Ultrasound in augmented reality: a mixed-methods evaluation of head-mounted displays in image-guided interventions

Christoph Rüger\textsuperscript{1,3,5}
rueger@campus.tu-berlin.de

Markus A. Feufel, Prof. Dr.\textsuperscript{4}
markus.feufel@tu-berlin.de

Simon Moosburner\textsuperscript{1}
simon.moosburner@charite.de

Christopher Özbek, Dr.\textsuperscript{3}
coezbek@scopis.com

Johann Pratschke, Prof. Dr. med.\textsuperscript{1,2}
johann.pratschke@charite.de

Igor M. Sauer, Prof. Dr. med.\textsuperscript{1,2}
igor.sauer@charite.de
(corresponding author)

1. Department of Surgery, Campus Charité Mitte | Campus Virchow-Klinikum, Experimental Surgery, Charité – Universitätsmedizin Berlin, corporate member of Freie Universität Berlin, Humboldt-Universität zu Berlin, and Berlin Institute of Health, 13353 Berlin, Germany
2. Cluster of Excellence Matters of Activity. Image Space Material funded by the Deutsche Forschungsgemeinschaft (DFG, German Research Foundation) under Germany’s Excellence Strategy – EXC 2025, Augustenburger Platz 1, 13353 Berlin, Germany
3. Scopis GmbH
Heinrich-Heine-Platz 10, 10179 Berlin
4. Technische Universität Berlin
Department of Psychology and Ergonomics, Division of Ergonomics
Marchstr. 23, MAR 3-2, 10587 Berlin, Germany
5. Technische Universität Berlin
Straße des 17. Juni 135, 10623 Berlin
### Categories

Categories are denoted as letters (N, L, …), subcategories as digits following the category letter. The first subcategory of each category defines the general category and is used when a phrase belongs to the category, but not to any of the defined subcategories.

Participants are referred to as P and a number, for example P2 or P4.

### Inhaltliche Beschreibung

| N1: Nutzen | Wird kodiert, wenn ein konkret bzw. direkt erlebter/ wahrgenommener Nutzen beschrieben wird | Beispiele für Anwendung | Abgrenzungen |
|------------|-------------------------------------------|-------------------------|--------------|
|            |                                          | [... ] macht sozusagen die Verortung von dem Ultraschallbild im Körper deutlich einfacher." (P4) | Spekulative bzw. vorhergesagte Nutzen (z. B. bei anderen Anwendungsfällen und für andere Personen) werden als Einschätzung kodiert, ebenso unspezifisch positive Aussagen |

### Orientierung erleichtert

| N2: | Das HMD erleichtert die Verortung des Ultraschallbildes in der Anatomie und/oder des Schallkopfes auf dem Patienten | [...] macht sozusagen die Verortung von dem Ultraschallbild im Körper deutlich einfacher." (P4) | In dieser Kategorie stehen einzelne Schnittbilder im Vordergrund, beim Zusammenwirken mehrerer Bilder oder räumlicher Korrelation ist N3 zu kodieren |
| Orien... |

### Verbesserte 3D-Vorstellung

| N3: | Das HMD erleichtert die 3D-Vorstellung anatomischer Strukturen und der Korrelation mehrerer Bilder untereinander | „das ist schon ein gewisses 3D-Gefühl für den Körper, das auf dem Schallbildschirm ja immer nur sozusagen virtuell rekonstruiert wird“ (P3) |

### Hedonistische Aspekte

| N4: | Subjektive Ausdrücke von Spaß, Begeisterung und/oder bezüglich des Novums der Technologie | „Also macht Bock halt" (P1, S.4) „Das ist schon abgefahren" (P1, S.2) „[…] dass es halt irgendwie so was Neues ist, was ja auch irgendwie total spannend ist." (P2) |
|      | Eher analytische Aussagen wie „das ist sinnvoll" werden als Einschätzung kodiert |

### Limitation

| L1: | Wird kodiert, wenn eine Limitation des HMDs bezüglich der Benutzung im Kontext der Sonographie beschrieben wird | Unspezifische negative Urteile, wie „das ist nicht sinnvoll" werden als Einschätzung kodiert |

### Blickwinkel

| L2: | Die Sichtbarkeit oder Qualität des Ultraschallbildes im HMD wird durch die perspektivische Darstellung gemindert | „Aber wenn ich jetzt hierhin gucke, sehe ich wenig, weil das Bild jetzt ganz, ganz in meinem so Blick ist" (P1) |

### Ergonomie

| L3: | Aspekte des technischen Aufbaus mit HMD schränken den physischen Komfort des Benutzenden ein | „[…] ich fand's ein bisschen schwer auf dem Kopf." (P4) |
|      | Bemerkungen, die spezifisch auf die erforderliche Bewegung hinweisen, gehören zu Kategorie L5 |

### Haptische Bedienung

| L4: | Die Betätigung der haptischen Bedienelemente des Ultraschallgeräts ist mit HMD schwieriger | „es war aber schwieriger nebenher dann aber das Gerät zu bedienen […]" (P3) |

### Bewegung

| L5: | Die Darstellung im HMD | „das ist gerade ein bisschen | Wird nicht kodiert, wenn |
| Erforderlich |
|----------------|
| **erforderlich** |
| Inhaltliche Beschreibung | Beispiele für Anwendung | Abgrenzungen |
| erfordert ein höhere Maß an Bewegung des Benutzenden | anstrengend, dass man dann den Kopf so dreht, und dann wirklich immer so auf der Ebene der Ultraschallsonde ist (P5) | die Bewegung nicht ausgeführt wird/ wurde ("ich müsste mich bewegen"), dieser Fall gehört zu L2 |
| L6: Einstellung mit Brille nicht/schwer möglich | Gewünschte Schnittbilderebenen können nicht mit dem HMD dar-/eingestellt werden | „Ich kann hier beim besten Willen nicht mit der Brille das einstellen." (P2) |
| L7: Optisches Tracking | Der erforderliche Blickkontakt der Sonde zur 3D-Kamera limitiert die Untersuchung | „aber wenn ich jetzt versuche die Punkte so zur 3D-Kamera zu halten kann ich dann auf [jetzigem "Testpatient"] nichts mehr sehen." (P1) |
| L8: Bildqualität | Auflösung, Kontrast oder Latenz des Bildes im HMD fallen störend auf | „Es wirkt alles so ein bisschen zeitversetzt gerade, also vom Gefühl." (P5, S. 2) |
| G1: Gewöhnung | Kodiert, wenn Äußerungen eine ungewohnte oder verwirrende Situation, aber auch das Überwinden dieser beschreibt | „ist ein bisschen ungewohnt so zu schauen" (P3) |
| G2: Ungewohnt | Äußerungen, die konkret Ungewöhnlichkeit ausdrücken | „Hm. So. Leber. So. Jetzt wird's besser." (P1) |
| G3: Adaptation | Wird kodiert bei Verbalisierung der Bewältigung einer ungewohnten oder verwirrenden Situation | „Mittenweile gewöhnt man sich dran" (P5) |
| G4: Verwirrung | Äußerungen, die konkret Verwirrung und/oder, auch implizit, fehlendes Verständnis der Anwendung ausdrücken, auch sprachlich durch unvollständige Sätze bemerkbar | „Okay, ähm. Ich muss mir das noch einen Moment angucken, um zu wissen was ich sehe" (P6) |
| G5: Übung bringt Besserung | Vorhersage, dass Verwirrung oder Limitationen durch das HMD durch Übung Wiederholung reduziert oder eliminiert werden kann | „Hm. Klappt das hier? Vielleicht muss man das irgendwie anders machen mit der..." (P1) |
| E1: Einschätzung | Aussagen zum Einsatz bzw. zu Auswirkungen des HMDs mit Sonographie, die sich nicht direkt auf den im Experiment erlebten Anwendungsfall beziehen bzw. sich davon nicht direkt ableiten | „Also ich glaub es wird besser, wenn man sich dran gewöhnt, [...]." (P5) |
| E2: Für Punktionen sinnvoll | Einsatz erscheint für Punktionen sinnvoll | „Im klinischen Alltag für Biopsien fände ich das jetzt recht sinnvoll." (P3) |
| E3: Intraoperativ sinnvoll | Einsatz erscheint intraoperativ sinnvoll | „Also bei Leberresektionen da draufzuschallen direkt, um da zu gucken, wo ist mein Knoten, das ist schon spannend." (P1) |
| E4: Für Lehre sinnvoll | Einsatz erscheint in Lehre/im Unterricht sinnvoll | „Also für die Lehre finde ich's deutlich sinnvoller, dass, äh, die Studenten die Schnittansicht verstehen." (P3) |
| Inhaltliche Beschreibung | Beispiele für Anwendung | Abgrenzungen |
|--------------------------|-------------------------|--------------|
| **E5: Für multimodalen Vergleich sinnvoll** | Einsatz könnte im Vergleich von Ultraschallbildern mit 3D-Daten sinnvoll sein | „Ich denke eher für so spezielle Sachen, wo man Sachen korrelieren muss mit anderen Sachen, die man dann schon sieht, also intermodal, intermodaler Bildvergleich und so." (P5) |
| **E5: In Zukunft gerne benutzen** | Proband_in würde HMD-gestützte Sonographie, auch unter Einschränkungen, gerne in Zukunft nutzen | „Also ich denke, wenn ich sie besser einsetzen könnte, würde ich es auf jeden Fall probieren.“ (P6) |
| **M1: Machbarkeit** | Aussagen, welche möglicherweise limitierende Faktoren als positiv oder tolerabel bezeichnen |  |
| **M2: Bildqualität** | Ausreichende oder gute Bildqualität und -latenz | „Und die Bildqualität ist eigentlich auch ziemlich gut, muss man sagen.“ (P4) |
| **M3: Ergonomie** | Ausreichende bzw. tolerierbare ergonomische Eigenschaften des Systems | „Ich steh ja auch mal 6 Stunden im OP, also Körperhaltung wäre jetzt nicht so das Problem, wenn es da mal zackt.“ (P6) |
| **W1: Wahrnehmung** | Aussagen bezüglich der verwendeten Sinne und deren Zusammenspiel |  |
| **W2: Wahrnehmungsart** | Bezeichnung oder Nennung eines verwendeten Wahrnehmungssinnes | „Ich würde mal sagen 98% visuell, der Rest haptisch?“ (P6) |
| **W3: Kein Unterschied** | Kein Unterschied in Wahrnehmung bzw. dem Zusammenspiel der Sinnessindrücke zwischen HMD und konventionellem Monitor | „[Zusammenspiel der Sinnessindrücke] Würde ich als relativ ähnlich bezeichnen bei beiden.“ (P4) |
| **W4: Unterbewusste Propriozeption** | Die Wahrnehmung und Steuerung der Bewegung der Sonde erfolgt unterbewusst | „[…] ich guck selten wirklich auf den, also während der Untersuchung irgendwo noch auf den Patienten sondern lass mich da halt vom Gefühl leiten.“ (P2) |
Categories are denoted as letters (N, L, …), subcategories as digits following the category letter. The first subcategory of each category defines the general category and is used when a phrase belongs to the category, but not to any of the defined subcategories.

Participants are referred to as P and a number, for example P2 or P4.

| Description | Examples | Differentiations to similar categories |
|-------------|----------|----------------------------------------|
| **N1: Benefits** | Coded when a concrete or directly experienced/perceived benefit is described | Speculative or predicted benefits (e.g. for other applications and for other users) are coded as assessments, as are unspecific positive statements |
| **N2: Navigation facilitated** | HMD facilitates the localization of the ultrasound image in the anatomy and/or the transducer on the patient | For this category, only the effect on individual ultrasound images is relevant; if several images are combined or spatial correlation is required, N3 is to be coded |
| **N3: Improved 3D understanding** | HMD facilitates 3D understanding of anatomical structures and the correlation of several images | |
| **N4: Hedonistic aspects** | Phrases expressing enjoyment, amazement or novelty value of technology | Analytical statements such as ‘I think it’s useful’ are to be coded as Assessments |
| **L1: Limitations** | Is coded if participants mention a limitation of the HMD regarding this use case | Unspecific negative statements such as ‘I don’t think it’s useful’ are to be coded as Assessments |
| **L2: Angle of view** | Visibility or quality of the ultrasound image (viewed through the HMD) is limited due to the perspective rendering of the image | |
| **L3: Ergonomics** | Aspects of technical estup with HMD decrease physical comfort of participant | Statements which specifically point to the need for additional movement belong to category L5 |
| Description | Examples | Differentiations to similar categories |
|-------------|----------|----------------------------------------|
| **L4: Haptic input** | Using haptic input elements of the ultrasound system is harder when using the HMD | „but it was more difficult then to operate the system on the side […]“ (P3) |
| **L5: Movement required** | Visualization through the HMD requires users to move to see some views | „that’s a bit exhausting right now, that you have to rotate your head like this so that you’re always really aligned to the plane of the ultrasound image“ (P5) Not coded if movement was not executed („I would need to move“) - this rather belongs to category L2 |
| **L6: Finding views with HMD is difficult** | Certain ultrasound views/planes cannot be appropriately viewed with the HMD | „I really tried but I can’t get this with the HMD.“ (P2) |
| **L7: Optical Tracking** | The required line of sight between the trackers and the 3D camera limits the user in performing the task | „but if I try to point the spheres to the 3D camera like this, I can’t see anything on the patient anymore“ (P1) If limitations occur due to both tracking and angle of view, code L7 |
| **L8: Image quality** | Resolution, contrast or latency of the image are insufficient | „things feel a little delayed right now.” (P1) „I have to say that the images were a lot clearer there [on conventional ultrasound monitor]“ (P6) |
| **G1: Unfamiliarity and adaption** | Coded if statements describe an unfamiliar or confusing situation, but also if such a situation is overcome | |
| **G2: Unfamiliar** | Statements directly mentioning unfamiliarity | „It’s a little unfamiliar to see it like this“ (P3) |
| **G3: Adaption** | Coded if participants verbalize overcoming a confusing or unfamiliar situation | „Hm. Right. Liver. Okay. Getting better now.“ (P1, S. 2) „Starting to get used to it by now“ (P5) |
| **G4: Confusion** | Statements which directly mention confusing and/or implicitly express lack of understanding of the HMD application | „Okay, uh. I need to keep looking at this for a bit so I know what I’m seeing“ (P6) „Hm. Does that work? Maybe I need to do something differently with the...“ (P1) |
| **G5: Improvements through practice** | Prediction that confusion or limitations caused by the HMD can be reduced or eliminated through practice | „Well I think it will get better once I get used to it […]“ (P5) „I think if I was familiar with it, I could utilize it a lot better.“ (P6) Only to be coded if participants refer to themselves, otherwise code as Assessment |
| **E1: Assessments** | Statements regarding effects of HMDs in this use-case, which are not directly related to the experiment or cannot be directly derived from it | |
| **E2: Useful for needle placements** | Deemed as useful for needle placements | „In clinical practice I’d find this useful for biopsies.“ (P3, S. 4) |
| **E3: Useful for surgery** | Deemed as useful for intraoperative use | „For liver resections with ultrasound, to check where a tumor is, that would definitely be
| **Description** | **Examples** | **Differentiations to similar categories** |
|-----------------|--------------|------------------------------------------|
| **E4: Useful for teaching** | Deemed as useful for teaching medical students or junior physicians | „So I think it makes a lot more sense for teaching so that students can better understand ultrasound as sectional images“ (P3) |
| **E5: Useful for multi-modal image comparison** | Deemed as useful for comparing ultrasound images with other 3D data | „I'm rather thinking kinda special stuff, where you need to correlate some things with others, so intermodal, intermodal image comparison and stuff like that.“ (P5) |
| **E5: Would like to use HMDs in the future** | Participants would like to test HMDs in practice in the future, even with limitations | „So I think if I could use it better, I would definitely want to try.“ (P6) |
| **M1: Feasibility** | Statements which indicate that potentially limiting factors are acceptable or good |  |
| **M2: Image quality** | Sufficient or good image quality and latency | „And the quality of the image is quite good, too, I have to say.“ (P4) |
| **M3: Ergonomics** | Sufficient or tolerable ergonomic properties of HMD | „I stand in the OR for 6 hours straight occasionally, so body posture wouldn't be the issue if it's a little uncomfortable here and there“ (P6) |
| **W1: Perception** | Statements regarding sensory perceptions used by participants to complete the task |  |
| **W2: Perception type** | Naming of specific perception types | „I'd say 98% visually, otherwise haptics?” (P6) |
| **W3: No difference** | No differences in perception or the interaction of senses between using the HMD and the conventional monitor | „[Interactions between senses] I'd describe that as quite similar for both.“ (P4) |
| **W4: Subconscious proprioception** | Perception and control of the ultrasound prove is subconscious | „[..] I hardly ever really look at neither the probe nor anywhere on the patient, I’m simply following my feelings there.“ (P2) |