

Schlussbericht zur Projektförderung auf Ausgabenbasis – Teil II

Zuwendungsempfänger: Universität Leipzig – Medizinische Fakultät In- novation Center Computer Assisted Surgery	Förderkennzeichen: 19OI23017A
Vorhabenbezeichnung: Verbundprojekt: MIRACLE-5 Teilvorhaben: Mixed-Reality telemedizinische Assistenz und Kommuni- kation mittels 5G in lokalen Einsatzfeldern	
Laufzeit des Vorhabens: 01.11.2023-30.06.2025	
Berichtszeitraum: 01.11.2023-30.06.2025	

Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt beim Autor.

1 Ausführliche Darstellung der durchgeführten Arbeiten

In diesem Kapitel werden die durchgeführten Arbeiten des Teilvorhabens im Detail beschrieben. Die Darstellung orientiert sich an den Arbeitspaketen (AP1–AP5) der Vorhabensbeschreibung.

1.1 Anforderungsanalyse (AP 1) 1 Seite

Die Anforderungsanalyse zielte darauf ab, die klinischen und technischen Anforderungen an AR/XR-basierte telemedizinische Anwendungen detailliert zu erfassen und Spezifikationen präzise zu bestimmen, um daraus geeignete Netzwerk- und Anwendungskonzepte ableiten zu können. Sie umfasste daher

- Identifikation des geeigneten Workflows einer AR-Anwendung für die jeweiligen UseCases
- Daraus abgeleitet die Anforderungen an die AR-Hard- und Software
- Daraus abgeleitet die Anforderungen an die technische Vernetzung der telemedizinischen Nutzer

Die Analyse erfolgte durch Hospitationen, Expertengespräche und strukturierte Interviews mit medizinischem Personal aus den beteiligten Fachdisziplinen Geriatrie, Hals-Nasen-Ohrenheilkunde (HNO) und Dermatologie.

Im Bereich der Geriatrie wurden intensive Gespräche mit Klinikern geführt, um Abläufe und Anforderungen an geriatrische Telekonsile zu erfassen. Es zeigte sich, dass besonders die visuelle Beurteilung von Patienten und deren Mobilität sowie die Möglichkeit zur interaktiven Kommunikation entscheidend sind. Eine wichtige Erkenntnis war die Notwendigkeit einer klaren und zuverlässigen Dokumentation zur Risikobewertung und Behandlungsentscheidung, insbesondere vor chirurgischen Eingriffen. Dabei wurden konkrete Anforderungen an eine stabile Videoqualität mit mindestens Full-HD-Auflösung, flüssigen Bildraten von 30 fps sowie geringer Latenz (<150 ms) definiert.

In der HNO-Heilkunde wurde neben Experteninterviews auch die medizinische Lehre als Anwendungsfall betrachtet. Hier sind insbesondere Echtzeit-Annotationsfunktionen und die Möglichkeit zur gleichzeitigen Betrachtung von operativen Eingriffen durch mehrere Nutzer von Interesse für die Anwender. Die technischen Anforderungen umfassen eine hohe Farbtreue, eine Auflösung von Full-HD bis 4K sowie eine zuverlässige Synchronisation zwischen Audio- und Videostreams. Die Anforderungen an das Netzwerk umfassten niedrige Latenzen, zuverlässige Datenübertragung und minimale Paketverluste, um qualitativ hochwertige medizinische Entscheidungen treffen zu können.

Technisch wurde festgelegt, dass die Videokompression minimal gehalten werden muss (Codec H.265 oder AV1), um artefaktfreie Darstellungen sicherzustellen. Für alle Anwendungen galt zudem die Forderung nach klarer und störungsfreier Audioübertragung (Codec AAC oder Opus) bei mindestens 128–256 kbps Bitrate und einer Samplingrate von 48 kHz.

Es fanden Gespräche mit Klinik-IT und Klinik-MT (Medizintechnik) Personal statt, um die Integration der AR-Anwendungen in die Netze zu erörtern, vor allem da ursprünglich ein Test in zwei realen Kliniken vorgesehen war. Diese Gespräche fanden selten und in unstrukturierter Form statt mit der Erkenntnis, dass technisches Personal in Kliniken einen klaren Aufgabenhorizont hat und budgetbedingt in der gesamten Aufgabenplanung keine Ressourcen vorhanden sind, über diesen aktuellen Horizont zu planen. Aus technischer Sicht ergaben sich zwei wesentliche Erkenntnisse. Die Integration neuer

Hardware unterliegt vielen Regularien bei denen Nachweise über elektrische Konformität, IT-Sicherheitskonformität, etc. erbracht werden müssten, was für den Umfang des Projekts herausfordernd gewesen wäre. Diese sind allerdings wichtig für die spätere klinische Nutzung von AR-Anwendungen, die höchstwahrscheinlich als Medizinprodukt mit den dazugehörigen Vorschriften gelten. Die AR-Hardware hingegen könnte unter die "leichtere" MD-Comp Zertifizierung fallen. Die zweite Haupteigenheit war, dass eine integrierte Brille in einem separaten VLAN (virtuelles lokales Netzwerk) betrieben würde. Verschiedene VLANs untereinander und alle VLANs zum Internet sind mit (mehreren) Firewalls abgesichert. Dies wirkt sich positiv auf die Sicherheit aus, hat aber ein komplexes Tunneln des AR-Datenstromes zur Folge und lässt in Konsequenz keine niedrig latenten Anwendungen zu.

Aus den Hospitationen und Gesprächen mit dem klinischen Personal wurden somit spezifische Anforderungen an AR/XR-Anwendungen, die Video- und Audioqualität sowie die Netzwerkinfrastruktur abgeleitet. Diese Erkenntnisse bildeten die Grundlage für die weiteren Arbeitspakete im Projekt MIRACLE-5.

Konkret umfassen die Anforderungen mindestens Full-HD Videoauflösung, mindestens Latenzen unter 150 ms, eine störungsfreie Audioübertragung, einen artefaktfreien und ruckelfreien Videostream sowie minimale Kompression, um eine optimale diagnostische Qualität sicherzustellen. Die konforme IT-Integration wird die zukünftige Nutzung intersektoraler AR-Videokonsultationen vor Herausforderungen stellen, wobei der vom Projekt erarbeitete Vorschlag in Kapitel 1.3 als Blaupause dienen könnte.

Zur besseren Nachvollziehbarkeit wurden die identifizierten UseCases zusätzlich in Form von Workflows beschrieben. Im geriatrischen Setting umfasst der Workflow typischerweise die Vorbereitung der Konsilsitzung (Patientenauswahl im KIS), das Aufsetzen der AR-Verbindung mittels Magic Leap 2, die Durchführung der visuellen Untersuchung mit Annotationen sowie die abschließende Dokumentation der Ergebnisse. Im HNO-Bereich wurde der Workflow anhand von Lehrsituationen konkretisiert: Ein Operateur trägt die Brille während eines Eingriffs, während mehrere Studierende oder Kollegen die Operation per Telepräsenz verfolgen und über Annotationen Rückfragen stellen können.

Darüber hinaus wurden zwei kleinere UseCases eingebracht: erstens die Nutzung der AR-Brille für präoperative Konsultationen, bei denen Patientenmobilität visuell beurteilt wird; zweitens der Einsatz im Rahmen der studentischen Ausbildung, um interaktive Lehrszenarien zu ermöglichen. Diese UseCases dienen dazu, die Bandbreite der Anforderungen abzubilden und stellen sicher, dass auch praxisnahe Alltagsszenarien berücksichtigt wurden.

Ein weiterer wichtiger Aspekt der Anforderungsanalyse betraf die Datenintegration und -darstellung. Für die klinische Nutzung ist es entscheidend, dass relevante Patientendaten (z. B. Vitalparameter, Bilddaten, Anamnesenotizen) nicht nur sicher übertragen, sondern auch kontextbezogen im Sichtfeld der AR-Brille dargestellt werden. Die Analyse ergab, dass hierfür insbesondere eine intuitive Verknüpfung von 2D- und 3D-Daten sowie die Möglichkeit zur räumlichen Verankerung von Informationen (z. B. am Patientenbett) notwendig sind. Darüber hinaus wurde die klare Trennung zwischen synthetischen Testdaten und realen Patientendaten als Voraussetzung für klinische Pilotierungen definiert. Diese Anforderungen an die Datenintegration flossen unmittelbar in die Konzeption von Software- und Netzarchitektur ein.

Die Ergebnisse aus AP1 bildeten die Grundlage für die Konzeption der Software- und Netzwerkarchitektur in AP2. Durch die enge Einbindung von klinischem Fachpersonal konnte sichergestellt werden, dass die abgeleiteten Anforderungen praxisnah, medizinisch relevant und technisch realisierbar sind.

1.2 Konzeption der Software und Netzinfrastruktur (AP 2) 2 Seiten

Die primäre Herausforderung der Konzeptionsphase bestand darin, eine Software- und Netzwerkarchitektur zu entwickeln, die sowohl den Anforderungen an medizinische AR/XR-Anwendungen gerecht wird als auch sicher und zuverlässig in bestehende klinische IT-Infrastrukturen integriert werden kann. Aufgrund externer Faktoren und strategischer Entscheidungen wurde die ursprünglich geplante Kooperation mit Telefónica als Netzwerkanbieter verworfen und stattdessen auf ein eigenes Campusnetzwerk basierend auf Open5G Core und Hardware von SML gesetzt.

Die Softwarearchitektur basiert auf einer modularen Struktur, um Flexibilität und Skalierbarkeit sicher-

zustellen. Im Zentrum steht eine AR/XR-Plattform, die eine Echtzeit-Kommunikation zwischen medizinischem Fachpersonal ermöglicht. Die Plattform erlaubt sowohl Echtzeit-Annotationen als auch die simultane Betrachtung medizinischer Eingriffe. Als zentrale Anforderung galt dabei, eine performante Synchronisation von Audio- und Video-streams sicherzustellen. Die Schnittstellen der Software wurden so konzipiert, dass sie problemlos in klinische Informationssysteme integriert werden können, wenngleich aufgrund von Herausforderungen bei der klinischen IT-Integration eine alternative Verwendung synthetischer Daten gewählt wurde.

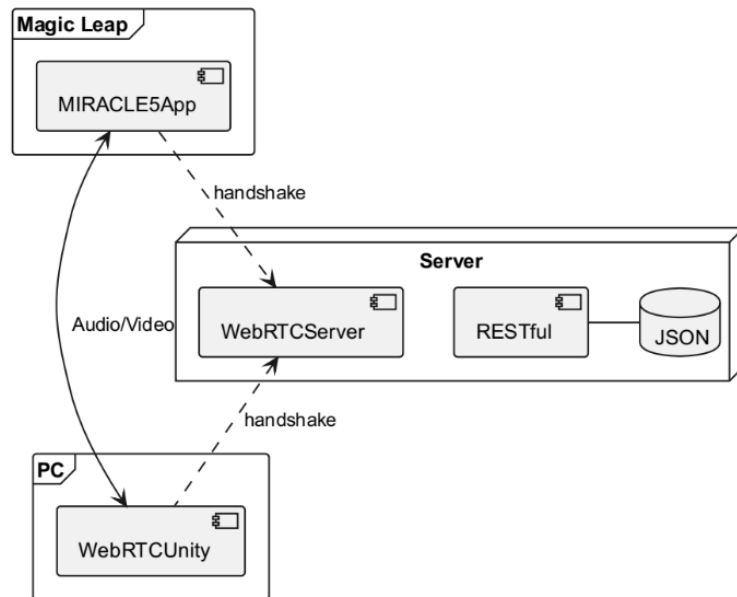
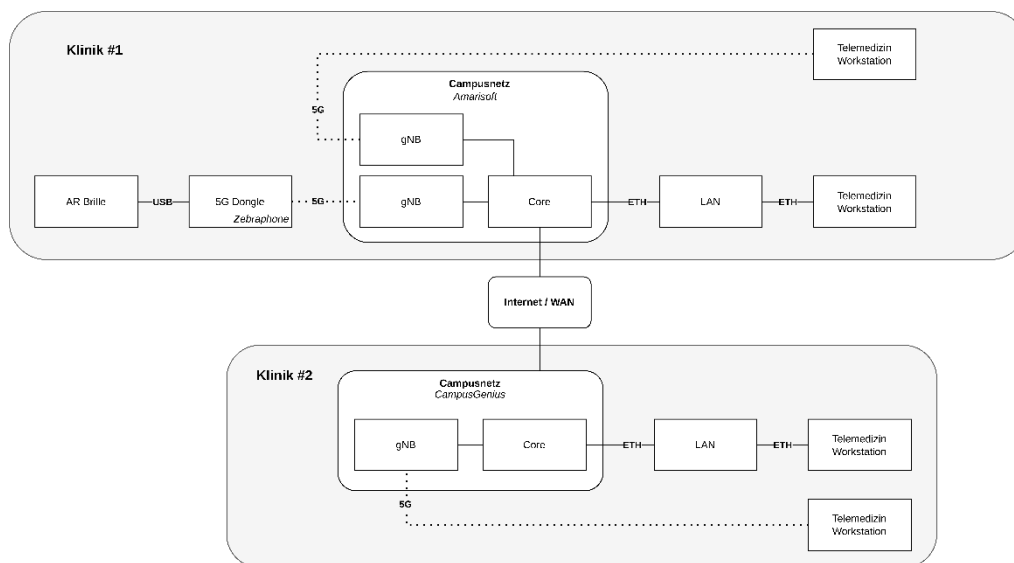


Abbildung 2: Grundsätzliche Anwendungsarchitektur nach Konzept-Phase

Abbildung 1 Architektur auf Applikationsebene - aus den LeFX Bericht

Die Netzwerkarchitektur wurde konzeptionell so ausgelegt, dass sie entweder als isoliertes Campusnetz innerhalb der Klinik oder alternativ als öffentliche 5G-Netz-Infrastruktur eingesetzt werden kann. Beide Ansätze wurden im Projekt theoretisch und praktisch betrachtet. Ein internes Campusnetz bietet den Vorteil einer vollständigen Kontrolle über die Infrastruktur und ermöglicht eine individuelle Anpassung der Netzwerkparameter, während die Nutzung eines öffentlichen 5G-Netzes den Vorteil hat, dass Netzwerkmanagement, Qualitätssicherung und Sicherheits Herausforderungen an einen externen ISP ausgelagert werden können. Letztere Option erschien aus klinischer Perspektive sogar vorteilhafter, da sie Ressourcen in der Klinik-IT schont, jedoch zu Lasten der Einhaltung bestehender VLAN-Sicherheitsarchitekturen geht, was potenzielle Konflikte mit etablierten Sicherheitsrichtlinien zur Folge hat.

Um eine weitere Flexibilität sicherzustellen, wurde die Architektur außerdem modular gestaltet, so dass der RAN-Teil auch mit WiFi realisiert werden konnte. Diese Entscheidung war einerseits dadurch bedingt, dass das finale 5G-Setup erst spät verfügbar wurde und andererseits, weil auf dem Papier 5G gegenüber WiFi nicht zwangsläufig überlegen ist. Die entwickelte modulare RAN-Lösung ermöglicht es, im selben Anwendungsfall vergleichende Messungen zwischen WiFi und 5G durchzuführen. Die Ergebnisse dieser Vergleichsmessungen werden detailliert in Kapitel 2.5 vorgestellt.



Verbindungsplan für MIRACLES

Version: 0.2
02.05.2025
Ivan Motyosh
Ken Paulitz

Technisch wurden umfassende Lösungen für Netzwerkparameter wie Quality of Service (QoS), Netzwerkslicing und Sicherheit entwickelt. Beim QoS standen minimale Latenzen und maximale Verfügbarkeit im Fokus, die für die medizinischen Anwendungen essenziell sind. Netzwerkslicing wurde eingesetzt, um dedizierte Ressourcen für kritische Anwendungen zu reservieren und eine zuverlässige Performance zu gewährleisten. Sicherheitstechnisch erfolgte die Netzkonzeption unter Berücksichtigung moderner Verschlüsselungstechnologien und strikter Zugangskontrollen, um sensible Patientendaten optimal zu schützen.

Zur Umsetzung wurden Anpassungen an bestehenden Netzwerken notwendig. Das Amarisoft-System, ergänzt durch nodeB-RAN-Zellen, erwies sich als äußerst flexibel und leistungsfähig. Das Open5G Core-System, geliefert von SML, wurde aufgrund seiner hohen Anpassungsfähigkeit gewählt. Anpassungen umfassten dabei die Optimierung von Upload- und Download-Slots sowie die detaillierte Konfiguration von Slicing- und QoS-Parametern, um eine reibungslose AR/XR-Nutzung zu gewährleisten.

Zusammenfassend erlaubt die entwickelte Netzwerk- und Softwarearchitektur eine flexible und skalierbare Umsetzung der AR/XR-Anwendungen, basierend auf einem offenen 5G-Campusnetz. Trotz notwendiger Kompromisse bei der Integration in bestehende Klinik-IT-Sicherheitsstrukturen stellt sie eine zukunftsfähige Grundlage dar, die sowohl praktische Vergleichsmessungen mit WiFi als auch eine sichere und performante Nutzung durch Netzwerkslicing und QoS-Optimierungen ermöglicht.

1.3 Integration in klinische Prozesse und Entwicklung der 5G-Infrastruktur (AP 3) 3 Seiten

Das ursprüngliche Arbeitspaket 3 „Anpassung der vorhandenen 5G-Netze“ zielte auf die Nutzung des Telefónica-Netzes im Helios Park Klinikum ab. Nachdem dieses Netz jedoch nicht mehr zur Verfügung stand, wurden die Aktivitäten neu strukturiert und auf zwei wesentliche Teilbereiche aufgeteilt: die

allgemeine Integration von XR-Videotelefonie in bestehende Klinik-IT-Architekturen und die Anpassung und Entwicklung der vorhandenen 5G-Netze, insbesondere des Open5G Core-Systems und der Amarisoft-Lösung mit nodeB-RAN-Zellen.

Die Integration eines Campusnetzwerks in die Klinik-IT-Architektur ist technisch komplex und unterliegt zahlreichen regulatorischen und organisatorischen Herausforderungen. Um ein internes Campusnetz erfolgreich in die Klinik zu integrieren, müssten die 5G-Netzwerkkomponenten an etablierte Schnittstellen zur Netzwerkverwaltung andocken, sie müssten darüber hinaus die gleichen Kryptographie-, Audit- und Kapselfunktionen unterstützen. Je weniger ähnlich die Verwaltung des 5G-Netzes von den bestehenden Kabelnetzen ist, desto mehr Aufwand müsste betrieben werden, um das 5G-Netz Parallelinfrastruktur zu betreiben. Dies ist ökonomisch unsinnig und im Regelbetrieb nicht realistisch.

Als praktikable und weniger aufwendige Alternative wurde im Projekt die Nutzung eines öffentlichen 5G-Netzes diskutiert. Der entscheidende Vorteil hierbei ist, dass alle Herausforderungen bezüglich des Netzwerkmanagements, der Qualitätssicherung und der Einhaltung regulatorischer und sicherheitstechnischer Anforderungen an einen externen Internet Service Provider (ISP) ausgelagert werden können. Ein solches Modell würde die internen Ressourcen der Klinik-IT erheblich entlasten. Um diese Option zu realisieren, wäre es erforderlich, mit dem ISP verbindliche Vereinbarungen hinsichtlich garantierter Servicequalität (QoS), Verfügbarkeit, Netzwerkslicing sowie Datenschutz und Datensicherheit zu treffen. Nach Einschätzung des Konsortiums eröffnet dies einen neuen Geschäftszweig für ISP, weswegen diese zu solchen Zusicherungen bereit sein könnten. Die Integration in die Klinikinformationssysteme (KIS) ist bei einem fremden Netz deutlich schwieriger. Jedoch liegt der Fokus der AR-Videotelefonie auf der Performance der Anwendung. Es müssen nicht hochdynamisch verschiedene Datenquellen hinzugezogen werden, es reicht ein Fallbezogener Ausschnitt aus der Patientenakte. Diesen Ausschnitt aus einer Benutzerschnittstelle des KIS zu extrahieren und in die mobile AR-Anwendung einzugeben ist für den Benutzer zwar ein Mehraufwand, jedoch ist dieser vergleichbar, wenn nicht geringer als der bisherige Aufwand, Daten zur Verfügung zu stellen und außerdem nicht echtzeitkritisch.

Für den Demonstrator wurden ein vorhandenes 5G-Netz des ICCAS und ein im Projekt erworbenes Netz genutzt.

Im Rahmen des Projekts wurde das vorhandene 5G-Campusnetz gezielt an die Anforderungen der telemedizinischen AR-/XR-Anwendungen angepasst. Als technische Grundlage diente das Amarisoft-System in Kombination mit nodeB-RAN-Zellen, die eine flexible und robuste Erweiterung der Netzwerkinfrastruktur ermöglichten. Durch die Anbindung mehrerer Zellen an den Amarisoft-Core konnte die Netzabdeckung im Testumfeld erheblich ausgeweitet werden, wobei Handover-Prozesse zwischen den einzelnen Funkzellen erfolgreich implementiert wurden. Eine besondere Rolle spielte die Anpassung der TDD-Pattern in den nodeB-Zellen, die ohne großen Konfigurationsaufwand vorgenommen werden konnte. Dadurch ließ sich insbesondere der Upload von Daten, etwa beim Streaming der Magic Leap 2 hin zu einem stationären telemedizinischen Arbeitsplatz, deutlich verbessern.

Darüber hinaus wurden verschiedene Funktionen des Netzes optimiert, die für den medizinischen Einsatz entscheidend sind. Dazu zählten die Einrichtung von Netzwerkslices und Quality-of-Service-Klassen zur gezielten Priorisierung von Datenströmen, die Implementierung von Bandbreitenbegrenzungen und die Minimierung von Latenzzeiten. Über die Zuordnung spezifischer IP-Ranges über die Konfiguration von Access Point Names (APNs) war es zudem möglich, das Routing granular zu steuern und so unterschiedliche Anwendungsszenarien abzubilden. Ein weiterer wichtiger Fortschritt bestand in der direkten Messbarkeit von Geschwindigkeit und Netzparametern am Core-System selbst, was eine

kontinuierliche Überwachung und Feinjustierung der Netzwerkkonfiguration erlaubte. Damit wurde die Grundlage geschaffen, um stabile und performante Echtzeitübertragungen zu gewährleisten, wie sie für XR-gestützte Telemedizin unabdingbar sind.

Mit dem ergänzend eingesetzten Open5G Core-System konnten auch die verschiedenen Inter-klinischen Szenarien abgebildet werden.

Lessons Learned: Im Verlauf der Arbeiten zeigten sich jedoch auch klare technische Grenzen der verfügbaren Endgeräte und Modems. Insbesondere der Einsatz externer 5G-Modems stellte sich als Engpass heraus: Je nach System traten erhebliche Treiberprobleme auf, und der Start- sowie Verbindungsaufbau der Modems nahm teils ungewöhnlich lange Zeit in Anspruch. Unter Android-basierten Plattformen wie dem Magic Leap OS bestand zudem kaum Unterstützung für USB-Modems, was den Betrieb erschwerte. Hinzu kamen zusätzliche Latenzen durch den Medienbruch zwischen Brille, USB-Hub, Modem und Core, die den Energieverbrauch erhöhten und die Mobilität einschränkten.

Diese Erfahrungen verdeutlichen, dass für den praktischen Einsatz in der Klinik zukünftig eine native 5G-Integration in XR-Headsets erforderlich ist. Aus den Anpassungen und Tests im Projekt lässt sich ableiten, dass moderne 5G-Systeme grundsätzlich die für XR-Anwendungen nötigen Qualitätsanforderungen erfüllen können, gleichzeitig aber dringend Verbesserungen in der Geräte- und Modemlandschaft notwendig sind. Wünschenswert wären robuste und schnell anbindbare 5G-Endgeräte mit stabiler Treiberunterstützung, die sich nahtlos in klinische Arbeitsabläufe integrieren lassen. Nur so können die Potenziale von 5G-gestützter Telemedizin langfristig ausgeschöpft werden. Auch sollte das Erstellen und Verteilen von eigenen eSIMs auf 5G-Campus-Netz ermöglicht werden.

1.4 Entwicklung und Implementierung der XR-Demonstratoren (AP 4)

Die Entwicklung der Anwendung im Rahmen von AP4 bildete den zentralen Schwerpunkt der technischen Projektarbeit der LeFX GmbH in enger Zusammenarbeit mit dem ICCAS. Basierend auf den in AP2 konzipierten Strukturen und Anforderungen wurde eine voll funktionsfähige, prototypische XR-Anwendung für die Magic Leap 2 umgesetzt. Ziel war es, zentrale Funktionen einer digital unterstützten Visite exemplarisch darzustellen und zugleich die technische Leistungsfähigkeit von 5G-basierten Übertragungswegen unter realitätsnahen Bedingungen zu testen.

Die Anwendung wurde mit Unity3D unter Nutzung aktueller XR-Entwicklungsstandards (OpenXR, MRTK3) realisiert und umfasste sowohl einen AR-Client als auch serverseitige Komponenten (REST-Backend, WebRTC-Kommunikation, Datenhaltung). Im Projektverlauf wurden mehrere zentrale Funktionsbereiche umgesetzt und getestet:

- **Räumliche Informationsdarstellung mit Spatial Anchors**, die es ermöglichten, Patientendaten direkt am Krankenbett einzublenden.
- **WebRTC-basierte Kommunikation**, bei der entfernte Nutzer das Sichtfeld der AR-Brille sehen und Annotationen in Echtzeit platzieren konnten.
- **Dokumentation durch Speech-to-Text und Bildintegration**, mit Verknüpfung von Screenshots/Fotos in einer virtuellen Patientenakte.
- **Testmodule zur Netzwerk-Performance**, die Bandbreite, Latenz und Stabilität systematisch erfassten und in der ICCAS-Testumgebung eingesetzt wurden.

Während der Entwicklung und Erprobung traten mehrere technische Herausforderungen auf. Besonders kritisch war die Sicherstellung einer stabilen Netzwerkverbindung, da externe 5G-Modems zusätzliche Latenzen verursachten und den Energieverbrauch der AR-Brille erhöhten. Im Kontext der digitalen Visite stellt die Audio-Video-Synchronisation die höchsten Anforderungen an das Netzwerk und die Softwarearchitektur, da bereits geringe Verzögerungen die Nutzbarkeit in klinischen Konsilen beeinträchtigen konnten. Diese wurden erwartet und traten im Projektdemonstrator auf, iterativ konnten sie auf ein für die Evaluation erträgliches Maß reduziert werden. Zudem kam es zu Medienbrüchen zwischen verschiedenen Übertragungswegen (USB-Hubs, externe Modems, WLAN-Fallback), die die Mobilität und Zuverlässigkeit der Anwendung einschränkten. Diese Erfahrungen flossen in die Optimierung des Demonstrators ein und unterstreichen die Notwendigkeit einer zukünftigen nativen 5G-Integration in XR-Headsets.

1.5 Technische Evaluierung (AP 5)

Die technische Evaluierung der entwickelten XR-Demonstratoren und der eingesetzten Netzwerkinfrastrukturen bildete den Abschluss der technischen Arbeiten im Projekt. Ziel war es, sowohl die Leistungsfähigkeit der Netzwerke unter realistischen Bedingungen als auch die Praxistauglichkeit der XR-Anwendungen im Zusammenspiel mit unterschiedlichen Übertragungswegen zu bewerten.

1.5.1 Evaluationsmethodik

Zur Bewertung wurden zentrale Netzparameter systematisch erfasst: Bandbreite, Latenz, Jitter und Packet Loss. Zum Einsatz kamen etablierte Messverfahren mit Wireshark, iperf3 und speziell entwickelten Skripten. Messungen wurden sowohl aktiv (durch das Generieren von Testtraffic) als auch passiv (durch Aufzeichnen realer XR-Sitzungen) durchgeführt. Die Messpunkte umfassten sowohl Endgeräte wie die Magic Leap 2 (über externes 5G-Modem) als auch stationäre Telemedizin-Arbeitsplätze. Ergänzend wurden verschiedene Kommunikationsszenarien untersucht – innerklinisch über Campusnetze, interklinisch über öffentliche Netze sowie hybride Szenarien.

Die Methodik zielte darauf ab, praxisnahe Bedingungen zu simulieren. Dazu gehörten Tests während der Bewegung innerhalb der Klinik (z. B. Raumwechsel mit aktiver Session), die Nutzung unterschiedlicher Netzwerktopologien (Campusnetz, WLAN 6, öffentliches 5G) sowie Belastungstests durch parallele Datenströme. Neben technischen Metriken wurde auch die Benutzererfahrung (Quality of Experience, QoE) dokumentiert.

1.5.2 Ergebnisse der Netzwerktests

Die Messungen zeigten deutliche Unterschiede zwischen 5G und WLAN. Das eingesetzte 5G-Campusnetz (Open5G Core mit nodeB-RAN und Amarisoft-System) erreichte konsistent niedrige Latenzen im Bereich von 8–15 ms, während WLAN 6 je nach Umgebung Werte zwischen 20–50 ms aufwies. Der Jitter lag im 5G-Netz stabil unter 2 ms, im WLAN-Netz hingegen häufig zwischen 5–10 ms. Hinsichtlich Bandbreite konnten in beiden Netzen ausreichend hohe Werte erzielt werden (5G: bis zu 2 Gbit/s Downlink, 400 Mbit/s Uplink; WLAN 6: bis zu 2,4 Gbit/s brutto, jedoch mehr schwankend). Besonders kritisch erwiesen sich Paketverluste: Während 5G nahezu verlustfrei arbeitete (<0,1 % Packet Loss), kam es in WLAN-Umgebungen regelmäßig zu merklichen Verlusten (>1 %), insbesondere bei Bewegung und Netzwechseln.

Hierbei stellte sich heraus, dass die (unvermeidliche) Verwendung externer 5G-Modems an der Magic Leap 2 zusätzliche Latenzen verursachte. Diese lagen typischerweise 5–10 ms über den Basiswerten.

Der Medienbruch (USB-Hub → Modem → Brille) führte zudem zu erhöhtem Energieverbrauch und verringerter Mobilität.

1.5.3 Ergebnisse der realistischen Leistungsbewertungen der XR-Lösungen

In praxisnahen Testszenarien – beispielsweise bei der Simulation eines geriatrischen Konsils oder eines HNO-Telekonsils – konnte die XR-Anwendung die Vorteile des 5G-Netzes ausspielen. Besonders in interaktiven Szenarien mit Live-Annotationen erwies sich die geringe Latenz als entscheidend für die Nutzbarkeit. Während einfache Videotelefonie auch über WLAN ausreichend funktionierte, waren AR-Annotationen über WLAN häufig durch Verzögerungen und Bildstabilitätsprobleme beeinträchtigt.

Die technische Evaluation zeigte zudem, dass AR-Sitzungen über 5G eine deutlich höhere Resilienz gegenüber Netzschwankungen aufweisen. Selbst bei Belastung des Netzes blieben die Video- und Audiostreams stabil und synchron. Im Gegensatz dazu traten in WLAN-Umgebungen unter Last häufig Artefakte, asynchrone Audio-Video-Darstellungen und im schlimmsten Fall Verbindungsabbrüche auf. Letztere könnten (und würden in einer Produktivsituation) durch ein aufwendigeres Softwaredesign abgefangen werden, die Nutzung von 5G als verschiebt diesen Aufwand in die Infrastruktur, was Softwareentwicklungszeiten reduzieren könnte.

Ein zentrales Ergebnis der Evaluation war die Bestätigung, dass 5G-Netze bei korrekter Konfiguration die für XR- Echtzeitfähigkeit-Telemedizin geforderten Latenzen erreichen können. Die Weiterentwicklung von Mobilfunk zu deterministische Latenz kombiniert mit der stabilen Bandbreite (ggf. durch Netzwerkslicing) stellen klare Vorteile für das zukünftige Mobilfunk gegenüber dem derzeitigen WLAN dar. Gleichzeitig wurde deutlich, dass die derzeitige Abhängigkeit von externen 5G-Modems für XR-Headsets ein technischer Engpass bleibt und zukünftige Geräte native 5G-Integration benötigen.

1.5.4 Zusammenfassung

Die technische Evaluierung belegt, dass 5G für XR-basierte Telemedizin signifikante Vorteile gegenüber WLAN bietet, insbesondere in Hinblick auf Latenz, Stabilität und Zuverlässigkeit. Die realistischen Tests mit den entwickelten Demonstratoren unterstreichen die Anwendbarkeit in mehreren klinischen Szenarien und zeigen klar die Grenzen von WLAN-basierten Lösungen auf. Die Ergebnisse bilden die Grundlage für die weitere Optimierung der Netzwerke und Geräte und fließen direkt in die Empfehlungen für die zukünftige Integration in klinische Prozesse ein.

Zusätzlich ist hervorzuheben, dass die im Rahmen der technischen Evaluierung am ICCAS erhobenen Netzwerkmessungen die praktischen Erfahrungen der LeFX GmbH bei der Entwicklung und Erprobung des XR-Demonstrators bestätigten. Insbesondere die höhere Deterministik des 5G-Campusnetzes im Vergleich zu WLAN spiegelte sich nicht nur in den gemessenen Parametern wieder, sondern auch in den Rückmeldungen zum Nutzungserlebnis (z. B. bei Annotationen oder Dokumentationsfunktionen). Damit ergänzten sich die beiden Perspektiven – Netzwerkanalyse durch ICCAS und XR-Anwendungsentwicklung durch LeFX und führten zu einer konsistenten Gesamteinschätzung der technologischen Machbarkeit.

1.6 Medizinische Evaluierung und Nutzerakzeptanz (AP 5)

Die medizinische Evaluierung des im Projekt entwickelten XR-Demonstrators erfolgte in enger Zusammenarbeit mit Fachpersonal aus der Geriatrie, der Hals-Nasen-Ohren-Heilkunde (HNO) sowie zu Teilen aus der Dermatologie. Ziel war es, die Akzeptanz, Benutzerfreundlichkeit (Usability) und den praktischen medizinischen Nutzen der entwickelten Lösung systematisch zu erfassen.

In allen beteiligten Fachdisziplinen zeigte sich eine grundsätzlich hohe Akzeptanz gegenüber der Nutzung von XR-Technologien im klinischen Alltag. Besonders positiv bewertet wurde die Möglichkeit, Patientendaten und visuelle Informationen direkt am Behandlungsort räumlich verankert darzustellen. Auch die Einbindung von Telepräsenz-Funktionalitäten wurde von den Endanwendern als klarer Mehrwert wahrgenommen, da dadurch externe Expertise zeitnah hinzugezogen werden konnte.

Die Usability der Technologie wurde insgesamt als intuitiv beschrieben, insbesondere durch die räumliche Navigation mit Spatial Anchors und die Sprachsteuerung. Verbesserungsbedarf ergab sich bei der Ergonomie der eingesetzten Hardware (Magic Leap 2), die für längere Einsätze im klinischen Umfeld noch zu schwer und unhandlich wirkt. Auch technische Aspekte wie die begrenzte Akkulaufzeit und der Wechsel von Peripheriegeräten (Headset/PC) wurden kritisch angemerkt. Besonders entscheidend für den Erfolg von AR-Anwendungen wird die Designsprache des Interfaces sein. Heutige Benutzer haben sich an die Ikonografie und Designsprachen von Desktop- und Tablet-Umgebungen gewöhnt. Diese können nur teilweise in die AR-Umgebung transponiert werden. Die Anbindung von Endnutzern und das Verstehen der Anwendungsdomain ist wie in vielen Softwareentwicklungen in den betrachteten Fällen absolut notwendig.

Aus medizinischer Sicht wurden vor allem zwei Nutzenaspekte hervorgehoben:

1. Die Möglichkeit zur schnellen visuellen Orientierung (z. B. Patientenübersicht am Krankenbett).
2. Die Option, Annotationen in Echtzeit direkt im Sichtfeld des Nutzers zu platzieren, wodurch fachübergreifende Diskussionen effizienter gestaltet werden konnten.

Die praktischen Tests wurden in enger Abstimmung mit dem Universitätsklinikum Leipzig durchgeführt. Dabei kam der XR-Demonstrator sowohl in kontrollierten Testumgebungen am ICCAS als auch in realitätsnahen Szenarien auf Station zum Einsatz.

- In der Geriatrie lag der Fokus auf der Unterstützung von Televisiten. Ärzt*innen testeten die räumliche Informationsdarstellung (Patientendaten an spezifischen Raumankerpunkten) sowie die Dokumentationsfunktion mittels Speech-to-Text. Rückmeldungen betonten den Mehrwert einer intuitiven Übersicht, forderten jedoch eine stärkere Integration in bestehende klinische Dokumentationssysteme.
- In der HNO wurden vor allem die Telepräsenz- und Lehrszenarien erprobt. Hier überzeugte die Möglichkeit, operative Eingriffe oder Untersuchungssituationen in Echtzeit mit räumlichen Annotationen zu begleiten. Kritisch angemerkt wurden kleinere Verzögerungen im Videostream und die Abhängigkeit von stabiler Netzwerkqualität.
- In der Dermatologie wurde der Demonstrator im Kontext der visuellen Begutachtung von Hautbefunden getestet. Besonders hervorgehoben wurde die Möglichkeit, hochauflösende Bilder gemeinsam zu betrachten und durch Annotationen zu markieren. Hier erwies sich die Bildqualität als entscheidend, während die Farbdarstellung und Latenz bei einzelnen Tests noch Optimierungspotenzial aufzeigten.

Die Feedback-Schleifen erfolgten iterativ: Nach jedem Testszenario wurden Rückmeldungen systematisch gesammelt, dokumentiert und in Abstimmung mit LeFX in die Weiterentwicklung zurückgeführt. So konnten u. a. die Menüführung vereinfacht, die Audioqualität verbessert und die Darstellung von Bilddaten optimiert werden.

Zusammengefasst bestätigt die medizinische Evaluierung die hohe Relevanz von XR-Technologien für den klinischen Alltag. Insbesondere die Kombination aus räumlicher Informationsdarstellung, Telepräsenz und Dokumentationsfunktionen wurde von den Endanwendern als innovativ und praxisnah eingestuft. Gleichzeitig wurde deutlich, dass für einen breiten klinischen Einsatz noch technische und ergonomische Verbesserungen notwendig sind. Die gewonnenen Erkenntnisse stellen eine wertvolle Grundlage für die weitere Entwicklung und klinische Erprobung dar. Insgesamt wurde der Demonstrator von den medizinischen Endanwendern als zukunftsweisend bewertet, mit hohem Potenzial zur Arbeitsentlastung und Qualitätssteigerung im klinischen Alltag.

1.7 Fazit und Ausblick

Das Teilvorhaben des ICCAS konnte die definierten Projektziele in wesentlichen Punkten erreichen. Ziel war es, die Machbarkeit von 5G-gestützten XR-Anwendungen für den klinischen Einsatz zu untersuchen und prototypisch zu demonstrieren. Dies wurde durch die Entwicklung, Implementierung und Evaluation eines XR-Demonstrators auf der Magic Leap 2 in enger Zusammenarbeit mit LeFx realisiert. Der Demonstrator zeigte praxisnah die Möglichkeiten der raumverankerten Visualisierung von Patientendaten, der Telepräsenz-Kommunikation und der sprachbasierten Dokumentation. Damit konnte die Kernfrage des Projekts – ob 5G-Campusnetze die technischen Voraussetzungen für eine klinisch nutzbare XR-Lösung schaffen – positiv beantwortet werden.

Lessons Learned (technisch und organisatorisch)

Die Ergebnisse zeigen, dass zentrale technische Entscheidungen im Projekt notwendig und angemessen waren:

- **Wechsel von Telefónica zu SML / Open5G Core:** Der Wechsel von Telefónica zu einer Eigenlösung mit SML/Open5G Core zeigte, dass eine umfassende Kontrolle über Netzparameter entscheidend ist, um in einer komplexen Umgebung eine stabile Erfahrung zu erhalten.
- **Einsatz modularer Software- und Netzarchitekturen:** Die Trennung von AR-Client, Backend und Kommunikationsmodulen ermöglichte eine flexible Anpassung an klinische Szenarien und erleichterte die Evaluierung unterschiedlicher Netzwerkkonfigurationen (5G vs. Wi-Fi).
- **Iterative Testschleifen mit Endanwendern:** Der kontinuierliche Austausch mit ärztlichem und pflegerischem Personal war entscheidend, um Usability-Probleme frühzeitig zu erkennen und die Anwendung schrittweise zu verbessern.
- **Nutzung externer 5G-Modems:** Deren Nutzung war technisch unvermeidlich, verursachte jedoch Medienbrüche und Ergonomieprobleme – ein klarer Hinweis auf die Notwendigkeit nativer 5G-Integration in XR-Geräte.

Organisatorisch wurde deutlich, dass eine enge Abstimmung zwischen ICCAS, LeFx und den klinischen Partnern notwendig war, um technische Entwicklungen an die realen Anforderungen der Klinik anzupassen.

Ausblick und Anschlussmöglichkeiten

Aufbauend auf den Ergebnissen ergeben sich folgende nächste Schritte:

- Identifizierung des UseCase mit dem größten marktwirtschaftlichen Potential
- Erstellung eines Produktnahen Prototypens
 - Dabei vor allem Optimierung der bereits angebrachten Audio-Video-Synchronisation
 - Aber auch vollständige Integration in die Kliniksysteme, Visualisierung komplexer medizinischer Daten (z. B. DICOM, Patientenakte)

- Reduktion von Medienbrüchen durch native 5G-Integration, ggf. mit Brillenherstellern und ergonomische Verbesserungen der Hardware.
- Klinische Validierung: Durchführung von Studien mit größeren Nutzergruppen für den Prototypen, um den klinischen Nutzen der Lösung wissenschaftlich zu belegen und die Integration in Routineabläufe zu prüfen.
- Transfer und Verwertung: Die erzielten Ergebnisse bieten eine belastbare Basis für Anschlussprojekte im Rahmen nationaler oder europäischer Förderprogramme. Darüber hinaus bestehen Potenziale für die Übertragung der entwickelten Technologien in weitere Anwendungsbereiche (z. B. chirurgische Telekonsile, Ausbildung und Training).

Insgesamt konnte das Projekt die Machbarkeit 5G-gestützter XR-Anwendungen im klinischen Kontext überzeugend demonstrieren. Die gewonnenen Erkenntnisse liefern nicht nur einen unmittelbaren Mehrwert für zukünftige Forschungs- und Entwicklungsprojekte, sondern schaffen auch eine tragfähige Grundlage für den langfristigen Transfer in die klinische Praxis.

2 Die wichtigsten Positionen des zahlenmäßigen Nachweises

Die beschriebenen Ausgaben waren insgesamt zweckmäßig, standen in unmittelbarem Bezug zu den Arbeitspaketen und ermöglichten die erfolgreiche Durchführung der vorgesehenen Evaluierungen.

2.1 Personalkosten

Der überwiegende Teil der Fördermittel entfiel auf Personalkosten. Sie umfassten die wissenschaftliche und technische Projektarbeit (Systemarchitektur, Softwareentwicklung, XR-Design, klinische Evaluation) sowie die Koordination mit den Projektpartnern. Durch den hohen Personalanteil konnte die kontinuierliche Weiterentwicklung der Demonstratoren und die enge Abstimmung mit den klinischen Endanwendern sichergestellt werden.

Der Ansatz von 42 PM wurde ausgeschöpft und minimal um 5PM überzogen.

2.2 Investitionen

Ein wesentlicher Teil der Projektmittel wurde für die Beschaffung von leistungsfähiger Hardware eingesetzt. Insgesamt wurden rund 15T€ für Laptops, AR-Headsets und ein 5G-Dongle ausgegeben. Diese Investitionen waren auch deshalb notwendig, weil trotz reduzierter Entwicklungsanteile die geplanten Anwendungen praktisch ausgeführt und erprobt werden mussten. Darüber hinaus liefen im Projekt Tests zu verteilten AR-Anwendungen, die ohne entsprechende Endgeräte und leistungsfähige Arbeitsstationen nicht hätten durchgeführt werden können.

Die Workstations wurden benötigt, um die technische Basis für die Ausführung der AR-Anwendungen, die Durchführung der Netzwerktests sowie die Steuerung des Demonstrators bereitzustellen. Sie dienten als Plattform für Rendering, Simulation und Messungen, insbesondere in Szenarien mit verteilter Rechenlast. Damit war es möglich, die im Projekt zentralen Fragestellungen zur Netzwerkintegration, zu Latenzen und zur Echtzeitfähigkeit von XR-Diensten unter realen Bedingungen zu beantworten.

Die XR Geräte (Magic Leap 2 Headsets) stellten die Kernkomponente für die praktischen medizinischen Use Cases dar. Sie wurden eingesetzt, um die klinischen Anwendungsszenarien – wie Konsile in der Geriatrie, HNO oder den ärztlichen Tele-Rat – realistisch zu erproben und Nutzerfeedback aus der Praxis zu erhalten. Die Brillen waren auch für die Tests verteilter AR-Anwendungen erforderlich, bei denen mehrere Nutzer gleichzeitig mit virtuellen Inhalten interagieren konnten. Nur so konnte überprüft werden, wie sich die Technik im Zusammenspiel mit klinischem Personal und komplexen Netzwerkanforderungen verhält.

Der 5G-Dongle von Askey war notwendig, um die Magic Leap 2 mit dem Campus-5G-Netz zu verbinden, da diese Brille kein integriertes 5G-Modem besitzt. Mit dem Dongle war es möglich, die Telemedizin-Szenarien im Zielnetzwerk zu betreiben und dabei auch die Performance unter 5G-Bedingungen zu messen. Gerade für die Untersuchungen zu verteilten AR-Anwendungen war die stabile und latenzarme Anbindung über 5G ein entscheidender Faktor, sodass der Dongle ein unverzichtbares Bindeglied zwischen Brillen und Netzwerk darstellte.

Die Anschaffungen waren somit notwendig, um den finalen Demonstrator aufzubauen, die praktischen Tests durchzuführen und die Projektergebnisse realistisch zu validieren. Auch wenn weniger eigene Software entwickelt wurde als ursprünglich geplant, konnten die geplanten Szenarien nur mit dieser Hardware umgesetzt werden, sodass die Projektziele dennoch erreicht und abgesichert werden konnten.

2.3 Unteraufträge

Eine große Position war mit 105 T€ die Beauftragung von Smart Mobile Labs (SML). Die geplanten Aufträge an Telefónica und MECSSware wurden hingegen nicht umgesetzt. Ursprünglich war vorgesehen, das bestehende Campusnetz am Park-Klinikum durch Telefónica und das ICCAS-Netz durch MECSSware betreuen und anpassen zu lassen. Diese Leistungen hätten vor allem projektspezifische Anpassungen an Software und Konfiguration, Softwareupdates, Wartungstätigkeiten und netzseitige Optimierungen umfasst, um die geplanten XR-Telemedizin-Anwendungen technisch absichern zu können. Im Projektverlauf wurde jedoch entschieden, stattdessen ein eigenes offenes 5G-System von SML zu beschaffen. Dieses bot größere Flexibilität bei der Anpassung des Netzes und konnte durch das ICCAS eigenständig eingerichtet und weiterentwickelt werden. Damit entfiel die Notwendigkeit externer Aufträge an Telefónica und MECSSware. Der Unterauftrag an SML umfasste also die Bereitstellung des Open5G-Core-Systems sowie Schulungen, damit das ICCAS in der Lage war, die Anpassungen selbst durchführen zu können.

3 Die Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Projektarbeiten

- Erläuterung der Bedeutung der einzelnen Arbeitspakete.
- Begründung der Angemessenheit der Projektaktivitäten in Relation zu Projektziel und -umfang (z.B. Umstrukturierung des Netzes, Anpassung der AR-App).

Die im Projekt durchgeführten Arbeiten erwiesen sich inhaltlich wie auch im Umfang als notwendig und angemessen, um die definierten Projektziele zu erreichen. Die einzelnen Arbeitspakete bauten logisch aufeinander auf und adressierten sowohl technische als auch klinische Anforderungen:

- **AP1 (Anforderungsanalyse):** Die enge Abstimmung mit klinischen Partnern stellte sicher, dass die entwickelten Lösungen praxisrelevante Anforderungen berücksichtigten. Die Erhebung klinischer Workflows (z. B. Visite, Telekonsil) bildete die Grundlage für die funktionalen und technischen Spezifikationen.
- **AP2 (Konzeption):** Die Entwicklung einer modularen Netzwerk- und Softwarearchitektur war essenziell, um die XR-Anwendung in einer realistischen 5G-Umgebung abbilden zu können. Die Umstrukturierung des Netzes – insbesondere der Wechsel von Telefónica zu SML/Open5G Core – war eine notwendige Anpassung, um die technische Machbarkeit innerhalb des Projektzeitraums sicherzustellen.
- **AP3 (Integration 5G-Infrastruktur):** Die Anpassung bestehender Netzwerke (Campusnetz, Amarisoft-System) ermöglichte die praktische Nutzung für XR-Szenarien. Ohne diese technischen Vorarbeiten wäre eine realitätsnahe Evaluation der Anwendung nicht möglich gewesen.
- **AP4 (Entwicklung XR-Demonstrator):** Die Erstellung eines funktionsfähigen Prototyps auf der Basis der Magic Leap 2 war der Kernschritt, um die definierten Use Cases in der Praxis zu überprüfen. Die iterative Weiterentwicklung der AR-App (z. B. Optimierungen bei Visualisierung, WebRTC-Kommunikation, Speech-to-Text) war eine direkte Antwort auf das im Projekt definierte Ziel, eine praxistaugliche Lösung zu erproben.
- **AP5 (Evaluation):** Die durchgeführten technischen und medizinischen Tests stellten sicher, dass Akzeptanz, Usability und klinischer Nutzen systematisch geprüft und dokumentiert wurden. Die Rückmeldungen aus den Feedback-Schleifen flossen kontinuierlich in die Weiterentwicklung des Demonstrators ein.

Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass alle Arbeitspakete zielgerichtet und im vorgesehenen Umfang umgesetzt wurden. Die getroffenen Anpassungen – insbesondere im Bereich der Netzwerkin-
tegration und der Applikationsentwicklung – waren notwendig, um die technische Realisierbarkeit zu gewährleisten und die Projektziele zu erreichen. Die Projektaktivitäten sind daher sowohl inhaltlich als auch organisatorisch als angemessen zu bewerten.

4 Der voraussichtliche Nutzen, insbesondere die Verwertbarkeit des Ergebnisses - auch konkrete Planungen für die nähere Zukunft - im Sinne des fortgeschriebenen Verwertungsplans

- Zusammenfassung des Nutzens für die beteiligten klinischen Anwender (Prozessoptimierung, medizinische Vorteile).
- Konkrete zukünftige Planungen (Weiterentwicklung, Vermarktung der Lösung durch LeFx, ICCAS LivingLab Integration).

Die im Projekt MIRACLE-5 entwickelten Demonstratoren zeigen, dass XR-gestützte Anwendungen in Verbindung mit 5G-Campusnetzen für klinische Prozesse einen deutlichen Mehrwert schaffen können. Für die beteiligten klinischen Anwender bedeutet dies vor allem Prozessoptimierung durch schnellere Informationsbereitstellung direkt am Patientenbett sowie medizinische Vorteile durch die Möglichkeit, relevante Daten (z. B. Bildgebung, Vitaldaten, Medikationshinweise) ortsgebunden und kontextsensitiv einzublenden. Auch die Telepräsenz mit räumlichen Annotationen wurde von den Nutzern als wesentliche Verbesserung der Verständlichkeit und Zusammenarbeit beschrieben.

Der praktische Nutzen liegt insbesondere in einer effizienteren Gestaltung von Visiten und Konsilen. Durch die Kombination aus „geteiltem Blick“, unmittelbarer Dokumentation und reduzierter Abhängigkeit von papierbasierten Workarounds wird sowohl die Arbeitsentlastung des medizinischen Personals als auch die Patientensicherheit unterstützt.

Hinsichtlich der Verwertbarkeit ist hervorzuheben, dass die Ergebnisse über den konkreten Demonstrator hinausgehen: Sie bilden eine technologische Grundlage für künftige Entwicklungen im Bereich digital unterstützter Klinikprozesse und können in nachfolgende Forschungs- und Transferprojekte eingebracht werden.

Für die nähere Zukunft bestehen bereits konkrete Planungen:

- **LeFx** wird die im Projekt entstandene Softwarearchitektur und die XR-Anwendung weiterentwickeln und hat dafür eine interne Roadmap erarbeitet, die zusätzliche Funktionen für einen möglichen Markteintritt vorsieht.
- **ICCAS** plant die Integration zentraler Komponenten in das LivingLab zur Demonstration gegenüber klinischen Partnern und für weiterführende Evaluationen.
- Darüber hinaus wird die Zusammenarbeit zwischen LeFx und ICCAS fortgeführt, um Anschlussprojekte zu initiieren, die sowohl auf klinische Pilotierungen als auch auf eine mögliche Kommerzialisierung der Lösung abzielen.

Das Projekt leistete so einen Beitrag zur klinischen Prozessoptimierung und schafft eine nachhaltige Basis für zukünftige Forschungs- und Marktaktivitäten.

5 Der während der Durchführung des Vorhabens dem Zuwendungsempfänger bekannt gewordenen Fortschritt auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen

Die Forschungslandschaft zu AR-verbesserten Telekonsilen und Telemedizin über 5G/6G-Netzwerke hat sich in den letzten zwei Jahren von experimentellen Ansätzen zu klinisch relevanten, technisch ausgereiften Systemen entwickelt. Diese Entwicklung zeigt sich besonders deutlich in der zunehmenden Integration von Edge Computing, KI-gestützten Algorithmen und fortschrittlichen Netzwerktechnologien. Die aktuelle Forschung konzentriert sich auf zwei Hauptrichtungen: die Verbesserung der technischen Infrastruktur für AR-Telemedizin und die klinische Validierung dieser Systeme. Während frühere Studien sich hauptsächlich auf Machbarkeitsnachweise konzentrierten, dokumentieren neuere Arbeiten ([5G Epicentre](#)) bereits konkrete klinische Anwendungen und Nutzererfahrungen. Ein systematisches [Review](#) von 2023 identifizierte 20 verschiedene AR-Geräte und -Plattformen, was die rasante technologische Diversifizierung in diesem Bereich verdeutlicht.

Die Entwicklung kollaborativer AR-Systeme markiert einen besonderen Fortschritt. Das [ARCollab-Projekt](#) demonstriert erstmals eine vollständig funktionsfähige Multi-User-AR-Anwendung für die kardiovaskuläre Chirurgieplanung, bei der mehrere Chirurgen und Kardiologen gleichzeitig in einer geteilten AR-Umgebung arbeiten können. Diese Innovation ersetzt traditionelle 3D-gedruckte Herzmodelle durch interaktive AR-Visualisierungen und ermöglicht Echtzeit-Kollaboration zwischen verschiedenen Standorten.

Die Integration von 5G-Technologie hat AR-Telemedizin einen Schritt zur klinischen Lösung herangebracht. Das [5G-EPICENTRE](#) System erreichte bei Tests eine durchschnittliche Latenz von 10,8 ms bei 66,8 Mbps Durchsatz und demonstrierte eine 30%ige Reduzierung des Energieverbrauchs der AR-Geräte durch Edge-basiertes Remote Rendering. Diese technischen Kennzahlen sind entscheidend für die Praktikabilität von AR-Systemen in Notfallsituationen, wo Batterielebensdauer und Reaktionszeit kritische Faktoren darstellen. Die klinische Validierung hat parallel zu den technischen Fortschritten stattgefunden. Eine [Studie](#) aus 2024 mit 364 Patienten zeigte, dass AR-Fernchirurgie bei Frakturoperationen ähnlich sicher und effektiv sein kann wie persönlich durchgeführte Operationen. Diese Ergebnisse werden durch ein umfassendes [Scoping Review](#) von 2025 unterstützt, das 21 Artikel über dynamische AR-Cues für Telementoring analysierte und positive klinische Ergebnisse dokumentierte. Das Projekt [CaringEyes](#) ermöglicht ärztliche Videosprechstunden über AR-Brillen und adressiert das Problem abnehmender ärztlicher Ressourcen in ländlichen Gebieten. Die 6G-Forschung konzentriert sich auf drei klinische Anwendungsfälle: Patientenüberwachung, kollaborative medizinische Teamarbeit und Smart Hospital-Anwendungen ([6G-Health](#)). Das [6G-PATH](#)-Projekt erforscht die Verbesserung der medizinischen Fernausbildung durch 6G- und XR-Technologien mit [ultra-niedriger Latenz](#). Die [VIRTEPEX-Pilotstudie](#) von 2025 dokumentierte eine 100%ige Abschlussrate ohne unerwünschte Ereignisse, wobei AR-gestützte Bewertungen präziser waren als traditionelle Telehealth-Methoden.

Die beschriebenen Fortschritte in der internationalen Forschungslandschaft unterstreichen die hohe Relevanz der im Projekt MIRACLE-5 verfolgten Ansätze. Insbesondere die Themen 5G-basierte Telepräsenz, AR-gestützte Kollaboration und klinische Validierung finden sich sowohl in aktuellen Großprojekten als auch in den Ergebnissen von MIRACLE-5 wieder. Damit wird deutlich, dass das Vorhaben nicht isoliert steht, sondern einen wichtigen Beitrag zur Weiterentwicklung und Einordnung solcher Technologien im klinischen Umfeld leistet.

6 Die erfolgten oder geplanten Veröffentlichungen des Ergebnisses

Die geplanten Publikationen beziehen sich auf die im Rahmen von MIRACLE-5 entwickelten und evaluierten Kernkomponenten: die XR-Demonstrator-Anwendung auf Basis der Magic Leap 2, die Integration in ein privates 5G-Campusnetz sowie die begleitenden klinischen und technischen Evaluierungen.

Es sind folgende Publikationen geplant:

1. „Die Verbesserung telemedizinischer Konsile durch AR-Videotelefonie“
 - o Medizinische Konferenz oder Journal
2. „Comparative Analysis of Wi-Fi 6 and Private 5G Campus Networks for Augmented Reality-Enhanced Telemedicine Applications“
 - o Technisches Journal, vorzugsweise IEEE.