

Akzeptanz und Anwendbarkeit eines Augmented Reality basierten Navigationssystems mit optischem Tracking für perkutane Eingriffe in der Interventionellen Radiologie – eine simulationsbasierte Phantomstudie

Acceptance and feasibility of an augmented reality-based navigation system with optical tracking for percutaneous procedures in interventional radiology – a simulation-based phantom study

Autorinnen/Autoren

Karl Rohmer¹, Mathias Becker¹, Marilena Georgiades¹, Christine March¹, Bohdan Melekh¹, Piotr Sperka², Dominik Spinczyk^{3, 2}, Anna Wolińska-Sołtys², Maciej Pech^{1, 4}

Institute

- 1 University Clinic for Radiology and Nuclear Medicine, University Hospital Magdeburg, Magdeburg, Germany
- 2 Holo4Med Spółka S. A., Holo4Med Spółka S. A., Białystok, Poland
- 3 Faculty of Biomedical Engineering/Department of Medical Informatics and Artificial Intelligence, Silesian University of Technology, Gliwice, Poland
- 4 Research Campus STIMULATE, Otto von Guericke University Magdeburg, Magdeburg, Germany

Keywords

interventional procedures, biopsy, ultrasound, interventional radiology, augmented reality

eingereicht 8.4.2024

akzeptiert nach Revision 5.9.2024

Artikel online veröffentlicht 2024

Bibliografie

Fortschr Röntgenstr

DOI 10.1055/a-2416-1080

ISSN 1438-9029

© 2024, Thieme. All rights reserved.

Georg Thieme Verlag KG, Rüdigerstraße 14, 70469 Stuttgart, Germany

Korrespondenzadresse

Karl Rohmer

University Clinic for Radiology and Nuclear Medicine,
University Hospital Magdeburg, Magdeburg, Germany
karl.rohmer@st.ovgu.de

English version at: <https://doi.org/10.1055/a-2416-1080>.

ZUSAMMENFASSUNG

Ziel Augmented Reality (AR) projiziert bei Eingriffen zusätzliche Informationen ins Sichtfeld des Anwenders. Ziel war es, die

Akzeptanz und klinische Anwendbarkeit eines AR-Systems zu evaluieren sowie Anwender verschiedener Erfahrungsstufen zu vergleichen. Untersucht wurde ein System, das ein CT-erzeugtes 3D-Modell eines Phantoms mithilfe einer HoloLens 2 ins Sichtfeld projiziert, wobei die getrackte Nadel angezeigt und live navigiert wird. Ein projiziertes Ultraschallbild dient zur Live-Kontrolle der Nadelpositionierung. Dadurch soll Strahlenexposition minimiert und Orientierung verbessert werden.

Material und Methoden Die Akzeptanz und Anwendbarkeit des AR-Navigationssystems wurde von 10 Ärzten und Medizinstudenten mit unterschiedlichem Erfahrungsstand evaluiert, indem sie Punktionen mit dem System in einem Phantom durchführten. Anschließend wurde die benötigte Zeit verglichen und ein Fragebogen zur Bewertung der klinischen Anwendbarkeit und Akzeptanz ausgefüllt. Zur statistischen Auswertung wurden Häufigkeiten für qualitative Merkmale, Lage- und Streuungsmaße für quantitative Merkmale sowie die Spearman-Rangkorrelationen für Zusammenhänge berechnet.

Ergebnisse 9 von 10 Probanden trafen alle 5 Zielregionen im ersten Versuch und benötigten durchschnittlich 29:39 Minuten für alle Punktionen. Es bestand ein signifikanter Zusammenhang zwischen Vorerfahrung in interventioneller Radiologie, Berufsjahren und der benötigten Zeit. Insgesamt variierte die Zeit von durchschnittlich 43:00 min. bei Medizinstudenten bis 15:00 min. bei Chefärzten. Alle Probanden zeigten hohe Akzeptanz des Systems und bewerteten besonders die potenzielle klinische Anwendbarkeit, die Vereinfachung der Punktion und die Bildqualität positiv. Die Mehrheit benötigt jedoch weiteres Training für ausreichende Sicherheit in der Anwendung.

Schlussfolgerung Das System bietet deutliche Vorteile bei Navigation und Orientierung, erleichtert während der Ausbildung perkutane Eingriffe und ermöglicht beruflich erfahrenen Ärzten kurze Eingriffszeiten. Darüber hinaus verbessert das System die Ergonomie während des Eingriffs, indem wichtige Informationen immer direkt im Sichtfeld verfügbar sind, und hat das Potenzial, insbesondere die Strahlenexposition des Personals durch Kombination von AR und Sonografie und damit verbundener Verkürzung von CT-Fluoroskopiezeiten zu reduzieren.

Kernaussagen

- AR-Navigation bietet Vorteile für die Orientierung bei perkutanen radiologischen Interventionen.
- Die Probanden möchten das AR-System im klinischen Alltag am Patienten verwenden.
- AR verbessert die Ergonomie, indem wichtige Informationen direkt im Sichtfeld verfügbar sind.
- Kombination von AR und Sonografie kann die Strahlenexposition des Personals deutlich reduzieren.

Zitierweise

- Rohmer K, Becker M, Georgiades M et al. Acceptance and feasibility of an augmented reality-based navigation system with optical tracking for percutaneous procedures in interventional radiology – a simulation-based phantom study. *Fortschr Röntgenstr* 2024; DOI 10.1055/a-2416-1080

ABSTRACT

Purpose Augmented reality (AR) projects additional information into the user's field of view during interventions. The aim was to evaluate the acceptance and clinical feasibility of an AR system and to compare users with different levels of experience. A system was examined that projects a CT-generated 3D model of a phantom into the field of view using a HoloLens 2, whereby the tracked needle is displayed and navigated live. A projected ultrasound image is used for live control of the needle positioning. This should minimize radiation exposure and improve orientation.

Materials and Methods The acceptance and usability of the AR navigation system was evaluated by 10 physicians and medical students with different levels of experience by performing punctures with the system in a phantom. The required time was then compared and a questionnaire was completed to assess clinical acceptance and feasibility. For statistical

analysis, frequencies for qualitative characteristics, location and dispersion measures for quantitative characteristics and Spearman rank correlations for correlations were calculated.

Results 9 out of 10 subjects hit all 5 target regions in the first attempt, taking an average of 29:39 minutes for all punctures. There was a significant correlation between previous experience in interventional radiology, years in the profession, and the time required. Overall, the time varied from an average of 43:00 min. for medical students to 15:00 min. for chief physicians. All test subjects showed high acceptance of the system and rated especially the potential clinical feasibility, the simplification of the puncture, and the image quality positively. However, the majority require further training for sufficient safety in use.

Conclusion The system offers distinct advantages for navigation and orientation, facilitates percutaneous interventions during training and enables professionally experienced physicians to achieve short intervention times. In addition, the system improves ergonomics during the procedure by making important information always directly available in the field of view and has the potential to reduce the radiation exposure of staff in particular by combining AR and sonography and thus shortening CT-fluoroscopy times.

Key Points

- AR navigation offers advantages for orientation during percutaneous radiological interventions.
- The subjects would like to use the AR system in everyday clinical practice on patients.
- AR improves ergonomics by making important information directly available in the field of view.
- The combination of AR and sonography can significantly reduce radiation exposure for staff.

Einleitung

Augmented Reality (AR) ermöglicht es, zusätzliche Informationen in die Realität einzublenden, die viele Vorteile, nicht nur in der Interventionellen Radiologie, bieten. So können zum Beispiel CT- oder MRT-Bilder während einer Intervention direkt im Sichtfeld zur Verfügung gestellt werden. Dazu gehören auch dreidimensionale Hologramme von Organen des Patienten oder 3D-Navigationsdaten einer Punktionsnadel. Ein weitverbreitetes Equipment zum Anzeigen solcher AR-Bilder stellen sogenannte Head Mounted Displays (HMD) dar. Ein solches HMD ist die Microsoft HoloLens 2. Der mögliche Einsatz von AR in der Medizin wurde bereits in anderen Studien für viele Fachbereiche gezeigt. So zum Beispiel in der Chirurgie [1], Orthopädie [2], Schilddrüsenchirurgie [3], Urologie [4] und Gefäßchirurgie [5].

Die momentan für komplexe Punktions verwendete CT-Fluoroskopie ist ein anspruchsvolles Verfahren, welches hohe Anforderungen an das räumliche Vorstellungsvermögen des Interventionalisten stellt. Die Position der Nadel im dreidimensionalen Körper muss anhand zweidimensionaler axialer CT-Bilder abstrahiert und kann

durch multiplanare Rekonstruktionen nur bedingt unterstützt werden. Um diese Orientierung zu vereinfachen, könnte Augmented Reality ein geeignetes Verfahren darstellen. Durch die Darstellung von 3D-Projektionen und damit verbundener Tiefenwahrnehmung kann eine bessere Übertragbarkeit auf den Körper des Patienten gegeben sein [5]. Dies vereinfacht die Punktion mit alternativen Zugangswegen, was das Risiko von Verletzungen kritischer Strukturen minimieren und somit die Patientensicherheit erhöhen könnte.

Studien aus dem Bereich der Urologie haben bereits gezeigt, dass mit Augmented Reality die Verfahrenszeiten deutlich minimiert werden konnten und qualitativ bessere Ergebnisse erzielt wurden [4]. Kürzere Verfahrenszeiten könnten helfen, die zunehmende Arbeitsbelastung mit Punktions zu kompensieren.

AR bietet viele zusätzliche Vorteile. So können Daten (3D-Modelle, Livebilder etc.) direkt in das Sichtfeld des Anwenders projiziert werden. Es ist beispielsweise möglich, Fusionsbilder aus CT und anderen Modalitäten mit 3D-Hologrammen der Organe des Patienten zu kombinieren. In Vorbereitung auf Biopsien bietet es die Möglichkeit, Punktionswege an dreidimensionalen Modellen zu planen und während der Intervention anzuzeigen. In Kombination mit einem

Live-Tracking von Nadeln und anderen Instrumenten kann so ein neuartiges und kostengünstiges Navigationssystem für minimalinvasive Verfahren realisiert werden. Besonders wichtig ist hierbei, dass die Informationen nicht auf einem zusätzlichen Bildschirm angezeigt werden müssen, sondern direkt auf das HMD, in die Sicht des Anwenders, projiziert werden können. Dies führt zu einer verbesserten Ergonomie während der Intervention und zu einer Fokussierung auf die wesentlichen Inhalte [6]. Durch den Wegfall zusätzlicher Bildschirme, welche häufig an ungünstigen Stellen positioniert werden müssen, können damit verbundene Probleme, wie Rücken-, Schulter- und Nackenschmerzen [7], aber auch ein sonst erhöhtes Risiko für iatrogene Verletzungen durch eine gestörte visuell motorische Achse [8] minimiert werden.

Ein HMD kann unter sterilen Bedingungen getragen werden [3]. Dies bietet die Möglichkeit, das Navigationssystem während einer Intervention zu nutzen, wodurch die Frequenz und Dauer der CT-Fluoroskopie potenziell verringert und damit die Strahlenexposition, vor allem für das medizinische Personal, gesenkt wird.

Hauptziel dieser Studie war es, die Akzeptanz eines auf der HoloLens 2 basierenden AR-Systems für minimalinvasive CT-gestützte interventionsradiologische Verfahren zu erfassen und dessen klinische Anwendbarkeit zu überprüfen. Sekundäres Ziel bildete

die Auswertung der Lernkurven verschiedener Erfahrungsstufen von Probanden.

Material und Methoden

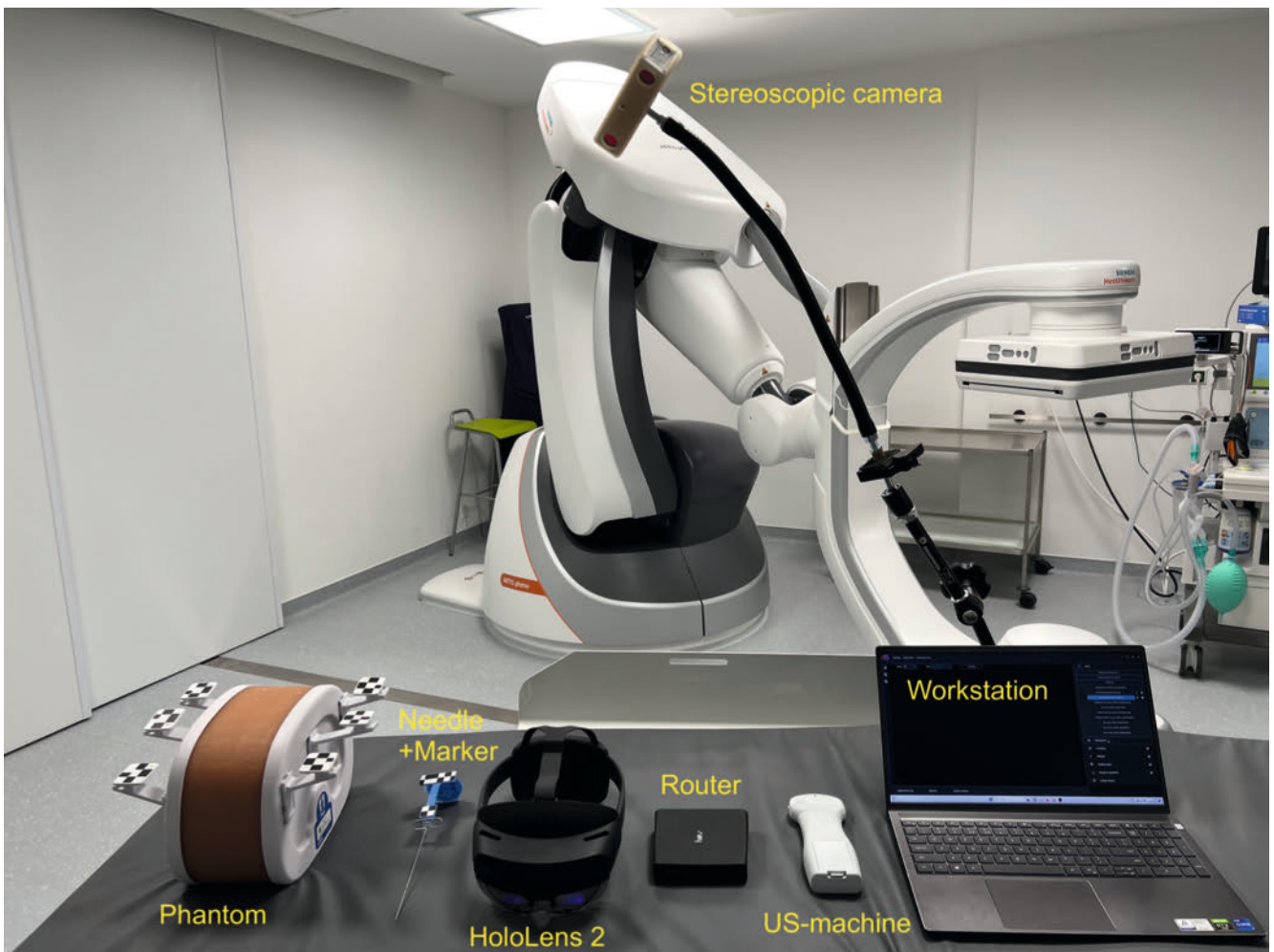
Hardware

Eine Übersicht des verwendeten Materials ist in ► **Abb. 1** zu sehen.

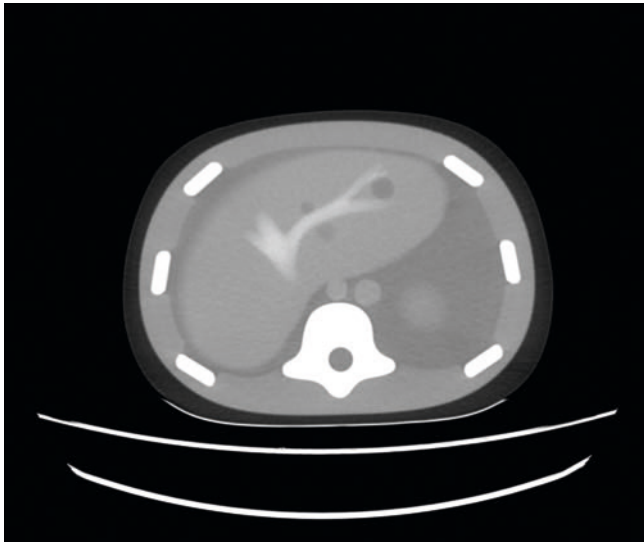
Als AR-System wurde eine HoloLens 2 (Version: 20348.1542, Microsoft Corporation, Redmond, USA) verwendet. Diese lässt sich vollständig durch Handgesten steuern, um die Bedienung unter sterilen Bedingungen zu ermöglichen. Die Displays der HoloLens 2 haben eine 2K-Auflösung im 3:2-Format, was einer Auflösung von >2500 Pixel pro Radiant entspricht [9]. Die HoloLens wurde über ein 5 GHz W-LAN mit der Workstation verbunden.

Für das optische Tracking kam eine Stereokamera (Micron Tracker 3 Hx40, ClaroNav Inc., Toronto, Canada) zum Einsatz.

Die Punktionen erfolgten an einem Phantom (CIRS triple modality 3D abdominal phantom, Model 057A, Sun Nuclear Corporation, Melbourne, USA) mit internen Strukturen (Rippen, Wirbelsäule, Nieren, Leber, Lebervene, Lunge), welches sowohl



► **Abb. 1** Equipment.



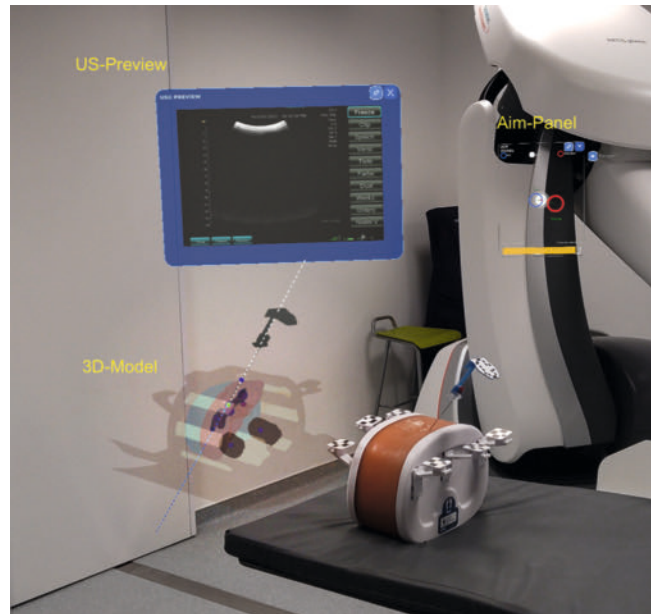
► **Abb. 2** CT-Scan Phantom.

Ultraschall- als auch CT-Bildgebung erlaubt (► **Abb. 2**). Für die Punktionsimulation wurden Nadeln mit einer Arbeitslänge von 150 mm verwendet (17G, 1,4 × 180 mm, KLS Martin SE & Co. KG, Tuttlingen, Deutschland).

Für das optische Tracking wurden an dem Phantom sechs optische Tracker angebracht, welche im optischen Zentrum eine kleine Metallkugel haben. Diese Kugel ist im CT detektierbar, wodurch die CT-Daten später mit den optischen Bildern der Kamera fusioniert werden können. Für das Tracken der Nadel wurden ebenfalls spezielle optische Marker verwendet (Holo4Med S.A., Białystok, Polen). Als Ultraschall kam ein Curved Array Schallkopf (3–11 MHz) (S40, SonoScape Medical Corp., Shenzhen, China) bzw. C5–2 Schallkopf (2–5 MHz) (ACUSON Freestyle, Siemens Healthineers AG, Forchheim, Deutschland) zum Einsatz.

Software und Anwendung

Als Software kam eine Anwendung namens HoloMIAI (Holo4Med S.A., Białystok, Polen) zum Einsatz. Die DICOM-Dateien des Phantoms wurden von der Software in ein 3D-Modell mit segmentierten inneren Strukturen umgerechnet. In diesem Modell lassen sich durch Definition des Einstich- und Zielpunktes Stichpfade planen. In der HoloLens 2 wird den Probanden das 3D-Modell des Phantoms inklusive der geplanten Nadelwege angezeigt. Hierbei wird eine Linie zwischen geplantem Einstich- und Zielpunkt angezeigt, welche zur besseren Orientierung aus dem Phantom heraus verlängert ist. Während der Punktionsnadel in dieses 3D-Modell projiziert, welche zur korrekten Punktionsnadel der Zielstruktur mit der verlängerten Stichlinie des 3D-Modells überlappt werden muss. Außerdem verfärbt sich der Zielpunkt von rot auf grün, sobald die verlängerte Nadelspitze auf ihn gerichtet ist (► **Abb. 3** und ► **Abb. 4**). Zusätzlich steht den Probanden ein weiteres Tool namens „Aim-Panel“ zur Verfügung. Hierbei handelt es sich um eine Zielhilfe, bestehend aus einem roten und einem blauen Ring, sowie einem weißen Punkt. Zur korrekten Punktionsnadel müssen dabei beide Ringe über den weißen Punkt gebracht werden. Der blaue Ring beschreibt den Abstand

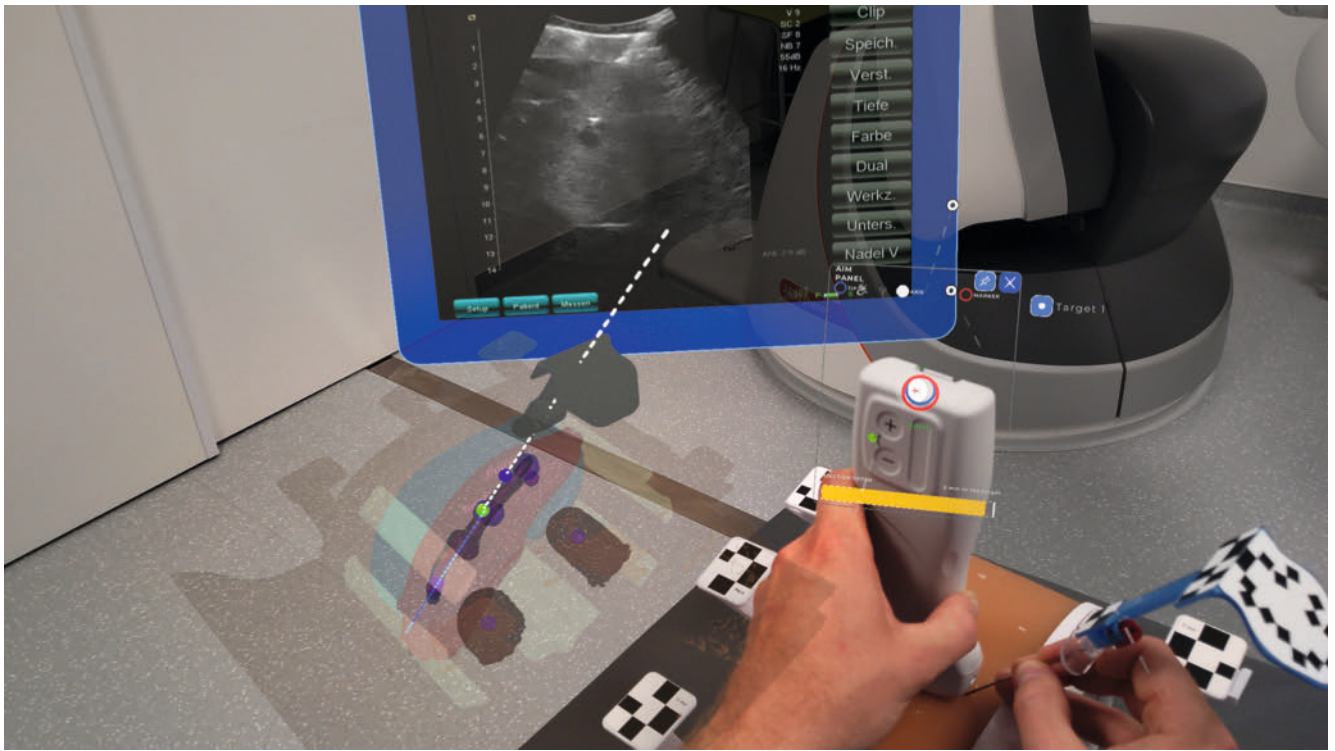


► **Abb. 3** AR-Bild der HoloLens mit korrekt auf die Zielstruktur gerichteter Nadel.

der Nadelspitze zum Einstichpunkt und der rote Ring zeigt die korrekte Ausrichtung der Nadelspitze auf das Ziel. Zusätzlich wird durch eine, sich bei Annäherung an das Ziel füllende Leiste, der Abstand zur Zielstruktur angezeigt (► **Abb. 3** und ► **Abb. 4**). Bei ca. 2 cm Abstand zum Ziel sollte der Ultraschall mitverwendet werden. Dieser wird ebenfalls in die Sicht des Anwenders, in die HoloLens 2 projiziert und dient während der finalen Punktionsnadel als live-bildgebende Modalität (► **Abb. 4**). Alle drei Komponenten (3D-Modell, Aim-Panel und Ultraschall-Bild) lassen sich frei vom Nutzer mittels Handgesten nach eigenem Belieben im Raum platzieren, sowie ein- oder ausblenden.

Studienablauf

Die Akzeptanz und Anwendbarkeit des AR-Systems wurden von Probanden, die sich hinsichtlich Erfahrungsstufen und Alter unterschieden, evaluiert (3 Medizinstudenten, 2 Assistenzärzte, 3 Fachärzte, 1 Oberarzt und 1 Chefarzt). Außerdem wurde die Berufserfahrung der Probanden in Form von Berufsjahren in der Radiologie erfasst und die Probanden wurden gebeten, die Anzahl an durchgeführten CT-Fluoroskopien, Ultraschalluntersuchungen und ultraschallgestützten Punktionsnadeln anzugeben. Zudem wurden bisherige Vorerfahrungen mit AR oder VR (Virtual Reality) dokumentiert. Alle Probanden erhielten zunächst eine Einführung in das AR-System und durchliefen das allgemeine Tutorial der HoloLens 2 von Microsoft, in welchem sie die allgemeine Bedienung kennenlernten. Zusätzlich wurde die HoloLens auf die Augen der Studienteilnehmer kalibriert. Anschließend erhielten die Probanden die Möglichkeit, sich mit der Punktionssoftware vertraut zu machen. Dafür bekamen sie zunächst eine Einführung in die verschiedenen Tools und Möglichkeiten des HoloMIAI-Systems und wie diese verwendet werden. Außerdem erhielten sie eine Einführung in die wichtigsten Sprachbefehle. Diese lagen auch während der Versuche als Liste aus. Nachdem die Probanden sich mit der



► **Abb. 4** AR-Bild während der finalen Punktion mit Ultraschall.



► **Abb. 5** Anwender während Punktion.

Bedienung des Systems vertraut gemacht hatten, folgte eine Übungsphase von insgesamt 3 Punktionen: eine erste Übungspunktion unter standardisierter Anleitung in eine 6 cm tief liegende und ca. 8 mm im Durchmesser messende Zielstruktur und anschließend zwei weitere Punktionen mit unterschiedlichen Zugangswegen und Zielgrößen zu Übungszwecken (► **Abb. 5**).

Nach der Trainingsphase sollten die Probanden fünf verschiedene Zielläsionen unterschiedlicher Größe und mit verschiedenen

langem und anguliertem Zugangsweg unter Vermeidung der kritischen Strukturen des Modells (Lunge und Lebervene) punktieren. Die Durchmesser der Läsionen differierten dabei zwischen 7 mm–15 mm und die Länge des Nadelwegs zwischen 65 mm–143 mm.

Anschließend wurden die Nadelspitzenlagen mittels eines CT-Scans dokumentiert und ausgewertet. Die benötigte Zeit vom Ansetzen der Nadel zur ersten Punktion, bis der Proband den Abschluss der fünften Läsion deklarierte, wurde dokumentiert. Falls nicht alle Zielläsionen getroffen wurden, wurde ein erneuter Durchgang mit 5 Punktionen durchgeführt. Auftretende Probleme und deren Begründungen wurden ebenfalls dokumentiert.

Im Anschluss an die Punktion wurden die Probanden gebeten, einen Fragebogen zur klinischen Anwendbarkeit, Sicherheit und der Handhabung des Systems auszufüllen. Dabei mussten die Probanden Fragen (► **Tab. 1**) auf einer Likert-Skala von „Stimme voll zu“ (5) bis „Stimme überhaupt nicht zu“ (1) bewerten.

Statistische Analyse

Für die statistische Analyse verwendeten wir IBM SPSS Statistics 28.0 (IBM Corp., Armonk, NY, USA). Zunächst erfolgte eine deskriptive Erhebung der erfassten Merkmale. Für qualitative Merkmale wurden dabei Häufigkeiten berechnet und diese als absolute Zahlen und Prozentzahlen dargestellt. Für quantitative Merkmale wurden Lage- und Streuungsmaße bestimmt. Zur Untersuchung von Zusammenhängen zwischen den quantitativen Variablen wurden Rangkorrelationen nach Spearman verwendet. Deren Bewertung erfolgt gemäß der Interpretation nach Cohen (1988):

► **Tab. 1** Fragebogen zur klinischen Anwendbarkeit, Sicherheit und Handhabung mit Ergebnissen.

Fragen	N	Mittelwert	Std.-Abweichung	Median	Minimum	Maximum
Ich kann mir einen Einsatz der HoloLens im klinischen Alltag vorstellen.	10	4,60	,516	5,00	4	5
Das System vereinfachte die Orientierung während der Intervention.	10	4,30	,949	5,00	3	5
Das System vereinfachte die Nadelnavigation.	10	4,70	,675	5,00	3	5
Ich habe mich schnell an die Handhabung des Systems gewöhnt.	10	3,80	,919	4,00	2	5
Die Bedienung der HoloLens war benutzerfreundlich.	10	3,90	,738	4,00	3	5
Ich fand die Einblendung der Informationen im Sichtfeld nützlich.	10	4,40	,516	4,00	4	5
Die Bildqualität der HoloLens war für den vorgesehenen Zweck ausreichend.	10	4,70	,483	5,00	4	5
Die Punktion außerhalb des CT-Gentry vereinfachte die Arbeit. (nur Ärzte)	7	4,57	,787	5,00	3	5
Während der Benutzung des Systems hatte ich ein sicheres Gefühl.	10	3,60	1,075	4,00	2	5
Augmented Reality sollte in der interventionellen Radiologie zukünftig eine Rolle spielen.	10	4,50	,707	5,00	3	5
Augmented Reality sollte bei der Ausbildung junger Ärzte eine Rolle spielen.	10	4,90	,316	5,00	4	5
Ich fühle mich in der Handhabung des Systems sicher.	10	3,20	1,033	3,00	2	5
Ich möchte das System für perkutane Verfahren am Patienten einsetzen.	10	4,40	,699	4,50	3	5
Ich benötige noch weiteres Training mit dem System.	10	4,20	1,317	5,00	1	5

$|rs| = 0.10$ – schwache Korrelation, $|rs| = 0.30$ – mittlere Korrelation, $|rs| = 0.50$ – starke Korrelation).

Alle Tests wurden zweiseitig durchgeführt, und ein p-Wert $< 0,05$ wurde als statistisch signifikant angesehen.

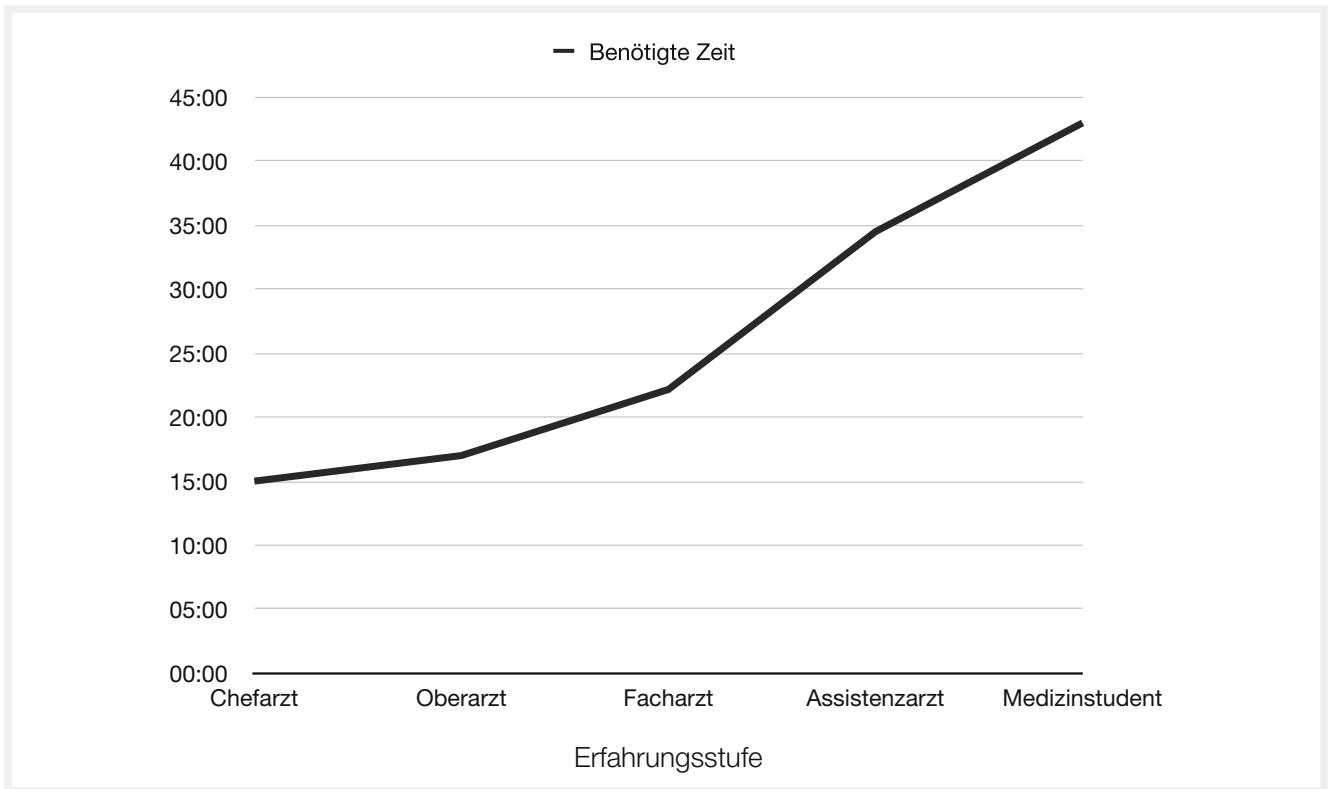
Ergebnisse

9 von 10 der Probanden waren in der Lage, alle 5 Zielstrukturen im ersten Versuch zu treffen. Lediglich ein Assistenzarzt benötigte einen zweiten Durchgang. Im Durchschnitt benötigten die Probanden 29:39 Minuten für 5 erfolgreiche Punktionen. Eine Untersuchung des Abstandes zur Läsionsmitte war nicht möglich, da bei teilweise lediglich 3,5 mm im Radius messenden Zielläsionen, selbst bei 1 mm CT-Schnitten, bei 1,4 mm dicken Nadeln und deutlichen Metallartefakten die Messungenauigkeit zu groß wäre. Daher erfolgte lediglich die für die Praxis relevante Einteilung in „getroffen“ oder „nicht getroffen“. Dabei zeigte sich ein signifikanter Zusammenhang zwischen der Anzahl an Berufsjahren und der benötigten Zeit ($r_s = -0,787$; $p = 0,007$), sowie zwischen der benötigten Zeit und Vorerfahrungen mit CT-Fluoroskopie ($r_s = -0,755$; $p = 0,012$), Sonografie ($r_s = -0,632$; $p = 0,050$) und sonografisch gestützten Punktionen

($r_s = -0,745$; $p = 0,013$). Drei der Probanden gaben an, bereits jeweils einmal außerhalb eines medizinischen Kontextes Erfahrung mit VR oder AR gemacht zu haben. Dies hatte aber keinen nachweisbaren Zusammenhang mit einer schnelleren Punktionszeit.

Medizinstudenten benötigten durchschnittlich 43:00 min, Assistenzärzte 34:30 min, Fachärzte 22:10 min, Oberärzte 17:00 min und Chefärzte 15:00 min (► **Abb. 6** und ► **Tab. 2**).

Bei der Befragung der Teilnehmer wurden im Wesentlichen positive und weitgehend zustimmende Stellungnahmen erhoben. Im Rahmen des Fragebogens mit einer Likert-Skala von 1 bis 5 Punkten wurde der Mittelwert (M) der gegebenen Antworten gebildet. Dabei gaben die Probanden an, dass sie sich einen Einsatz der HoloLens im klinischen Alltag vorstellen können ($M = 4,6$), dass das System die Nadelnavigation vereinfachte ($M = 4,7$), dass die Bildqualität für den vorgesehenen Zweck ausreichend war ($M = 4,7$) und dass die Punktion außerhalb der CT-Gentry die Punktion vereinfachte ($M = 4,57$). Die Benutzerfreundlichkeit und schnelle Gewöhnung an die Handhabung wurden mit $M = 3,9$ bzw. $M = 3,8$ bewertet. Die Frage danach, ob man während der Punktion ein sicheres Gefühl hatte, wurde mit $M = 3,6$ bewertet. Mit einer Bewertung von $M = 4,2$ stimmten die Probanden zu, dass sie das System zukünftig für perkutane Verfahren am Patienten



► **Abb. 6** Grafische Darstellung der für 5 Punktionen benötigten Zeit über der Erfahrungsstufe.

► **Tab. 2** Benötigte Zeiten für 5 erfolgreiche Punktionen.

Erfahrungsstufe	N	Mittelwert	Standardabweichung	Standardfehler des Mittelwerts	Median	Minimum	Maximum
Chefarzt	1	15:00	.	.			
Oberarzt	1	17:00	.	.			
Facharzt	3	22:10	05:45	03:19	22:00	16:30	28:00
Assistenzarzt	2	34:30	20:30	14:29	34:30	20:00	49:00
Medizinstudent	3	43:00	02:00	01:09	43:00	41:00	45:00
Insgesamt	10	29:39	13:24	04:14	25:00	15:00	49:00

einsetzen möchten. Ebenfalls mit $M=4,2$ wurde die Notwendigkeit von weiterem Training bewertet (► **Tab. 1**). Bei den vergebenen Punktzahlen gab es in aller Regel keinen erkennbaren Zusammenhang zwischen der Bewertung durch Medizinstudenten und erfahreneren Probanden. Einzig auffällig war, dass der befragte Chefarzt sich bereits so sicher mit dem System fühlte, dass er die Notwendigkeit von weiterem Training mit 1 bewertete und damit deutlich von der Bewertung der anderen Probanden ($M=4,2$) abwich.

Zu technischen Problemen kam es insgesamt selten. Bei zwei Probanden schaltete sich die HoloLens aufgrund von Überhitzung ab. Vermutlich war hier die zusätzliche Rechenbelastung durch die Livebild-Übertragung des HoloLens-Bildes im Rahmen der Studie auf einen PC die Ursache. Zweimal kam es kurzzeitig zu Über-

tragungsproblemen des W-LANs und bei einem Probanden knickte der Marker der Nadel leicht ab, wodurch es zu einem fehlerhaften Tracking der Nadel kam.

Diskussion

Die Ergebnisse zeigen, dass das AR-System viele Vorteile für perkutane Verfahren in der Interventionellen Radiologie hat, beispielsweise eine verbesserte Orientierung während der Intervention, was vor allem Vorteile bei der Nadelnavigation bietet. Außerdem hat die Einbindung der Live-Bildgebung des Ultraschalls bei weiterhin bestehender Möglichkeit der CT-Fluoroskopie das Potenzial, die Strahlenexposition für das Personal drastisch

zu reduzieren, ohne die Sicherheit der Nadelnavigation in den Patienten zu verringern.

Ein signifikanter Zusammenhang zwischen der Berufserfahrung, der Vorerfahrung in Interventioneller Radiologie der Probanden und der für die Punktionen benötigten Zeit war zu erwarten und wurde hier bestätigt. Dennoch ist zu unterstreichen, dass alle Medizinstudenten, ohne jegliche Berufserfahrung, in der Lage waren, ebenfalls die Punktionen mit diesem System im ersten Versuch erfolgreich durchzuführen. Dieser Vorteil bei perkutanen Verfahren für gänzlich unerfahrene Medizinstudenten deckt sich mit Ergebnissen mit anderen AR-Systemen (ohne US) [10]. Hier zeigt sich das Potenzial, die Lernkurven für perkutane Eingriffe in der Interventionellen Radiologie abzufachen und somit durch eine schnellere Ausbildung, die Ausbildung von mehr Interventionalisten zu ermöglichen.

Die Benutzungsakzeptanz des Systems ist sehr hoch ausgefallen und die Handhabung wurde als intuitiv empfunden. Darüber hinaus konnten sich alle befragten Probanden den Einsatz des Systems im klinischen Alltag gut vorstellen. Allerdings gaben 80% der Probanden an, weiteres Training mit dem System zu benötigen, was wahrscheinlich auch die im Verhältnis betrachtete niedrigere Bewertung des sicheren Gefühls während der Punktion erklärt.

Die Anwendbarkeit von durch Augmented Reality angezeigten 3D-Modellen für Punktionen wurde in anderen Studien bestätigt [10, 11, 12]. Studien haben ebenfalls bereits die Anwendbarkeit von Ultraschall während CT-gestützter perkutaner Eingriffe mit deutlicher Reduktion der Strahlenbelastung gezeigt [13].

Allerdings ist diese Studie eine der ersten, die ein System evaluiert, welches optisch gestütztes Nadeltracking mit AR-Projektion eines 3D-Modells, sowie in der Sicht des Anwenders angezeigten live-Ultraschall für perkutane Eingriffe kombiniert. Die Überlegenheit eines mittels AR angezeigten US-Bildes für perkutane Biopsien, insbesondere durch die verbesserte Ergonomie [6], angenehmeres Arbeiten [14] und eine verbesserte Präzision [15] wurde bereits in anderen Studien bestätigt. Auch die Möglichkeit der Kombination von US- und CT-Bildern für AR-gestützte Punktionen [16], sowie Instrumenten-Trackings und AR-projiziertem Ultraschall wurden bereits gezeigt [17]. Für Prostata-Punktionen wurde bereits die Anwendbarkeit eines ähnlichen Systems wie dem hier getesteten mit 3D-Navigation und Ultraschall gezeigt [18].

Die Punktionszeit mit durchschnittlich 5:56 min/Punktion mit dem hier getesteten AR/US-Verfahren in einem Phantom mit Lebervene und Lunge als wesentliche Risikostrukturen ist vergleichbar mit den Ergebnissen anderer Studien mit AR-basierten Punktionssystemen. Hier lagen die Punktionszeiten in einem Phantom ohne jegliche Risikostrukturen mit AR-Navigation in Kombination mit CT-Fluoroskopie bei 4:42 min/Punktion [10] bzw. 9:24 min/Punktion bei rein AR-gestützten Punktionen in einem menschlichen Leichnam [11]. Zu bedenken ist, dass die hier verglichenen Systeme sich technisch deutlich unterscheiden, allerdings deutet sich eine Verlängerung der Punktionszeit mit Zunahme und Komplexität von Risikostrukturen an.

Eine Herausforderung stellt die gewohnte Verformung oder Biegung der Nadel im Phantom oder zukünftig im Patienten und die damit verbundene, nicht 100%-gerade Punktionsstrecke dar, da im Rahmen des optischen Trackings die Nadelspitze anhand

einer geraden Linie vom Marker am Ende der Nadel abstrahiert wird. Daher bedarf es einer kontinuierlichen Kontrolle durch live-bildgebende Modalitäten wie Ultraschall, insbesondere bei den letzten 2–3 cm der Punktionsstrecke. Außerdem wäre eine Verbindung des Systems mit biegungsensitiven Nadeln denkbar [19].

Als weitere wichtige Limitation ist zu erwähnen, dass es sich hier um ein stationäres Phantom handelt, welches keine Atembewegung hat. Dieses Problem könnte durch Kombination mit einer Atembewegungsüberwachung minimiert werden [20]. Zudem ist denkbar, dass die durch die Atembewegung entstehenden Artefakte des optischen Trackings auch dadurch kompensiert werden, dass die finale Punktion unter Live-Bildgebung erfolgt.

Bei Patienten oder Zielstrukturen, bei denen eine Bildgebung durch Ultraschall nicht möglich ist, wäre auch eine Live-Bildgebung der finalen Endstrecke durch CT-Fluoroskopie vorstellbar [10].

In Kombination mit Ultraschall beschränkt sich die Anwendung des Systems auf schallbare Punktionsorte. Daher bietet es sich besonders für Punktionen im Abdomen, beispielsweise für Leber- oder Nierenpunktionen an. Wobei immer auch CT-Fluoroskopie zur Verfügung stehen sollte, falls kein adäquates Schallfenster gefunden werden sollte.

Aufgrund der vielversprechenden Eigenschaften haben wir bereits eine randomisierte klinische Studie initiiert (Prospektive Evaluation eines AR-basierten Verfahrens für perkutane Verfahren in der Interventionellen Radiologie).

Zusammenfassend weist das System ein hohes Potenzial in der praktischen Anwendung auf, insbesondere die potenzielle Reduktion der Strahlenexposition bei dennoch vorhandener Sicherheit durch Live-Bildgebung, sowie die mögliche Verbesserung der Ergonomie und Orientierung könnten eventuell zu einer effizienteren, benutzerfreundlicheren und sichereren Intervention führen.

Klinische Relevanz

- Das AR-System ermöglicht eine verbesserte Orientierung und Navigation während bildgestützter Punktionen.
- Das System bietet Vorteile bei Punktionen für Anfänger und ermöglicht erfahrenen Interventionalisten kurze Verfahrenszeiten.
- Durch den Einsatz von Sonografie als live-bildgebende Modalität wird die Strahlenexposition des Personals reduziert.
- Die Ergonomie wird durch Informationen im direkten Blickfeld des Radiologen während der Intervention verbessert.

Interessenkonflikt

Die Mitarbeiter von Holo4Med waren ausschließlich bei der Installation und Kalibrierung des Equipments, der Schulung der Studienbetreuer in der Bedienung der Technik vor Studienbeginn, dem technischen Support, sowie der Bereitstellung technischer Details beteiligt. Die Studie selbst wurde ausschließlich von Personen durchgeführt und ausgewertet, die in der Klinik arbeiten und weder eine Vergütung von Holo4Med erhalten noch in einem Arbeitsverhältnis zu Holo4Med stehen.

Literatur

- [1] Moosburner S, Remde C, Tang P et al. Real world usability analysis of two augmented reality headsets in visceral surgery. *Artificial Organs* 2019; 43: 694–698. doi:10.1111/aor.13396
- [2] Elmi-Terander A, Nachabe R, Skulason H et al. Feasibility and Accuracy of Thoracolumbar Minimally Invasive Pedicle Screw Placement With Augmented Reality Navigation Technology. *Spine (Phila Pa 1976)* 2018; 43: 1018–1023
- [3] Scherl C, Stratemeier J, Rotter N et al. Augmented Reality with HoloLens in Parotid Tumor Surgery: A Prospective Feasibility Study. *ORL J Otorhinolaryngol Relat Spec* 2021; 83: 439–448
- [4] Al Janabi HF, Aydin A, Palaneer S et al. Effectiveness of the HoloLens mixed-reality headset in minimally invasive surgery: a simulation-based feasibility study. *Surg Endosc* 2020; 34: 1143–1149. doi:10.1007/s00464-019-06862-3
- [5] Jiang T, Yu D, Wang Y et al. HoloLens-Based Vascular Localization System: Precision Evaluation Study With a Three-Dimensional Printed Model. *J Med Internet Res* 2020; 22: e16852
- [6] Okachi S, Matsui T, Sakurai M et al. Real-time ultrasound-guided thoracentesis simulation using an optical see-through head-mounted display: a proof-of-concept study. *J Ultrason* 2024; 24: 20240012
- [7] Wauben LSGL, van Veelen MA, Gossot D et al. Application of ergonomic guidelines during minimally invasive surgery: a questionnaire survey of 284 surgeons. *Surg Endosc* 2006; 20: 1268–1274
- [8] El Shallaly G, Cuschieri A. Optimum view distance for laparoscopic surgery. *Surg Endosc* 2006; 20: 1879–1882. doi:10.1007/s00464-005-0162-1
- [9] HoloLens 2—Overview, Features, and Specs | Microsoft HoloLens. o. J.
- [10] Park BJ, Hunt SJ, Nadolski GJ et al. Augmented reality improves procedural efficiency and reduces radiation dose for CT-guided lesion targeting: a phantom study using HoloLens 2. *Sci Rep* 2020; 10: 18620. doi:10.1038/s41598-020-75676-4
- [11] Solbiati M, Passera KM, Rotilio A et al. Augmented reality for interventional oncology: proof-of-concept study of a novel high-end guidance system platform. *Eur Radiol Exp* 2018; 2: 18. doi:10.1186/s41747-018-0054-5
- [12] Bettati P, Chalian M, Huang J et al. Augmented Reality-Assisted Biopsy of Soft Tissue Lesions. *Proc SPIE Int Soc Opt Eng* 2020; 11315: 113150W. doi:10.1117/12.2549381
- [13] Damm R, El-Sanossy S, Omari J et al. Ultrasound-assisted catheter placement in CT-guided HDR brachytherapy for the local ablation of abdominal malignancies: Initial experience. *Fortschr Röntgenstr* 2019; 191: 48–53. doi:10.1055/a-0636-4055
- [14] Farshad-Amacker NA, Kubik-Huch RA, Kolling C et al. Learning how to perform ultrasound-guided interventions with and without augmented reality visualization: a randomized study. *Eur Radiol* 2023; 33: 2927–2934
- [15] Costa N, Ferreira L, de Araújo ARVF et al. Augmented Reality-Assisted Ultrasound Breast Biopsy. *Sensors (Basel)* 2023; 23: 1838
- [16] Pfefferle M, Shahub S, Shahedi M et al. Renal biopsy under augmented reality guidance. *Proc SPIE Int Soc Opt Eng* 2020; 11315: 113152W. doi:10.1117/12.2550593
- [17] Li H, Yan W, Zhao J et al. Navigate biopsy with ultrasound under augmented reality device: Towards higher system performance. *Computers in Biology and Medicine* 2024; 174: 108453
- [18] Bettati P, Young J, Rathgeb A et al. An augmented reality-guided biopsy system using a high-speed motion tracking and real-time registration platform. *Proc SPIE Int Soc Opt Eng* 2024; 12928: 129281G. doi:10.1117/12.3008573
- [19] Lin MA, Siu AF, Bae JH et al. HoloNeedle: Augmented Reality Guidance System for Needle Placement Investigating the Advantages of Three-Dimensional Needle Shape Reconstruction. *IEEE Robotics and Automation Letters* 2018; 3: 4156–4162
- [20] Nicolau SA, Pennec X, Soler L et al. An augmented reality system for liver thermal ablation: Design and evaluation on clinical cases. *Medical Image Analysis* 2009; 13: 494–506. doi:10.1016/j.media.2009.02.003