *Kardiologie* 16:391–400

Hinweis des Verlags. Der Verlag bleibt in Hinblick auf geografische Zuordnungen und Gebietsbezeichnungen in veröffentlichten Karten und Institutsadressen neutral.

TEE, 3D and interventional echocardiography

Since its first more experimental applications in the late 1970s and early 1980s, transesophageal echocardiography (TEE) has become an essential modality in cardiac imaging as a result of its advantage of an almost unobstructed ultrasound window and a variety of technical developments. This article describes the evolution of TEE and the defining contributions of German cardiologists in this subfield of echocardiography over the past decades, from monoplane TEE to peri-interventional monitoring using three-dimensional (3D) TEE.

Keywords

Diagnostics · Structural heart diseases · Endocardial diseases · Valvular diseases · Heart valve replacement