

Aus der Klinik für Kardiologie, Pneumologie und Angiologie der
Heinrich-Heine-Universität Düsseldorf
Direktor: Univ.-Prof. Dr. med. Malte Kelm

Einfluss der Kathetergeneration auf die Workflow-
Effizienz des hochauflösenden linksatrialen Mappings

Dissertation

zur Erlangung des Grades eines Doktors der Medizin der
Medizinischen Fakultät der
Heinrich-Heine-Universität Düsseldorf

vorgelegt von
Cristina Elena Bejinariu

2026

Als Inauguraldissertation gedruckt mit Genehmigung der Medizinischen Fakultät der
Heinrich-Heine-Universität Düsseldorf.

gez.:

Dekan: Prof. Dr. med. Nikolaj Klöcker

Erstgutachter: Priv.-Doz. Dr. med. Obaida Rana

Zweitgutachter: Prof. Dr. med. Sajjad Muhammad

I. Zusammenfassung

Das hochauflösende elektroanatomische Mapping des linken Vorhofs (LA) ist ein zentraler Bestandteil moderner Ablationsprozeduren bei Vorhofflimmern (VHF) und linksatrialen Tachykardien (LAT). Es dient der anatomischen Rekonstruktion, der Katheternavigation, der Charakterisierung von Substrat und Aktivierung sowie der Überprüfung prozeduraler Endpunkte. Da Mapping und Re-Mapping in LA-Prozeduren wiederholt erforderlich sein können, gewinnt die Workflow-Effizienz der Signalakquise zunehmend an Bedeutung. Ziel dieser Arbeit war es, den Einfluss der Mappingkathetergeneration auf die Workflow-Effizienz des hochauflösenden LA-Mappings zu untersuchen.

In diese retrospektive, monozentrische Beobachtungsstudie wurden 94 konsekutive Patienten eingeschlossen, bei denen zwischen Juli 2025 und Januar 2026 eine LA-Ablation mit hochauflösendem Mapping durchgeführt wurde. Eingeschlossen wurden Prozeduren bei paroxysmalem VHF, persistierendem VHF und LAT. Verglichen wurden der Advisor HD Grid (Grid) und der Advisor HD Grid X (Grid X) in Kombination mit dem EnSite X 3D-Mappingsystem. Die Mappingzeit wurde als Zeitspanne vom Beginn der systematischen Signalakquise bis zur Erstellung einer vollständigen, klinisch verwertbaren LA-Map definiert. Zusätzlich wurden die finale Zahl erfasster Elektrogramme (EGMs), die EGM-Akquisitionsgeschwindigkeit und die volumenbezogene Mapping-Geschwindigkeit bestimmt.

Bei weitgehend vergleichbaren Baseline-Charakteristika und Indikationsverteilung (Grid n=43; Grid X n=51) zeigte Grid X eine signifikant kürzere Mappingzeit (12 min [10-13] vs. 22 min [19-25], $p<0,001$) und eine höhere volumenbezogene Mapping-Geschwindigkeit (6 ml/min [4,37-7,53] vs. 2,94 ml/min [2,14-4,9], $p<0,001$) als der Grid. Auch die finale EGM-Zahl und die EGM-Akquisitionsgeschwindigkeit waren unter Grid X signifikant höher. Die explorative Subgruppenanalyse zeigte über paroxysmales VHF, persistierendes VHF und LAT hinweg eine gleichgerichtete Effektrichtung. Ein signifikanter Unterschied im akuten periprozeduralen Sicherheitsprofil bestand nicht. Zusammenfassend war der Grid X im Vergleich zu Grid mit einer höheren Workflow-Effizienz des hochauflösenden LA-Mappings assoziiert. Die Ergebnisse sprechen dafür, dass technische Weiterentwicklungen innerhalb eines grid-basierten Mappingkonzepts die praktische Durchführung des LA-Mappings messbar beeinflussen können.

II. Summary

High-density electroanatomical mapping of the left atrium (LA) is an essential component of contemporary LA ablation procedures for atrial fibrillation (AF) and left atrial tachycardia (LAT). It supports anatomical reconstruction, catheter navigation, substrate and activation assessment, and verification of procedural endpoints. Since mapping and remapping may be required repeatedly during LA procedures, workflow efficiency of signal acquisition has become increasingly relevant. The aim of this dissertation was to evaluate the impact of mapping catheter generation on the workflow efficiency of high-density LA mapping.

This retrospective, single-center observational study included 94 consecutive patients who underwent LA ablation with high-density mapping between July 2025 and January 2026. Procedures were performed for paroxysmal AF, persistent AF, and LAT. Advisor HD Grid (Grid) and Advisor HD Grid X (Grid X) were compared, both used with the EnSite X 3D mapping system. Mapping time was defined as the interval from the start of systematic signal acquisition to completion of a full, clinically usable LA map. In addition, the final number of acquired electrograms (EGMs), EGM acquisition speed, and volume-normalized mapping speed were assessed.

The study cohort consisted of 43 patients in the Grid group and 51 patients in the Grid X group. Baseline characteristics and procedural indications did not differ significantly between the two groups. Mapping time was significantly shorter with Grid X than with Grid (12 min [10-13] vs. 22 min [19-25], $p<0.001$). Volume-normalized mapping speed was significantly higher with the Grid X (6 ml/min [4.37-7.53] vs. 2.94 ml/min [2.14-4.9], $p<0.001$). The final number of acquired EGMs and EGM acquisition speed were also significantly higher in the Grid X group. Exploratory subgroup analysis showed a consistent direction of effect in favor of Grid X across paroxysmal AF, persistent AF, and LAT. No significant difference in acute periprocedural safety was observed.

In conclusion, Grid X was associated with higher workflow efficiency of high-density LA mapping compared with Grid. These findings indicate that technical refinements within a grid-based mapping concept can measurably affect the practical performance of LA mapping under routine clinical conditions.

III. Abkürzungsverzeichnis

3D	dreidimensional
Abb.	Abbildung
ACB	aortokoronarer Bypass
AF	<i>atrial fibrillation</i> ; Vorhofflimmern
BMI	Body-Mass-Index
CBA	Kryoballonablation
CFAE	komplex fraktionierte atriale Elektrogramme
CHA₂DS₂-VASc	Score zur Abschätzung des thromboembolischen Risikos bei Vorhofflimmern
COPD	chronisch obstruktive Lungenerkrankung
CTI	cavotrikuspidaler Isthmus
EGM	Elektrogramm
EHRA	<i>European Heart Rhythm Association</i> ; Europäische Herzrhythmusgesellschaft
EP	Elektrophysiologie / elektrophysiologisch
ESC	<i>European Society of Cardiology</i> ; Europäische Gesellschaft für Kardiologie
HD	<i>high-density</i> ; hochauflösend
HF	<i>heart failure</i> ; Herzinsuffizienz
HF_{rEF}	<i>heart failure with reduced ejection fraction</i> ; Herzinsuffizienz mit reduzierter Ejektionsfraktion
HPSD	<i>high-power short-duration</i> ; Ablation mit hoher Leistung und kurzer Dauer
ICE	intrakardiale Echokardiographie
KI	künstliche Intelligenz
LA	linkes Atrium; linksatrial
LAT	linksatriale Tachykardie
LAVI	linksatrialer Volumenindex
LVEF	linksventrikuläre Ejektionsfraktion
OP	Operation
OSAS	obstruktives Schlafapnoe-Syndrom
pAVK	periphere arterielle Verschlusskrankheit
PFA	Pulsfeldablation

PV	Pulmonalvene(n)
PVI	Pulmonalvenenisolation
RFA	Radiofrequenzablation
SPSS	<i>Statistical Package for the Social Sciences</i> ; statistische Software
TEE	transösophageale Echokardiographie
TSP	Transseptalpunktion
US4ABL	systematischer ultraschallgeführter Workflow für Ablationsprozeduren
VHF	Vorhofflimmern
vHPSD	<i>very high-power short-duration</i> ; Ablation mit sehr hoher Leistung und kurzer Dauer

IV. Inhaltsverzeichnis

- I. Zusammenfassung (deutsch)**
- II. Zusammenfassung (englisch)**
- III. Abkürzungsverzeichnis**
- IV. Inhaltsverzeichnis**

1	Einleitung	1
1.1	Klinischer Kontext und Relevanz linksatrialer Ablationsprozeduren	1
1.2	Prozeduraler Workflow linksatrialer Ablationen im klinischen Alltag	3
1.2.1	Gefäßzugang und Transseptalpunktion	3
1.2.2	Mapping und Ablation	4
1.2.3	Läsionsüberprüfung und Re-Mapping	5
1.3	Hochauflösendes linksatriales Mapping	6
1.3.1	Klinische Bedeutung des linksatrialen Mappings	7
1.3.2	Technische Grundlagen des hochauflösenden Mappings	8
1.3.3	Methodische Einflussfaktoren und Limitationen	9
1.4	Workflow-Effizienz des linksatrialen Mappings	11
1.5	Zielsetzung und Fragestellungen der Arbeit	12
2	Patienten und Methoden	13
2.1	Studiendesign	13
2.2	Patientenkollektiv	13
2.3	Prozedurablauf und Endpunkte	14
2.4	Erfassung der Mapping-Effizienz	15
2.4.1	Dokumentation der Mappingzeit	16
2.4.2	Bestimmung des linksatrialen Volumens	16
2.4.3	Volumenbezogene Mapping-Geschwindigkeit	17
2.5	Statistische Analyse	18
3	Ergebnisse	20
3.1	Patientencharakteristika	20
3.2	Prozedurale Charakteristika	22
3.3	Mapping-Effizienz	23
3.4	Explorative Subgruppenanalyse nach Indikation	26
3.5	Akute periprozedurale Sicherheit	29
4	Diskussion	31
4.1	Workflow-Effizienz des hochauflösenden LA-Mappings	31

4.2	Einfluss der Kathetergeneration auf die Mapping-Durchführung	34
4.3	Prozedurale Bedeutung der beobachteten Effizienzunterschiede	36
4.4	Indikationsabhängige Betrachtung	38
4.5	Akute periprozedurale Sicherheit	40
4.6	Stärken der Arbeit	42
4.7	Limitationen	43
4.8	Schlussfolgerung und Ausblick.....	44
5	Literaturverzeichnis	45
6	Danksagung.....	53

1 Einleitung

Vorhofflimmern (VHF) ist die häufigste anhaltende Herzrhythmusstörung und stellt aufgrund seiner hohen Prävalenz, des progredienten Krankheitsverlaufs sowie der zunehmenden Krankheitslast eine zentrale Herausforderung der kardiovaskulären Medizin dar.^{1–5}

Neben einer erheblichen Symptomlast ist VHF eng mit thromboembolischen Ereignissen (insbesondere ischämischem Schlaganfall), Hospitalisationen, Herzinsuffizienzprogression und Mortalität assoziiert.^{1,6–8}

Entsprechend betonen aktuelle europäische Leitlinien die Notwendigkeit einer strukturierten Diagnostik und individualisierten Therapie, die Rhythmuskontrolle, Schlaganfallprävention und konsequentes Management der Komorbiditäten integriert.¹

1.1 Klinischer Kontext und Relevanz linksatrialer Ablationsprozeduren

Die klinische Rolle der Rhythmuskontrolle bei VHF hat sich in den letzten Jahren deutlich weiterentwickelt. Während Rhythmuskontrolle lange primär symptomorientiert eingesetzt wurde,⁹ zeigte die randomisierte EAST-AFNET-4-Studie, dass eine frühe rhythmuskontrollierende Strategie bei Patienten mit kürzlich diagnostiziertem VHF und kardiovaskulären Komorbiditäten im Vergleich zur üblichen Versorgung mit einer Reduktion klinischer kardiovaskulärer Ereignisse assoziiert war.¹⁰ Diese Daten werden in den aktuellen europäischen Leitlinien als relevanter Baustein einer zeitnahen, patientenzentrierten Rhythmusstrategie aufgegriffen und unterstreichen die zunehmende Bedeutung effektiver Rhythmusinterventionen im Behandlungspfad.¹

Als interventionelle Rhythmustherapie ist die Katheterablation fest im klinischen Behandlungspfad verankert, mit der Pulmonalvenenisolation (PVI) als primärem prozeduralem Grundprinzip. Die pathophysiologische Grundlage hierfür wurde durch die klassische Arbeit von Haïssaguerre et al., die ektopische Aktivität aus den Pulmonalvenen (PV) als wesentlichen Trigger von paroxysmalem VHF beschrieb.¹¹

Randomisierte Studien haben zudem gezeigt, dass Ablation bei geeigneter Patientenselektion bereits als initiale Therapie gegenüber antiarrhythmischer Medikation Vorteile hinsichtlich der Arrhythmiefreiheit erzielen kann.^{12,13}

Die kontinuierliche Weiterentwicklung von Ablationsmodalitäten macht den direkten Vergleich unterschiedlicher Energiequellen klinisch relevant – nicht zuletzt, weil sich prozedurale Profile (z. B. Ablations- und Workflow-Charakteristika) zwischen den Verfahren unterscheiden können. Historisch zeigte die FIRE AND ICE Studie die Nichtunterlegenheit der Kryoballon- (CBA) gegenüber der Radiofrequenzablation (RFA) bei medikamentenrefraktärem paroxysmalem VHF.¹⁴ Mit der ADVENT Studie liegen randomisierte Daten vor, die Pulsfeldablation (PFA) gegenüber konventioneller thermischer Ablation (CBA oder RFA) als nicht unterlegen hinsichtlich Wirksamkeit einordnen.¹⁵ Ergänzend zeigte die SINGLE SHOT CHAMPION Studie die Nichtunterlegenheit von PFA gegenüber CBA bei paroxysmalem VHF unter kontinuierlichem Rhythmusmonitoring.¹⁶

Über Symptomkontrolle und Rhythmusstabilisierung hinaus ist PVI insbesondere bei Patienten mit Herzinsuffizienz (HF) klinisch bedeutsam. In der CASTLE-AF Studie war die PVI bei Patienten mit HF mit reduzierter Ejektionsfraktion (HFrEF) im Vergleich zur medikamentösen Therapie mit einer Reduktion eines kombinierten klinischen Endpunkts aus Gesamtmortalität und Hospitalisation wegen progredienter HF assoziiert.¹⁷ In der CASTLE-HTx-Studie wurde zudem bei Patienten mit terminaler HF ein klinischer Vorteil der PVI gegenüber alleiniger medikamentöser Therapie berichtet.¹⁸ Diese Evidenz verdeutlicht die Relevanz der PVI in Patientengruppen, in denen Rhythmustherapie über reine Symptomkontrolle hinaus klinische Endpunkte adressieren kann.

Neben VHF stellen linksatriale Tachykardien (LAT) eine klinisch relevante Arrhythmieentität dar – sowohl als eigenständige Rhythmusstörung als auch im Kontext vorbestehender atrialer Narben/Substratveränderungen und nach vorausgegangenen linksatrialen (LA) Interventionen. Elektroanatomische Charakteristika und LAT-Mechanismen nach zirkumferenzieller PVI wurden früh detailliert beschrieben.¹⁹ Die berichtete Inzidenz atrialer Tachykardien nach VHF-Ablation variiert dabei in Abhängigkeit von Index-Strategien und Substratmodifikation deutlich, was die klinische Bedeutung differenzierter Mapping- und Ablationsansätze unterstreicht.²⁰ Auch nach chirurgischen VHF-Ablationsverfahren sind postinterventionelle atriale Tachykardien mechanistisch heterogen und stellen besondere Anforderungen an prozedurale Planung und elektrophysiologische Charakterisierung.²¹

In der klinischen Routine gehören LA-Ablationsprozeduren – insbesondere die PVI bei paroxysmalem und persistierendem Vorhofflimmern sowie die LAT-Ablationen – heute

zum Standardrepertoire der interventionellen Rhythmustherapie. Mit der Ausweitung der Ablationsindikationen und der zunehmenden prozeduralen Komplexität wird neben Wirksamkeit und Sicherheit zunehmend relevant, wie effizient sich diese Eingriffe im elektrophysiologischen (EP) Herzkatheterlabor durchführen lassen: LA-Prozeduren erfordern häufig mehrere, zeitkritische Prozessschritte wie wiederholtes elektroanatomisches Mapping, Evaluation von Ablationslinien und Strategieanpassungen während derselben Sitzung.

1.2 Prozeduraler Workflow linksatrialer Ablationen im klinischen Alltag

LA-Ablationen sind im klinischen Alltag in eine standardisierte Abfolge prozeduraler Schritte eingebettet.²² Die prozedurale Variabilität konzentriert sich dabei typischerweise auf drei Abschnitte: den Zugang (Gefäßzugang und Transseptalpunktion (TSP) – einschließlich Schleusenmanagement), Mapping und Ablation im LA sowie die Validierung mit Re-Mapping; diese Abschnitte sind klinisch relevant, da das Komplikationsspektrum der Ablationen vaskuläre und perikardiale Ereignisse beinhaltet.²³

1.2.1 Gefäßzugang und Transseptalpunktion

Vaskuläre Komplikationen stellen weiterhin einen relevanten Anteil prozedurbezogener Ereignisse dar und sind eng mit Zugangstechnik, Anzahl der Zugänge sowie Schleusendurchmessern assoziiert.²³ Für PVI-Kollektive berichten neue klinische Daten eine Reduktion zugangsassoziierter Komplikationen unter routinemäßiger Ultraschallführung.^{24,25} Ein konsequent standardisierter Workflow ist die US4ABL-Strategie mit definierter Ultraschall-Schrittfolge. Die US4ABL-Strategie umfasst den Ausschluss von LA-Thromben mittels TEE, den ultraschallgesteuerten femoralvenösen Zugang, die TEE-geführte TSP sowie den postprozeduralen Ausschluss eines Perikardergusses.²⁶

Die TSP ist ein eigenständiger prozeduraler Risikoschritt und wird im aktuellen Konsensus-Statement als zentraler Sicherheits- und Qualitätsabschnitt eingeordnet.²² Bildgebungsbasierte Strategien für die TSP-Führung zielen hierbei auf die Lokalisation der Fossa ovalis sowie die Reduktion von Fehlpunktionen und Mehrfachversuchen. Für die TEE-geführte TSP wurde die Durchführbarkeit und Sicherheit im PVI-Setting

beschrieben.²⁷ Weitere Alternativen zur TSP-Führung stellen das 3D-Mapping-System bzw. die intrakardiale Echokardiographie (ICE) dar.²⁸

Zum transseptalen Zugang gehört in der Praxis auch das Schleusenmanagement, das insbesondere bei großlumigen Schleusen relevant wird. Die Elimination prozeduraler Schritte wie Schleusenwechsel spielt hier eine bedeutsame Rolle. Für die PVI mittels PFA wurden mehrere Strategien im Sinne von „zero-exchange“ Ansätzen sowohl fluoroskopisch über die Nadel („over-the-needle“)²⁹ als auch mit TEE-Führung beschrieben.³⁰ Ebenfalls wurde bei CBA ein Dilatator/Nadel-System für die TSP untersucht: es konnte gezeigt werden, dass dies zu einer Steigerung der prozeduralen Effizienz führt.³¹

Registerdaten aus der DISRUPT-AF Studie zeigen, dass „zero-exchange“ Workflows mit günstigeren prozeduralen Zeitparametern assoziiert sein können, ohne die prozedurale Sicherheit zu gefährden.³²

1.2.2 Mapping und Ablation

Nach Etablierung eines stabilen LA-Zugangs bilden Mapping und Ablation die zentralen Schritte im LA. Mapping dient dabei der anatomischen Rekonstruktion und Navigation sowie – abhängig von Indikation und Strategie – der Substrat-/Mechanismuscharakterisierung; die Ablation umfasst die Läsionssetzung (z. B. PVI, ggf. zusätzliche Läsionen) und die unmittelbare prozedurale Kontrolle des sogenannten Läsionssets.²² Für den Workflow sind zu diesem Zeitpunkt insbesondere zwei Aspekte relevant: die Dauer der Mapping- und Ablationsschritte selbst und der Grad der Standardisierung innerhalb des Ablaufs im EP-Labor.

Aktuelle Daten zeigen, dass die Integration moderner Mapping-Ansätze zusammen mit prozeduralen Ablationsprotokollen die Prozedurdauer beeinflussen kann: in einer systematischen Analyse institutioneller Workflow-Optimierung war die Implementierung hochauflösender Mapping-Strategien zusammen mit High-Power-Short-Duration-Protokollen mit einer signifikanten Verkürzung von Mapping- und Ablationszeiten sowie der Gesamtprozedurzeit assoziiert, ohne Sicherheits- oder Wirksamkeitssignale im beobachteten Zeitraum.³³ Parallel adressieren aktuelle praktische Leitfäden zu PFA-Ablationssystemen prozedurale Standardisierung explizit als Voraussetzung für reproduzierbare Abläufe und Prozessqualität im EP-Labor.³⁴

Die intraprozedurale Bildführung ist in diesem Abschnitt für mehrere Ablaufparameter relevant, insbesondere für Navigation, Fluoroskopiezeit und dementsprechend

Strahlenexposition. Hierbei spielt die ICE eine bedeutsame Rolle. Für eine ICE-geführte Kryoballon-Ablation ohne Verwendung der Fluoroskopie wurde die Machbarkeit in einer prospektiv randomisierten Studie gezeigt. Erwähnenswert ist in diesem Kontext, dass sowohl die Sicherheit als auch die Rezidivfreiheit ähnlich in beiden Gruppen (ohne versus mit Fluoroskopie) waren.³⁵ Ferner zeigt eine aktuelle Metaanalyse, dass die ICE-Verwendung mit kürzerer Prozedurdauer sowie reduzierter Fluoroskopiezeit und Strahlenexposition assoziiert war.³⁶

1.2.3 Läsionsüberprüfung und Re-Mapping

Nach Ablation besteht die Validierung bei der PVI im Nachweis einer vollständigen elektrischen Isolation der PV. Dabei beruhen Entrance- und Exit-Block auf unterschiedlichen Prinzipien: der Entrance-Block wird elektrogrammbasiert beurteilt, also durch das Verschwinden oder die Dissoziation von PV-Potentialen auf einem multipolaren Katheter bzw. im Mapping. Der Exit-Block wird stimulationsbasiert geprüft, mittels Stimulation innerhalb der isolierten PV mit lokalem Capture ohne Überleitung in das LA. Der aktuelle Konsensus empfiehlt daher als Mindestanforderung den Nachweis eines Entrance-Blocks, wobei in unklaren Fällen auch der Exit-Block empfohlen wird.²² Für lineare Läsionen ist demgegenüber der vollständige bidirektionale Block der entscheidende prozedurale Endpunkt, klassisch geprüft durch Stimulationsmanöver (insbesondere differenziales Pacing) und zunehmend ergänzt durch hochauflösendes („high-density“, HD) Aktivierungs-Mapping.^{22,37}

Neuere Daten sprechen dafür, dass die konventionelle Überprüfung der vollständigen elektrisch isolierten PV die tatsächliche Läsionskontinuität nicht in jedem Fall vollständig abbildet. In einer prospektiven Studie wurden nach konventionellem Nachweis von Entrance- und Exit-Block mit einem 20-poligen zirkulären Katheter und nach mindestens 20-minütiger Wartezeit zusätzliche HD-Re-Maps durchgeführt. Dabei fanden sich in 20% der Patienten noch residuelle Leitungslücken entlang der erstellten PVI-Linien.³⁸ In einer randomisierten monozentrischen Studie wurde nach konventioneller Bestätigung des Entrance-Blocks zusätzlich ein HD-Mapping der antralen Linie durchgeführt. Eine darauf basierende zusätzliche Ablation antraler, fragmentierter Elektrogramme (EGMs) mit geringer Amplitude („Low-Voltage“) war im Rahmen des geplanten invasiven Re-Mappings mit einer höheren Durabilität der PVI-Linie assoziiert (92,2% vs. 80,8%).³⁹ Ergänzend zeigte eine größere Kohorte, dass ein

HD-Mapping nach PVI mit gezielten inkrementellen Zusatzläsionen mit einer besseren Arrhythmiefreiheit assoziiert war, bei vergleichbaren Prozedurzeiten und Komplikationsraten.⁴⁰ Auch im PFA-Setting zeigen aktuelle multizentrische Daten, dass nach standardisierter Energieabgabe in etwa einem Viertel der Fälle mittels 3D-elektroanatomischem Mapping noch mindestens eine akute Residualverbindung nachweisbar ist – dies unterstreicht den Stellenwert von HD-Mapping nach akuter elektrischer Isolation und definierten Wartezeitkonzepten bei neuen Technologien.⁴¹ Bei Ablationslinien ist der Nachweis eines vollständigen bidirektionalen Leitungsblocks über die gesamte Linie empfohlen. Konventionell erfolgt dies durch Stimulationsmanöver, vor allem differenziales Pacing, ergänzt durch die Analyse der Aktivierungssequenz beiderseits der Linie. Neuere Arbeiten zeigen jedoch, dass diese Strategie allein residuale Leitungen übersehen kann. In einer 2025 publizierten Studie wurden lineare Läsionen systematisch sowohl mit differenzialem Pacing als auch mit HD-Mapping überprüft. Residuelle Leitung wurde mittels HD-Mappings bei 37,6% der CTI-Linien (kavotrikuspidaler Isthmus), 47,1% der Dachlinien und 28,6% der Mitralisthmus-Linien nachgewiesen; das differenziale Pacing ergab dabei in einem relevanten Anteil falsch-positive Blockdiagnosen (sogenannter „Pseudo-Block“). Klinisch war das relevant: wenn alle Linien im HD-Mapping tatsächlich blockiert waren, lag die 1-Jahres-Freiheit von atrialen Tachykardien bei 95,4%; bei mindestens einer persistierend leitenden Linie dagegen bei 31,9%.⁴²

1.3 Hochauflösendes linksatriales Mapping

Das elektroanatomische Mapping des LA ist ein fester Bestandteil von modernen Ablationsprozeduren. Es dient der anatomischen Rekonstruktion, der Katheternavigation, der Dokumentation erzielter Läsionseffekte sowie der elektrischen Beurteilung von Isolation der PV, residueller Leitung und atrialen Tachykardiemechanismen.⁴³

Mit der Etablierung multipolarer Katheter und automatisierter Punktakquise hat sich das LA-Mapping von einer sequenziellen Punkt-für-Punkt („point-by-point“) Erfassung zu einem HD-Verfahren entwickelt. Dadurch können sowohl Substratmerkmale wie Low-Voltage-Areale als auch komplexe Aktivierungsmuster präziser erfasst werden, was für die Einordnung von Vorhofflimmersubstraten und die Charakterisierung von LAT-Mechanismen klinisch relevant ist.⁴⁴

1.3.1 Klinische Bedeutung des linksatrialen Mappings

Das LA-Mapping hat in der klinischen Elektrophysiologie mehrere klar definierte Funktionen. Im Rahmen der PVI dient es zunächst der anatomischen Rekonstruktion des LA und der PV-Antra sowie der Navigation während der Läsionssetzung. Darüber hinaus ist es für die unmittelbare prozedurale Beurteilung des Ablationsergebnisses relevant, insbesondere für den Nachweis residueller Leitung nach PVI und für die Lokalisation akuter Rekonnektionen. Entsprechend wird das elektroanatomische Mapping in aktuellen Konsensdokumenten sowohl als Orientierungsinstrument als auch als Bestandteil der prozeduralen Qualitätskontrolle definiert.^{22,41}

Seine klinische Bedeutung geht jedoch über die reine Läsionsdokumentation hinaus. Bei Re-Interventionen nach PVI wird das HD-Mapping regelhaft eingesetzt, um eventuelle PV-Rekonnektionen sowie weiteres LA-Substrat zu beurteilen. Eine aktuelle Umfrage der EHRA (European Heart Rhythm Association) zeigt, dass in Redo-Prozeduren am häufigsten eine Kombination aus PV-Mapping und LA-Substratmapping verwendet wird.⁴⁵ Gleichzeitig hat das LA-Voltage-Mapping klinische Relevanz als Marker einer atrialen Myopathie. In einer aktuellen Metaanalyse fanden sich Low-Voltage-Areale sowohl bei paroxysmalem als auch bei nicht-paroxysmalem Vorhofflimmern in relevanter Häufigkeit.⁴⁶

Für Ablationsstrategien über die PVI hinaus ist die Evidenz bei persistierendem Vorhofflimmern heterogen: positive randomisierte Daten liegen sowohl für die Ablation von Low-Voltage-Arealen zusätzlich zur PVI⁴⁷ als auch für eine KI-gestützte (künstliche Intelligenz) Ablation von Arealen spatiotemporaler Dispersion zusätzlich zur PVI⁴⁸ vor; demgegenüber zeigten andere randomisierte Studien keinen zusätzlichen Nutzen einer ergänzenden Substrat- oder Linienablation, darunter die Ablation von Low-Voltage-Arealen zusätzlich zur PVI,⁴⁹ die Ablation komplex fraktionierter EGMs bzw. linearer Läsionen zusätzlich zur PVI in STAR AF II⁵⁰ sowie die zusätzliche Isolation der posterioren Wand im CAPLA-Trial.⁵¹ Die verfügbare randomisierte Evidenz betrifft damit bislang im Wesentlichen RFA als Energieform; im PFA-Setting fehlen derzeit belastbare randomisierte Daten mit Langzeit-Follow-up zum Thema Effektivität zusätzlicher Läsionen.

Eine weitere zentrale Funktion des LA-Mappings besteht in der Diagnose und Charakterisierung von LAT-Mechanismen. Nach vorausgegangenen atrialen Interventionen sind multiple oder überlappende makroreentrybasierte Tachykardien

häufig und ohne detailliertes Aktivierungs-Mapping lässt sich der kritische Isthmus in vielen Fällen nicht zuverlässig definieren. In einer systematischen Analyse komplexer LAT-Mechanismen nach vorangegangenen atrialen Ablationsprozeduren konnten mittels HD-Mappings unterschiedliche Mechanismen präzise charakterisiert werden.⁵² Ergänzend wurde gezeigt, dass auch algorithmische Auswertansätze auf der Grundlage von HD-Maps die Mechanismuzuordnung unterstützen können, die elektrophysiologische Interpretation jedoch nicht ersetzen.⁵³

1.3.2 Technische Grundlagen des hochauflösenden Mappings

Die technische Entwicklung des LA-Mappings verlief in den letzten zwei Jahrzehnten von einer überwiegend sequenziellen Punkt-für-Punkt-Erfassung („point-by-point“) hin zu multipolaren und zunehmend HD-Mappingsystemen. Die Punkt-für-Punkt-Erfassung erlaubte zwar eine anatomische Rekonstruktion und lokale Spannungs- bzw. Aktivierungsanalysen, war jedoch in hohem Maß von Katheterstabilität, Kontaktqualität und manueller Annotation der Signale abhängig. Mit automatisierter Punktakquise sowie Weiterentwicklung der Mappingkatheter wurde dieser Ansatz schrittweise beschleunigt, blieb aber seinem Prinzip nach sequenziell. Entsprechend zeigte der direkte Vergleich von Punkt-für-Punkt Mapping und HD-Mapping bereits 2017, dass das HD-Verfahren deutlich höhere Punktdichten bei kürzerer Mappingzeit erreichen kann.^{54–56}

Einen wichtigen Zwischenschritt stellten zirkuläre Mappingkatheter dar. Sie wurden vor allem im Umfeld der PVI etabliert, weil sie PV-Potentiale simultan erfassen und damit Entrance- und Exit-Block sowie Residualleitungen im antralen Bereich der PV praktisch zugänglich machen. Im Gegensatz zum reinen Punkt-für-Punkt-Mapping lieferten sie damit kontinuierliche lokale Information in einem funktionell wichtigen Bereich, ohne jedoch eine flächige hochdichte Erfassung des gesamten LA zu ermöglichen. Diese Rolle zirkulärer Katheter bei PVI-Validierung und Lokalisation der Rekonnektionen ist in der Literatur gut dokumentiert und blieb auch nach Einführung moderner 3D-Systeme klinisch relevant.^{57,58}

Der eigentliche Schritt zum HD-Mapping erfolgte mit multipolaren Kathetern mit möglichst geringem Abstand zwischen den Elektroden und automatisierter, großvolumiger Punktakquise. Ziel war nicht allein eine größere Zahl an Punkten, sondern eine höhere räumliche Auflösung bei gleichzeitig besserer Erfassung komplexer lokaler EGMs. Für atriale Arrhythmien wurde früh gezeigt, dass kleine

Elektroden mit engem Abstand zwischen den Elektroden insbesondere in Low-Voltage-Arealen eine präzisere Substratdarstellung erlauben.^{59,60} Neuere Systeme kombinieren dieses Prinzip mit weitgehend automatisierter Annotation und Katheterdesigns, die entweder eine breitere Flächenabdeckung oder eine gezieltere lokale Signalaufnahme ermöglichen.

Mit dieser Entwicklung rückte die Kathetergeometrie selbst in den Vordergrund. Gegenwärtig dominieren drei Grundformen: multispline-, basket- und grid-basierte Designs (Abbildung 1).

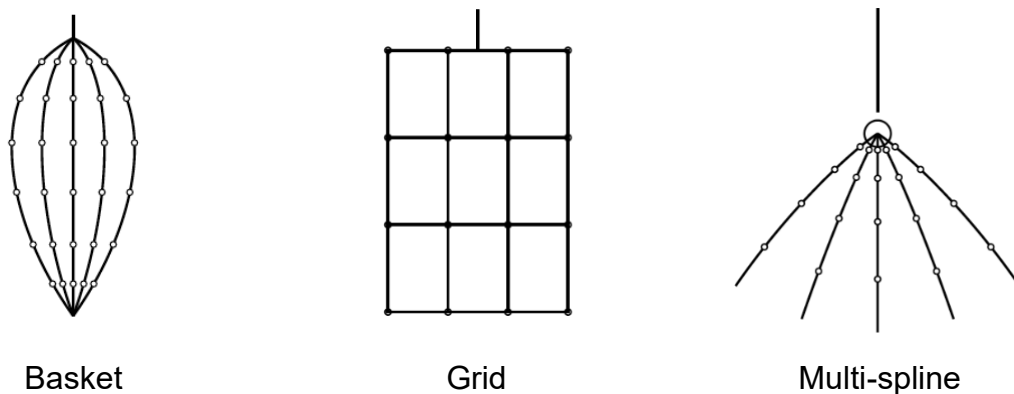


Abb. 1: **Schematische Darstellung der häufigsten Designs von HD-Mappingkathetern**

Multispline-Katheter kombinieren mehrere flexible Arme mit guter Anpassungsfähigkeit an die unregelmäßige LA-Anatomie und erlauben eine dichte lokale Erfassung bei gleichzeitig relativ guter Flächenabdeckung. Basket-Katheter zielen auf eine breitere dreidimensionale Erfassung innerhalb einer Kammer und eignen sich insbesondere dann, wenn eine panoramische Aktivierungsdarstellung angestrebt wird. Grid-Katheter wiederum basieren auf orthogonal angeordneten Elektrodenpaaren und sollen die Richtungsabhängigkeit bipolarer Ableitungen reduzieren.^{61,62}

1.3.3 Methodische Einflussfaktoren und Limitationen

Das LA-Mapping wird wesentlich durch die Katheterkonfiguration, die Elektrodengeometrie und die Richtung der lokalen Erregungsausbreitung beeinflusst. Für bipolare EGMs ist die Richtungsabhängigkeit seit längerem belegt; auch bei orthogonalen Bipol-Konfigurationen wird sie vermindert, aber nicht vollständig aufgehoben.⁶³ Aktuelle experimentell-klinische Daten zeigen darüber hinaus, dass sich die räumliche Signalerfassung verschiedener Katheterkonfigurationen deutlich

unterscheidet und damit auch die Abgrenzung von Nahfeld- und Fernfeldsignalen beeinflusst.⁶¹ Daraus folgt, dass elektrische Informationen nicht unabhängig vom verwendeten Katheterdesign interpretiert werden können.

Ein weiterer wesentlicher Einflussfaktor ist die Elektrodengeometrie. Elektrodenfläche und Interelektrodenabstand bestimmen die registrierte Signalamplitude, die Signalbreite und die Sensitivität für lokale im Vergleich zu weiter entfernten Aktivierungen. Für kleine Elektroden und geringe Interelektrodenabstände wurde eine bessere Nahfelderfassung, eine geringere Fernfeldüberlagerung und eine höhere Sensitivität für die Detektion von Rekonnektionen beschrieben.⁶⁴ Umgekehrt kann eine geringe Veränderung des Interelektrodenabstands die gemessene bipolare Spannung und damit die Ausdehnung von Low-Voltage-Arealen relevant verändern. In einer aktuellen Untersuchung führte bereits ein Unterschied von 1 mm im Interelektrodenabstand zu signifikanten Veränderungen bipolarer Spannungen und der Ausdehnung von Niedervoltagearealen; die Autoren leiten daraus die Notwendigkeit katheterspezifischer, abstandsadaptierter Spannungsschwellen ab.⁶⁵ Bipolare Spannungsgrenzwerte sind damit nicht ohne Weiteres zwischen unterschiedlichen Kathetern übertragbar.

Die Interpretation von Voltage-Maps ist rhythmusabhängig. Mehrere Arbeiten zeigen, dass Lage und Ausdehnung von Low-Voltage-Arealen zwischen Sinusrhythmus und Vorhofflimmern nicht vollständig übereinstimmen und dass regionale Schwellenwerte erforderlich sein können, wenn Befunde rhythmusunabhängig verglichen werden sollen.⁶⁶ Omnipolare Maps können in Vorhofflimmern Low-Voltage-Areale spezifischer abgrenzen als konventionelle bipolare Maps.⁶⁷ Die aus einer Map abgeleitete Aussage zum Vorliegen und zur räumlichen Ausdehnung von Substrat ist daher von Rhythmus, Ableitungsmodus und Schwellenwertdefinition abhängig.

Schließlich beeinflussen auch Akquise- und Verarbeitungsalgorithmen das Ergebnis. Automatisierte 3D-Mappingsysteme beruhen auf vorgegebenen Kriterien für Punktakquise und Punktakzeptanz, unter anderem der Stabilität des Referenzsignals, der Zykluslänge, atemabhängigen Bewegungen, der Katheterstabilität und der Qualität der Positionsdetektion.⁶⁸ Zusätzlich wirken sich Filtereinstellungen auf Morphologie und Amplitude bipolarer EGMs aus: selbst unter standardisierten Bedingungen können unterschiedliche Hoch-, Tief- oder Notch-Filter die Detektion lokaler Signale verändern.⁶⁹ Aktuelle Übersichtsarbeiten betonen deshalb, dass Maps unterschiedlicher Systeme, Katheter und Analysealgorithmen nur eingeschränkt direkt vergleichbar sind und immer im Kontext der verwendeten Methodik interpretiert

werden müssen.⁶² Für die vorliegende Arbeit ist dieser Punkt zentral, weil Unterschiede in der Workflow-Effizienz nur dann sinnvoll bewertet werden können, wenn zugleich berücksichtigt wird, dass technische Weiterentwicklungen nicht allein die Geschwindigkeit, sondern auch die Eigenschaften der Datenerfassung selbst beeinflussen.

Diese methodischen Einflussfaktoren prägen die praktische Durchführung des HD-LA-Mappings maßgeblich.

1.4 Workflow-Effizienz des linksatrialen Mappings

Im klinischen Alltag ist das LA-Mapping häufig kein einmaliger prozeduraler Schritt. Es wird zur initialen Erstellung der Anatomie, zur Festlegung des Läsionssets sowie zur Validierung mit Re-Mapping eingesetzt. Entsprechend ist der Mappingprozess für die LA-Verweilzeit („LA dwell time“) relevant. Dies spiegelt sich auch in aktuellen Workflow-Analysen wider, in denen standardisierte Ablationsabläufe mit HD-Mapping, verkürzten Mapping-, Ablations- und Gesamtprozedurzeiten assoziiert waren.^{22,33,70}

Daher bezeichnet Workflow-Effizienz den zeitlichen und prozeduralen Aufwand, der für die Durchführung eines definierten Mappingschritts unter klinischen Routinebedingungen erforderlich ist. In der Literatur wird dies nicht einheitlich operationalisiert. Verwendet werden unter anderem die reine Mappingzeit, die Zahl der erfassten Punkte oder EGMs pro Map, die Punktakquisitionsrate, die LA-Verweilzeit sowie Prozedur- und Laborzeiten. Für einen neueren octa-spline-basierten HD-Mappingkatheter wurden beispielsweise höhere Punktdichten und höhere Punktakquisitionsraten bei kürzerer Mappingzeit beschrieben. In anderen Kathetervergleichen wurden kürzere Mappingzeiten mit einer höheren Zahl erfasster Punkte berichtet.^{71–73}

Mit der zunehmenden technischen Komplexität von LA-Ablationsprozeduren gewinnt die Frage an Bedeutung, wie effizient zentrale Arbeitsschritte im klinischen Alltag durchgeführt werden können. Dies gilt insbesondere für das Mapping, da es in vielen Eingriffen wiederholt eingesetzt wird und damit einen relevanten Anteil an LA-Verweilzeit und Gesamtprozedurzeit haben kann. Technische Weiterentwicklungen von Mappingkathetern sind deshalb nicht allein unter dem Aspekt der Signalcharakteristik zu bewerten, sondern auch im Hinblick darauf, ob sie die Durchführung des Mappings im Routineablauf vereinfachen, beschleunigen und

reproduzierbarer machen. Daraus ergibt sich die klinisch relevante Fragestellung, ob Unterschiede in der Kathetergeneration zu messbaren Unterschieden in der praktischen Durchführbarkeit des LA-Mappings führen.

1.5 Zielsetzung und Fragestellungen der Arbeit

Ziel der vorliegenden Arbeit ist es, den Einfluss der Mappingkathetergeneration auf die Workflow-Effizienz des HD-LA-Mappings in der klinischen Routine zu untersuchen. Hierzu werden zwei Generationen eines grid-basierten HD-Mappingkatheters in LA-Prozeduren bei paroxysmalem und persistierendem Vorhofflimmern sowie bei LAT-Ablationen verglichen. Im Zentrum steht die Frage, ob sich Unterschiede in der Mappingkathetergeneration in einer veränderten praktischen Durchführbarkeit des LA-Mappings abbilden.

Daraus ergeben sich folgende Fragestellungen:

1. Unterscheidet sich die Workflow-Effizienz des HD-LA-Mappings zwischen den beiden Kathetergenerationen?
2. Gehen mögliche Unterschiede mit Veränderungen prozeduraler Parameter, des Umfangs der Datenerfassung und akuter periprozeduraler Sicherheitsaspekte einher?
3. Zeigen sich diese Unterschiede über die verschiedenen Indikationen hinweg in vergleichbarer Weise?

2 Patienten und Methoden

2.1 Studiendesign

Bei der vorliegenden Untersuchung handelt es sich um eine retrospektive, monozentrische Beobachtungsstudie aus dem Bereich der klinischen Elektrophysiologie des Universitätsklinikums Düsseldorf. Untersucht wird der Einfluss der Mappingkathetergeneration auf die Workflow-Effizienz des HD-LA-Mappings im klinischen Alltag. Hierzu werden zwei Generationen eines grid-basierten Mappingkatheters in konsekutiven LA-Prozeduren verglichen.

Die Auswertung erfolgt auf Grundlage klinischer Routinedaten, Prozedurprotokolle, während der Prozedur manuell dokumentierter Mappingzeiten sowie der im Mappingsystem dokumentierten Verfahrensparameter. Das Studienvorhaben wurde von der zuständigen Ethikkommission der Medizinischen Fakultät der Heinrich-Heine-Universität Düsseldorf genehmigt (Studennummer 2019-555_4 vom 20.07.2023). Die Studie wird in Übereinstimmung mit den Prinzipien der Deklaration von Helsinki durchgeführt.

Die Zuordnung zu den Kathetergenerationen erfolgte nicht randomisiert, sondern spiegelte die klinische Einführung und Verfügbarkeit der neueren Kathetergeneration im Routineworkflow wider. Der Gruppenvergleich ist daher als retrospektiver, potenziell chronologisch beeinflusster Real-World-Vergleich zu interpretieren.

2.2 Patientenkollektiv

In die Analyse eingeschlossen wurden alle konsekutiven erwachsenen Patienten, bei denen zwischen Juli 2025 und Januar 2026 eine LA-Ablation mit HD-Mapping durchgeführt wurde. Berücksichtigt wurden Prozeduren bei paroxysmalem VHF, persistierendem VHF und LAT.

Voraussetzung für den Einschluss war die Durchführung einer vollständigen LA-Map mit einer der beiden untersuchten Kathetergenerationen. Nicht eingeschlossen wurden Fälle ohne vollständige LA-Map sowie Fälle mit unvollständiger prozeduraler Dokumentation, soweit die für die Analyse erforderlichen Variablen hierdurch nicht erhoben werden konnten.

Das endgültige Studienkollektiv umfasste 94 Patienten. Davon entfielen 51 Patienten auf die Gruppe der neueren Kathetergeneration (Grid X) und 43 Patienten auf die

Gruppe der älteren Kathetergeneration (Grid). Erfasst wurden klinische und echokardiographische Basischarakteristika, insbesondere Alter, Geschlecht, relevante Komorbiditäten, Risikoscores sowie ausgewählte echokardiographische Parameter.

2.3 Prozedurablauf und Endpunkte

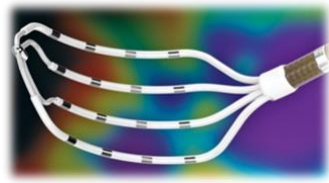
Alle Ablationsprozeduren wurden in intravenöser Sedierung durchgeführt. Die Sedierung erfolgte mit Midazolam und Propofol, je nach Bedarf wurde zusätzlich Piritramid verabreicht. Während der gesamten Prozedur wurden Herzfrequenz, Sauerstoffsättigung und nichtinvasiver Blutdruck kontinuierlich gemäß den institutsüblichen Standards überwacht.

Für die Ablationsprozeduren wurde der am Zentrum etablierte US4ABL-Workflow verwendet.²⁶ Zum Ausschluss eines LA-Thrombus wurde routinemäßig eine TEE-Untersuchung unmittelbar präprozedural (vor dem sterilen Abdecken) durchgeführt. Der femorale Gefäßzugang erfolgte ultraschallgesteuert. Zur Führung der Transseptalpunktion wurde eine multimodale Bildgebung (TEE und Fluoroskopie) verwendet. Nach Abschluss der Prozedur wurde eine transthorakale Echokardiographie zum Ausschluss eines Perikardergusses durchgeführt. Das Management der oralen Antikoagulation erfolgte nach einer minimal unterbrochenen Strategie – die orale Antikoagulation wurde am Morgen vor der Prozedur pausiert und nach echokardiographischem Ausschluss eines Perikardergusses routinemäßig am Abend nach dem Eingriff wieder aufgenommen.

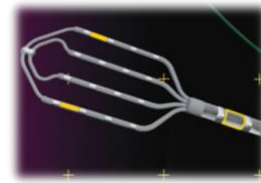
Alle Prozeduren wurden von drei erfahrenen Elektrophysiologen durchgeführt, die vor Beginn des Studienzeitraums jeweils mehr als 500 Ablationsprozeduren mit dem verwendeten 3D-Mappingsystem durchgeführt hatten.

Für das HD-Mapping des LA wurden der Advisor™ HD Grid (Grid) bzw. der Advisor™ HD Grid X (Grid X) in Kombination mit dem EnSite X 3D-Mappingsystem verwendet. Beide Katheter beruhen auf einem grid-basierten Mappingkonzept mit 16 Elektroden an einer distalen Grid-Struktur. Der Grid X stellt die neuere Kathetergeneration innerhalb dieses Konzepts dar und unterscheidet sich vom Grid insbesondere durch eine weiterentwickelte sensorische Systemintegration zur räumlichen Erfassung des Katheters im Mappingsystem (Abbildung 2). Die vorliegende Arbeit bewertet nicht einzelne konstruktive Detailmerkmale des Katheters, sondern deren praktische

Auswirkung auf die Workflow-Effizienz der LA-Map-Erstellung unter klinischen Routinebedingungen.



Advisor™ HD Grid



Advisor™ HD Grid X

Abb. 2: Schematische Gegenüberstellung der beiden untersuchten grid-basierten HD-Mappingkathetergenerationen

Die prozeduralen Endpunkte wurden in Abhängigkeit von Art und Ziel des jeweiligen LA-Eingriffs festgelegt.

Für die PVIs bei paroxysmalem VHF oder persistierendem VHF war der Endpunkt die vollständige elektrische Isolation aller PV mittels zirkumferenzieller Ablation paarweise (septal und lateral). Dies wurde mittels Entrance- und Exit-Block geprüft: der Entrance-Block wurde anhand des Fehlens von PV-Signalen im Mapping beurteilt, wobei der Exit-Block durch Stimulationsmanöver innerhalb der jeweiligen isolierten Vene geprüft wurde.

Bei den LAT-Ablationen erfolgte zunächst ein detailliertes elektroanatomisches HD-Mapping (Aktivierungsmapping) zur Charakterisierung des zugrunde liegenden Arrhythmiemechanismus und zur Identifikation kritischer Isthmusbereiche. Das Läsionsset wurde anhand der im Mapping erhobenen Aktivierungs- und Spannungscharakteristika festgelegt und an das jeweilige Tachykardiesubstrat angepasst. Der prozedurale Endpunkt war die Nichtinduzierbarkeit nach der Anlage des Läsionssets. In das Studienkollektiv wurden ausschließlich makroreentrybasierte Tachykardien eingeschlossen, fokale Mechanismen wurden nicht berücksichtigt. Die linearen Läsionen wurden systematisch durch differenzielles Pacing über die Ablationslinie überprüft.

2.4 Erfassung der Mapping-Effizienz

Die zentralen Parameter für die Bestimmung der Mapping-Effizienz waren die Mappingzeit und das LA-Volumen.

2.4.1 Dokumentation der Mappingzeit

Die Mappingzeit wurde als Zeitspanne vom Beginn der systematischen Signalakquise bis zum Vorliegen einer klinisch verwertbaren vollständigen LA-Map definiert. Sie wurde während jeder Prozedur manuell erfasst und im Prozedurprotokoll dokumentiert. Als vollständig galt die LA-Map, wenn alle 8 Segmente des LA in einer adäquaten Dichte der EGMs erfasst wurden.⁴³ Die 8 Segmente des LA sind in der Literatur wie folgt beschrieben:

- Segment 1: das Antrum der linken PV;
- Segment 2: das Antrum der rechten PV;
- Segment 3: die posteriore Wand (der sog. „LA Dom“);
- Segment 4: die anteriore Wand;
- Segment 5: das linke Vorhofohr;
- Segment 6: die laterale Wand;
- Segment 7: die inferiore Wand;
- Segment 8: die septale Wand.

Bei LAT-Ablationen musste zusätzlich ein klinisch interpretierbares Aktivierungsmuster vorliegen. In die Mappingzeit gingen sämtliche Schritte der Datenerfassung ein, einschließlich Kathetermanövern und Repositionierungen von Schleusen und Mappingkathetern während des Mappings sowie die erneute Etablierung des LA-Zugangs bei versehentlichem Wechsel zum rechten Atrium.

Darüber hinaus wurden die Zahl und die Rate der erfassten EGMs dokumentiert. Für die Analyse wurden ausschließlich die nach Abschluss des Mappings im System verbleibenden EGMs berücksichtigt. Die ausgewertete Punktzahl entsprach damit der finalen Datengrundlage nach Entfernung unnötiger Punkte sowie nach Ausschluss oder Korrektur falsch annotierter Signale.

2.4.2 Bestimmung des linksatrialen Volumens

Das LA-Volumen wurde echokardiographisch mittels biplaner Flächen-Längen-Methode aus apikalem Vierkammer- und Zweikammerblick bestimmt.⁷⁴ Die Bestimmung erfolgte unmittelbar postprozedural im elektrophysiologischen Herzkatheterlabor nach dem Ausschluss eines Perikardergusses mit Hilfe eines Echokardiographie-Geräts der Firma GE (Vivid T8, GE Healthcare, Chicago, IL, USA). Das postprozedural bestimmte LA-Volumen wurde als anatomische

Standardisierungsgröße zur Berechnung der volumenbezogenen Mapping-Geschwindigkeit verwendet.

Grundlage der zweidimensionalen Volumenbestimmung war die Nachzeichnung der Blut-Gewebe-Grenze (die Endokardkontur) des LA in beiden Anlotungen. Auf Höhe der Mitralklappenebene wurde die Kontur jeweils durch eine Gerade zwischen den gegenüberliegenden Ansätzen des Mitralklappenannulus geschlossen. Das linke Vorhofrohr und die Einmündungen der PV wurden nicht in die Flächenmessung einbezogen. Die Messung erfolgte in der endsystolischen Phase bei maximalem LA-Volumen. Die LA-Länge wurde als die kürzere der beiden Longitudinalachsen im apikalen Vierkammer- und Zweikammerblick definiert. Die Volumenberechnung erfolgte nach der Formel:

$$V = \frac{8}{3\pi} \cdot \frac{A_1 \cdot A_2}{L}$$

wobei A_1 und A_2 die Flächen des LA im Vierkammer- bzw. Zweikammerblick [cm^2] und L die kürzere der beiden gemessenen LA-Längen [cm] bezeichnet.

Bei Anwendung der biplanen Flächen-Längen-Methode ist auf eine nicht verkürzte Darstellung des LA im apikalen Vierkammer- und Zweikammerblick zu achten, da eine verkürzte Darstellung zu einer systematischen Unterschätzung des LA-Volumens führen kann.

Die Konturierung hat die Blut-Gewebe-Grenze des LA abzubilden und wird auf Höhe des Mitralklappenannulus durch eine Gerade zwischen den gegenüberliegenden Annuluspunkten geschlossen; das Vorhofrohr und die PV-Ostien werden nicht in die Flächenmessung einbezogen. Die LA-Länge ist als die kürzere der in beiden Anlotungen gemessenen Longitudinalachsen zu verwenden. Deutliche Unterschiede zwischen beiden Längenmessungen sprechen für unterschiedliche Schallachsen und vermindern die Zuverlässigkeit der Volumenberechnung. Zu berücksichtigen ist außerdem, dass die zweidimensionale Flächen-Längen-Methode auf geometrischen Annahmen beruht und ihre Messwerte deshalb nicht ohne Weiteres mit anderen echokardiographischen Volumenmethoden austauschbar sind.^{74,75}

2.4.3 Volumenbezogene Mapping-Geschwindigkeit

Als ergänzende Kennzahl der Mapping-Effizienz wurde die volumenbezogene Mapping-Geschwindigkeit berechnet. Sie wurde definiert als echokardiographisch bestimmtes LA-Volumen [Milliliter, ml] dividiert durch die dokumentierte Mappingzeit

[Minuten, min] und in ml/min angegeben. Die Berechnung erfolgte nach der folgenden Formel, wie bereits in der Literatur beschrieben:⁷⁶

$$\text{Volumenbezogene Mapping Geschwindigkeit} = \frac{\text{LA Volumen [ml]}}{\text{Mappingzeit [min]}}$$

Die Zahl der erfassten EGMs wurde nicht als Standardisierungsgröße verwendet, da sie wesentlich durch Akquisitionsalgorithmus, Punktakzeptanzkriterien, Filtereinstellungen, manuelle Nachbearbeitung und die individuelle Mappingstrategie beeinflusst wird. Sie erlaubt daher keine belastbare Normalisierung in Bezug auf die anatomische Größe des erfassten LA. Ebenso wurde ein aus dem 3D-Mappingsystem abgeleitetes LA-Volumen nicht verwendet, da dessen Berechnung von der Vollständigkeit und Qualität der geometrischen Rekonstruktion sowie von systemspezifischen Interpolations- und Grenzdefinitionsschritten abhängt. Zur volumenbezogenen Standardisierung wurde deshalb das echokardiographisch bestimmte LA-Volumen herangezogen.

Die volumenbezogene Mapping-Geschwindigkeit beschreibt das Verhältnis zwischen der Größe des erfassten LA und dem hierfür erforderlichen Zeitaufwand. Höhere Werte entsprechen einer kürzeren Mappingzeit bezogen auf ein gegebenes LA-Volumen. Die Kennzahl wurde als ergänzende Variable der Mapping-Effizienz ausgewertet und im Zusammenhang mit der dokumentierten Mappingzeit, der Zahl der final erfassten Punkte bzw. EGMs sowie den prozeduralen Zeitparametern interpretiert.

2.5 Statistische Analyse

Die statistische Auswertung erfolgte mit IBM SPSS Statistics, Version 28 (IBM Corp., Armonk, NY, USA) sowie GraphPad Prism, Version 10 (GraphPad Software, Boston, MA, USA). Die Analyse wurde explorativ durchgeführt. Eine formale Fallzahlplanung erfolgte aufgrund des retrospektiven Studiendesigns nicht.

Die deskriptive Auswertung umfasste klinische Basischarakteristika, echokardiographische Parameter sowie prozedurale und mappingbezogene Variablen. Kategoriale Variablen wurden als absolute und relative Häufigkeiten dargestellt. Kontinuierliche Variablen wurden als Median mit Interquartilsabstand angegeben und zwischen Grid und Grid X mittels Mann-Whitney-U-Test verglichen. Kategoriale Variablen wurden mittels Chi-Quadrat-Test nach Pearson analysiert; bei niedriger erwarteter Zellbesetzung wurde der exakte Test nach Fisher verwendet.

Die primären Vergleiche bezogen sich auf Parameter der Mapping-Effizienz, insbesondere Mappingzeit, volumenbezogene Mapping-Geschwindigkeit und Umfang der Signalakquise. Ergänzend wurden prozedurale Zeitparameter, Fluoroskopieparameter und akute periprozedurale Sicherheitsaspekte zwischen den Gruppen verglichen.

Alle statistischen Tests wurden zweiseitig durchgeführt. Ein p -Wert $< 0,05$ wurde als statistisch signifikant gewertet. Aufgrund des explorativen Charakters der Untersuchung erfolgte keine Adjustierung für multiples Testen. Fehlende Werte wurden nicht imputiert; die jeweiligen Analysen wurden auf Grundlage der verfügbaren Datensätze durchgeführt.

3 Ergebnisse

3.1 Patientencharakteristika

Das Studienkollektiv umfasste insgesamt 94 Patienten, davon 43 Patienten in der Grid-Gruppe und 51 Patienten in der Grid-X-Gruppe. Die Baseline-Charakteristika sind in Tabelle 1 dargestellt.

Die Indikationen der Eingriffe verteilten sich im Gesamtkollektiv auf 49 Patienten mit paroxysmalem VHF (52,1%), 34 Patienten mit persistierendem VHF (36,2%) und 11 Patienten mit LAT (11,7%). Zwischen Grid und Grid X zeigte sich kein signifikanter Unterschied in der Indikationsverteilung ($p=0,821$). In der Grid-Gruppe wurden 22 Patienten (51,2%) mit paroxysmalem VHF, 15 Patienten (34,9%) mit persistierendem VHF und 6 Patienten (14%) mit LAT eingeschlossen. In der Grid-X-Gruppe lagen die entsprechenden Werte bei 27 Patienten (52,9%), 19 Patienten (37,3%) und 5 Patienten (9,8%).

Das mediane Alter betrug im Gesamtkollektiv 70,3 Jahre [63,9-76,4]. Zwischen Grid und Grid X bestand kein signifikanter Altersunterschied (71,2 Jahre [63,6-76,4] vs. 69,9 Jahre [63,9-77,2], $p=0,793$). Auch Geschlecht, Body-Mass-Index (BMI), CHA₂DS₂-VASc-Score und EHRA-Klasse unterschieden sich nicht signifikant zwischen den Gruppen.

Die echokardiographischen Basisparameter waren zwischen beiden Gruppen vergleichbar. Dies betraf insbesondere die linksventrikuläre Ejektionsfraktion (57% [55-61] vs. 58% [56-60], $p=0,256$), das LA-Volumen (67 ml [46,5-102] vs. 70 ml [53,5-88,5], $p=0,776$) und den LA-Volumenindex (34,2 ml/m² [24,8-51,9] vs. 35,4 ml/m² [27,8-44,5], $p=0,97$).

Relevante Komorbiditäten waren zwischen beiden Gruppen weitgehend gleich verteilt. Dies galt unter anderem für arterielle Hypertonie, Diabetes mellitus, Herzinsuffizienz, Schlaganfall, chronisch obstruktive Lungenerkrankung, obstruktive Schlafapnoe, Myokardinfarkt, periphere arterielle Verschlusskrankheit sowie vorausgegangene kardiochirurgische oder strukturelle Eingriffe. Eine vorherige LA-Ablation lag insgesamt bei 43 Patienten (45,7%) vor und war in der Grid-X-Gruppe numerisch häufiger als in der Grid-Gruppe (54,9% vs. 34,9%, $p=0,052$).

Ergebnisse

Parameter	Alle Patienten n=94	Grid n=43	Grid X n=51	p- Wert
Alter, Jahre	70,3 [63,9-76,4]	71,2 [63,6-76,4]	69,9 [63,9-77,2]	0,793
Männliches Geschlecht, n (%)	41 (43,6%)	17 (39,5%)	24 (47,1%)	0,464
BMI, kg/m ²	27 [24,2-31,2]	27,8 [24,8-30,7]	26 [23,4-31,2]	0,189
CHA ₂ DS ₂ -VASc-Score	3 [2-4]	3 [2-4]	3 [2-4]	0,108
EHRA-Klasse	3 [3-3]	3 [2-3]	3 [3-3]	0,338
Indikation für den Eingriff, n (%)				0,821
• Paroxysmales VHF	49 (52,1%)	22 (51,2%)	27 (52,9%)	
• Persistierendes VHF	34 (36,2%)	15 (34,9%)	19 (37,3%)	
• LAT	11 (11,7%)	6 (14%)	5 (9,8%)	
Echokardiographie Parameter				
• LVEF, %	58 [55-61]	57 [55-61]	58 [56-60]	0,256
• LA-Volumen, ml	69 [50,2-94,0]	67 [46,5-102]	70 [53,5-88,5]	0,776
• LAVI, ml/m ²	34,7 [26,8-48,8]	34,2 [24,8-51,9]	35,4 [27,8-44,5]	0,970
Komorbiditäten				
• Arterielle Hypertonie, n (%)	67 (71,3%)	30 (69,8%)	37 (72,5%)	0,767
• Diabetes mellitus, n (%)	14 (14,9%)	5 (11,6%)	9 (17,6%)	0,414
• Herzinsuffizienz, n (%)	19 (20,2%)	12 (27,9%)	7 (13,7%)	0,088
• Schlaganfall, n (%)	11 (11,7%)	7 (16,3%)	4 (7,8%)	0,205
• COPD, n (%)	5 (5,3%)	3 (7%)	2 (3,9%)	0,511
• OSAS, n (%)	9 (9,6%)	4 (9,3%)	5 (9,8%)	0,934
• Myokardinfarkt, n (%)	8 (8,5%)	3 (7%)	5 (9,8%)	0,625
• Mitralklappen-OP, n (%)	5 (5,3%)	2 (4,7%)	3 (5,9%)	0,791
• Mitralklappen-Clipping, n (%)	3 (3,2%)	1 (2,3%)	2 (3,9%)	0,661
• ACB-OP, n (%)	5 (5,3%)	3 (7%)	2 (3,9%)	0,511
• pAVK, n (%)	6 (6,4%)	3 (7%)	3 (5,9%)	0,829
• Blutungen, n (%)	0 (0%)	0 (0%)	0 (0%)	1,000
Elektrische Kardioversion, n (%)	65 (69,1%)	31 (72,1%)	34 (66,7%)	0,570
Vorherige LA-Ablation, n (%)	43 (45,7%)	15 (34,9%)	28 (54,9%)	0,052

Tabelle 1: **Baseline-Charakteristika**; VHF = Vorhofflimmern; LAT = linksatriale Tachykardie; LA = linkes Atrium; LAVI = linksatrialer Volumenindex; LVEF = linksventrikuläre Ejektionsfraktion; COPD = chronisch obstruktive Lungenerkrankung; OSAS = obstruktives Schlafapnoe-Syndrom; ACB = aortokoronarer Bypass; OP = Operation; pAVK = periphere arterielle Verschlusskrankheit.

3.2 Prozedurale Charakteristika

Die prozeduralen Charakteristika sind in Tabelle 2 dargestellt. Insgesamt wurde bei 92 Patienten (97,9%) eine RFA durchgeführt; 2 Patienten (2,1%) erhielten eine PFA. In der Grid-Gruppe wurden 41 Patienten (95,3%) mittels RFA behandelt; 2 Patienten (4,7%) erhielten PFA, während in der Grid-X-Gruppe ausschließlich RFA verwendet wurde (51/51; 100%).

Der verwendete Ablationskatheter unterschied sich zwischen den Gruppen ($p < 0,001$). In der Grid-X-Gruppe wurde ausschließlich der TactiFlex SE eingesetzt. In der Grid-Gruppe kamen TactiCath SE, TactiFlex SE und in zwei Fällen der PFA-Katheter Farawave zum Einsatz.

Die Gesamtprozedurzeit war in der Grid-X-Gruppe kürzer als in der Grid-Gruppe (110 min [85-135,5] vs. 136 min [115,5-160], $p < 0,001$). Auch die Zeit bis zur TSP war in der Grid-X-Gruppe kürzer (15 min [11,5-16] vs. 17 min [14-29,5], $p = 0,012$). Da Zeit bis TSP und Gesamtprozedurzeit durch mehrere nicht mappingbezogene Workflow-Komponenten beeinflusst werden, wurden diese Parameter als Kontextparameter und nicht als primäre katheterspezifische Endpunkte interpretiert.

Die Fluoroskopiezeit war in der Grid-X-Gruppe numerisch geringer, erreichte jedoch keine statistische Signifikanz (14 min [8-18] vs. 16 min [11-21,6], $p = 0,105$). Das Dosisflächenprodukt unterschied sich nicht zwischen den Gruppen (678 [353-1020] vs. 637 [459-886,5], $p = 0,979$).

Parameter	Alle Patienten n=94	Grid n=43	Grid X n=51	p-Wert
Ablationsenergie				0,120
• RFA	92 (97,9%)	41 (95,3%)	51 (100%)	
• PFA	2 (2,1%)	2 (4,7%)	0 (0%)	
Ablationskatheter				<0,001
• TactiFlex SE	65 (69,1%)	14 (32,6%)	51 (100%)	
• TactiCath SE	27 (28,7%)	27 (62,8%)	0 (0%)	
• Farawave	2 (2,1%)	2 (4,7%)	0 (0%)	
Gesamtprozedurzeit, min	121 [102,5-149,5]	136 [115,5-160]	110 [85-135,5]	<0,001
Zeit bis TSP, min	15 [12-20]	17 [14-29,5]	15 [11,5-16]	0,012
Fluoroskopiezeit, min	14 [10-19,8]	16 [11-21,6]	14 [8-18]	0,105
Dosisflächenprodukt, cGy·cm ²	657,5 [372-1006,5]	637 [459-886,5]	678 [353-1020]	0,979

Tabelle 2: **Prozedurale Charakteristika**; RFA = Radiofrequenzablation; PFA = Pulsfeldablation; TSP = Transseptalpunktion.

3.3 Mapping-Effizienz

Die Mapping-Effizienz wurde anhand der Mappingzeit, der volumenbezogenen Mapping-Geschwindigkeit, der Zahl final erfasster EGMs sowie der EGM-Akquisitionsgeschwindigkeit beurteilt. Die Ergebnisse sind in den Abbildungen 3.1 bis 3.4 dargestellt. Alle Werte sind als Median [Interquartilsabstand] angegeben.

Die Mappingzeit war in der Grid-X-Gruppe signifikant kürzer als in der Grid-Gruppe (12 min [10-13] vs. 22 min [19-25], $p < 0,001$; Abbildung 3.1). Damit wurde eine vollständige LA-Map mit Grid X in deutlich kürzerer Zeit erstellt.

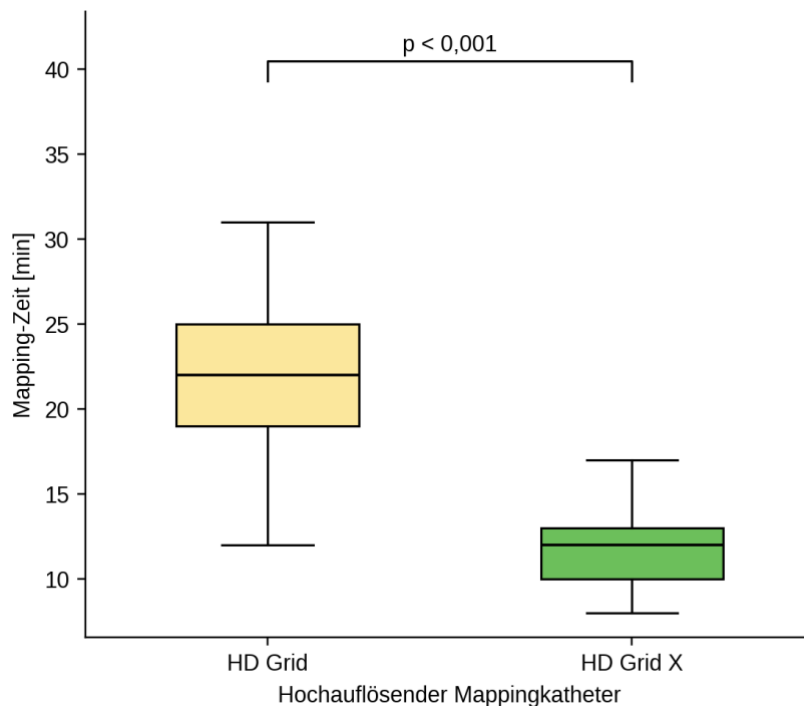


Abb. 3.1: **Mappingzeit nach verwendetem HD-Mappingkatheter**

Die volumenbezogene Mapping-Geschwindigkeit war in der Grid-X-Gruppe signifikant höher als in der Grid-Gruppe (6 ml/min [4,37-7,53] vs. 2,94 ml/min [2,14-4,9], $p < 0,001$; Abbildung 3.2). Diese Kennzahl setzt die Mappingzeit in Relation zum echokardiographisch bestimmten LA-Volumen und berücksichtigt damit Unterschiede in der anatomischen Ausgangsgröße des LA. Höhere Werte zeigen an, dass für ein gegebenes LA-Volumen weniger Zeit zur Erstellung einer vollständigen LA-Map benötigt wurde. Der Unterschied zugunsten von Grid X blieb somit auch nach volumenbezogener Standardisierung der Mappingzeit bestehen.

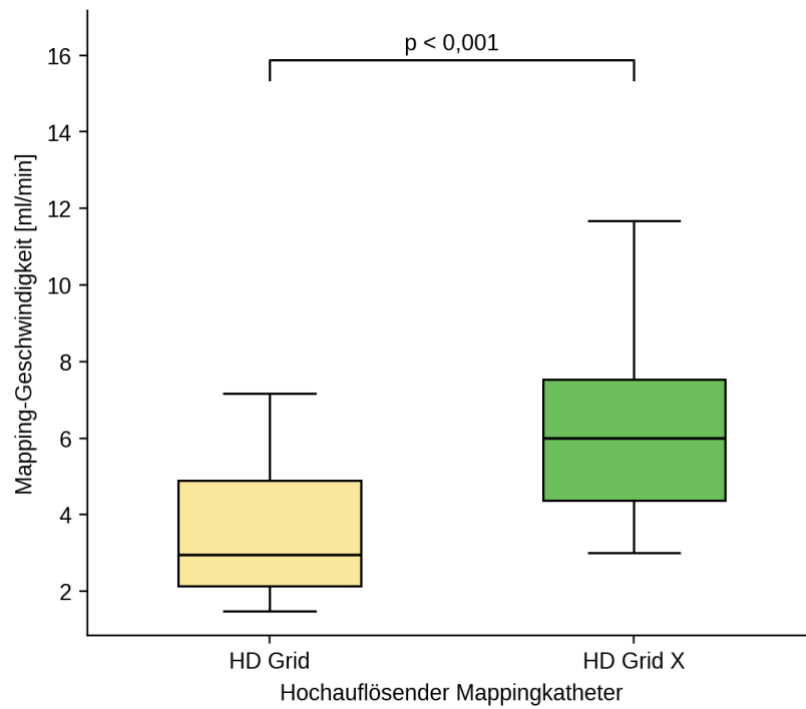


Abb. 3.2: **Volumenbezogene Mapping-Geschwindigkeit nach verwendetem HD-Mappingkatheter**

Auch die Zahl der final erfassten EGMs unterschied sich signifikant zwischen den Gruppen. In der Grid-X-Gruppe wurden mehr EGMs erfasst als in der Grid-Gruppe (4918 [3981-5710] vs. 3685 [2825-4524], $p < 0,001$; Abbildung 3.3).

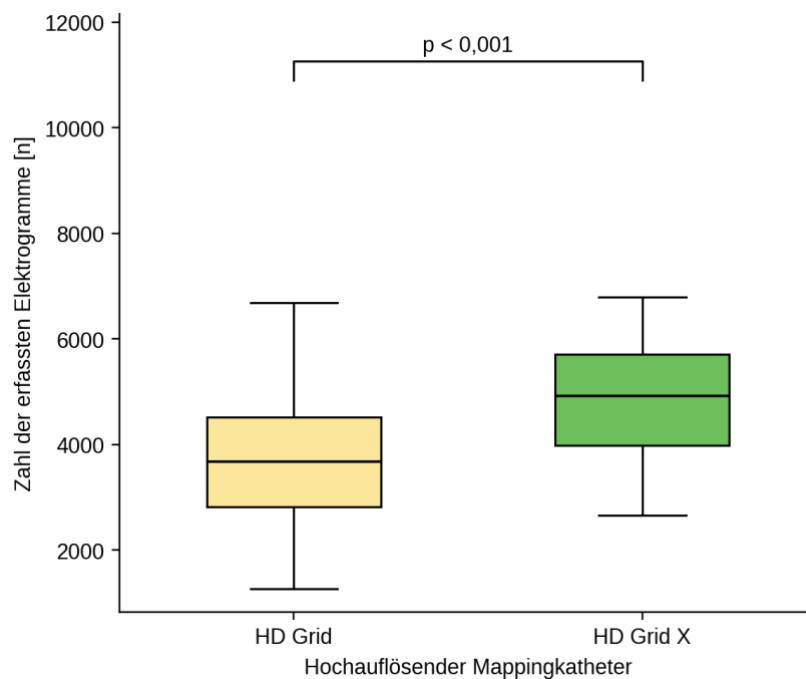


Abb. 3.3: **Zahl der erfassten EGMs nach verwendetem HD-Mappingkatheter**

Ergebnisse

Entsprechend war auch die EGM-Akquisitionsgeschwindigkeit in der Grid-X-Gruppe signifikant höher (415,9 EGMs/min [319,5-490,1] vs. 161,5 EGMs/min [119,7-219,4], $p < 0,001$; Abbildung 3.4). Insgesamt zeigte sich damit für Grid X eine kürzere Mappingzeit bei gleichzeitig höherer finaler Elektrogrammzahl und höherer EGM-Akquisitionsgeschwindigkeit.

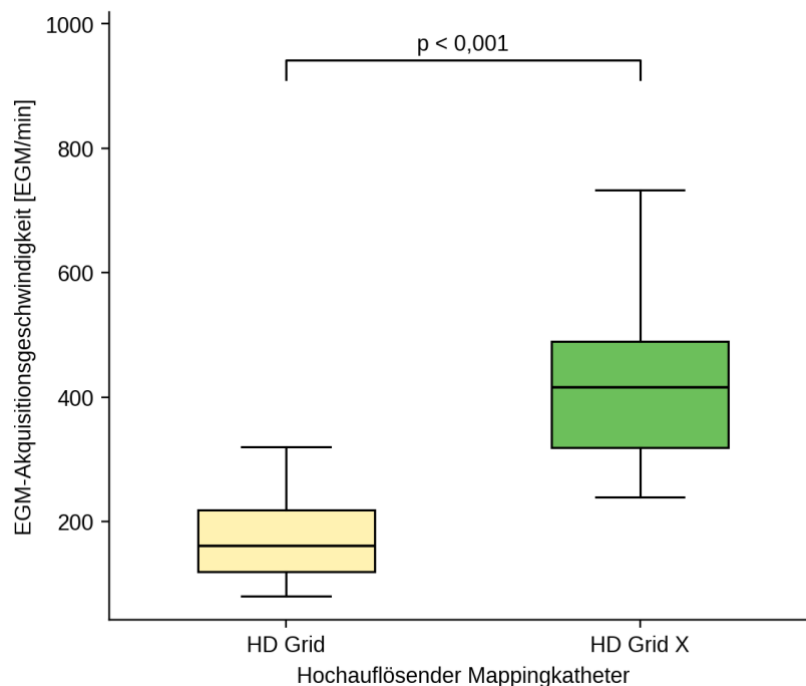


Abb. 3.4: **EGM-Akquisitionsgeschwindigkeit nach verwendetem HD-Mappingkatheter**

Als ergänzende explorative Kennzahl wurde die volumenbezogene EGM-Dichte ausgewertet. Die volumenbezogene Dichte der erfassten EGMs in der Grid-X-Gruppe war höher als in der Grid-Gruppe (67,9 EGMs/ml [49,9-94,6] vs. 53,2 EGMs/ml [37,2-77,5], $p=0,011$).

Die Abbildung 3.5 zeigt exemplarische LA-Maps mit Grid und Grid X bei paroxysmalem VHF, persistierendem VHF und LAT. Dargestellt sind Beispiele aus den drei untersuchten Indikationsgruppen, um die praktische Anwendung der beiden Mappingkatheter im klinischen Kontext zu veranschaulichen. Die Abbildung ordnet die im Ergebnisteil dargestellten quantitativen Parameter wie Mappingzeit, volumenbezogene Mapping-Geschwindigkeit und EGM-Akquisition visuell ein.

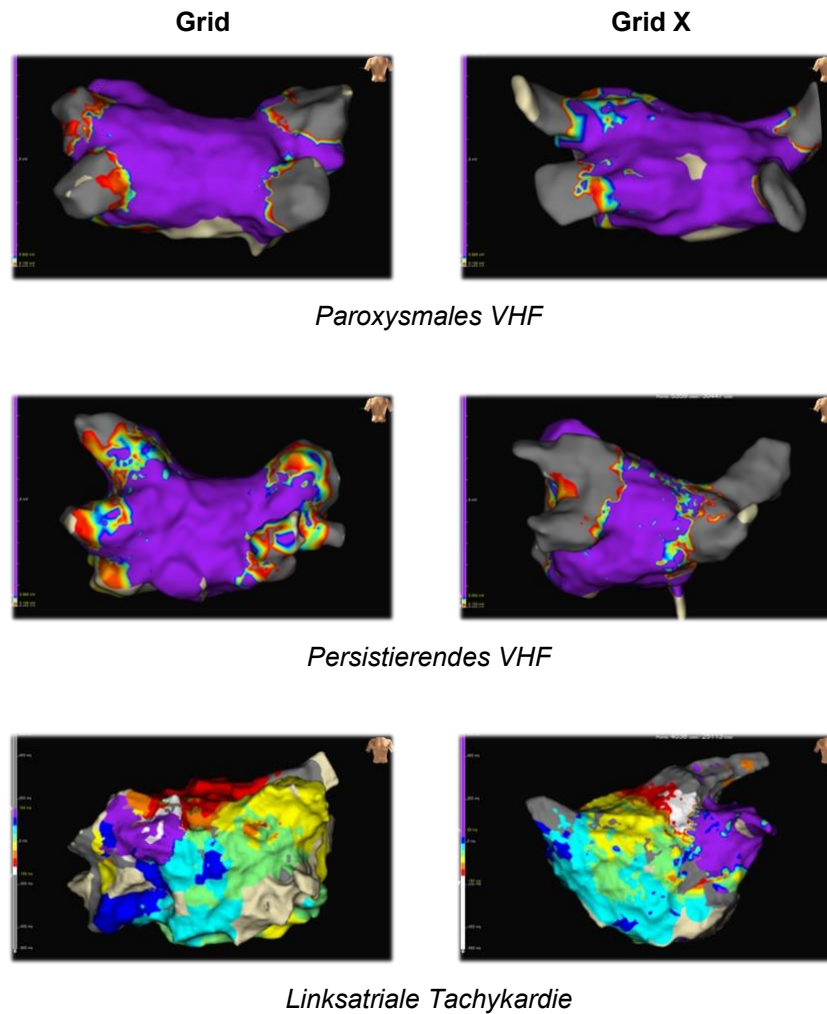


Abb. 3.5: **Exemplarische LA-Maps nach Indikation**

3.4 Explorative Subgruppenanalyse nach Indikation

Zur Prüfung der indikationsabhängigen Konsistenz der Ergebnisse wurde eine explorative Subgruppenanalyse durchgeführt. Hintergrund war, dass der Mapping-Workflow bei paroxysmalem VHF, persistierendem VHF und LAT unterschiedliche Anforderungen aufweist. Während bei VHF-Prozeduren die Erstellung einer vollständigen LA-Map im Rahmen der PVI im Vordergrund stand, erforderte die LAT-Ablation zusätzlich eine aktivierungsbasierte Charakterisierung des zugrunde liegenden Tachykardiemechanismus. Die Analyse erfolgte daher getrennt für

paroxysmales VHF, persistierendes VHF und LAT. Bewertet wurden Mappingzeit, volumenbezogene Mapping-Geschwindigkeit und EGM-Akquisitionsgeschwindigkeit. Die Mappingzeit war in allen drei Indikationsgruppen unter Verwendung von Grid X kürzer als unter Verwendung von Grid. Bei paroxysmalem VHF betrug die Mappingzeit 12 min [10,5-13,5] in der Grid-X-Gruppe gegenüber 20,5 min [16,5-25] in der Grid-Gruppe ($p < 0,001$). Bei persistierendem VHF lagen die entsprechenden Werte bei 12 min [10-12] gegenüber 24 min [21-27] ($p < 0,001$). Auch bei LAT zeigte sich eine kürzere Mappingzeit mit Grid X (10 min [10-14] vs. 23 min [20,3-26,5], $p = 0,022$; Abbildung 3.6).

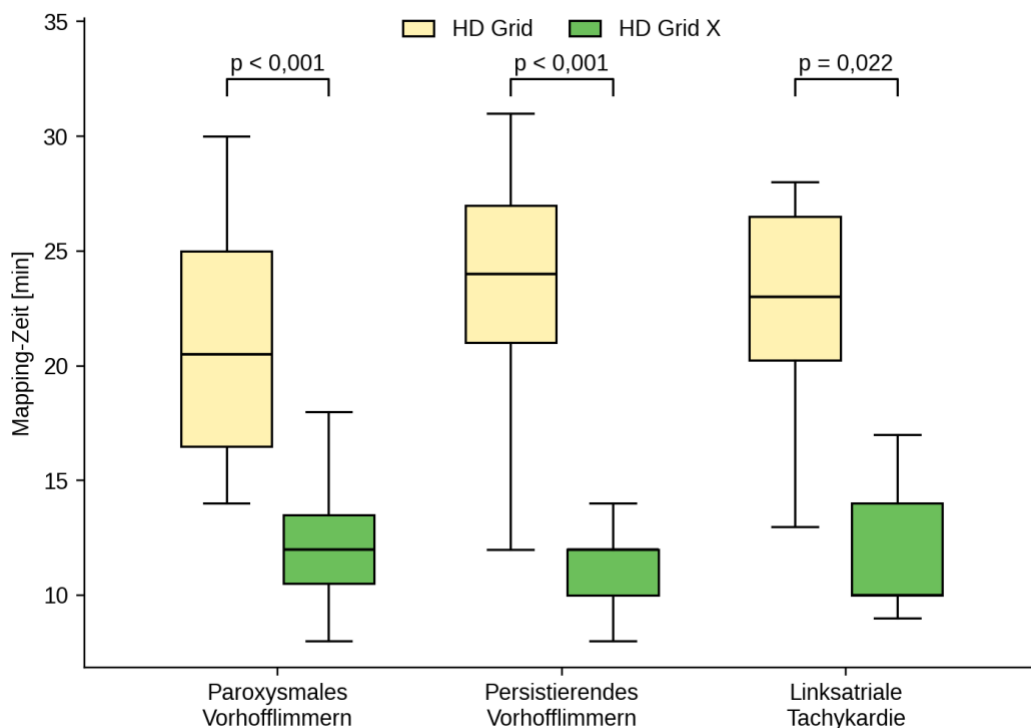


Abb. 3.6: Mappingzeit nach Indikation und verwendetem HD-Mappingkatheter

Die volumenbezogene Mapping-Geschwindigkeit war bei paroxysmalem und persistierendem VHF in der Grid-X-Gruppe signifikant höher. Bei paroxysmalem VHF betrug sie 5,83 ml/min [4,30-7,06] vs. 3,26 ml/min [2,26-4,61] ($p < 0,001$). Bei persistierendem VHF lag sie bei 7,08 ml/min [5,32-8,44] vs. 3,04 ml/min [2,20-4,86] ($p < 0,001$). In der LAT-Subgruppe war die volumenbezogene Mapping-Geschwindigkeit numerisch höher (6 ml/min [5,35-6,57] vs. 2,32 ml/min [1,68-4,73]), erreichte jedoch keine statistische Signifikanz ($p = 0,177$; Abbildung 3.7).

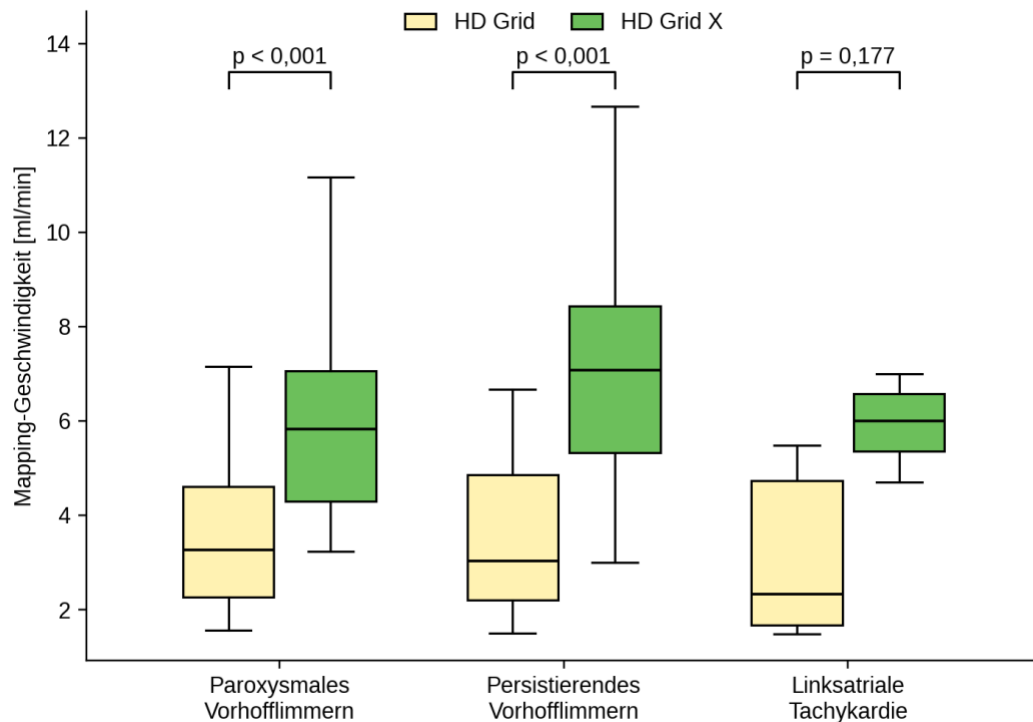


Abb. 3.7: Volumenbezogene Mapping-Geschwindigkeit nach Indikation und verwendetem HD-Mappingkatheter

Die EGM-Akquisitionsgeschwindigkeit war in allen drei Indikationsgruppen höher unter Verwendung von Grid X. Bei paroxysmalem VHF betrug sie 359,1 EGMs/min [294,2-461] vs. 162,5 EGMs/min [129,7-247,9] ($p < 0,001$). Bei persistierendem VHF lagen die Werte bei 446,4 EGMs/min [395,9-528,2] vs. 122,4 EGMs/min [108,8-192,8] ($p < 0,001$). Auch in der LAT-Subgruppe zeigte sich eine signifikant höhere EGM-Akquisitionsgeschwindigkeit mit Grid X (449 EGMs/min [365-484,9] vs. 200,9 EGMs/min [170,9-217,9], $p = 0,004$; Abbildung 3.8).

Die LAT-Subgruppe umfasste nur 11 Patienten (Grid: $n = 6$; Grid X: $n = 5$). Die Ergebnisse dieser Subgruppe wurden daher ausschließlich explorativ bewertet; insbesondere nicht signifikante Unterschiede lassen sich aufgrund der geringen Fallzahl nur eingeschränkt interpretieren. Trotz dieser Limitation entsprach die Richtung der Effekte dem Muster der Gesamtkohorte: mit Grid X war die Mappingzeit auch bei LAT kürzer und die EGM-Akquisitionsgeschwindigkeit höher. Die volumenbezogene Mapping-Geschwindigkeit war in der LAT-Subgruppe ebenfalls numerisch höher, erreichte jedoch kein statistisches Signifikanzniveau. Insgesamt zeigten die Subgruppenanalysen damit über paroxysmales VHF, persistierendes VHF

und LAT hinweg ein konsistentes Muster zugunsten von Grid X, insbesondere für Mappingzeit und EGM-Akquisitionsgeschwindigkeit.

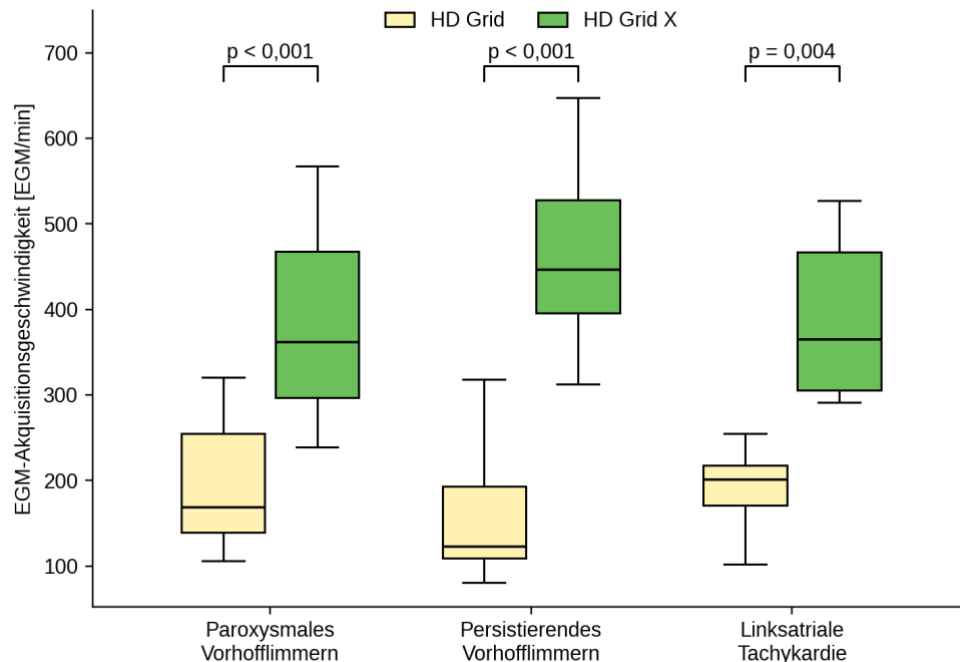


Abb. 3.8: **EGM-Akquisitionsgeschwindigkeit nach Indikation und verwendetem HD-Mappingkatheter**

Die Ergebnisse der explorativen Subgruppenanalyse waren insgesamt mit den Befunden der Gesamtkohorte vereinbar.

3.5 Akute periprozedurale Sicherheit

Als akute periprozedurale Komplikationen wurden Ereignisse erfasst, die intraprozedural oder im unmittelbaren postprozeduralen stationären Verlauf bis zur Entlassung dokumentiert wurden. Die akuten periprozeduralen Sicherheitsendpunkte sind in Tabelle 3 dargestellt. Insgesamt wurden bei 2 von 94 Patienten (2,1%) akute periprozedurale Komplikationen dokumentiert. Beide Ereignisse traten in der Grid-X-Gruppe auf (2/51; 3,9%), während in der Grid-Gruppe keine akute periprozedurale Komplikation dokumentiert wurde (0/43; 0%). Der Unterschied zwischen den Gruppen war statistisch nicht signifikant ($p=0,498$).

Bei einem Patienten der Grid-X-Gruppe trat intraprozedural eine Perikardtamponade auf (1/51; 2,0%). Eine Reanimationspflichtigkeit bestand nicht. Das Ereignis trat

Ergebnisse

während der Ablation im zeitlichen Zusammenhang mit einem Steam-Pop-Ereignis auf und wurde als nicht TSP-assoziierte Tamponade im Sinne eines Typ-E-Ereignisses nach der Klassifikation von Maclean et al. eingeordnet.⁷⁷ Die Perikardtamponade wurde unmittelbar erkannt und mittels akuter perkutaner Perikardpunktion erfolgreich behandelt. Ein operatives Vorgehen war nicht erforderlich.

Als zweite Komplikation wurde in der Grid-X-Gruppe eine Leistenkomplikation dokumentiert (1/51; 2%). Hierbei handelte es sich um eine Nachblutung unmittelbar postprozedural auf der Station. Die Blutung konnte durch lokale Kompression erfolgreich gestillt werden. Weitere interventionelle oder operative Maßnahmen waren nicht erforderlich.

Komplikation	Alle Patienten n=94	Grid n=43	Grid X n=51	p-Wert
Perikarderguss ohne Tamponade	0 (0%)	0 (0%)	0 (0%)	-
Perikardtamponade	1 (1,1%)	0 (0%)	1 (2%)	1,000
Leistenkomplikation	1 (1,1%)	0 (0%)	1 (2%)	1,000
Pneumonie	0 (0%)	0 (0%)	0 (0%)	-
Schlaganfall	0 (0%)	0 (0%)	0 (0%)	-
Temporäre Phrenikusparese	0 (0%)	0 (0%)	0 (0%)	-
Permanente Phrenikusparese	0 (0%)	0 (0%)	0 (0%)	-
Tod	0 (0%)	0 (0%)	0 (0%)	-
Gesamtkomplikationen	2 (2,1%)	0 (0%)	2 (3,9%)	0,498

Tabelle 3: Akute periprozedurale Komplikationen

Perikardergüsse ohne Tamponade, Pneumonien, Schlaganfälle, temporäre oder permanente Phrenikusparesen und Todesfälle wurden im Studienkollektiv nicht beobachtet. Insgesamt ergab sich damit kein Hinweis auf einen signifikanten Unterschied im akuten periprozeduralen Sicherheitsprofil zwischen Grid und Grid X. Aufgrund der niedrigen Ereigniszahl erfolgte der Gruppenvergleich der Sicherheitsendpunkte mittels exaktem Test nach Fisher.

4 Diskussion

Die vorliegende Arbeit untersucht in einem retrospektiven, monozentrischen Real-World-Kollektiv, ob sich die technische Weiterentwicklung vom Grid zum Grid X auf die praktische Durchführung des HD-Mappings in LA-Ablationsprozeduren auswirkt. Im Fokus standen mappingbezogene Effizienzparameter bei Prozeduren wegen paroxysmalem VHF, persistierendem VHF und LAT; eine qualitative Bewertung der Maps, die Arrhythmieinterpretation und klinische Langzeitendpunkte waren nicht Gegenstand der Analyse. Die Diskussion orientiert sich damit an der in der Vorarbeit etablierten Trennung zwischen Workflow-Effizienz und Mapping-Qualität.⁷⁶

Die wesentlichen Ergebnisse waren:

1. Höhere Mapping-Effizienz: Grid X war mit kürzerer Mappingzeit, höherer volumenbezogener Mapping-Geschwindigkeit und höherer EGM-Akquisitionsgeschwindigkeit assoziiert.
2. Höhere Datenerfassung: die finale Zahl erfasster EGMs war in der Grid-X-Gruppe höher.
3. Konsistenz in Subgruppen: die explorative Subgruppenanalyse zeigte über paroxysmales VHF, persistierendes VHF und LAT hinweg eine vergleichbare Effektrichtung.

Der Beitrag der Arbeit liegt damit in der Quantifizierung eines definierten Mapping-Workflows unter klinischen Routinebedingungen. Ob die beobachteten Effizienzvorteile mit Unterschieden in der Map-Qualität, der Arrhythmieanalyse oder dem klinischen Verlauf verbunden sind, bleibt weiterführenden Untersuchungen vorbehalten.

4.1 Workflow-Effizienz des hochauflösenden LA-Mappings

LA-Ablationsprozeduren werden zunehmend durch strukturierte, wiederholbare Arbeitsschritte geprägt. Neben der eigentlichen Läsionssetzung haben Mapping, Validierung und Re-Mapping einen wesentlichen Anteil am Ablauf der Prozedur. Dies gilt insbesondere für Prozeduren mit 3D-Mapping, bei denen die LA-Anatomie, die elektrische Isolation der PV, mögliche Residualleitungen sowie komplexe Aktivierungsmuster systematisch erfasst werden. Aktuelle Konsensudokumente zur Katheterablation bei VHF betonen definierte prozedurale Endpunkte und

standardisierte Ablationsabläufe, wodurch die zuverlässige und effiziente Datenerfassung im LA zunehmend an Bedeutung gewinnt.²²

Die methodische Grundlage dieser Arbeit ist die zuvor publizierte Real-World-Benchmark-Analyse zur Workflow-Effizienz des HD-LA-Mappings über vier multipolare Katheterdesigns.⁷⁶ In dieser Vorarbeit wurde die volumenbezogene Mapping-Geschwindigkeit als Kennzahl definiert, berechnet aus dem echokardiographisch bestimmten LA-Volumen dividiert durch die Zeit bis zur vollständigen LA-Map. Die Analyse war ausdrücklich auf Effizienzmetriken fokussiert und nicht auf Mapping-Qualität, Arrhythmieinterpretation oder klinische Endpunkte ausgelegt.

Diese Vorarbeit zeigte, dass sich unterschiedliche HD-Mappingkatheter hinsichtlich volumenbezogener Mapping-Geschwindigkeit und EGM-Akquisitionsgeschwindigkeit deutlich unterscheiden können. Besonders relevant war dabei die konzeptionelle Trennung zwischen einer operativen Effizienzmetrik und einer Aussage zur diagnostischen oder klinischen Wertigkeit der Map. Die volumenbezogene Mapping-Geschwindigkeit wurde als Messgröße eines definierten Arbeitsauftrags verstanden: Erstellung einer vollständigen LA-Map unter Routinebedingungen. Diese Definition erlaubt einen Vergleich der prozeduralen Leistungsfähigkeit, ohne daraus unmittelbar Rückschlüsse auf Map-Qualität oder klinische Überlegenheit abzuleiten.⁷⁶

Auch andere aktuelle Arbeiten stützen die Relevanz workflowbezogener Parameter in der AF-Ablation. Fink et al. untersuchten die Implementierung von HD-Mapping und HPSP-Ablationsprotokollen („high-power short-duration“, Ablation mit hoher Leistung und kurzer Dauer) in einen standardisierten institutionellen Workflow. In dieser Analyse unterschieden sich Skin-to-skin-Zeiten und Laborzeiten signifikant zwischen den untersuchten Set-ups; die Kombination aus HPSP-Ablation und HD-Mapping führte zu kürzeren Mapping- und Ablationszeiten sowie zu einer verkürzten Gesamtprozedurdauer, ohne dass die arrhythmiefreie Überlebensrate nach zwölf Monaten unterschiedlich war.³³

Ähnliche Fragestellungen finden sich in neueren Arbeiten zu standardisierten PVI-Workflows. Gigli et al. untersuchten einen strukturierten Ablationsablauf mit HD-Mapping und sehr hochenergetischer Kurzzeita-blation bei paroxysmalem VHF. Der Fokus lag dabei auf Prozedurzeit, Effektivität und Sicherheit innerhalb eines standardisierten Workflows.⁷⁰ Diese Arbeiten zeigen, dass technische Weiterentwicklungen im EP-Labor zunehmend anhand ihrer Auswirkungen auf

Ablaufparameter bewertet werden, nicht allein anhand ihrer isolierten technischen Eigenschaften.

Die vorliegende Arbeit erweitert diesen Ansatz um den direkten Vergleich zweier Generationen desselben grid-basierten Mappingkonzepts. Dieser Vergleich ist methodisch enger gefasst als Vergleiche unterschiedlicher Katheterdesigns und Mappingsysteme. Grid und Grid X wurden im selben Mappingsystem eingesetzt und beruhen auf demselben grundlegenden Grid-Prinzip. Damit steht weniger die Frage nach der Überlegenheit einer bestimmten Kathetergeometrie im Vordergrund, sondern der Einfluss einer technischen Weiterentwicklung innerhalb eines etablierten Katheterkonzepts.

Die Ergebnisse der vorliegenden Arbeit passen zu dieser Fragestellung. Grid X war mit einer signifikant kürzeren Mappingzeit verbunden. Gleichzeitig wurden mehr finale EGMs erfasst, und die EGM-Akquisitionsgeschwindigkeit war höher. Der Zeitvorteil entstand damit nicht durch eine reduzierte Datenerfassung. Vielmehr zeigte sich eine höhere Akquisitionsleistung innerhalb eines kürzeren Mapping-Intervalls. Dieser Befund ist für die Bewertung der Workflow-Effizienz zentral, da eine verkürzte Mappingzeit allein methodisch nur begrenzt aussagekräftig wäre.

Die volumenbezogene Mapping-Geschwindigkeit ergänzt diese Betrachtung, weil sie die Mappingzeit zur anatomischen Ausgangsgröße des LA in Beziehung setzt. In der vorliegenden Arbeit blieb der Vorteil von Grid X auch nach dieser volumenbezogenen Standardisierung bestehen. Damit war der Unterschied nicht allein durch unterschiedliche LA-Volumina erklärbar. Die höhere Mapping-Geschwindigkeit beschreibt vielmehr, dass pro Zeiteinheit ein größerer LA-Volumenanteil erfasst wurde. Katheterdesign und Systemumgebung beeinflussen die praktische Mapping-Durchführung wesentlich. Steinfurt et al. beschrieben für einen Multispline-Katheter (octa-spline) mit 48 eng benachbarten Elektroden eine sichere und effiziente Anwendung mit hoher elektroanatomischer Auflösung; bei LAT-Prozeduren zeigte sich gegenüber einem Penta-Spline-Katheter eine höhere Punktdichte und Mapping-Geschwindigkeit.⁷² Diese Daten unterstreichen, dass Weiterentwicklungen von Mappingkathetern klinisch relevante Auswirkungen auf die Datenerfassung haben können. Die vorliegende Arbeit zeigt ein entsprechendes Prinzip innerhalb des grid-basierten HD-Mappings.

Zusammenfassend ordnen die vorliegenden Ergebnisse Grid X als effizientere Kathetergeneration für die Erstellung vollständiger LA-Maps unter Routinebedingungen ein. Der Beitrag der Arbeit liegt in der Quantifizierung eines

definierten Mapping-Workflows innerhalb eines realen klinischen Ablationsablaufs. Ob die beobachteten Effizienzvorteile mit Unterschieden in der Map-Qualität, der Arrhythmieanalyse oder dem klinischen Verlauf verbunden sind, bleibt weiterführenden Untersuchungen vorbehalten.

4.2 Einfluss der Kathetergeneration auf die Mapping-Durchführung

Der Vergleich zwischen Grid und Grid X unterscheidet sich von vielen bisherigen Arbeiten zu HD-Mappingkathetern, weil nicht unterschiedliche Kathetergeometrien oder verschiedene Mappingsysteme gegenübergestellt wurden. Beide untersuchten Katheter beruhen auf demselben grid-basierten Design und wurden im selben 3D-Mappingsystem eingesetzt. Dadurch steht in dieser Arbeit nicht die Frage nach unterschiedlichen Katheterklassen im Vordergrund, sondern der Einfluss einer technischen Weiterentwicklung innerhalb desselben Katheterkonzepts.

Das ursprüngliche Grid-Konzept greift ein zentrales methodisches Problem bipolarer Ableitungen auf: deren Abhängigkeit von der Ausbreitungsrichtung der lokalen Erregung. Bei konventionellen bipolaren EGMs hängt die gemessene Spannung wesentlich davon ab, ob die Erregungsfront parallel, schräg oder quer zur Elektrodenachse verläuft. Dadurch können lokale Spannungen unterschätzt und Aktivierungsmuster unvollständig abgebildet werden. Grid nutzt eine rasterförmige Elektrodenanordnung, die bipolare Ableitungen in zwei orthogonalen Richtungen ermöglicht. Signale können dadurch sowohl entlang einzelner Elektrodenarme als auch zwischen benachbarten Elektrodenarmen erfasst werden. In Verbindung mit den entsprechenden Auswertalgorithmen wird für die Darstellung lokaler Aktivierung jeweils die geeignetste bipolare Ableitung herangezogen. Auf diese Weise soll die Richtungsabhängigkeit bipolarer Signale reduziert werden. Dieses Prinzip adressiert die in der Literatur beschriebene Richtungsblindheit bipolarer Mappingkatheter („bipolar blindness“) und bildet eine wesentliche Grundlage für den Einsatz grid-basierter Katheterdesigns.⁷⁸

Die vorliegenden Ergebnisse passen zu dieser technischen Erwartung. Mit Grid X war die Mappingzeit signifikant kürzer, während gleichzeitig mehr finale EGMs erfasst wurden. Dieser Befund ist entscheidend, da eine kürzere Mappingzeit allein auch durch eine reduzierte Datenerfassung erklärbar wäre. In der vorliegenden Arbeit zeigte sich das Gegenteil: Grid X erzielte eine kürzere Mappingzeit bei höherer finaler EGM-

Zahl und deutlich höherer EGM-Akquisitionsgeschwindigkeit. Damit spricht der Befund nicht für eine verkürzte oder vereinfachte Map-Erstellung auf Kosten der Datengrundlage, sondern für eine höhere mappingbezogene Durchsatzleistung im klinischen Ablauf.

Diese Interpretation wird durch die volumenbezogene Analyse gestützt. Die volumenbezogene Mapping-Geschwindigkeit war in der Grid-X-Gruppe signifikant höher. Da diese Kennzahl die Mappingzeit auf das echokardiographisch bestimmte LA-Volumen bezieht, wird die anatomische Ausgangsgröße des linken Vorhofs berücksichtigt. Der Vorteil von Grid X blieb nach dieser Standardisierung bestehen. Unterschiede in der LA-Größe erklären die beobachtete Verkürzung der Mappingzeit daher nicht hinreichend. Vielmehr zeigen die Daten, dass mit Grid X pro Zeiteinheit ein größerer LA-Volumenanteil erfasst wurde.

Der wesentliche Zusatznutzen der vorliegenden Arbeit liegt darin, dass hier kein plattformübergreifender Vergleich verschiedener Katheterdesigns durchgeführt wurde. Stattdessen wurden zwei Generationen desselben grid-basierten Designs im selben System verglichen. Dadurch wird der Einfluss unterschiedlicher Mappingplattformen, unterschiedlicher Kathetergeometrien und stark abweichender Akquisitionslogiken reduziert. Die beobachteten Unterschiede sprechen daher spezifischer für einen Effekt der Kathetergeneration bzw. ihrer Systemintegration. Gleichwohl bleibt die Interpretation retrospektiver Real-World-Daten vorsichtig: zeitliche Workflow-Entwicklung, zunehmende Routine mit dem System und Veränderungen in Ablationsabläufen können das Ergebnis mitbeeinflusst haben.

Aus methodischer Sicht ist zudem relevant, dass absolute EGM-Zahlen nicht isoliert interpretiert werden sollten. EGM-Zahlen hängen von Akquisitionsalgorithmus, Punktakzeptanzkriterien, Filtereinstellungen, Nachbearbeitung und Mappingstrategie ab. In dieser Arbeit wurden daher die finalen, nach Entfernung unnötiger oder falsch annotierter Punkte verbleibenden Elektrogramme ausgewertet. Der Vergleich innerhalb desselben Systems und desselben Kathetergrundkonzepts stärkt die Aussagekraft dieser Analyse, ersetzt aber keine qualitative Bewertung der Map.

Die Ergebnisse zeigen, dass die technische Weiterentwicklung von Grid zu Grid X mit einer messbaren Veränderung der Mapping-Durchführung verbunden war. Die Daten sprechen für eine effizientere Datenerfassung unter klinischen Routinebedingungen. Eine Aussage über höhere Map-Qualität, bessere Mechanismusinterpretation oder verbesserte klinische Langzeitergebnisse lässt sich daraus nicht ableiten. Genau darin liegt jedoch der methodische Wert dieses Abschnitts: die Arbeit quantifiziert die

prozedurale Auswirkung einer Kathetergeneration auf einen definierten HD-LA-Mapping-Workflow.

4.3 Prozedurale Bedeutung der beobachteten Effizienzunterschiede

Die beobachteten Unterschiede der Mapping-Effizienz sind vor allem im Kontext des gesamten LA-Prozedurablaufs zu bewerten. Das Mapping ist in diesen Eingriffen kein isolierter technischer Messvorgang, sondern Teil der LA-Arbeitsstrecke: initiale anatomische und elektrische Erfassung, Kontrolle nach Ablation, ggf. Re-Mapping und bei LAT zusätzlich aktivierungsbasierte Mechanismuscharakterisierung. Ein Zeitgewinn beim Mapping kann deshalb besonders dann relevant werden, wenn innerhalb derselben Prozedur mehrere Maps erforderlich sind. Dies betrifft vor allem komplexere Eingriffe, Re-Do-Prozeduren und LAT-Ablationen.

In der vorliegenden Analyse war neben der Mappingzeit auch die Gesamtprozedurzeit in der Grid-X-Gruppe kürzer. Dieser Befund ist klinisch relevant, muss aber methodisch zurückhaltend interpretiert werden. Die Gesamtprozedurzeit wird durch zahlreiche Faktoren beeinflusst, darunter Sedierung, Gefäßzugang, TSP, Ablationsstrategie, Validierungsschritte, operatorabhängige Abläufe und Labororganisation. Besonders die kürzere Zeit bis zur TSP in der Grid-X-Gruppe kann nicht durch den Mappingkatheter selbst erklärt werden, da dieser erst nach Etablierung des LA-Zugangs zum Einsatz kommt. Dieser Parameter weist eher auf Veränderungen des allgemeinen Workflows, zeitliche Effekte oder Unterschiede in der Routine während des Studienzeitraums hin. Die mappingbezogenen Parameter sind daher für die Beurteilung der Kathetergeneration aussagekräftiger als die Gesamtprozedurzeit. Die prozedurale Relevanz kürzerer LA-Ablationsabläufe wird in der Literatur zunehmend diskutiert. Neben klinisch manifesten Schlaganfällen werden nach AF-Ablation auch stumme zerebrale Läsionen beschrieben, die mittels diffusionsgewichteter Magnetresonanztomographie nachweisbar sind. Eine aktuelle Übersichtsarbeit fasst zusammen, dass die Entstehung solcher Läsionen multifaktoriell ist und unter anderem durch Antikoagulation, Kathetermanipulation, Luft- oder Thromboembolien sowie prozedurale Faktoren beeinflusst wird.⁷⁹ In der ERACE-Studie wurde gezeigt, dass technische und prozedurale Modifikationen die Rate asymptomatischer zerebraler Embolien während PVIs beeinflussen können.⁸⁰

Auch kognitive Veränderungen nach PVI wurden mit prozeduralen Faktoren in Verbindung gebracht. Medi et al. beschrieben subtile postoperative kognitive Dysfunktion nach AF-Ablation; in dieser Arbeit war eine längere LA-Zugangszeit in der univariaten Analyse mit kognitiven Veränderungen assoziiert.⁸¹ In einer randomisierten Studie von Al-Kaisey et al. war postoperative kognitive Dysfunktion nach PVI zwar vorübergehend, jedoch wurde die Ablationszeit als unabhängiger Prädiktor beschrieben.⁸² Diese Daten belegen keinen direkten Zusammenhang zwischen Mappingzeit und klinischen Endpunkten. Sie zeigen jedoch, dass Zeitabschnitte innerhalb von LA-Prozeduren klinisch relevant sein können.

Ein aktuelles Beispiel für diese Denkweise liefert die Untersuchung von Boga et al. zur zerebralen Sicherheit von PVI mittels vHPSD („very high-power short-duration“, Ablation mit sehr hoher Leistung und kurzer Dauer). Dort wurden neben klassischen Sicherheitsendpunkten explizit Prozedurzeit und LA-Verweilzeit berichtet; in der Magnetresonanztomographie-Subgruppe wurden stumme zerebrale Embolien bei 5 von 61 Patienten nachgewiesen, während klinisch manifeste Schlaganfälle nicht auftraten.⁸³ Die Autoren diskutieren dabei, dass eine kürzere LA-Verweilzeit potenziell zur prozeduralen Sicherheit beitragen kann. Für die vorliegende Arbeit ist dieser Punkt relevant, weil effizienteres Mapping einen Teil der LA-Verweilzeit beeinflussen kann, auch wenn die Studie selbst nicht auf zerebrale Endpunkte ausgelegt war.

Neben Sicherheitsaspekten hat die Mapping-Effizienz eine praktische Bedeutung für das EP-Labor. Kürzere, reproduzierbare Mapping-Schritte können die Planbarkeit komplexer Ablationsprozeduren verbessern, insbesondere bei hohem Prozeduraufkommen und begrenzten Laborressourcen. Dies betrifft weniger die einzelne Minute im isolierten Mappingvorgang, sondern die Summe wiederholter Arbeitsschritte innerhalb eines Eingriffs. Bei standardisierten PVI-Prozeduren kann ein schnelleres initiales Mapping den Ablauf vereinfachen; bei LAT oder Re-Do-Prozeduren kann der Effekt größer sein, da die Erstellung zusätzlicher Aktivierungs- oder Re-Maps häufiger erforderlich ist.

Die vorliegenden Daten zeigen allerdings auch die Grenzen dieser Interpretation. Die Fluoroskopiezeit und das Dosisflächenprodukt unterschieden sich zwischen den Gruppen nicht signifikant. Der Vorteil von Grid X lag daher primär in der mappingbezogenen Datenerfassung und nicht in einer messbaren Reduktion der Strahlenexposition. Ebenso wurden keine Sedierungsdauer, keine Medikamentendosis, keine ökonomischen Parameter und keine systematische LA-

Verweilzeit ausgewertet. Aussagen zu Ressourceneffekten oder Patientenschonung bleiben daher indirekt.

Die prozedurale Relevanz der beobachteten Effizienzunterschiede liegt daher vor allem darin, dass Mapping einen wiederkehrenden Arbeitsschritt innerhalb der LA-Prozedur darstellt. Eine kürzere und zugleich umfangreichere Datenerfassung kann den Ablauf insbesondere dann beeinflussen, wenn innerhalb eines Eingriffs mehrere Maps erforderlich sind. Ob sich daraus messbare Vorteile für LA-Verweilzeit, Laborressourcen, neurologische Sicherheit oder Langzeitverlauf ergeben, sollte in prospektiven Untersuchungen geprüft werden.

4.4 Indikationsabhängige Betrachtung

Die Anforderungen an das HD-LA-Mapping unterscheiden sich je nach Indikation. Bei paroxysmalem VHF steht in der Regel die anatomisch und elektrisch vollständige PVI im Vordergrund. Bei persistierendem VHF kann zusätzlich die Beurteilung eines komplexeren atrialen Substrats relevant werden. Bei LAT verschiebt sich der Schwerpunkt auf die aktivierungsbasierte Rekonstruktion des Tachykardiemechanismus und die Identifikation kritischer Leitungsbahnen. Die explorative Subgruppenanalyse nach Indikation war deshalb wichtig, um zu prüfen, ob der beobachtete Effizienzvorteil von Grid X auf eine einzelne Prozedurgruppe beschränkt war oder sich über unterschiedliche mappingbezogene Anforderungen hinweg zeigte.

Beim paroxysmalen VHF ist die PVI pathophysiologisch durch die Bedeutung pulmonalvenöser Trigger begründet. Die klassische Arbeit von Haïssaguerre et al. zeigte, dass ektopische Aktivität aus den Pulmonalvenen paroxysmales VHF initiieren kann.¹¹ Die aktuellen Konsensusdokumente definieren die elektrische Isolation der Pulmonalvenen weiterhin als zentralen prozeduralen Endpunkt der VHF-Ablation.²² In diesem Setting ist das Mapping im Vergleich zu komplexeren Prozeduren stärker standardisiert, denn es dient primär der anatomischen Rekonstruktion, der Navigation und der Validierung der elektrischen Isolation. Dass Grid X auch in dieser standardisierten Indikationsgruppe eine kürzere Mappingzeit und eine höhere EGM-Akquisitionsgeschwindigkeit zeigte, spricht für einen technischen Effizienzvorteil im Routine-Mapping und nicht ausschließlich für einen Effekt in komplexen Sonderfällen.

Beim persistierenden VHF ist die Situation heterogener. Hier spielen neben PV-Triggern atriale Remodeling-Prozesse, Fibrose, Low-Voltage-Areale und nicht-PV Mechanismen eine größere Rolle. Die Evidenz zu Ablationsstrategien über die PVI hinaus ist entsprechend uneinheitlich. In der STAR AF II Studie führte die Ergänzung der PVI um lineare Läsionen oder Ablation von komplex fraktionierten EGMs (CFAE) nicht zu einer Verbesserung der Arrhythmiefreiheit gegenüber PVI allein.⁵⁰ Auch die CAPLA-Studie zeigte keinen zusätzlichen Nutzen einer routinemäßigen Hinterwandisolation zusätzlich zur PVI bei persistierendem VHF.⁵¹ Demgegenüber berichtete die ERASE-AF Studie einen Vorteil einer spannungsgesteuerten Substratablation zusätzlich zur PVI,⁴⁷ und die TAILORED-AF Studie zeigte einen Vorteil einer KI-gestützten Ablation von Arealen spatiotemporaler Dispersion zusätzlich zur PVI.⁴⁸ Eine weitere randomisierte Studie zur Ablation von Low-Voltage-Arealen bei persistierendem VHF fand hingegen keinen signifikanten Zusatznutzen gegenüber PVI allein.⁴⁹

Diese heterogene Evidenz erklärt, warum Mapping bei persistierendem VHF methodisch anders zu gewichten ist als bei paroxysmalem VHF. Die Map bildet hier eine anatomische Grundlage für die PVI und dient der Substratbeschreibung, der Identifikation von Low-Voltage-Arealen oder der Planung individualisierter Zusatzläsionen. Die vorliegende Subgruppenanalyse zeigte auch bei persistierendem VHF einen deutlichen Vorteil von Grid X hinsichtlich Mappingzeit, volumenbezogener Mapping-Geschwindigkeit und EGM-Akquisitionsgeschwindigkeit. Der Effekt trat somit in einer Gruppe auf, in der die mappingbezogenen Anforderungen potenziell variabler sind als bei paroxysmalem VHF. Daraus ergibt sich keine Aussage über den Nutzen bestimmter PVI-plus-Strategien; die Daten zeigen jedoch, dass die effizientere Datenerfassung mit Grid X auch in diesem komplexeren klinischen Kontext erhalten blieb.

Bei LAT hat das Mapping eine andere Funktion. Hier steht die Mechanismuscharakterisierung im Vordergrund. Entscheidend sind die Rekonstruktion der Aktivierungssequenz, die Identifikation kritischer Isthmusbereiche und die Abgrenzung anatomischer oder funktioneller Leitungsbarrieren. Dies gilt besonders für makroreentrybasierte LAT nach vorausgegangenen atrialen Interventionen. Derval et al. zeigten, dass HD-Mapping komplexer atrialer Tachykardien nach vorausgegangenen atrialen Eingriffen eine detaillierte mechanistische Charakterisierung ermöglicht.⁵² Aktuelle Empfehlungen zum Management atrialer Tachykardien betonen ebenfalls die Rolle von HD-Aktivierungs-

Maps, detaillierter Elektrogrammanalyse und ergänzender Stimulationsmanöver zur Identifikation des kritischen Isthmus.³⁷ Automatisierte Auswerteansätze wie Directed Graph Mapping wurden zusätzlich als Hilfe zur Mechanismuszuordnung komplexer LAT untersucht, ersetzen aber nicht die elektrophysiologische Interpretation der Map.⁵³

Die LAT-Subgruppe der vorliegenden Arbeit war klein. Die Ergebnisse sind deshalb zurückhaltend zu interpretieren. Dennoch war die Richtung der Effekte auch hier mit den Befunden der Gesamtkohorte vereinbar. Die Mappingzeit war unter Grid X kürzer, und die EGM-Akquisitionsgeschwindigkeit war höher. Die volumenbezogene Mapping-Geschwindigkeit war ebenfalls numerisch höher, erreichte jedoch kein statistisches Signifikanzniveau. Dieser Befund ist bei der geringen Fallzahl nicht überraschend. Für LAT-Prozeduren ist zudem zu berücksichtigen, dass die Zeit bis zur vollständigen Map nicht nur von der Katheterleistung abhängt, sondern auch von Tachykardiestabilität, Zykluslänge, Aktivierungsabdeckung und der Notwendigkeit zusätzlicher Plausibilitätsprüfungen.

Die indikationsbezogene Analyse zeigt damit, dass der Effizienzvorteil von Grid X nicht durch eine einzelne Patientengruppe getragen wurde. Besonders robust waren die Effekte bei Mappingzeit und EGM-Akquisitionsgeschwindigkeit. Bei paroxysmalem VHF betrifft dies einen standardisierten PVI-Workflow, bei persistierendem VHF eine komplexere Substratbeschreibung und bei LAT aktivierungsbasierte Mappingaufgaben. Die Ergebnisse bleiben explorativ, unterstützen jedoch die Annahme, dass die technische Weiterentwicklung von Grid zu Grid X über unterschiedliche LA-Mapping-Kontexte hinweg wirksam war.

4.5 Akute periprozedurale Sicherheit

Die Sicherheitsbefunde dieser Arbeit müssen vor dem Hintergrund der niedrigen Ereigniszahl und der unterschiedlichen Mechanismen akuter Komplikationen interpretiert werden. Bei LA-Ablationsprozeduren entstehen relevante Komplikationen typischerweise aus unterschiedlichen prozeduralen Abschnitten: Gefäßzugang und Antikoagulation können vaskuläre Ereignisse begünstigen, der transseptale Zugang ist mit dem Risiko perikardialer Komplikationen verbunden, und während der Ablation können thermische Läsionseffekte wie Steam-Pop-Ereignisse zu Perikarderguss oder Tamponade führen. Der alleinige Vergleich der Gesamtrate akuter Ereignisse

zwischen Grid und Grid X ist daher nur begrenzt aussagekräftig; entscheidend ist die Zuordnung der jeweiligen Komplikation zum plausiblen prozeduralen Mechanismus. Für die beobachtete Perikardtamponade ist die mechanistische Zuordnung relevant. Maclean et al. unterscheiden bei Tamponaden während LA-Ablationen zwischen TSP-assoziierten und nicht TSP-assoziierten Ereignissen; eine während der Ablation im Zusammenhang mit einem Steam-Pop auftretende Tamponade wird als Typ-E-Ereignis eingeordnet.⁷⁷ Diese Einordnung spricht in der vorliegenden Arbeit gegen eine Zuordnung der Komplikation zum LA-Zugang oder zum HD-Mappingkatheter.

Steam-Pop-Ereignisse sind Ausdruck einer intramyokardialen Dampfbildung während RFA und werden im Zusammenhang mit Energieabgabe, Gewebeerwärmung, Kontaktkraft, Impedanzveränderungen und Läsionsbildung diskutiert. Neuere Arbeiten zur PVI beschreiben Steam-Pop-Ereignisse als seltene, aber potenziell relevante Ereignisse, da sie in Einzelfällen mit schwerwiegenden Perikardkomplikationen einhergehen können.^{84,85} Für die Interpretation der vorliegenden Daten ist die Tamponade daher am ehesten als ablationsenergieassoziiertes Ereignis und nicht als spezifisches Signal des verwendeten HD-Mappingkatheters zu bewerten.

Die zweite dokumentierte Komplikation, eine postprozedurale Nachblutung an der Leiste, gehört mechanistisch in den Bereich vaskulärer Zugangsergebnisse. Solche Ereignisse werden bei LA-Ablationen durch femorale Punktion, Schleusengröße, Antikoagulation, Hämostase und postprozedurale Mobilisation beeinflusst. Der Mappingkatheter selbst ist hierfür nur mittelbar relevant, etwa über Schleusenmanagement und Katheterwechsel, nicht jedoch als primärer kausaler Faktor. Dass die Nachblutung mittels Kompression beherrschbar war und keine interventionelle oder operative Therapie erforderlich wurde, spricht für ein leichtes bis moderates vaskuläres Ereignis innerhalb des erwartbaren Komplikationsspektrums von LA-Prozeduren.

Aus der Sicherheitsanalyse ergibt sich daher kein Hinweis auf ein spezifisches komplikatives Muster im Zusammenhang mit Grid X. Die beiden Ereignisse lassen sich unterschiedlichen Abschnitten des Eingriffs zuordnen: ein ablationsassoziiertes Steam-Pop-Ereignis und ein vaskuläres Zugangsergebnis. Diese Trennung ist wichtig, weil die Fragestellung der Arbeit primär auf die Workflow-Effizienz des Mappings gerichtet ist. Ein sicherheitsrelevanter Nachteil des HD-Mappingkatheters wäre plausibler, wenn Komplikationen unmittelbar mit Mapping, Kathetermanipulation oder Systemintegration assoziiert wären; hierfür ergab sich in dieser Kohorte kein Anhalt.

Die Aussagekraft bleibt jedoch durch die geringe Fallzahl begrenzt. Seltene Komplikationen wie Tamponade, Schlaganfall oder relevante Gefäßereignisse lassen sich in einer Kohorte von 94 Patienten nicht belastbar vergleichen. Auch die aktuellen Konsensudokumente zur PVI behandeln Komplikationen als zentrale Qualitäts- und Sicherheitsendpunkte, deren belastbare Bewertung große Register oder prospektive Studien erfordert.²² Die Sicherheitsdaten dieser Arbeit dienen damit vor allem der deskriptiven Einordnung der Effizienzbefunde. Eine formale Bewertung der Sicherheit von Grid X gegenüber Grid erfordert größere, prospektiv angelegte Untersuchungen mit systematischer Komplikationsadjudikation.

4.6 Stärken der Arbeit

Eine wesentliche Stärke der vorliegenden Arbeit liegt im direkten Vergleich zweier Generationen desselben grid-basierten Mappingkonzepts. Anders als in Untersuchungen, die unterschiedliche Katheterdesigns, verschiedene Mappingsysteme oder mehrere Plattformen miteinander vergleichen, wurde hier ein enger technischer Vergleich innerhalb derselben Katheterfamilie durchgeführt. Dadurch wird die Fragestellung methodisch klarer: im Vordergrund steht nicht die grundsätzliche Überlegenheit eines Katheterdesigns gegenüber einem anderen, sondern der Einfluss einer konkreten technischen Weiterentwicklung von Grid zu Grid X auf die praktische Durchführung des HD-LA-Mappings.

Ein weiterer Vorteil ist die Untersuchung eines konsekutiven Real-World-Kollektivs aus der klinischen Routine. Eingeschlossen wurden Patienten mit paroxysmalem VHF, persistierendem VHF und LAT, sodass das Spektrum typischer LA-Prozeduren in der klinischen Elektrophysiologie abgebildet wurde. Die Ergebnisse spiegeln damit die Anwendung beider Kathetergenerationen in einem realen Ablationssetting wider.

Methodisch relevant ist die während der Prozedur manuell dokumentierte und anhand eines definierten Start- und Endpunkts ausgewertete Erfassung der Mappingzeit. Gemessen wurde die Zeit vom Beginn der systematischen Signalakquise bis zum Abschluss einer vollständigen, klinisch verwertbaren LA-Map. Bei LAT galt die Map erst dann als abgeschlossen, wenn ein interpretierbares Aktivierungsmuster vorlag. Der Vergleich der Mapping-Effizienz bezog sich damit auf einen klar definierten prozeduralen Arbeitsschritt.

Auch die Auswertung der final erfassten EGMs stellt eine Stärke dar. Für die Analyse wurden nicht alle ursprünglich akquirierten Punkte ungefiltert übernommen, sondern die nach Entfernung unnötiger oder falsch annotierter Punkte verbleibenden EGMs berücksichtigt. Damit orientierte sich die Punktzahl an der tatsächlich verwendeten Datengrundlage der Map und nicht an einer rein systemgenerierten Rohzahl.

Die volumenbezogene Standardisierung der Mappingzeit ist ein weiterer methodischer Vorteil. Durch die Verwendung des echokardiographisch bestimmten LA-Volumens wurde berücksichtigt, dass die zur vollständigen LA-Map benötigte Zeit auch von der anatomischen Ausgangsgröße des LA beeinflusst sein kann. Dadurch konnte gezeigt werden, dass der beobachtete Vorteil von Grid X nicht allein durch Unterschiede in der Vorhofgröße erklärbar war.

Schließlich stärkt die explorative Subgruppenanalyse die Einordnung der Ergebnisse. Die Effekte zugunsten von Grid X zeigten sich in der Gesamtkohorte und über die untersuchten Indikationsgruppen hinweg in vergleichbarer Richtung. Aufgrund der begrenzten Fallzahl einzelner Subgruppen ist diese Analyse nicht als konfirmatorisch zu verstehen; sie unterstützt jedoch die Konsistenz der Hauptbefunde.

4.7 Limitationen

Die vorliegende Arbeit ist durch ihr retrospektives, monozentrisches Studiendesign limitiert. Eine randomisierte Zuteilung zu Grid oder Grid X erfolgte nicht. Da Grid X zeitlich nach Grid eingeführt wurde, können begleitende Veränderungen im Laborablauf, zunehmende Routine und allgemeine Workflow-Effekte nicht vollständig ausgeschlossen werden.

Die Untersuchung bewertet primär die Workflow-Effizienz des HD-LA-Mappings. Eine systematische Beurteilung der Map-Qualität, der diagnostischen Genauigkeit der Arrhythmieinterpretation oder klinischer Langzeitendpunkte erfolgte nicht. Die Ergebnisse erlauben daher keine Aussage darüber, ob die effizientere Datenerfassung mit einer besseren klinischen Wirksamkeit verbunden ist.

Zusätzlich unterschieden sich Ablationskatheter und Energiequelle zwischen den Gruppen. TactiFlex SE wurde ausschließlich in der Grid-X-Gruppe eingesetzt, während PFA-Fälle nur in der Grid-Gruppe vorkamen. Daher dürfen insbesondere Gesamtprozedurzeit, Zeit bis TSP und sicherheitsbezogene Kontextparameter nicht kausal der Mappingkathetergeneration zugeschrieben werden.

Die indikationsbezogene Subgruppenanalyse war explorativ, insbesondere aufgrund der kleinen LAT-Subgruppe. Zusätzlich ist die volumenbezogene Standardisierung durch die echokardiographische LA-Volumenbestimmung methodisch begrenzt, da die biplane Flächen-Längen-Methode von Bildqualität und Konturierung abhängig ist.

Die Limitationen betreffen vor allem die kausale Interpretation und die Übertragbarkeit der Ergebnisse. Der zentrale Befund ist vor diesem Hintergrund vorsichtig, aber konsistent zu interpretieren.

4.8 Schlussfolgerung und Ausblick

Die vorliegende Arbeit zeigt, dass Grid X im Vergleich zu Grid mit einer messbar höheren Workflow-Effizienz des HD-LA-Mappings verbunden war. Der Unterschied zeigte sich konsistent in einer kürzeren Mappingzeit, einer höheren volumenbezogenen Mapping-Geschwindigkeit, einer höheren EGM-Akquisitionsgeschwindigkeit und einer größeren Zahl final erfasster EGMs. Damit spricht die Datenlage für eine effizientere Datenerfassung mit Grid X unter klinischen Routinebedingungen.

Die explorative Subgruppenanalyse zeigte eine vergleichbare Richtung der Effekte bei paroxysmalem VHF, persistierendem VHF und LAT. Dies unterstützt die Annahme, dass der beobachtete Vorteil nicht auf eine einzelne Indikationsgruppe beschränkt war. Im akuten periprozeduralen Sicherheitsprofil ergab sich kein signifikanter Unterschied zwischen den beiden Kathetergenerationen.

Die Ergebnisse zeigen, dass technische Weiterentwicklungen innerhalb eines etablierten grid-basierten Mappingkonzepts die praktische Durchführung des LA-Mappings relevant beeinflussen können. Die klinische Bedeutung dieser Effizienzvorteile sollte in prospektiven Studien mit standardisierter Bewertung der Map-Qualität, LA-Verweilzeit und klinischer Langzeitendpunkte weiter untersucht werden.

5 Literaturverzeichnis

1. Van Gelder IC, Rienstra M, Bunting KV, Casado-Arroyo R, Caso V, Crijns HJGM, et al. 2024 ESC Guidelines for the management of atrial fibrillation developed in collaboration with the European Association for Cardio-Thoracic Surgery (EACTS): Developed by the task force for the management of atrial fibrillation of the European Society of Cardiology (ESC), with the special contribution of the European Heart Rhythm Association (EHRA) of the ESC. Endorsed by the European Stroke Organisation (ESO). *Eur Heart J* 2024;**45**:3314–3414.
2. Lloyd-Jones DM, Wang TJ, Leip EP, Larson MG, Levy D, Vasan RS, et al. Lifetime Risk for Development of Atrial Fibrillation. *Circulation* 2004;**110**:1042–1046.
3. Krijthe BP, Kunst A, Benjamin EJ, Lip GYH, Franco OH, Hofman A, et al. Projections on the number of individuals with atrial fibrillation in the European Union, from 2000 to 2060. *Eur Heart J* 2013;**34**:2746–2751.
4. Miyasaka Y, Barnes ME, Gersh BJ, Cha SS, Bailey KR, Abhayaratna WP, et al. Secular Trends in Incidence of Atrial Fibrillation in Olmsted County, Minnesota, 1980 to 2000, and Implications on the Projections for Future Prevalence. *Circulation* 2006;**114**:119–125.
5. Chugh SS, Havmoeller R, Narayanan K, Singh D, Rienstra M, Benjamin EJ, et al. Worldwide Epidemiology of Atrial Fibrillation. *Circulation* 2014;**129**:837–847.
6. Wolf PA, Abbott RD, Kannel WB. Atrial fibrillation as an independent risk factor for stroke: the Framingham Study. *Stroke* 1991;**22**:983–988.
7. Benjamin EJ, Wolf PA, D'Agostino RB, Silbershatz H, Kannel WB, Levy D. Impact of Atrial Fibrillation on the Risk of Death. *Circulation* 1998;**98**:946–952.
8. Anter E, Jessup M, Callans DJ. Atrial Fibrillation and Heart Failure. *Circulation* 2009;**119**:2516–2525.
9. Wyse DG, Waldo AL, DiMarco JP, Domanski MJ, Rosenberg Y, Schron EB, et al. A comparison of rate control and rhythm control in patients with atrial fibrillation. *N Engl J Med* 2002;**347**:1825–1833.
10. Kirchhof P, Camm AJ, Goette A, Brandes A, Eckardt L, Elvan A, et al. Early Rhythm-Control Therapy in Patients with Atrial Fibrillation. *N Engl J Med* 2020;**383**:1305–1316.
11. Haïssaguerre M, Jaïs P, Shah DC, Takahashi A, Hocini M, Quiniou G, et al. Spontaneous Initiation of Atrial Fibrillation by Ectopic Beats Originating in the Pulmonary Veins. *N Engl J Med* 1998;**339**:659–666.
12. Wazni OM, Dandamudi G, Sood N, Hoyt R, Tyler J, Durrani S, et al. Cryoballoon Ablation as Initial Therapy for Atrial Fibrillation. *N Engl J Med* 2021;**384**:316–324.

13. Andrade JG, Wells GA, Deyell MW, Bennett M, Essebag V, Champagne J, et al. Cryoablation or Drug Therapy for Initial Treatment of Atrial Fibrillation. *N Engl J Med* 2021;**384**:305–315.
14. Kuck K-H, Brugada J, Fürnkranz A, Metzner A, Ouyang F, Chun KRJ, et al. Cryoballoon or Radiofrequency Ablation for Paroxysmal Atrial Fibrillation. *N Engl J Med* 2016;**374**:2235–2245.
15. Reddy VY, Gerstenfeld EP, Natale A, Whang W, Cuoco FA, Patel C, et al. Pulsed Field or Conventional Thermal Ablation for Paroxysmal Atrial Fibrillation. *N Engl J Med* 2023;**389**:1660–1671.
16. Reichlin T, Kueffer T, Badertscher P, Jüni P, Knecht S, Thalmann G, et al. Pulsed Field or Cryoballoon Ablation for Paroxysmal Atrial Fibrillation. *N Engl J Med* 2025;**392**:1497–1507.
17. Marrouche NF, Brachmann J, Andresen D, Siebels J, Boersma L, Jordaens L, et al. Catheter Ablation for Atrial Fibrillation with Heart Failure. *N Engl J Med* 2018;**378**:417–427.
18. Sohns C, Fox H, Marrouche NF, Crijns HJGM, Costard-Jaeckle A, Bergau L, et al. Catheter Ablation in End-Stage Heart Failure with Atrial Fibrillation. *N Engl J Med* 2023;**389**:1380–1389.
19. Mesas CE, Pappone C, Lang CCE, Gugliotta F, Tomita T, Vicedomini G, et al. Left atrial tachycardia after circumferential pulmonary vein ablation for atrial fibrillation: electroanatomic characterization and treatment. *J Am Coll Cardiol*. 2004;**44**:1071–1079.
20. Liu Y, Shehata M, Wang X. Atrial Tachycardias After Atrial Fibrillation Ablation. *Circ Arrhythm Electrophysiol* 2018;**11**:e006480.
21. Gopinathannair R, Mar PL, Afzal MR, Di Biase L, Tu Y, Lakkireddy T, et al. Atrial Tachycardias After Surgical Atrial Fibrillation Ablation: Clinical Characteristics, Electrophysiological Mechanisms, and Ablation Outcomes From a Large, Multicenter Study. *JACC Clin Electrophysiol* 2017;**3**:865–874.
22. Tzeis S, Gerstenfeld EP, Kalman J, Saad EB, Sepehri Shamloo A, Andrade JG, et al. 2024 European Heart Rhythm Association/Heart Rhythm Society/Asia Pacific Heart Rhythm Society/Latin American Heart Rhythm Society expert consensus statement on catheter and surgical ablation of atrial fibrillation. *Europace* 2024;**26**:euae043.
23. Benali K, Khairy P, Hammache N, Petzl A, Da Costa A, Verma A, et al. Procedure-Related Complications of Catheter Ablation for Atrial Fibrillation. *J Am Coll Cardiol* 2023;**81**:2089–2099.
24. Kupo P, Riesz TJ, Saghy L, Vamos M, Bencsik G, Makai A, et al. Ultrasound guidance for femoral venous access in patients undergoing pulmonary vein isolation: A quasi-randomized study. *J Cardiovasc Electrophysiol* 2023;**34**:1177–1182.

25. Krimphoff A, Urbanek L, Bordignon S, Schaack D, Tohoku S, Chen S, et al. The impact of ultrasound-guided vascular access for catheter ablation of left atrial arrhythmias in a high-volume centre. *J Interv Card Electrophysiol* 2024;**67**:1247–1255.
26. Bejinariu AG, Augustin N, Spieker M, Heiden C auf der, Angendoehr S, Höckmann M, et al. The US4ABL Strategy: A Systematic Ultrasound-Guided Approach for Left Atrial and Ventricular Ablation Procedures. *J Clin Med* 2024;**14**:103.
27. Zuercher R, Herling A, Schmidt MT, Bachmann M, Winnik S, Duru F, et al. Transesophageal Echocardiography-Guided Transseptal Left Atrial Access to Improve Safety in Patients Undergoing Pulmonary Vein Isolation. *J Clin Med* 2022;**11**(9):2546.
28. Chokesuwattanaskul R, Ananwattanasuk T, Hughey AB, Stuart EA, Shah MM, Atreya AR, et al. Three-dimensional-guided and ICE-guided transseptal puncture for cardiac ablations: A propensity score match study. *J Cardiovasc Electrophysiol* 2023;**34**:382–388.
29. Kueffer T, Madaffari A, Thalmann G, Mühl A, Galuszka O, Baldinger S, et al. Eliminating transseptal sheath exchange for pulsed field ablation procedures using a direct over-the-needle transseptal access with the Faradrive sheath. *Europace* 2023;**25**:1500–1502.
30. Bejinariu AG, Spieker M, Makimoto H, Augustin N, Kelm M, Rana OR. A zero-exchange approach for left atrial access in pulmonary vein isolation with pulsed field ablation. *J Cardiovasc Electrophysiol* 2024;**35**:688–693.
31. Yap S-C, Bhagwandien RE, Szili-Torok T. Use of a novel integrated dilator-needle system in cryoballoon procedures: a zero-exchange approach. *J Interv Card Electrophysiol* 2022;**65**:527–534.
32. Eckart R, Brewer R, Nair D, Dukes J, Costello J, Martens MD, et al. The efficiency and safety of zero-exchange workflows in pulsed field ablation: Comprehensive insights from the DISRUPT-AF registry. *Heart Rhythm* 2025;**6**:1508–1515.
33. Fink T, Sciacca V, Nischik F, Bergau L, Guckel D, El Hamriti M, et al. Atrial fibrillation ablation workflow optimization facilitated by high-power short-duration ablation and high-resolution mapping. *Europace* 2024;**26**:euae067.
34. Chen S, Narayan SM, Boveda S, Neven K, Ruwald MH, Martinek M, et al. 2025 International Expert Practical Guide on the Use of the Pentaspline Pulsed Field Ablation System in Atrial Fibrillation Ablation Procedures. *Circ Arrhythm Electrophysiol* 2025;**18**:e013977.
35. Ahn J, Shin DG, Han S-J, Lim HE. Safety and efficacy of intracardiac echocardiography-guided zero-fluoroscopic cryoballoon ablation for atrial fibrillation: a prospective randomized controlled trial. *Europace* 2023;**25**:euad086.

36. Karakasis P, Tzeis S, Pamporis K, Vlachos K, Siontis KC, Antoniadis AP, et al. Safety and efficacy of intracardiac echocardiography in atrial fibrillation ablation: a meta-analysis. *Europace* 2026;**28**:euag002.
37. Meyer C, Kahle A-K, Dagres N, Derval N, Dewland TA, Drago F, et al. Management of patients with atrial tachycardia: a clinical consensus statement of the European Heart Rhythm Association (EHRA) of the ESC, endorsed by the Heart Rhythm Society (HRS), the Asia Pacific Heart Rhythm Society (APHRS), the Latin American Heart Rhythm Society (LAHRS), and the Association for European Paediatric and Congenital Cardiology (AEPC). *Europace* 2025;**27**(12):euaf324.
38. Vandenberg B, Quinn FR, Barmby J, Wilton SB, Kuriachan V. High-density mapping improves detection of conduction gaps after pulmonary vein isolation ablation with a circular mapping catheter. *J Interv Card Electrophysiol* 2023;**66**:1401–1410.
39. Kajdič N, Kalinšek TP, Antolič B, Žižek D, Štublar J, Demšar J, et al. Impact of High-Density Mapping on Pulmonary Vein Isolation Durability: A Randomized, Single-Center Study. *Pacing Clin Electrophysiol* 2025;**48**:587–597.
40. Rodriguez-Riascos JF, Vemulapalli HS, Muthu P, Raman A, Prajapati P, Iyengar S, et al. Post-pulmonary vein isolation voltage remapping-guided incremental lesions: A feasible strategy to improve long-term outcomes. *Heart Rhythm O2* 2025;**6**:424–433.
41. Mills MT, Sommer P, Day J, Demo H, Jewell CW, Trulock K, et al. Characterization of acute residual pulmonary vein connections using electroanatomic mapping during pulsed-field ablation of atrial fibrillation. *Heart Rhythm* 2025;**22**:3140–3148.
42. Vlachos K, Benali K, Derval N, Pambrun T, Frontera A, Yokoyama M, et al. High-Resolution Mapping vs Differential Pacing in Evaluating Atrial Linear Lesions and the Impact of Pseudoblocks on Atrial Tachycardia Risk. *JACC Clin Electrophysiol* 2025;**11**:1492–1507.
43. Althoff TF, Anderson RH, Goetz C, Petersen SE, Díaz PM, Nijveldt R, et al. Regionalization of the atria for 3D electroanatomical mapping, cardiac imaging, and computational modelling: a clinical consensus statement of the European Heart Rhythm Association and the European Association of Cardiovascular Imaging of the ESC. *Europace* 2025;**27**(7):euaf134.
44. Starek Z, Di Cori A, Betts TR, Clerici G, Gras D, Lyan E, et al. Baseline left atrial low-voltage area predicts recurrence after pulmonary vein isolation: WAVE-MAP AF results. *Europace* 2023;**25**:euad194.
45. Conti S, Anic A, Conte G, Heeger C-H, Karvonen J, Metzner A, et al. Contemporary strategies for repeat ablation of atrial fibrillation: a European Heart Rhythm Association survey. *Europace* 2025;**27**(11):euaf231.
46. Oliva C-A, Morello M, Kron J, Ellenbogen KA, Golino M, De Ponti R. Prevalence and multiple predictors of left atrial low voltage in paroxysmal and non-

- paroxysmal atrial fibrillation patients undergoing ablation: a systematic review and meta-analysis. *Europace* 2025;**27**(9):euaf206.
47. Huo Y, Gaspar T, Schönbauer R, Wójcik M, Fiedler L, Roithinger FX, et al. Low-Voltage Myocardium-Guided Ablation Trial of Persistent Atrial Fibrillation. *NEJM Evid* 2022;**1**:EVIDoa2200141.
48. Deisenhofer I, Albenque J-P, Busch S, Gitenay E, Mountantonakis SE, Roux A, et al. Artificial intelligence for individualized treatment of persistent atrial fibrillation: a randomized controlled trial. *Nat Med* 2025;**31**:1286–1293.
49. Masuda M, Sunaga A, Tanaka N, Watanabe T, Minamiguchi H, Egami Y, et al. Low-voltage-area ablation for persistent atrial fibrillation: a randomized controlled trial. *Nat Med* 2025;**31**:1661–1667.
50. Verma A, Jiang C, Betts TR, Chen J, Deisenhofer I, Mantovan R, et al. Approaches to Catheter Ablation for Persistent Atrial Fibrillation. *N Engl J Med* 2015;**372**:1812–1822.
51. Kistler PM, Chieng D, Sugumar H, Ling L-H, Segan L, Azzopardi S, et al. Effect of Catheter Ablation Using Pulmonary Vein Isolation With vs Without Posterior Left Atrial Wall Isolation on Atrial Arrhythmia Recurrence in Patients With Persistent Atrial Fibrillation: The CAPLA Randomized Clinical Trial. *JAMA* 2023;**329**:127–135.
52. Derval N, Takigawa M, Frontera A, Mahida S, Konstantinos V, Denis A, et al. Characterization of Complex Atrial Tachycardia in Patients With Previous Atrial Interventions Using High-Resolution Mapping. *JACC Clin Electrophysiol* 2020;**6**:815–826.
53. Van Nieuwenhuyse E, Strisciuglio T, Lorenzo G, El Haddad M, Goedgebeur J, Van Cleemput N, et al. Evaluation of Directed Graph-Mapping in Complex Atrial Tachycardias. *JACC Clin Electrophysiol* 2021;**7**:936–949.
54. Rottner L, Metzner A, Ouyang F, Heeger C, Hayashi K, Fink T, et al. Direct Comparison of Point-by-Point and Rapid Ultra-High-Resolution Electroanatomical Mapping in Patients Scheduled for Ablation of Atrial Fibrillation. *J Cardiovasc Electrophysiol* 2017;**28**:289–297.
55. Ptaszek LM, Moon B, Rozen G, Mahapatra S, Mansour M. Novel automated point collection software facilitates rapid, high-density electroanatomical mapping with multiple catheter types. *J Cardiovasc Electrophysiol* 2018;**29**:186–195.
56. Rolf S, Hindricks G, Sommer P, Richter S, Arya A, Bollmann A, et al. Electroanatomical mapping of atrial fibrillation: Review of the current techniques and advances. *J Atr Fibrillation* 2014;**7**:1140.
57. Martins RP, Galand V, Behar N, Daubert J-C, Mabo P, Leclercq C, et al. Localization of Residual Conduction Gaps After Wide Antral Circumferential Ablation of Pulmonary Veins. *JACC Clin Electrophysiol* 2019;**5**:753–765.

58. Meissner A, Maagh P, Christoph A, Oernek A, Plehn G. Pulmonary vein potential mapping in atrial fibrillation with high density and standard spiral (lasso) catheters: A comparative study. *J Arrhythmia* 2017;**33**:192–200.
59. Anter E, Tschabrunn CM, Josephson ME. High-Resolution Mapping of Scar-Related Atrial Arrhythmias Using Smaller Electrodes With Closer Interelectrode Spacing. *Circ Arrhythm Electrophysiol* 2015;**8**:537–545.
60. Bun S-S, Latcu DG, Delassi T, Jamili ME, Amoura AA, Saoudi N. Ultra-High-Definition Mapping of Atrial Arrhythmias. *Circ J* 2016;**80**:579–586.
61. Rodrigo M, Ruipérez-Campillo S, Ganesan P, Feng R, Narayan SM. Impact of Catheter Configuration on the Mapping of Atrial Fibrillation. *Circ Arrhythm Electrophysiol* 2026;**19**(3):e014061.
62. Narayan SM, John RM. Advanced Electroanatomic Mapping: Current and Emerging Approaches. *Curr Treat Options Cardiovasc Med* 2024;**26**:69–91.
63. Takigawa M, Relan J, Martin R, Kim S, Kitamura T, Frontera A, et al. Effect of bipolar electrode orientation on local electrogram properties. *Heart Rhythm* 2018;**15**:1853–1861.
64. Takigawa M, Kitamura T, Basu S, Bartal M, Martin CA, Martin R, et al. Effect of electrode size and spacing on electrograms: Optimized electrode configuration for near-field electrogram characterization. *Heart Rhythm* 2022;**19**:102–112.
65. Yamaguchi J, Takigawa M, Goya M, Iwakawa H, Kawamura I, Kato R, et al. Impact of 1 mm difference in interelectrode spacing on local electrograms and voltage/activation maps. *Europace* 2025;**27**(7):euaf135.
66. Nairn D, Eichenlaub M, Lehrmann H, Müller-Edenborn B, Chen J, Huang T, et al. Spatial correlation of left atrial low voltage substrate in sinus rhythm versus atrial fibrillation: The rhythm specificity of atrial low voltage substrate. *J Cardiovasc Electrophysiol* 2023;**34**:1613–1621.
67. Butcher C, Roney C, Wharmby A, Ahluwalia N, Chow A, Lambiase PD, et al. In Atrial Fibrillation, Omnipolar Voltage Maps More Accurately Delineate Scar Than Bipolar Voltage Maps. *JACC Clin Electrophysiol* 2023;**9**:1500–1512.
68. Kellnar A, Fichtner S, Mehr M, Czermak T, Sinner MF, Lackermair K, et al. Single-center experience of ultra-high-density mapping guided catheter ablation of focal atrial tachycardia. *Clin Cardiol* 2022;**45**:291–298.
69. Takigawa M, Sacher F, Martin C, Cheniti G, Duchateau J, Pambrun T, et al. Impact of filter configurations on bipolar EGMs: An optimal filter setting for identifying VT substrates. *J Cardiovasc Electrophysiol* 2023;**34**:1708–1717.
70. Gigli L, Preda A, Testoni A, Kotinas AS, Tacchetto A, Guarracini F, et al. Optimized workflow for paroxysmal atrial fibrillation ablation using very high power short duration. *Front Cardiovasc Med* 2025;**12**:1552340.
71. Masuda M, Asai M, Iida O, Okamoto S, Ishihara T, Nanto K, et al. Left atrial voltage mapping with a direction-independent grid catheter: Comparison with a

- conventional circular mapping catheter. *J Cardiovasc Electrophysiol* 2019;**30**:2834–2840.
72. Steinfurt J, Dall’Aglio PB, Hugenschmidt J, Stuplich J, Jäckel M, Jordan E, et al. Initial Clinical Experience With a Novel 8-Spline High-Resolution Mapping Catheter. *JACC Clin Electrophysiol* 2022;**8**:1067–1076.
73. Masuda M, Matsuda Y, Uematsu H, Asai M, Okamoto S, Ishihara T, et al. Comparison of voltage maps using OCTARAY catheter and PENTARAY catheter. *Pacing Clin Electrophysiol* 2024;**47**:28–35.
74. Lang RM, Badano LP, Mor-Avi V, Afilalo J, Armstrong A, Ernande L, et al. Recommendations for Cardiac Chamber Quantification by Echocardiography in Adults: An Update from the American Society of Echocardiography and the European Association of Cardiovascular Imaging. *J Am Soc Echocardiogr* 2015;**28**:1-39.e14.
75. Addetia K, Lang RM. Complexities of Left Atrial Analysis. *Circ Cardiovasc Imaging* 2016;**9**:e005196.
76. Bejinariu AG, Augustin N, Spieker M, Heiden C auf der, Angendohr S, Glöckner D, et al. Workflow Efficiency of High-Density Left Atrial Mapping: A Real-World Benchmark Across Four Multipolar Catheter Designs. *Appl Sci* 2026;**16**(9):4291.
77. Maclean E, Mahtani K, Roelas M, Vyas R, Butcher C, Ahluwalia N, et al. Transseptal puncture for left atrial ablation: Risk factors for cardiac tamponade and a proposed causative classification system. *J Cardiovasc Electrophysiol* 2022;**33**:1747–1755.
78. Deno DC, Bhaskaran A, Morgan DJ, Goksu F, Batman K, Olson GK, et al. High-resolution, live, directional mapping. *Heart Rhythm* 2020;**17**:1621–1628.
79. Calvert P, Kollias G, Pürerfellner H, Narasimhan C, Osorio J, Lip GYH, et al. Silent cerebral lesions following catheter ablation for atrial fibrillation: a state-of-the-art review. *Europace* 2023;**25**:euad151.
80. Verma A, Debruyne P, Nardi S, Deneke T, DeGreef Y, Spitzer S, et al. Evaluation and Reduction of Asymptomatic Cerebral Embolism in Ablation of Atrial Fibrillation, But High Prevalence of Chronic Silent Infarction. *Circ Arrhythm Electrophysiol* 2013;**6**:835–842.
81. Medi C, Evered L, Silbert B, Teh A, Halloran K, Morton J, et al. Subtle Post-Procedural Cognitive Dysfunction After Atrial Fibrillation Ablation. *JACC* 2013;**62**:531–539.
82. Al-Kaisey AM, Parameswaran R, Bryant C, Anderson RD, Hawson J, Chieng D, et al. Impact of Catheter Ablation on Cognitive Function in Atrial Fibrillation: A Randomized Control Trial. *JACC Clin Electrophysiol* 2023;**9**:1024–1034.
83. Boga M, Suhai FI, Orbán G, Salló Z, Nagy KV, Szegedi L, et al. Incidence and predictors of stroke and silent cerebral embolism following very high-power short-duration atrial fibrillation ablation. *Europace* 2023;**25**:euad327.

84. Wang X-S, Wu Z-Y, Wu Q, Long D-Y, Sang C-H, Jiang C-X, et al. Ablation characteristics associated with steam pops in ablation index-guided radiofrequency ablation of atrial fibrillation. *Europace* 2025;**27**:euaf084.
85. Shuang T, Kong L, Cheng F, Wang X. Prevalence, Predictors and Mechanisms of Steam Pops in Ablation Index-Guided High-Power Pulmonary Vein Isolation. *J Cardiovasc Dev Dis* 2022;**9**:441.

6 Danksagung

Mein herzlichster Dank gilt meinem Doktorvater PD Dr. med. Obaida Rana, der mir die Möglichkeit gegeben hat, diese Arbeit in seiner Arbeitsgruppe zu verfassen. Seine fachliche Expertise, seine Verlässlichkeit und seine geduldige, konstruktive Begleitung haben diese Dissertation erst in ihrer jetzigen Form möglich gemacht.

Von ganzem Herzen danke ich meinem Mann Alexandru. Für seinen unerschütterlichen Glauben an mich, seinen Rückhalt in den nicht immer einfachen Phasen dieser Arbeit – und dafür, dass er mir neben Klinik, Kindern und allem, was das Leben sonst bereithält, den Raum gelassen hat, dieses Vorhaben zu Ende zu bringen.

Meiner Mutter danke ich von Herzen für alles, was sie mir ermöglicht hat. Sie hat mir diesen Weg bereitet, lange bevor ich wusste, wohin er führt. Dass sie bis heute an meiner Seite ist, auch über die Distanz hinweg, bedeutet mir mehr, als ich in Worte fassen kann.

Für meinen Vater – in liebevoller Erinnerung.