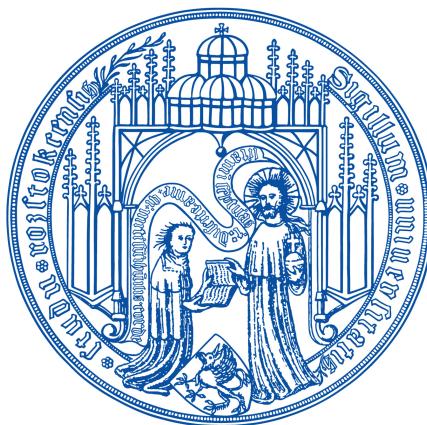

Entwicklung von 3D-Darstellungen mit der HoloLens zur Unterstützung der Vermittlung physikalischer Inhalte

Masterarbeit

Universität Rostock
Fakultät für Informatik und Elektrotechnik
Institut für Informatik



vorgelegt von: Matthias Kuhr
Matrikelnummer: 212207426
geboren am: 07.04.1993 in Rostock
Erstgutachter: Prof. Dr. Heidrun Schumann
Zweitgutachter: Prof. Dr. Oliver Staadt
Betreuer: Dr. Christian Tominski
Abgabedatum: 16. März 2019

SELBSTSTÄNDIGKEITSERKLÄRUNG

Ich erkläre, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig und nur unter Verwendung der angegebenen Literatur und Hilfsmittel angefertigt habe.

Rostock, den 16. März 2019

ZUSAMMENFASSUNG

TODO...

- HoloLens ein MR-Device mit speziellen Fähigkeiten und Einschränkungen
- Physik interessantes Anwendungsgebiet für MR und kommt mit ersten Anwendungen bereits zum Einsatz
- Ziel: HoloLens im konkretem Beispiel: Versuch Helmholtz-Spule zur Bestimmung des Erdmagnetfeldes einzusetzen und dadurch der Frage nachgehen, wie ein solcher Einsatz der HoloLens erfolgen kann, der die technischen Möglichkeiten und Einschränkungen berücksichtigt
- Was soll angezeigt werden? Wie soll es angezeigt werden? Wie soll damit interagiert werden?
- Lösung mit Darstellung von Magnetfeld, Stromfluss, Kompass und Messdaten konzipiert
- Umsetzung mit Unity entwickelt
- Bewertung anhand technischer Kriterien: Gut. Außerdem Positives Feedback. Inhaltliche Unterstützung durch die HoloLens: Gut.
- Zeigt: HL einsetzbar, unterstützt die Lehre, Anwendung jedoch stark auf den Anwendungsfall angepasst, um gute UX abzusichern
- Erweiterung und Übertragung auf weitere Anwendungsfälle durch Ergebnisse motiviert

ABSTRACT

Abstract ENG

INHALTSVERZEICHNIS

1 Einleitung	1
1.1 Motivation	1
1.2 Fragestellung und prinzipieller Lösungsansatz	2
1.3 Aufbau der Arbeit	2
2 Hintergrund	3
2.1 HoloLens	3
2.1.1 Einordnung der HoloLens	3
2.1.2 Die Hardware	5
2.1.3 Die Software und Interaktion	6
2.1.4 Implikationen für Anwendungsdesign	9
2.1.5 Empfehlungen zu Design und Umsetzung	10
2.2 Augmented Reality in der Lehre	14
2.2.1 Einsatz von AR in der Lehre	14
2.2.2 In der Physik	15
2.3 Auswahl des Experimentes und physikalischer Hintergrund	20
2.3.1 Auswahl des Experimentes	20
2.3.2 Spulen und Magnetfelder	21
2.3.3 Helmholtz-Spule	22
2.3.4 Versuchsaufbau und Ablauf	23
3 Anforderungen und Problemstellung	25
3.1 Anforderungen	25
3.1.1 Physikalische Seite	25
3.1.2 Technische Seite	27
3.2 Präzisierung der Problemstellung	27
4 Lösungsansatz	29
4.1 Design der AR-Umgebung	29
4.2 Designentscheidungen bezogen auf Infos	30
4.3 Designentscheidungen bezogen auf HoloLens	32
4.4 Wie erfolgt die Darstellung?	34
4.4.1 Das Magnetfeld - Echtzeitdarstellung	34
4.4.2 Magnetfeld - Simulationsdarstellung	39
4.4.3 Der Stromfluss	41
4.4.4 Der Kompass	42
4.4.5 Das Datenpanel	44
4.5 Interaktion	46

4.6	Implementierung	47
4.7	Zusammenfassung Design	49
5	Umsetzung	50
5.1	Aufbau des Systems	50
5.1.1	Client-Server Datenübertragung	50
5.1.2	Architektur der HoloLens-Anwendung	52
5.2	Implementierung	53
5.2.1	Implementierung der Darstellungen	54
5.2.2	Implementierung der Interaktion	58
5.2.3	Performance-Optimierungen	61
6	Ergebnisse und Diskussion	62
6.1	Ergebnisse	62
6.1.1	Unterstützung des Experimentes	62
6.1.2	Technische Umsetzung	64
6.1.3	Feedback	69
6.2	Diskussion	70
6.2.1	Erweiterbarkeit	71
6.2.2	Übertragbarkeit	73
7	Zusammenfassung und Ausblick	75
7.1	Zusammenfassung	75
7.2	Ausblick	75
A	Anhang A	76
A.1	Aufnahmen mit der HoloLens	76
	Literatur	78

1 EINLEITUNG

TODO...

Augmented Reality hat in den letzten Jahren immer mehr an Bedeutung gewonnen. Nicht zuletzt durch Fortschritte im Bereich der künstlichen Intelligenz und immer leistungsfähiger werdender Hardware eröffnen sich neue Möglichkeiten, um die Realität digital zu erweitern. In vielen Bereichen existieren bereits Anwendungen, die auf Augmented Reality Technologie aufbauen. TODO...

1.1 Motivation

TODO...

Die Physik stellt auf natürliche Weise ein interessantes Anwendungsgebiet für Augmented Reality dar.

- Physics holo.lab learning experience: using smartglasses for augmented reality labwork to foster the concepts of heat conduction [Str+17b]
- Augmenting Microsoft's HoloLens with vuforia tracking for neuronavigation [Fra+18]
- HoloMuse: Enhancing Engagement with Archaeological Artifacts Through Gesture-Based Interaction with Holograms [Pol+17]
- Augmented Reality ein aktuelles Innovationsgebiet
- Aktuelle Bedeutung durch Fortschritte bei Hardware und KI
- HoloLens erweitert Realität durch virtuelle 3D Objekte
- Einsatz in der Physik interessant
- Existierende Beispiele: Thermodynamik + HoloLens, Elektromagnetismus und WebCam-AR
- Versuch Helmholtz-Spule aus 2. Beispiel aufgreifen
- Problem: Wie kann HoloLens genutzt werden, um Experiment durch virtuelle Darstellungen anzureichern?
- Motivation z.B. Einbinden von Informationen zu Versuchsaufbau, Visualisierung nicht sichtbarer physikalischer Größen und Vorgänge z.B. Magnetfeld und Stromfluss

1.2 Fragestellung und prinzipieller Lösungsansatz

Die HoloLens ist ein AR-Device mit eigenen technischen Eigenschaften und Einschränkungen, die Auswirkungen darauf haben, ob und wie das Gerät in verschiedenen Anwendungsszenarien genutzt werden kann. Zum Einsatz im Bereich der Physik finden sich aktuell nur wenige Beispiele in der gängigen Literatur. Wie die Brille in der physikalischen Ausbildung dabei unterstützen kann, Konzepte und Zusammenhänge zu vermitteln, ist daher eine interessante Fragestellung. Die vorliegende Arbeit dringt in das Gebiet vor, indem sich näher mit der Unterstützung von Laborversuchen durch die HoloLens befasst wird. Dies geschieht anhand eines konkreten Beispiels: Die experimentelle Messung des Erdmagnetfeldes mit Hilfe einer Helmholtz-Spule.

Die konkrete Fragestellung dieser Arbeit lautet daher:

Wie kann die HoloLens in dem konkreten Anwendungsfall eines physikalischen Versuches genutzt werden?

Es wird untersucht, mit welchen virtuellen Elementen der Versuch durch die HoloLens angereichert werden kann und wie diese Integration erfolgt. Der Lösungsansatz basiert darauf, die technischen Möglichkeiten der AR-Technologie zu nutzen, um nicht direkt sichtbare physikalische Eigenschaften in ihrem realen Kontext anzuzeigen und durch eine räumliche und zeitliche Einbettung in Zusammenhang zum Versuchsaufbau zu setzen. Gleichzeitig werden jedoch technische Limitierungen berücksichtigt, um negative Auswirkungen auf die Nutzererfahrung zu vermeiden. Ziel ist es, eine AR-Lösung mit der HoloLens zu entwickeln, die auf der einen Seite wichtige physikalische Eigenschaften und Zusammenhänge sichtbar und erfahrbar macht, und auf der anderen Seite eine komfortable Nutzung ermöglicht.

1.3 Aufbau der Arbeit

Die vorliegende Arbeit ist wie folgt aufgebaut. Kapitel 2 erläutert notwendige Hintergrundinformationen zur Technik der HoloLens, deren Anwendung in der Lehre sowie die physikalischen Hintergründe des Versuches. Kapitel 3 kristallisiert die Anforderungen für den konkreten Anwendungsfall heraus und präzisiert die Problemstellung. In Abschnitt 4 werden die gewählten Lösungsansätze vorgestellt, deren Implementierung in Kapitel 5 erörtert wird. Kapitel 6 stellt die Ergebnisse heraus und diskutiert diese im Rahmen der Fragestellung. Abschließend fasst Kapitel 7 die Ergebnisse zusammen und gibt einen Ausblick.

2 HINTERGRUND

Die Arbeit baut auf bestehende Erkenntnisse aus drei Bereichen auf. Ausgangspunkt ist die HoloLens mit ihrem technischen Hintergrund. Daraus ergeben sich für diese Arbeit technische Anforderungen und Einschränkungen, die es zu berücksichtigen gilt. Daher wird die Technik mit ihren Implikationen in Kap. 2.1 vorgestellt.

Außerdem fußt die Arbeit auf bestehenden Erkenntnissen und Ansätzen aus der Lehre, insbesondere im Bereich der Physik. Aufgrund der Aktualität der HoloLens existieren hier zum Zeitpunkt dieser Arbeit nur begrenzt Arbeiten auf Basis des Gerätes. Allerdings finden sich bereits ähnliche Ansätze zur der Anwendung von Augmented Reality in der Physik mit anderen Geräten. Deshalb wird auf Forschungsergebnisse aus dem weiteren Bereich des Einsatzes von Augmented Reality zurückgegriffen, die in Kap. 2.2 erörtert werden.

Auf Basis der beiden vorangegangenen Abschnitte stellt schließlich Kap. 2.3 den gewählten Laborversuch genauer vor. Die Informationen zum Hintergrund der physikalischen Vorgänge sind notwendig, um geeignete Darstellungen mit der HoloLens zu entwickeln.

2.1 HoloLens

Die HoloLens ist ein von Microsoft entwickeltes *Head-Mounted Display* (HMD), das seit 2016 auf dem Markt ist. Das Gerät ist in der Lage, virtuelle Darstellungen in der Umgebung des Trägers zu verankern und anzuzeigen. Anders als bei anderen Geräten wird dabei die Umgebung nicht durch eine Kamera wahrgenommen, wie z.B. bei einer Anwendung mit einem Smartphone, sondern ist direkt mittels durchsichtiger Displays sichtbar. Einen Eindruck von dem Gerät vermittelt Abbildung 1. Kurz vor der Fertigstellung dieser Arbeit wurde das Nachfolgemodell "HoloLens 2" vorgestellt. Gegenstand dieser Untersuchung ist deshalb die erste Generation. Bevor näher auf die technischen Eigenschaften dieser Lösung eingegangen wird, soll zunächst eine kurze Einordnung der Gerätes erfolgen.

2.1.1 Einordnung der HoloLens

Microsoft ordnet die Brille im Bereich der *Mixed Reality* (MR) ein. Der Begriff wurde von Paul Milgram und Fumio Kishino in deren Arbeit "*A Taxonomy of Mixed Reality Visual Displays*" im Jahr 1994 eingeführt [MK94]. Die Autoren stellen das Konzept eines *Virtual Continuum*s vor, einem kontinuierlichen Spek-



Abbildung 1: Die HoloLens in der Developer Edition [Coo18].

trum zwischen vollständig realer und vollständig virtueller Umgebung. Augmented Reality findet sich damit auf der linken Seite des Spektrums wieder, dem entgegen steht Augmented Virtuality auf der rechten Seite. Als Mixed Reality wird der gesamte Bereich des Continuums bezeichnet, der zwischen den beiden Extremen “völlig real” und “völlig virtuell” liegt. Schema 2 skizziert diesen Zusammenhang.



Abbildung 2: Virtual Continuum eingeführt von Paul Milgram [MK94]

Beim Begriff der *Augmented Reality* (AR) folgt diese Arbeit der gängigen Definition von Ronald T. Azuma [Azu97]. Dabei werden unter AR Techniken zusammengefasst, die es dem Nutzer erlauben, die reale Welt zu sehen, welche überlagerte oder eingebettete virtuelle Objekte enthält. Dafür hat eine Technik drei Charakteristiken aufzuweisen, sie:

1. Kombiniert reales und virtuelles
2. Ist interaktiv (in Echtzeit)
3. Steht in einem dreidimensionalen, räumlichen Zusammenhang

Die HoloLens deckt mit ihren technischen Möglichkeiten vor allem den linken Bereich des Spektrums ab. Viele Anwendungen liegen deshalb im Teilbereich Augmented Reality. Das trifft auch auf diese Arbeit zu. Deshalb, und im Sinne einer konsistenten Bezeichnung, verwendet die Arbeit im Weiteren stets den AR-Begriff.

Die technischen Eigenschaften und genutzten Techniken des HMDs bringen verschiedene Implikationen und Einschränkungen für Anwendungen auf der HoloLens mit sich. Daher soll nun auf die technischen Aspekte näher eingegangen

werden.

2.1.2 Die Hardware

Bei dem Device handelt es sich um einen eigenständigen Computer, auf dem eine spezielle Version von Windows 10 läuft. Die Brille arbeitet also völlig autonom und ist nicht auf externe Hardware wie z.B. zusätzliche Rechen- und Batterieeinheiten angewiesen.

Das Display

Kernstück des Gerätes ist das durchsichtige, stereoskopische Display, mit dem die virtuellen 3D-Objekte angezeigt werden. Durchsichtig bedeutet, dass das Display für Licht von außen durchlässig ist und der Nutzer somit wie durch eine Brille seine Umgebung sehen kann. Virtuelle Objekte werden zusätzlich dazu angezeigt, indem Licht über optische Wellenleiter in das Display geleitet wird, welches das Licht dann auf die Augen reflektiert.

Anwendungen werden mit 60 Frames pro Sekunde dargestellt. Bei der Anzeige handelt es sich jedoch um ein *Color Sequential Display*, bei dem die drei Farben Rot, Grün und Blau nacheinander dargestellt werden. Pro Bild werden folglich drei Einzelbilder (je eins pro Farbe) gezeigt, was eine Framerate von 240 Hz ergibt.

Es handelt sich dabei um ein stereoskopisches Display, bei dem pro Auge separat ein Bild dargestellt wird. So ermöglicht die HoloLens dem Träger die stereoskopische Wahrnehmung dreidimensionaler Objekte. Die beiden Bilder werden in einem festen Abstand von 22 mm zueinander dargestellt. Außerdem beträgt die Distanz, auf die sich die Augen einstellen müssen, damit Bilder als scharf wahrgenommen werden (Akkommodation), etwa zwei Meter und ist ebenfalls fest.

Das Tracking

Um die Hologramme im Raum verankern zu können, benötigt die HoloLens Informationen über ihre exakte Position und Orientierung im Raum. Beides erarbeitet das Gerät allein aus einem Zusammenspiel der verschiedenen internen Sensoren und ist nicht auf externe Markierungen angewiesen, es handelt sich um sogenanntes *Inside-Out Tracking*. Das Vorgehen basiert dabei auf zwei Strategien.

Zum einen erfasst die HoloLens die Oberflächenstruktur der Umgebung über Tiefen- und Stereokameras. Während der Nutzer sich durch den Raum bewegt,

wird dies immer weiter vervollständigt und verbessert. Dieses Vorgehen wird *Spatial Mapping* genannt und kann auch von Anwendungen genutzt werden, um mit Objekten der realen Welt zu interagieren. Eine Darstellung der optischen Sensoren ist in Abb. 3 enthalten.

Zum anderen kommt eine inertiale Messeinheit zum Einsatz. Über die Beschleunigungs-, Rotations- und Magnetflusssensoren können Änderungen in Position und Ausrichtung der Brille gemessen werden. Bei diesem Vorgehen summieren sich Messfehler im Laufe der Zeit jedoch stetig weiter auf und die Positionsschätzung wird zunehmend unzuverlässiger. Daher wird ein Zusammenspiel mit der Raumerkennung genutzt.

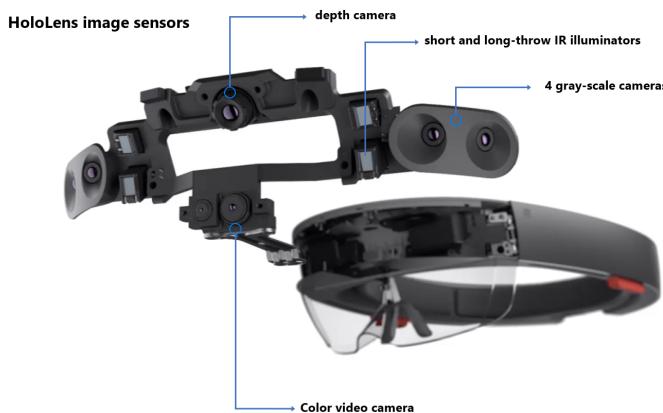


Abbildung 3: Überblick über die optischen Sensoren der HoloLens [Coo18]

Einen Überblick über die verwendete Hardware gibt Tabelle 1.

2.1.3 Die Software und Interaktion

Auf der HoloLens läuft eine spezielle Version von Windows 10. Diese benötigt weniger Ressourcen im Vergleich zu einem herkömmlichen PC und hat daher auch einen eingeschränkten Funktionsumfang. Anwendungen werden in Form von UWP Apps bereitgestellt. Hier unterstützt Microsoft die Entwicklung mit Unity und stellt entsprechende Toolkits zur Verfügung.

Die Steuerung durch den Nutzer erfolgt auf vier verschiedene Arten:

- Blickrichtung (Orientierung des Kopfes)
- Handgesten
- Sprachbefehle
- Externe Eingabegeräte (Controller, Maus, Tastatur, etc.)

Kategorie	Eigenschaft
Anzeige	1268 x 720 Pixel pro Auge 60 Hz Bildwiederholrate Blickfeld ca. 34° (diagonal), 16:9 Format
Prozessor	Intel 32-Bit Prozessor @ 1.0 GHz
Grafik	Microsoft Holographic Processing Unit (HPU)
Arbeitsspeicher	2 GB RAM 1 GB HPU RAM
Speicher	64 GB Flash Speicher
Kamera	2 MP Foto / HD Video Front-Kamera
Sensoren	Inertiale Messeinheit (Accelerometer, Gyroskop, Magnetometer) Zwei Stereo Kameras 120° x 120° Tiefenkamera Vier Mikrofone Ambient Light Sensor
Akku	2-3h Akkulauzeit
Gewicht	579 Gramm
Konnektivität	WiFi, BLE, USB 2.0, 3.5 mm Audio Jack
Audio	Lautsprecher mit Raumklang-Unterstützung
Steuerung	Gestensteuerung Sprachsteuerung HoloLens Klicker, Controller, Maus, Tastatur

Tabelle 1: Technische Spezifikation der HoloLens [Coo18].

Handgesten werden von der HoloLens automatisch erkannt und an die Anwendung in Form von Events weitergegeben, auf welche dann reagiert werden kann. Hier sind aktuell verschiedene Klick-Gesten zu nennen, durch die bekannte Mausfunktionen wie Klick, Click-and-Hold, Doppelklick und Drag-and-Drop abgebildet werden. Der Cursor orientiert sich dabei an der aktuellen Blickrichtung: Es wird automatisch das Objekt angeklickt, das als erstes von einer zentralen, vorwärts gerichteten Linie getroffen würde. Außerdem gibt es eine spezifische Handgeste zum aufrufen des Hauptmenüs.

Darüber hinaus nimmt die HoloLens englische Wörter als Sprachbefehle an, die sich auch kombinieren lassen. So kann eine Anwendung die Phrase "Hello World" als Keyword registrieren und dann darauf reagieren. Über Bluetooth lassen sich weitere Eingabegeräte anschließen: Den mit der HoloLens mitgelieferten Klicker, der die Klick-Geste ersetzen kann, aber auch eine Tastatur oder

ein Controller lassen sich nutzen.

Das Mixed Reality Toolkit

Das *Mixed Reality Toolkit* (MRTK) ist ein quelloffenes Toolkit, das elementare Funktionen für die Entwicklung von Mixed Reality Anwendungen, insbesondere auch für die HoloLens, bereitstellt. Dazu gehört beispielsweise ein Objekt, das den zuvor genannten Cursor implementiert, aber auch Funktionen, die das Spatial Mapping auswerten. Für die Entwicklung mit Unity gibt es das Toolkit als Unitypackage, das unter anderem folgende Features bereitstellt:

- Kameraobjekt mit den korrekten Einstellungen für die HoloLens
- Stabilisiertes Cursorobjekt mit Animationen für verschiedene Klicks
- Manager-Objekte, die Steuerung von Inputs und des Spatial Mappings erlauben
- Skripte für Standard Interaktionen wie Drag-and-Drop und Skalierung
- Für HoloLens angepasste Materialien und Shader
- Vorgefertigte und anpassbare UI-Elemente wie Buttons, Tooltips, Icons und Dialoge

Für die Entwicklung mit dem Toolkit und der HoloLens existiert ein umfassendes Repertoire aus Dokumentation, Beispielen, Guidelines, Einführungen und Hinweisen.

Aufnahmen von der HoloLens

Die HoloLens bietet außerdem die Möglichkeit, Fotos von Anwendungen zu machen, indem das gerenderte Bild mit dem der Kamera überlagert wird. Von dieser Funktion wird in der vorliegenden Arbeit Gebrauch gemacht, um einen Eindruck von der Nutzererfahrung wiederzugeben. Allerdings ist die Qualität dieser Aufnahmen deutlich eingeschränkt und weicht von der tatsächlichen Nutzererfahrung ab. Die wesentlichen Einschränkungen sind dabei:

- Stark vergrößertes Sichtfeld
- Andere Auflösung mit geringerer Pixeldichte
- Verfälschte Farben und Transparenzen
- Verfälschte Positionierung
- Aufnahmen nicht möglich, wenn Kamera durch Anwendung genutzt wird

Die Umstände führen dazu, dass beispielsweise Text, der für den Nutzer gut lesbar ist, ggf. auf der Aufnahme stark verpixelt und daher gar nicht zu lesen ist. Dies gilt es bei der Einschätzung solcher Aufnahmen zu beachten, worauf an entsprechender Stelle jedoch nochmals hingewiesen wird. Eine detailliertere Beschreibung der Effekte findet sich im Anhang.

2.1.4 Implikationen für Anwendungsdesign

Die technischen Eigenschaften der HoloLens haben Auswirkung auf Design und Nutzung von Anwendungen. Dazu gehören auch technisch bedingte Einschränkungen sowie zu berücksichtigende Aspekte für die Usability und Nutzererfahrung. Im Folgenden soll auf ausgewählte solcher Zusammenhänge hingewiesen werden.

Tracking

Ein wichtiger Punkt ist, das Tracking nicht zu behindern, da die Darstellungen andernfalls nicht korrekt im Raum positioniert werden können. Für die Stereo- und Tiefenkamera sind sehr dunkle und transparente Materialien problematisch, da hier kaum (Infrarot-) Licht reflektiert wird und so entsprechende Gegenstände nicht erkannt werden. Spiegelnde Materialien sind daher ebenfalls ungünstig.

Display

Die Displays sind, vergleichbar mit einem Beamer, in der Lage den Hintergrund zu überblenden, nicht jedoch ihn abzudunkeln. Dementsprechend ist kein Schwarz darstellbar. Wie transparent Objekte auf der HoloLens erscheinen, hängt folglich auch vom Hintergrund und der Umgebungshelligkeit ab. Ein sehr heller Hintergrund kann von der HoloLens nicht vollständig überblendet werden.

Außerdem hängt die Transparenz virtueller Objekten von ihrer Farbe ab. Ein blauer Pixel leuchtet nur in jedem dritten Frame auf, ein weißer hingegen in jedem Frame, da die Farben sequentiell dargestellt werden.

Bedingt durch die Displaytechnik wirken Objekte scharf, wenn sich die Augen auf eine Distanz von zwei Metern einstellen (Akkommodation). Die Augen sind jedoch daran gewöhnt, dass nah liegende Objekte eine andere Akkommodation erfordern, als weiter entfernte. Dies kann vor allem bei sehr dicht liegenden Objekten dazu führen, dass Nutzer sich unwohl fühlen oder die Objekte nicht richtig erkennen können.

Im Zusammenhang der Akkommodation spielt hier auch die Konvergenz der Augen eine Rolle. Darunter versteht man die Bewegung der Augen aufeinander zu, sodass der Punkt, in dem sich die Gesichtslinien treffen, näher kommt. Dieser Vorgang ist wichtig, damit Objekte nicht doppelt gesehen werden. Akkommodation und Konvergenz sind auf natürliche Weise gekoppelt: Um ein dicht liegendes Objekt zu betrachten laufen die Augen weiter zusammen und erhöhen ihre Brechkraft. Dieser Effekt wird auch Akkommodation-Konvergenz-Reflex genannt. Beim Tragen der HoloLens kann es jedoch dazu kommen, dass

dieses Zusammenspiel aufgebrochen wird.

Angenommen ein Nutzer fokussiert ein reales Objekt in einer Entfernung unter zwei Metern. Jetzt wird ein virtuelles Objekt räumlich vor dem realen Objekt positioniert. Jetzt müssen Akkommodation und Konvergenz gegenläufig arbeiten: Die Augen müssen sich aufeinander zu bewegen, die Brechkraft dabei jedoch abnehmen, da sie sich auf zwei Meter anpassen muss. Dies steht im Gegensatz zum Akkommodation-Konvergenz-Reflex und kann die Nutzererfahrung negativ beeinflussen.

Sowohl für Akkommodation als auch Konvergenz gilt jedoch, dass die Unterschiede mit zunehmender Distanz kleiner werden und die Probleme deshalb vor allem bei kurzen Distanzen auftreten.

Hardwareressourcen

Die Hardwareressourcen der HoloLens sind mit einer CPU und GPU mit jeweils 1 GHz und 1GB RAM stark limitiert. Anwendungen sollten daher möglichst ressourcenschonend sein. Auf rechenintensive Operationen wie z.B. Schattenberechnungen oder Kantenglättung muss meist verzichtet werden.

Framerate

Dabei ist es von besonderer Bedeutung, dass die Anwendung möglichst konstant 60 Bilder pro Sekunde ausgibt. Um die Hologramme im Raum stabil und ohne Ruckeln oder Zittern anzuzeigen, müssen selbst feinste Kopfbewegungen ausgeglichen werden. Dazu nutzt die HoloLens ein spezielles Verfahren:

Bevor eine Szene in die Render-Pipeline geht, trifft die Brille anhand der Sensordaten eine Vorhersage darüber, in welcher Position und Ausrichtung sich die Brille befinden wird, wenn das zu errechnende Bild dargestellt wird. Anhand dieser Schätzung wird die Kamera-Position und -Ausrichtung für die Szene festgelegt und anschließend gerendert. Eine längere oder variierende Renderzeit bedeutet damit auch eine unzuverlässige Schätzung. Das kann zu instabil wirkenden Darstellungen führen, z.B. in Form von Zittern oder Ruckeln. Deshalb empfiehlt Microsoft, die Framerate von 60 FPS stets aufrecht zu erhalten.

2.1.5 Empfehlungen zu Design und Umsetzung

Damit Einschränkungen umgangen und negative Auswirkungen vermieden werden können, gibt es bereits einige Designempfehlungen und Richtlinien sowie Empfehlungen zur Implementierung. Die Dokumentation zu Windows Mixed Reality umfasst hier einige Kriterien, Vorschläge und Hinweise, von denen besonders relevante hier vorgestellt werden sollen.

Qualitätskriterien

Als Referenz dafür, wie gut eine Anwendung technische Einschränkungen berücksichtigt, kann eine Liste von Qualitätskriterien dienen, anhand derer Anwendungen bewertet werden können [Coo]. Diese deckt viele der zuvor erläuterten Probleme wie z.B. der Abstand zu Objekten ab. Jedes Kriterium ist mit einer Beschreibung versehen, unter welchen Umständen es als optimal erfüllt, erfüllt oder nicht erfüllt gilt. Eine Kurzfassung relevanter Kriterien ist in Tabelle 2 zusammengestellt.

Kriterium	Kurzbeschreibung
Framerate	Gibt die Anwendung konstant 60 FPS aus?
Stabilität der Hologramme	Weisen Hologramme bei Bewegungen Ruckler, Sprünge, Drift, Wackeln, Wippen oder ähnliches auf?
Positionierung	Sind Hologramme im Verhältnis zu realen Objekten korrekt positioniert?
Komfortzone	Liegen Distanz und Betrachtungswinkel in den empfohlenen Bereichen?
Tiefen Wechsel	Bedingt die Anwendung häufige Fokuswechsel?
FOV-Grenzen	Beeinträchtigen die Begrenzungen des FOV die Nutzererfahrungen?
Input Interaction Clarity	Werden konsistente, bekannte und geeignete Eingabemethoden geboten?
Anpassung an Nutzerposition	Passen sich Darstellungen der Position des Nutzers an?
Interaktive Objekte	Sind interaktive Objekte als solche erkennbar?
Ladevorgänge	Erhält der Nutzer Feedback über länger laufende Operationen?

Tabelle 2: Kurzfassung der Qualitätskriterien. Eine ausführliche Version mit genauen Kriterien und Methoden zur Evaluierung findet sich in [Coo].

Positionierung von Objekten

Zur Anordnung von Objekten gibt es einige Design-Guidelines, von denen ausgewählte hier genannt werden sollen. Die Dokumentation nennt die Folgenden Richtlinien:

- Distanz zur Kamera optimal bei 2m, Komfortzone 1-5m, Blickwinkel zwischen 0° und 35°
- Größe für interaktive Objekte min. 1,5° - 3° Grad in der Vertikalen

- Positionierung möglichst nah an Spatial Anchors und der Stabilization Plane

Distanz

Objekte sollten typischerweise aus einer Distanz zwischen einem und fünf Metern betrachtet werden, um die zuvor erläuterten Probleme mit der Wahrnehmung zu vermeiden. Deshalb sollten Objekte ausgeblendet werden, die zu nah kommen. Neben der Distanz spielt auch der Blickwinkel in der vertikalen eine Rolle. Damit ein Anwender die Darstellungen angenehm betrachten kann ist es wichtig, eine angenehme und natürliche Kopfposition zu ermöglichen. Hier wird ein Blickwinkel zwischen 0° und 35° unterhalb der Horizontlinie empfohlen.

Größe

Weiterhin ist die Größe von Objekten von Bedeutung. Das gilt besonders dann, wenn sie mit dem an die Kopfbewegungen gekoppelten Cursor anvisiert werden müssen. Zu kleine Objekte wären für den Anwender schwer zu treffen. Ein Winkel zwischen $1,5^\circ$ und 3° des Sichtfeldes dienen hier als Orientierung. Allerdings sollten die Darstellungen auch nicht zu groß sein, da sie sonst schon bei geringen Kopfbewegungen durch die Begrenzung des Displays abgeschnitten werden.

Um Objekte wie z.B. Menus und Dialoge, die nicht fest im Raum verankert sind, anzupassen, stellt das Mixed Reality Toolkit verschiedene Funktionen wie z.B. Billboarding oder Tagalong zur Verfügung, die Abstand, Orientierung und Skalierung entsprechend der Nutzerbewegung automatisch anpassen.

Stabilisierung

Die HoloLens maximiert die Stabilität von Hologrammen gegen eine ausgewählte Ebene, die von der laufenden Anwendung dynamisch gesetzt werden kann. Hologramme sollten daher, sofern sie gerade betrachtet werden, möglichst nah an dieser Ebene liegen, um stabil zu wirken.

Performance Optimierungen

Da die Framerate maßgeblichen Einfluss auf die Stabilität von Hologrammen hat und die Hardwareressourcen limitiert sind, gibt es eine Reihe von empfohlenen Optimierungen und Hinweisen, um die Performance einer Anwendung zu verbessern. Diese umfassen unter anderem:

- Single Pass Instanced Rendering verwenden
- Z-Puffer Größe auf 16 Bit setzen
- Full-Screen Post Processing (z.B. FXAA) vermeiden
- Shader anpassen / vereinfachen

- Physics ausschalten
- Overdraw reduzieren

Um die Performance bei der Entwicklung im Blick haben zu können gibt es einige Tools. Die HoloLens stellt über ein Webinterface einen Performance-Monitor zur Verfügung. Dieser gibt Auskunft über die Auslastung von Ressourcen wie CPU und GPU, ähnlich zum Windows Taskmanager. Außerdem verfügt Unity über einen Profiler, der detailliertere Informationen zum Renderingprozess liefert.

Weitere Empfehlungen

Aus ihren Erfahrungen und dem Nutzerfeedback aus mehreren HoloLens-Applikationen geben Zimmer et. al. einige weitere Empfehlungen [Zim+17]. Im Folgenden ist eine Auswahl an für diese Arbeit besonders relevanten Aspekten zusammengefasst:

- Einen sichtbaren Cursor in der Mitte des Blickfeldes für die Auswahl bzw. das Anklicken von Objekten nutzen
- Begrenzungen des Field-of-View (FOV) beachten: Wenn möglich Objektgröße so anpassen, dass diese ganz dargestellt werden können, da andernfalls Objekte weniger präsent wirken
- Die Einbettung von Objekten kann durch visuelle Anhaltspunkte wie Verdeckung oder Schatten unterstützt werden
- Spatial Mesh für grobe Verdeckung nutzbar, für genauere Verdeckung können reale Objekte nachmodelliert werden
- Alternative Interaktionsmöglichkeiten (z.B. Klicker) können hilfreich sein, wenn Nutzer Probleme mit Gesten oder der Sprachsteuerung haben
- Eine Einführung in die Anwendung und insbesondere die Steuerung kann hilfreich sein, da der Umgang mit der HoloLens oder ähnlichen Geräten für Anwender meist ungewohnt ist

Nach diesen technischen Voraussetzungen soll nun beleuchtet werden, wie das Gerät und andere AR-Lösungen bereits in der Lehre eingesetzt werden.

2.2 Augmented Reality in der Lehre

Ausbildung und Training sind ein wichtiges Anwendungsgebiet für Augmented Reality Technologie. In der Literatur findet sich ein breites Spektrum an Arbeiten zum Einsatz von AR zur Vermittlung von Lerninhalten und zum Training. Einige Arbeiten beleuchten die Anwendung von AR aus dem Gesichtspunkt der Lerntheorie, Psychologie und Kognitionsforschung [Mar+17; San+14]. Andere nähern sich dem Thema aus Sicht konkreter Anwendungsbeispiele und stellen speziell entwickelte AR-Lösungen vor [Str+17a; Ami+18; Buc+09; Hug+05]. Außerdem gibt es eine Reihe von Studien zu den Auswirkungen von AR-Technologie auf das Lernverhalten, den Lernerfolg und die Nutzererfahrung [Ibá+14; Li+11; JA10; Akç+16; Str+17b]. Einen Überblick über die Forschung zum Einsatz von AR bei Lernanwendungen geben unter anderem die Arbeiten von Bacca et. al. und Chen et. al. [Che+17; Bac+14].

Im ersten Schritt beleuchtet das Kapitel kurz allgemeine Erkenntnisse aus der Forschung und stellt dann bestehende Arbeiten zum Einsatz von AR in der Physik vor.

2.2.1 Einsatz von AR in der Lehre

In der gängigen Literatur gibt es ein zunehmendes Maß an Arbeiten zur Nutzung von erweiterter Realität in Lernanwendungen [Bac+14; IDK18]. Gerade in den Bereichen von Naturwissenschaften und Medizin finden sich hier Beispiele. Oft wurden Anwendungen für Schüler auf Mittel- und Oberstufenniveau sowie angehende Studierende konzipiert. Dabei geht es meist darum, einen Sachverhalt zu erklären und zusätzliche Informationen anzuzeigen. In diesem Zusammenhang werden unter anderem Simulation und Gameification eingesetzt.

Die verwendete Hard- und Software variiert dabei. Einige Arbeiten setzen auf Lösungen, die eine Webcam und einen Laptop nutzen. Mit der zunehmenden Verfügbarkeit von Smartphones und Tablets finden sich auch viele Ansätze, die ein solches Gerät nutzen. In der Kategorie der Head Mounted Displays finden sich aufgrund der mangelnden Verfügbarkeit entsprechender Devices vor allem aktuelle Arbeiten auf Basis der HoloLens. Um Darstellung im Raum zu positionieren finden typischerweise Marker-basierte Verfahren Anwendung.

Als positive Auswirkungen von AR-Anwendungen nennen die Arbeiten [Che+17; Bac+14; San+14] unter anderem:

- Positiver Lerneffekt

- Höheres Motivationslevel und stärkere Interaktivität
- Positivere Einstellung und stärkere Einbindung
- Verstärkte Kollaboration

2.2.2 In der Physik

Auch in der Physik finden sich in der gängigen Literatur bereits einige Ansätze, die AR-Technologie nutzen. Die Idee, physikalische Experimente in AR durchzuführen, ist nicht neu und es finden sich für mehrere Bereiche der Physik Arbeiten. Insbesondere im Bereich Magnetismus und Elektrodynamik finden sich Beispiele für Anwendungen mit AR [Ibá+14; Mat+13; Man+11; Buc+09]. Aber auch in den Fachgebieten Thermodynamik [Str+17a; Str+17b], Elektrik [Akç+16; Ami+18; JPL18] und Mechanik [Li+11; JA10; KM08] finden sich Arbeiten. Die gewählten Ansätze variieren dabei. Oft besteht das Ziel in der Darstellung physikalischer Sachverhalte wie z.B. Magnetfelder. Andere Lösungen zielen auf ein kollaboratives Erlebnis ab oder aber sollen Experimente unterstützen. Einige ausgewählte Beispiele sind in Abb. 4 abgebildet.

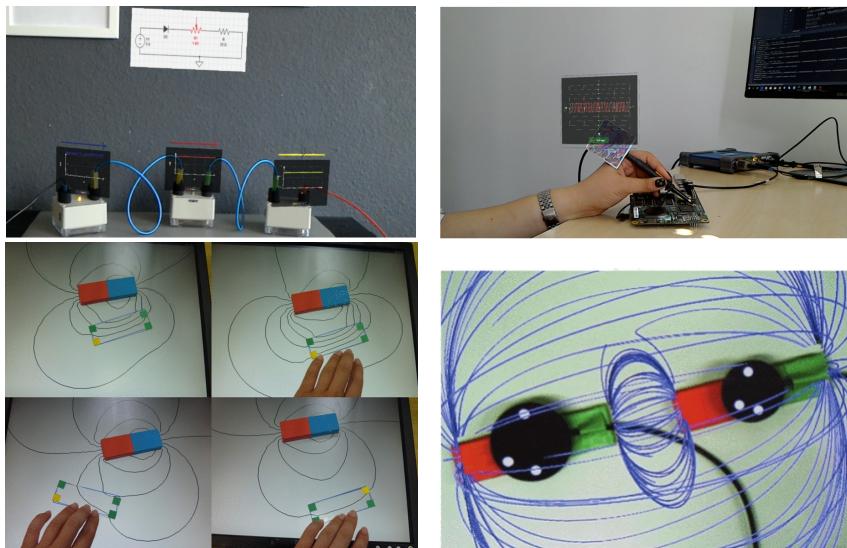


Abbildung 4: **Oben Links:** Experimente mit elektrischen Schaltungen, unterstützt durch AR mit HoloLens [Ami+18]. **Oben Rechts:** Messungen an elektrischen Schaltungen werden durch HoloLens mit Echtzeitdaten angereichert [JPL18]. **Unten Links:** Webcam-basierte Darstellung von Feldlinien eines Stabmagneten [Mat+13]. **Unten Rechts:** Video-See-Through HMD zeigt Feldlinien für zwei Stabmagneten [Man+11].

Diese Arbeit baut besonders auf zwei bestehenden Arbeiten auf. Die eine befasst sich ebenfalls mit der Anwendung von AR für eine Helmholtz-Spule. Die andere erweitert ein Experiment mit einer HoloLens, jedoch für einen anderen Versuch.

Beide Arbeiten sollen daher im Folgenden näher vorgestellt werden.

AR in der Elektrodynamik

Die erste Arbeit wendet AR im Bereich der Elektrodynamik an und präsentiert unter anderem eine Darstellung des Magnetfeldes einer Helmholtz-Spule. Buchau et. al. stellen eine Arbeit vor, in der ein Verbund aus optischen Markern, Webcam, Laptop und Server genutzt wird, um Magnetfeldlinien für verschiedene Objekte anzuzeigen [Buc+09]. Über die optischen Marker wird die genaue Position und Ausrichtung der Objekte relativ zur Kamera bestimmt. Die Feldlinien werden dann entsprechend in das Bild der WebCam eingebettet und auf dem Laptop angezeigt. Abbildung 4 zeigt zwei Screenshots der Anwendung.

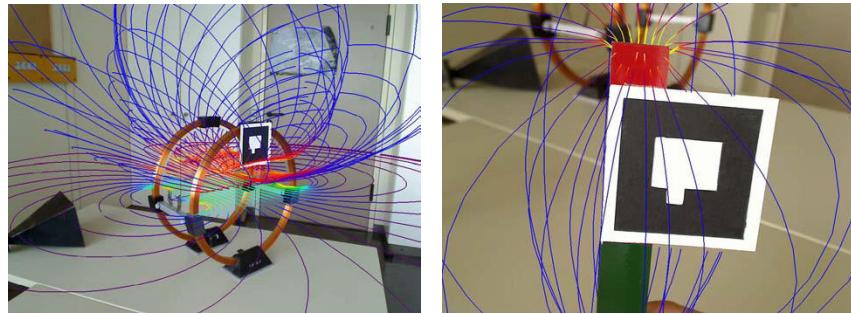


Abbildung 5: **Links:** Berechnete Feldlinien für Helmholtz-Spule in drei ausgewählten Ebenen. **Rechts:** Feldlinien eines Stabmagneten.[Buc+09]

Die Berechnung der Feldlinien erfolgt auf Basis der Finite Elemente Methode auf einem Server. Die Feldstärke ist dabei zusätzlich über die Farbe der Feldlinien codiert. Die Einbettung der errechneten Linien in die realen Objekte wird neben der perspektivisch korrekten Darstellung über Verdeckung erzielt. Das geschieht mittels virtuellen Objekten, die den realen maßstabsgetreu entsprechen. Diese werden dann anhand der Marker mit den realen Gegenständen überlagert und ausschließlich in den Z-Puffer gerendert. Dadurch werden Feldlinien, die sich hinter einem Magneten oder Spulenteil befinden, nicht dargestellt. Die vorgestellte Anwendung zielt dabei vor allem auf den Einsatz in einem Unterrichtsraum ab, indem das Bild vom Laptop über einen Beamer für alle Teilnehmer sichtbar gemacht wird.

Die Autoren halten fest, dass Augmented Reality eine anschauliche Methode zur Visualisierung elektromagnetischer Felder ist. Sowohl Lernende als auch Experten könnten dabei leicht die Charakteristiken der Felder mit den realen Objekten verknüpfen. Diese Einschätzung stützt die Motivation der vorliegen-

den Arbeit, die Felddarstellungen für die Durchführung eines Experimentes in eine Helmholtz-Spule einzubetten.

Ziel der vorgestellten Anwendung ist vor allem die Visualisierung realer physikalischer Gegebenheiten in ihrem natürlichen Kontext. Diese wird jedoch durch die Limitierungen der verwendeten Hardware eingeschränkt. Die Wahrnehmung erfolgt indirekt über den Laptop und beschränkt sich auf ausgewählte Perspektiven. Diese sind begrenzt durch die Beweglichkeit der Webcam und die Positionierung der Marker. Letztere nehmen außerdem aufgrund ihrer Größe¹ einen nicht unerheblichen Teil des Sichtfeldes ein.

Die vorliegende Arbeit setzt hier an und soll eine direkte Betrachtung des Magnetfeldes durch die HoloLens ermöglichen, bei der sich ein Nutzer frei um die Spule bewegen kann und die Felddarstellung nicht durch Marker beeinträchtigt wird. Außerdem sollen mehrere, teils interaktive Felddarstellungen geboten werden.

AR in der Thermodynamik

Die zweite Arbeit kommt aus dem Bereich der Thermodynamik und verwendet die HoloLens. Strzys et. al. stellen *holo.lab* vor, eine Augmented Reality Anwendung die im Kontext eines physikalischen Laborversuches genutzt wird [Str+17a]. Dabei handelt es sich um ein Experiment aus der Thermodynamik, bei dem ein Metallstab gleichzeitig von der einen Seite erhitzt und von der anderen gekühlt wird. Nach kurzer Zeit ergibt sich über die Länge des Stabes ein Temperaturverlauf, der mit einer Infrarotkamera gemessen werden kann. Abbildung 6 zeigt den Versuchsaufbau sowie die Szene aus Sicht eines Nutzers mit der HoloLens. In einem sich anschließenden Paper führen die Autoren eine Nutzungsstudie durch und weisen einen kleinen, positiven Effekt bei der Lernleistung nach [Str+17b].

Die Messdaten der Infrarotkamera werden nun in Echtzeit an die HoloLens übertragen, die diese dann auf drei Arten darstellt:

1. Ausgewählte, numerische Werte als Text
2. Temperaturverlauf als Graph (zweidimensionale Darstellung)
3. Falschfarbdarstellung über ein eingebettetes 3D-Modell, das den Metallstab überlagert

Dabei hat der Nutzer die Möglichkeit, einzelne Darstellungsformen ein- und auszublenden. Die Autoren schildern den Hintergrund des Designs der Anwendung

¹Die Marker müssen so groß sein, damit die Positionierung ausreichend genau erfolgen kann.

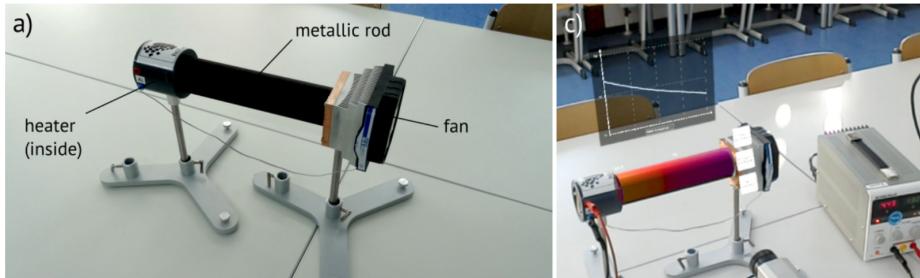


Abbildung 6: **Links:** Der zu erhitze Metallstab. **Rechts:** Laufendes Experiment aus Sicht eines Nutzers. [Str+17a]

wie folgt:

“The main focus of this design is to visualize the invisible and thus to extend human perception to new regimes, e.g., temperature and heat, thereby strengthening the connection between theory and experiment.

In this realization the MR setting not only has the advantage of intrinsic contextuality, but also spatial and time contiguity which is supposed to support the learning process of the students. Moreover, the just-in-time evaluation of the data yields the possibility for the students to directly examine the process itself and the parameter involved, and immediately compare the outcome to theoretical predictions which we believe to enhance the links between theory and experiment.”

Die hier vorliegende Arbeit baut direkt auf genau diesen Ansatz auf und überträgt jenen auf den Versuch mit der Helmholtz-Spule. So fließen die beschriebenen Erkenntnisse, die auf der Forschung im Bereich E-Learning fußen, in diese Arbeit mit ein.

Allerdings wird das Konzept nicht nur übertragen, sondern dahingehend erweitert, dass das Design auch die technischen Gegebenheiten der HoloLens berücksichtigt. Außerdem wird der Umfang der hier vorgestellten Anwendung deutlich über den des holo.lab hinaus erweitert. Die Autoren merken an, dass der Umfang an zusätzlichen Inhalten der holo.lab-Anwendung gering ist, um in der Studie aussagekräftige Ergebnisse erhalten zu können. Sie gehen aber davon aus, dass umfangreichere Experimente noch mehr von einer Erweiterung durch AR profitieren würden. Das motiviert diese Arbeit zusätzlich.

Vor diesen Hintergründen soll im nächsten Schritt der in dieser Arbeit betrach-

tete Anwendungsfall des Experimentes mit der Helmholtz-Spule vorgestellt werden.

2.3 Auswahl des Experimentes und physikalischer Hintergrund

Welches Experiment unterstützt und welche physikalischen Zusammenhänge damit vermittelt werden sollen, bestimmt die inhaltlichen Aspekte einer Lösung. Helmholtz-Spulen werden in der Physik an verschiedenen Stellen verwendet und spielen auch in der Ausbildung von Schülern und Studenten eine wichtige Rolle. Unter anderem werden sie in Schülerversuchen genutzt, um experimentell die Stärke des Erdmagnetfeldes zu bestimmen. Im Folgenden sollen die physikalischen Hintergründe kurz eingeführt sowie der Versuchsaufbau und -Ablauf erläutert werden.

Zuvor soll jedoch kurz auf die Auswahl des vorgestellten Versuches eingegangen werden.

2.3.1 Auswahl des Experimentes

Das Experiment wurde aus mehreren Gründen für diese Arbeit ausgewählt. Zum einen ist Augmented Reality für die Darstellung von Magnetfeldern eine bekannte Methode. Bestehende Arbeiten auf dem Gebiet motivieren den Einsatz der Technik in diesem Kontext. Aus dieser Perspektive ist das Experiment mit der Helmholtz-Spule geeignet, da die entstehenden Magnetfelder dabei im Fokus stehen. Außerdem bietet der Anwendungsfall Potential zur Erweiterung auf andere Experimente mit einer Helmholtz-Spule. Aber auch weitere, teilweise komplexere Inhalte wie z.B. das Biot-Savart-Gesetz ließen sich daran anknüpfen.

Neben diesen Motivationen wurde der Versuch auch aus technischen und praktischen Aspekten ausgewählt. Im Wesentlichen trugen dazu die folgenden Faktoren bei:

- Das Magnetfeld der Spule hat keine erkennbaren Auswirkungen auf die HoloLens (das Gerät nutzt ein Magnetometer). Tests im Vorfeld mit Flussdichten von über 100 Mikrotesla zeigten keine wahrnehmbaren Auswirkungen auf das Tracking und die Stabilität von Hologrammen
- Die notwendigen Materialien (Spule, Messgeräte, Simulationslösung) standen für diese Arbeit zur Verfügung
- Die gegebene Größe der Spule ($R=15\text{cm}$) eignet sich für das beschränkte Sichtfeld der HoloLens.
- Das Experiment enthält keine sich schnell bewegenden Elemente und ist bis auf den Kompass statisch, es erfordert außerdem keine besondere Schutzausrüstung
- Der physikalische Hintergrund des Versuches nicht so komplex, als dass eine Auseinandersetzung damit den Rahmen dieser Arbeit sprengen würde

Einige dieser Umstände begünstigen einen Einsatz der Brille für diesen konkreten Anwendungsfall und sind ggf. bei anderen Szenarien so nicht gegeben.

2.3.2 Spulen und Magnetfelder

Ein Magnetfeld kann als dreidimensionales Vektorfeld aufgefasst werden. Die Stärke an einem Punkt lässt sich über den Feldstärkevektor \mathbf{H} sowie die Flussdichte \mathbf{B} angeben. Beide Größen hängen über eine Materialkonstante μ zusammen: $\mathbf{B} = \mu \cdot \mathbf{H}$.

Wird eine Leiterschleife von einem elektrischen Strom durchflossen, so induziert diese ein Magnetfeld. Dieses Feld verläuft sowohl durch das Innere als auch durch die Umgebung der Spule. Die Stärke des Feldes hängt dabei von der Windungszahl und dem Durchmesser der Spule sowie der anliegenden Stromstärke ab. Im Zentrum der Spule ist das Magnetfeld *homogen*. Das bedeutet, es ist an allen Punkten im Raum gleich stark und gleich gerichtet. Außerhalb und am Rand der Spule hingegen ist das Feld *inhomogen*, es erfüllt beide zuvor genannten Eigenschaften nicht.

Darstellungsformen von Magnetfeldern

Zur Visualisierung von Magnetfeldern gibt es unterschiedliche Darstellungsmodelle. Im Bereich der Lehre haben sich davon vor allem zwei etabliert: Feldlinien und Vektoren. Beide stellen das Feld mit Richtung und Stärke im Raum dar, unterscheiden sich aber in der Art und Weise. Abbildung 7 zeigt eine gemeinsame Darstellung beider Ansätze für eine Helmholtz-Spule.

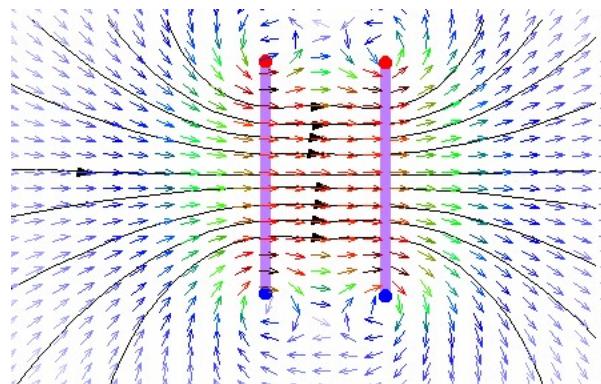


Abbildung 7: Magnetfeld einer Helmholtz-Spule in der X-Z-Ebene [Com15]. Der Betrag der Vektoren wurde hier statt der Länge über die Farbe kodiert. Die Feldlinien sind für einen mittigen Ausschnitt der Spule gezeichnet. Im Inneren ist das Feld weitgehend homogen.

Das Feldlinienmodell

Die Feldliniendarstellung ist wohl die häufiger anzutreffende Darstellungsform. Hier werden kontinuierliche Linien genutzt, um den magnetischen Fluss darzustellen. Die Richtung des Feldstärkevektors an einem Punkt auf einer Feldlinie entspricht der Tangente an diesem Punkt. Die Stärke des Feldes wird meist proportional zur Dichte der Feldlinien dargestellt [Kil03].

Diese Darstellung macht den Unterschied zwischen homogenen und inhomogenen Feldern besonders gut sichtbar, da bei einem homogenen Feld die Feldlinien parallel verlaufen, bei einem inhomogenen hingegen nicht. Außerdem ist die Darstellung über die Dichte der Feldlinien eng verbunden mit dem Konzept des magnetischen Flusses.

Allerdings bedeutet diese Darstellungsform auch, dass um so stärker das Feld ist, desto mehr Feldlinien auf gleichem Raum dargestellt werden müssen. Außerdem ist bei sich ändernden Feldern schwer zu erkennen, ob sich nur die Beträge der Feldstärkevektoren ändern, oder auch deren Richtungen. Denn in beiden Fällen verändern sich Form und Abstand der Feldlinien.

Vektorfeld

Im Gegensatz dazu wird in der Vektor-Darstellung das Feld über einzelne Vektoren repräsentiert. Dabei geben Richtung und Betrag eines Vektors den Feldstärkevektor des Magnetfeldes für genau einen Punkt an.

So lässt sich die Feldstärke an einem durch einen Vektor repräsentierten Punkt im Raum direkt ablesen. Wo ein Feld homogen ist lässt sich jedoch nur durch das Vergleichen von mehreren Vektoren in Länge und Richtung feststellen. Dieses Modell hat gegenüber dem Feldlinienmodell jedoch den Vorteil, dass mit zunehmender Feldstärke die Vektoren nur länger werden, ihre Anzahl jedoch gleich bleibt. Außerdem ist hier klar zu erkennen, ob bei einem sich ändernden Feld die Richtung der Vektoren konstant bleibt, oder nicht.

2.3.3 Helmholtz-Spule

Bei einer Helmholtz-Spule handelt es sich im Prinzip um zum zwei zusammengeschaltete solcher Spulen. Dabei werden zwei identische Spulen nebeneinander aufgestellt und verbunden, sodass der Abstand genau dem Radius der Spulen entspricht. Abbildung 8 zeigt eine solche Helmholtz-Spule.

Durch diese spezielle Eigenschaft des Aufbaus überlagern sich die beiden, durch die einzelnen Spulen entstehenden Magnetfelder genau so, dass im Raum zwi-

schen den Spulen ebenfalls ein (nahezu) homogenes Magnetfeld entsteht. Abbildung 7 zeigt das Feld für die X-Z-Ebene in der Draufsicht von oben auf eine Helmholtz-Spule. Dabei ist zu erkennen, dass das Feld in weiten Teilen des durch die zwei Spulen aufgespannten Zylinders homogen ist. Lediglich am Rand und in unmittelbarer Nähe zu den Spulen wird das Feld zunehmend inhomogen. Detailliertere Informationen dazu finden sich beispielsweise in [Dem13].

Das Feld wird durch elliptische Integrale beschrieben, die nur numerisch zu lösen sind. Die magnetische Flussdichte einer Helmholtz-Spule im Mittelpunkt zwischen den Spulen vereinfacht sich jedoch zu folgender Gleichung:

$$B = \mu_0 \cdot \frac{8 \cdot I \cdot N}{\sqrt{125} \cdot R} \quad (1)$$

Dabei entspricht I der Stromstärke, N der Anzahl Windungen, R dem Radius und μ_0 die magnetische Feldkonstante. Die Stromstärke tritt dabei in der Feldgleichung als linearer Faktor auf. Änderungen an der Stromstärke rufen eine dazu proportionale Änderung der Feldstärke hervor. Außerdem bedeutet dieser Umstand, dass die Richtung des Feldstärke- bzw. Flussdichtevektors nicht von der Stromstärke abhängt, sondern konstant bleibt.



Abbildung 8: Foto der verwendeten Helmholtz-Spule. Radius und Abstand betragen 15 cm und jede Teilspule hat 124 Windungen [Gmb].

2.3.4 Versuchsaufbau und Ablauf

Ziel des Versuches ist die Bestimmung des Erdmagnetfeldes. Genauer bedeutet das die experimentelle Bestimmung von Richtung und magnetischer Flussdichte des Feldes. Die Richtung kann dabei allein über den Kompass bestimmt werden. Die Flussdichte wird mittels Gleichung 1 aus der gemessenen Stromstärke ermittelt, bei der die Helmholtz-Spule ein gleich starkes, eigenes Magnetfeld erzeugt.

Aufbau

Der Versuchsaufbau ist in Abbildung 9 dargestellt und besteht aus:

- Einer Helmholtz-Spule mit fester Windungszahl und festem Radius
- Einem mittig in der Spule positionierten Kompass

- Einem in Reihe geschalteten Amperemeter
- Einem in Reihe geschalteten Widerstand
- Einer angeschlossenen Spannungsquelle

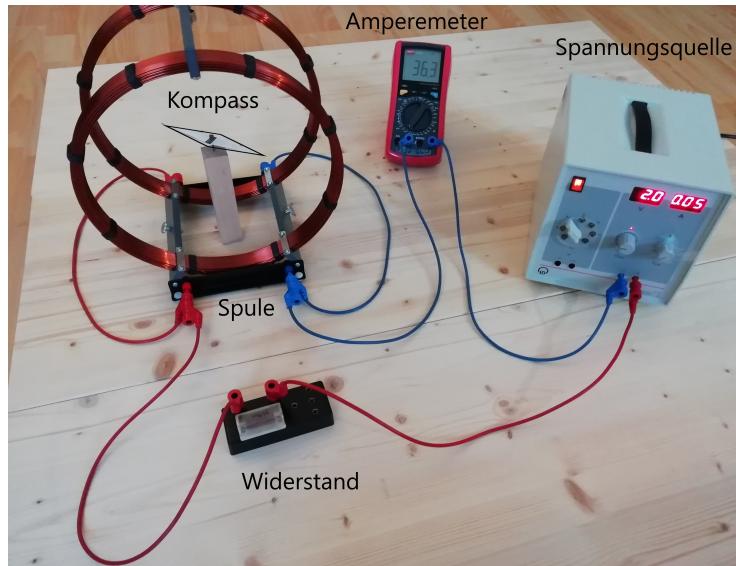


Abbildung 9: Foto des Versuchsaufbaus. Die Helmholtz-Spule besteht aus zwei parallel geschalteten Spulen. Der Widerstand passt den Bereich der einstellbaren Stromstärke an. Der weiß überklebte Kompass wurde nachträglich schwarz umrandet, damit er auf dem Foto besser zu sehen ist.

Ablauf

Der Versuch läuft in zwei Teilen ab. Zunächst wird die Ausrichtung des Erdmagnetfeldes bestimmt und im nächsten Schritt dann die Flussdichte. Der Ablauf lässt sich wie folgt zusammenfassen:

1. Kompassnadel nach Norden ausrichten lassen
2. Helmholtz-Spule orthogonal zur Kompassnadel ausrichten
3. Spannungsquelle einschalten und Spannung langsam erhöhen
4. Spannung erhöhen, bis Kompassnadel um 45° ausgelenkt ist
5. Stromstärke ablesen und in Gleichung (1) einsetzen

Durch dieses Vorgehen wird im zweiten Schritt durch die Spule ein Magnetfeld erzeugt, das orthogonal zu dem der Erde gerichtet ist. Beide Felder überlagern sich, so dass sie den Kompass genau dann gleichmäßig in beide Richtungen auslenken, wenn beide Felder gleich stark auf die Nadel wirken.

3 ANFORDERUNGEN UND PROBLEMSTELLUNG

Ziel dieser Arbeit ist es, am konkreten Beispiel des in Kap. 3.2 beschriebenen Laborversuches zu untersuchen, wie die HoloLens in der Physik Lehre eingesetzt werden kann. Die dazu notwendigen Hintergrundinformationen von technischer und physikalischer Seite wurden im vorangegangenen Kapitel erläutert. Außerdem wurden bestehende Lösungen vorgestellt und in Zusammenhang mit der Zielsetzung dieser Arbeit gebracht. Damit sind die Grundlagen geschaffen, um konkrete Anforderungen und Probleme zu formulieren.

3.1 Anforderungen

Die Anforderungen an eine Umsetzung teilen sich in zwei Bereiche: Inhaltliche Anforderungen aus Sicht der Physik und technische Bedingungen von Seiten der HoloLens. Ein Design muss beide berücksichtigen und zu einer Lösung zusammenführen. Dabei bestimmt das Anwendungsszenario vor allem die Frage, was dargestellt werden soll, während die technischen Gegebenheiten vorwiegend auf das "Wie" der Umsetzung Einfluss nehmen. Im Weiteren sollen die Anforderungen beider Seiten formuliert werden.

3.1.1 Physikalische Seite

Von Seiten der Physik teilen sich die Anforderungen nochmals in zwei Bereiche. Zum einen sind inhaltliche Kriterien an die Anwendung zu stellen. Der Versuch dient dazu, Lernenden bestimmte physikalische Konzepte und Zusammenhänge zu vermitteln. An diesen muss sich eine Lösung orientieren und ableiten, welche Informationen mit der HoloLens darzustellen sind.

Zum anderen bringt der Anwendungsfall auch Einschränkungen in Bezug darauf mit sich, wie die Darstellungen erfolgen sollen. Letztere müssen unter anderem für den Anwender hinsichtlich ihrer physikalischen Bedeutung interpretierbar sein und dürfen keine falschen Eindrücke erwecken.

Relevante physikalische Zusammenhänge

Der Fokus dieser Arbeit liegt darin, zusätzliche Informationen zu physikalischen Zuständen anzuzeigen. Eine Unterstützung beim Aufbau oder der Durchführung des Versuches ist nicht vorgesehen. Die Anwendung zielt zunächst nur auf die Bestimmung der Stärke des Erdfeldes ab. Die in Kap. 2.3.3 genannten ersten beiden Schritte der Durchführung (Ausrichtung von Nadel und Spule) werden also vorausgesetzt. Ausgangspunkt dafür, welche Informationen zu visualisieren sind, stellen die zu vermittelnden Zusammenhänge dar. In Zusammenarbeit mit Experten wurden die folgenden Fragen als zentral für das Verständnis des

Versuches festgehalten (RSL18).

- Welche Magnetfelder entstehen und welche Eigenschaften weisen sie auf?
- Wie hängen Ausrichtung des Magnetfeldes der Spule und Stromfluss zusammen?
- Wie verändert sich die Feldstärke der Spule bei einem sich ändernden Stromfluss?
- Wann ist die Nadel um 45° ausgelenkt?

Das Verständnis dieser Sachverhalte soll im Rahmen der zu erarbeitenden Lösung durch zusätzlich angezeigte Informationen gestützt werden. Das Ziel ist dabei nicht die eigenständige Beantwortung dieser Fragen, sondern vielmehr die Bereitstellung von dafür wichtigen Informationen.

Anforderungen an die Umsetzung

Neben den Voraussetzungen bezüglich dessen, was dargestellt wird, sind auch Anforderungen daran zu stellen, wie dies erfolgt. Ziel des Versuches ist ein qualitatives Verständnis der zuvor genannten Eigenschaften und Zusammenhänge. Darstellungen sollten also auf in erster Linie einen qualitativen Eindruck vermitteln.

Damit die dargestellten physikalischen Zustände auch als solche interpretierbar sind, sollte auf etablierte Modelle zurückgegriffen werden. Andernfalls müsste ein Nutzer neben den eigentlichen Sachverhalten zunächst die Bedeutung der virtuellen Elemente verstehen. Darüber hinaus dürfen durch die angezeigten Objekte keine falschen Eindrücke entstehen, da diese dem eigentlichen Ziel entgegen stünden.

Sofern Zusammenhänge direkt repräsentiert werden, sollen diese physikalisch korrekt wiedergegeben werden. Um außerdem eine natürliche und sichere Nutzung der Gerätschaften zu gewährleisten, soll der Nutzer nicht in seiner Interaktion mit dem Versuchsaufbau und relevanten Materialien eingeschränkt werden.

Um den Einsatz eines Prototypen auch für Nutzer ohne Erfahrung mit der HoloLens zu ermöglichen, sollte die Lösung keine Vorkenntnisse zu dem Gerät voraussetzen. Um schließlich die praktische Umsetzung zu gewährleisten, sollen die vorhandenen Gerätschaften und Lehrmittel genutzt werden.

Diese aufgestellten Rahmenbedingungen fasst Tabelle 3 noch einmal zusammen. Nachdem die inhaltlichen Anforderungen aufgestellt wurden, sollen nun die technischen folgen.

Bereich	Anforderung
Darstellungen sollen..	..physikalische Eigenschaften qualitativ wiedergeben ..physikalisch interpretierbar sein ..und falsche physikalische Eindrücke vermeiden
Anwendung soll..	..die Interaktion mit den Gerätschaften nicht behindern ..nutzbar sein für unerfahrene Nutzer ..und vorhandene Lehrmittel verwenden

Tabelle 3: Inhaltliche Anforderungen an die Art und Weise einer Umsetzung.

3.1.2 Technische Seite

In Kapitel 2.1 wurde die HoloLens mit ihren technischen Möglichkeiten aber auch Einschränkungen vorgestellt sowie Auswirkungen auf das Anwendungsdesign aufgezeigt. Die genannten Probleme sollen möglichst vermieden werden, indem die Anwendung an die speziellen Gegebenheiten der HoloLens angepasst wird. Dementsprechend sollen auch von technischer Seite Anforderungen aufgestellt werden.

TODO.....

3.2 Präzisierung der Problemstellung

Die inhaltlichen und technischen Anforderungen stecken den Rahmen ab, für den eine Lösung zu erarbeiten ist. Dazu ist ein Design nötig, dass die inhaltlichen Anforderungen bedient, dabei die Möglichkeiten der HoloLens nutzt und gleichzeitig um technische Einschränkungen und Besonderheiten herum navigiert. Um die Fragestellung zu beantworten, wie die HoloLens am konkreten Beispiel eingesetzt werden kann, sind drei zentrale Fragen zu adressieren:

- Was soll mit der HoloLens dargestellt werden?
- Wie soll diese Darstellung erfolgen?
- Und wie soll mit den dargestellten Informationen interagiert werden?

Was soll dargestellt werden?

Zunächst stellt sich die Frage, welche Objekte die HoloLens zusätzlich anzeigen soll. Aus den genannten physikalischen Zusammenhängen sind in Zusammenarbeit mit Experten wichtige Informationen abzuleiten, die repräsentiert werden sollen. Gegebenenfalls ist auch zu entscheiden, ob eine Darstellung durch die HoloLens erfolgen, oder die Information durch ein reales Objekt vermittelt werden soll. In letzterem Fall ist darauf zu achten, dass die Objekte durch virtuelle Darstellungen nur bedingt überblendet werden sollten. Im Ergebnis soll eine

Liste von durch die Anwendung dargestellten Informationen und den dazugehörigen Objekten aufgestellt werden.

Wie soll es dargestellt werden?

Die wohl umfassendste Frage besteht darin, wie die Informationen und Zusammenhänge visualisiert werden sollen. Für die erarbeiteten Elemente ist ein visuelles Design mit einer technischen Umsetzung zu erarbeiten. Was soll textuell, als 2D oder als 3D Geometrie mit der HoloLens dargestellt werden? Welche Objekte werden gewählt und wie angeordnet? Wie erfolgt die technische Realisierung? Daraus resultiert eine Umsetzung für die anzuzeigenden Objekte, die im Ergebnis anhand der formulierten Anforderungen an die Umsetzung bewertet wird.

Wie soll damit interagiert werden?

Nicht zuletzt ist ein Konzept für die Interaktion zu erstellen. Welche Eingabemethoden werden dem Nutzer angeboten und wie wird der Nutzer über diese informiert? Welche Aktionen soll die Anwendung zur Verfügung stellen? Das Ergebnis ist ein Konzept für die Interaktion und den Ablauf der Applikation.

4 LÖSUNGSANSATZ

Nachdem in den vorangegangenen Kapiteln die Hintergründe erläutert und Probleme identifiziert wurden, beschreibt dieses Kapitel nun den gewählten Lösungsansatz. Der Abschnitt ist dazu wie folgt strukturiert: Zunächst verfeinert der folgende Abschnitt den prinzipiellen Lösungsansatz und beschreibt, wie die AR-Aspekte genutzt werden sollen. Danach werden die getroffenen Designentscheidungen bezüglich dessen vorgestellt, was angezeigt wird, wie es dargestellt wird und wie damit interagiert wird.

TODO...

Die Idee baut auf dem Ansatz von Strzys et. al. auf und soll zunächst in ihren Grundzügen dargestellt und konkretisiert werden.

4.1 Design der AR-Umgebung

Im Kern besteht der Ansatz dieser Arbeit darin, die physikalischen Eigenschaften darzustellen, in ihren realen Kontext einzubetten und dadurch einen räumlichen und zeitlichen Zusammenhang zu schaffen. Die Versuchsaufbauten werden mit virtuellen Objekten angereichert und somit in eine gemeinsame Anwendung integriert. Die Nutzererfahrung entsteht also durch das Zusammenspiel von realen und virtuellen Objekten.

Um den räumlichen Zusammenhang herzustellen, sind die virtuellen Objekte in Relation zum Versuchsaufbau, vor allem zur Spule, zu platzieren. Dementsprechend muss die Position und Ausrichtung relevanter Geräte bestimmt und in das Koordinatensystem der Anwendung transformiert werden. Nachdem dies einmal erfolgt ist, muss der Vorgang im Laufe der Anwendung nicht wiederholt werden, denn der Aufbau wird im Laufe des Versuches nicht bewegt oder gedreht und die HoloLens verankert die Objekte an ihrer Position im Raum. Der Anwender kann sich dann frei um die Gerätschaften herum bewegen, sie aus verschiedenen Perspektiven betrachten und damit interagieren. Die Interaktion erfolgt dabei sowohl mit den realen als auch den virtuellen Objekten.

Neben dem räumlichen Zusammenhang wird auch ein zeitlicher hergestellt. Dies geschieht, indem die Brille in Echtzeit Messwerte von Geräten des Versuches erhält. Diese werden dann verarbeitet und dazu in Zusammenhang stehende Darstellungen angepasst. Im Laufe des Experimentes ändert die durchführende Person die anliegende Spannung durch einen Regler an der Spannungsquelle. Dieser Ansatz bedeutet

Das bedeutet, dass der Nutzer beim Einstellen des Stromflusses an der Span-

nungsquelle die Änderungen an den physikalischen Eigenschaften gleichsam in der Realität als auch der virtuellen Realität in Echtzeit beobachten kann.

Dieses Konzept macht von den zentralen Stärken der HoloLens Gebrauch. Als Head Mounted Display mit transparenter, stereoskopischer Anzeige und dem Raumverständnis sind solch immersive Anwendungsszenarien die Kernkompetenz der Brille. Dazu trägt auch die Bewegungsfreiheit sowie der Punkt, dass der Träger die Hände frei hat, bei.

Überblick

- Integration von realen und virtuellen Objekten in eine Augmented Reality Anwendung
- Virtuelle Objekte werden in den Versuchsaufbau eingebettet und interagieren mit diesem in Echtzeit
- Gemessene, berechnete und beobachtete physikalische Vorgänge werden somit in einer Anwendung integriert
- Nutzer kann sich mit der HoloLens frei im Raum bewegen und mit der Anwendung sowie den Gerätschaften interagieren

Unter diesem grundsätzlichen Ansatz soll die Lösung nun weiter konkretisiert werden.

4.2 Designentscheidungen bezogen auf Infos

Zunächst ist zu entscheiden, welche physikalischen Eigenschaften durch die HoloLens visualisiert werden sollen. Von besonderem Interesse sind hier vor allem Informationen, die für den Versuch zwar relevant, für den Nutzer jedoch nicht direkt beobachtbar sind.

Das betrifft in erster Linie die beiden sich überlagernden Magnetfelder von Erde und Spule. Das Zusammenspiel beider Felder und deren Eigenschaften ist elementar für das Verständnis des Experimentes. Allerdings sind Magnetfelder nicht sichtbar und die Auswirkungen auf die Magneten entstehen durch das überlagerte Feld, die einzelnen Komponenten des Feldes sind darin nicht mehr erkennbar. Deshalb sollen diese für den Anwender sichtbar gemacht werden. In Absprache mit Experten wurde entschieden, zunächst nur die Einzelfelder und nicht das resultierende Feld zu visualisieren [RSL18].

Die Auslenkung des Kompass hängt von Richtung und Stärke der beiden Einzelfelder in unmittelbarer Nähe des Kompasses ab. Diese Eigenschaften der Felder

sind damit für den Versuch ausschlaggebend und sollen deshalb dargestellt werden. Während die Stärke und Richtung des Erdmagnetfeldes an einem Ort als konstant angenommen werden kann, ändert sich das Feld der Spule mit der Stromstärke. Um diesen Zusammenhang sichtbar zu machen, soll die dargestellte Feldstärke (des Feldes der Spule) anhand von gemessenen Echtzeitdaten angepasst werden. Dafür soll die aktuell gemessene Stromstärke an die HoloLens übermittelt werden. Aus dieser lässt sich anhand der Formel in Abschnitt 2.3.3 die Feldstärke für den Mittelpunkt der Spule berechnen.

Damit die Felder auch als solche interpretiert und ihre Eigenschaften erkannt werden können, wird auf die etablierten Darstellungsmodelle über Feldlinien bzw. Vektoren zurückgegriffen. Da beide sowohl Vor- als auch Nachteile haben, sollen beide Darstellungen alternativ angeboten werden.

Für die Auslenkung der Nadel ist lediglich das Feld in unmittelbarer Nähe des Kompass ausschlaggebend. Deshalb beschränken sich die Repräsentationen der Felder zunächst auf das Innere der Spule. In diesem ist das Feld nahezu homogen, was ebenfalls erkennbar sein soll. Vor diesem Hintergrund und dem Ziel eines qualitativen Verständnisses kann die Feldstärke im Mittelpunkt für einen größeren Bereich im Inneren der Spule angenommen werden.

Um unabhängig von der Durchführung des Experiments auch einen Eindruck von der Struktur des Feldes der Spule über das Innere dieser hinaus zu vermitteln, soll eine eigene Darstellung von Simulationsdaten verwendet werden. Diese legt eine numerisch berechnete Lösung zu Grunde, die dieser dieser Arbeit zur Verfügung steht. Ziel dieser Darstellung ist es, die Homogenität im Inneren der Spule im Gegensatz zur Inhomogenität des restlichen Feldes sichtbar zu machen. Hier folgt das Design der Empfehlung von Experten, diese Eigenschaft ebenfalls sichtbar zu machen (RSL18).

Während die Stromstärke die Feldstärke beeinflusst, bedingt die Stromrichtung die Richtung des Feldstärkevektors. Deshalb soll auch diese angezeigt werden, sofern tatsächlich Strom fließt.

Weitere, nicht direkt erkennbare Eigenschaften des Versuches sind außerdem die physikalischen Parameter des Versuchsaufbaus.

Ein weiterer interessanter Aspekt ist die Einbindung theoretischer Ergebnisse. Das ermöglicht dem Anwender, direkt am Versuchsaufbau sowohl gemessene, als auch berechnete Werte zu erfassen und beide miteinander zu vergleichen. Bei der Bestimmung des Erdmagnetfeldes betrifft das vor allem die Auslenkung des

Kompasses, die sich in Abhängigkeit des Feldstärkevektors verändert. Die Magnetnadel des Kompass unterliegt dabei Faktoren wie Reibung und Trägheit, die zu Abweichungen führen können. Ein berechneter, virtueller Kompass unterliegt solchen Einschränkungen nicht und kann ergänzend zum realen Konterpart das angenommene Verhalten des Systems unter Idealbedingungen aufzeigen. Deshalb soll ein solcher durch die HoloLens integriert werden.

Zusammenfassend sollen also die folgenden Elemente visualisiert werden:

1. Die einzelnen Magnetfelder von Erde und Spule werden in einem Bereich im Inneren der Spule dargestellt. Die Darstellungen erfolgen sowohl über das Feldlinien- als auch das Vektormodell und ändern sich dynamisch mit der eingestellten Spannung. Dabei sollen die folgenden Eigenschaften der Felder erkennbar sein:
 - Stärke
 - Richtung
 - Homogenität
2. Das Feld der Spule soll außerdem gesondert auf Basis von Simulationsdaten für einen größeren Bereich auch außerhalb der Spule dargestellt werden. Dafür wird das Feldlinienmodell und eine bestehende Simulation genutzt.
3. Die Richtung des Stromflusses durch die Spule wird durch einen Indikator-Objekt angezeigt. Ergänzend dazu sollen Plus und Minus gekennzeichnet werden.
4. Die berechnete Auslenkung einer theoretischen, idealen Magnetnadel ohne Störeinflüsse.
5. Die gemessenen und berechneten Werte für Stromstärke und Flussdichte.

Für diese Elemente gilt es nun ein visuelles Design zu konzipieren und eine technische Realisierung zu erarbeiten. Diese werden jedoch durch Designentscheidungen beeinflusst, die technische Eigenschaften der HoloLens adressieren, um eine komfortable Nutzung zu gewährleisten. Deshalb soll zunächst auf diese näher eingegangen werden.

4.3 Designentscheidungen bezogen auf HoloLens

Viele Darstellungen sollen am Versuchsaufbau, also vor allem an der Spule, verankert werden. Das bedeutet, dass der Anwender Abstand und Blickwinkel zu diesen Objekten durch seine Bewegungen und Blickrichtung selbst steuert. Um

dennnoch stets eine komfortable Nutzung zu ermöglichen, und die zuvor erläuterten Probleme im Hinblick auf Distanz und Blickrichtung zu vermeiden, werden mehrere Maßnahmen getroffen.

Distanz

Um zu geringe Distanzen zwischen Nutzer und den virtuellen Objekten zu vermeiden, werden fest verankerte Darstellung unterhalb einer gewissen Distanz ausgeblendet. Hier folgt das Design den existierenden, zuvor aufgeführten Empfehlungen. Das ermöglicht dem Nutzer zugleich das Eintauchen in die Darstellungen. Frei bewegliche Elemente hingegen werden durch entsprechende Skripte den Bewegungen des Nutzers angepasst, so dass sie stets in einer komfortablen Zone des Sichtfeldes verbleiben.

Weiterhin soll eine Nutzung im Abstand von ca. 1,2m bis 1,5m begünstigt werden. Das hat mehrere Gründe. Zum einen passt bei diesem Abstand die Spule vollständig in das Sichtfeld der HoloLens. Darin eingebettete Darstellungen werden also nicht durch die Grenzen des Field of View abgeschnitten. Dabei bleibt auch noch etwas Spielraum für Kopfbewegungen, so dass die Darstellungen nicht schon bei kleinen Bewegungen an die Grenzen des Displays stoßen. Gleichzeitig bleiben nicht so große Teile des Sichtfeldes ungenutzt. Außerdem reduzieren sich so die Effekte durch die Diskrepanz zwischen Konvergenz und Akkommodation der Augen im Vergleich zu kleineren Abständen. Hier findet also ein Kompromiss zwischen Ausnutzung des Sichtfeldes und Komfort statt. Der genannte Bereich wurde dabei aus praktischer Erfahrung festgelegt.

Größe & Blickrichtung

Für die Darstellungen bedeutet das, dass die Größe der Objekte für diesen Bereich geeignet sein sollte. Darüber hinaus kann die Auswahl eines geeigneten Tisches die Nutzung begünstigen. Das Design geht davon aus, dass der Nutzer die Anwendung im Stehen verwendet, damit er in der Lage ist, sich frei um den Versuchsaufbau herum zu bewegen. Ein entsprechend hoher Tisch führt dazu, dass der vertikale Blickwinkel im empfohlenen Bereich zwischen 0° und 35° unterhalb der Horizontlinie liegt. Weiterhin kann die Spule mit etwas Abstand zur Tischkante positioniert werden, um so auf natürliche Weise die Nutzung in der geeigneten Distanz zu begünstigen.

Farbe

Die Farbe bestimmt auf der HoloLens nicht nur die Helligkeit, sondern auch die Transparenz eines Objektes. Bei der Farbwahl wird deshalb darauf geachtet, dass Objekte, die gleich transparent erscheinen sollen, auch gleich hell sind.

Das geschieht, indem die Farben so gewählt werden, dass sich die drei RGB-Farbkomponenten zu einem konstanten Wert addieren.

Nach diesen allgemeinen Designentscheidungen, die alle Visualisierungen betreffen, kann nun das visuelle Design konkretisiert werden.

4.4 Wie erfolgt die Darstellung?

4.4.1 Das Magnetfeld - Echtzeitdarstellung

Die Darstellung des Magnetfeldes von Erde und Spule ist zentraler Bestandteil der Anwendung.

Allgemeines

- Komponenten des Feldes (Erde, Spule) werden mit verschiedenen Farben dargestellt
- Feld der Erde ist fest und wird exemplarisch, mittig in der Spule mit der minimal notwendigen Anzahl Elemente gezeigt
- Feldlinien / Vektoren als Pfeillinien / Pfeile modelliert
- Form wird durch Schattierung betont
- Anordnung, Minimum und Maximum (von Abstand bzw. Länge) der Darstellungen sind im Code parametrisiert
- Darstellungsgrenzen über Transparenz (Minimum) und Hardware-Limitierung (Maximum)

Visuelles Design

Die Darstellung des Feldes erfolgt über 3D-Pfeile bzw. -Pfeillinien. Diese werden schattiert, damit die Form und Ausrichtung im Raum besser erkennbar wird. Die Größe der Objekte wurde anhand von Erfahrungswerten angepasst. Durchmesser und Länge sind vergleichbar mit denen eines Kugelschreibers oder dickeren Stiftes. Als Farben wurden Hellblau und Orange für den Anteil der Spule bzw. der Erde gewählt. Blau wird oft für Magnetfeldlinien verwendet und wird daher auch hier gebraucht. Allerdings wird ein weniger gesättigtes, helleres Blau verwendet, damit die Deckkraft vor helleren Hintergründen nicht verloren geht. Das Orange weist die selbe Sättigung und Helligkeit auf wie das Blau, damit sich die Objekte nicht in der Transparenz voneinander unterscheiden.

Begrenzung der Darstellung

Die Visualisierung des Feldes erfordert die Festlegung eines darzustellenden Bereiches für die Flussdichte. Ein Intervall lässt sich in der Anwendung frei über die Einstellungen festlegen. Diese Einstellungsmöglichkeit ist für die praktische

Nutzung wesentlich, da die gemessene Flussdichte des Erdmagnetfeldes in Abhängigkeit von der Umgebung variieren kann. Voreingestellt ist ein Bereich von $3\mu T$ bis $60\mu T$, die Flussdichte der Erde liegt mit $30\mu T$ bis $40\mu T$ im mittleren Bereich dieser Skala. Am unteren Ende des Bereiches werden die Objekte über Transparenz ausgeblendet.

Nach oben hin ist keine Darstellung der Begrenzung vorgesehen. Der Bereich sollte so gewählt werden, dass die obere Grenze durch die maximal am Regler einstellbare Stromstärke nicht erreicht werden kann. Somit erfährt der Anwender die Limitierung der Darstellung auf natürliche Weise. Die Konfiguration der Schaltung kann hier über eingebaute Widerstände so an die Spannungsquelle angepasst werden, dass der erzeugte Stromfluss im gewünschten Bereich liegt.

Einbettung durch Verdeckung

Objekte verändern sich dynamisch anhand von Messwerten

Feldlinien

Die Feldliniendarstellung ist in Abb. 10 gesondert dargestellt.

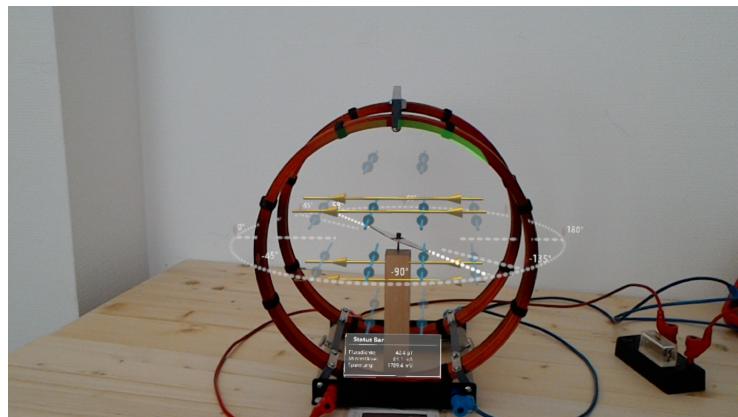


Abbildung 10: Feldlinien

Anordnung

Die Feldlinien der Spule verlaufen orthogonal zur X-Y-Ebene, also in Richtung der Z-Achse. Damit die gewünschten Eigenschaften (Stärke, Homogenität und Richtung) des dreidimensionalen Feldes anhand des Feldlinienmodells erkennbar sind, bedarf es mindestens vier Linien. In einer 2x2 Anordnung um den Mittelpunkt der X-Y-Ebene ist so der Abstand in beiden Dimensionen sichtbar und die Linien sind symmetrisch zur Z-Achse. Anhand der Parallelität lässt sich die Homogenität erkennen und anhand des Abstandes (in der horizontalen oder vertikalen, beide sind gleich groß) die Stärke. Die Flussrichtung ist über einge-

baute Pfeilspitzen abgebildet. Als Darstellungsvolumen wurde ein zylindrischer Ausschnitt der Spule gewählt, da diese den Raum besser ausfüllt, als beispielsweise ein kubischer Ausschnitt.

Anzahl

Bei einem festen, für die Darstellungen zur Verfügung stehenden Volumen und kleiner werdenden Abständen müssen zunehmend mehr Linien gezeichnet werden. Zu viele Objekte würden jedoch die Sichtbarkeit anderer Elemente wie Magnetnadel und Kompass beeinträchtigen. Außerdem transportieren zusätzliche Feldlinien keine zusätzlichen Informationen (im Fall eines homogenen Feldes). Allerdings unterstützt die Beobachtung, dass mit zunehmender Flussdichte die Anzahl der Feldlinien steigt, das Verständnis des Feldlinienmodells. Daher wurde für die Umsetzung das Intervall von minimalem und maximalem Abstand so gewählt, dass mindestens 4 und höchstens 16 Linien dargestellt werden. Beim Ein- und Austreten der Objekte in das bzw. aus dem Darstellungsvolumen werden sie kontinuierlich ein bzw. ausgeblendet.

To Do

Abbildung 11: Feldlinien Skalierung Abstand

Skalierung

Dabei wurde sich bewusst für die Abbildung der Flussdichte auf den Abstand der Feldlinien entschieden. Das bedeutet, Letzterer ändert sich proportional mit der Flussdichte. Oft wird statt des Abstandes die Anzahl der Feldlinien durch eine Einheitsfläche proportional zur Flussdichte gewählt. Das bedeutet bei einer symmetrischen Darstellung eines quadratischen Ausschnittes jedoch, dass die Anzahl in diskreten Stufen $n \geq 1$ mit 4^n steigt. Werden diese Stufen durch eine kontinuierliche Kontraktion der Linien zum Zentrum hin interpoliert, dann skaliert der Abstand d der Feldlinien mit $1/(3n)$. Die Grafik 11 illustriert diesen Zusammenhang. Da für den Anwender in erster Linie jedoch der Abstand die sichtbare, sich ändernde Größe ist, könnte dies den falschen Eindruck erwecken, die Flussdichte ändere sich nicht linear mit der Stromstärke. Außerdem werden

nur zwei Stufen dargestellt, daher wurde sich für die proportionale Änderung des Abstandes entschieden.

Überblick

- Pfeillinien repräsentieren Feldlinien über Abstand und Ausrichtung
- 4 bis 16 Feldlinien im Gitter angeordnet, orthogonal zur Z-Achse
- Anordnung im 3D-Gitter mit konfigurierbaren Parametern (Abstand, Anzahl pro Dimension)
- Änderung des Abstandes über Kontraktion zum Mittelpunkt in X-Y-Ebene, Linien werden über Transparenz an der Darstellungsgrenze ein- bzw. ausgeblendet

Überblick

- Magnetfeld von Erde und Spule über 3D-Geometrie darstellen und räumlich in die Spule einbetten
- Einbettung durch Verdeckungsberechnung von realer Spule und virtueller Geometrie verbessern
- Komponenten des Feldes (Erde, Spule) mit verschiedenen Farben darstellen anstelle des tatsächlichen, kombinierten Feldes
- Sowohl die Darstellung über Feldlinien als auch die über Vektoren anbieten, Nutzer kann zwischen den Varianten umschalten
- Darstellung beschränkt sich auf einen zylindrischen Ausschnitt der Spule
- Objekte verändern sich dynamisch anhand von Messwerten
- Eine davon unabhängige, eigene Darstellung von Simulationsdaten zeigt eine numerische Lösung für das Feld sowohl innerhalb als auch außerhalb der Spule für eine ausgewählte Ebene

Vektoren

Anordnung und Anzahl

In der Vektorendarstellung werden mindestens acht Vektoren benötigt, damit die zuvor genannten Eigenschaften erkennbar werden. Dabei gelten die gleichen Gründe wie zuvor. Während jedoch eine Feldlinie das Feld in Richtung der Z-Achse kontinuierlich darstellt, sind hier wenigstens zwei Vektoren notwendig. Die Anordnung erfolgt in einem 3D-Gitter, bei dem die Anzahl und die Abstände pro Dimension parametrisiert sind. Auch hier gilt, dass mehr Objekte im homogenen Teil des Feldes keine weiteren Informationen transportieren. Daher

wurde in Anbetracht des zur Verfügung stehenden Raumes in die Größe anstelle der Anzahl der Objekte investiert.

Skalierung

Die Flussdichte wird im Fall der Pfeile über deren Länge und Richtung ausgedrückt. Die Form der Objekte soll mit einer sich ändernden Länge nicht verzerrt werden. Eine einfache Skalierung der Pfeillänge würde jedoch dazu führen, dass auch die Pfeilspitze in die Länge gezogen wird. Daher wird die Geometrie zur Laufzeit angepasst und nur ein Teil in der Mitte verändert.

Bezugspunkt

Welcher Punkt dem Vektor als Ankerpunkt dient ist dabei nicht entscheidend, denn ein Pfeil repräsentiert jeden Punkt des homogenen Feldes. Eine explizite Darstellung ist daher nicht erforderlich. Allerdings wird die Verankerung im Mittelpunkt dadurch deutlich, dass die Position bei variierender Länge gleich bleibt.

Inhomogener Anteil

Im Gegensatz zu den Feldlinien ist eine Darstellung des inhomogenen Feldes über Vektoren auch ohne aufwendige Echtzeit-Berechnungen möglich (siehe Kap. 2.3.2). Die Anwendung nutzt diese Eigenschaft, um in dieser Darstellung auch das inhomogene Feld anzudeuten. Dies geschieht, indem das Raster so gewählt wird, dass vor und hinter der Spule (im Sinne der Z-Achse) jeweils eine Reihe Vektoren positioniert ist. Diese sind hier im Vergleich deutlich kürzer und nicht parallel, sondern nach innen bzw. nach außen gerichtet. So wird erkennbar, dass das Feld hier schwächer und inhomogen ist. Da die Darstellungen erst ab einem minimalen Wert eingeblendet werden, wird der inhomogene Teil nach dem homogenen Teil eingeblendet.

Überblick

- Pfeile repräsentieren Feldstärkevektor über Länge und Ausrichtung
- 8 Pfeile für homogenes Feld, weitere 8 für Andeutung inhomogenes Feld
- Anordnung im 3D-Gitter mit konfigurierbaren Parametern (Abstand und Anzahl, jeweils pro Raumrichtung)
- Ankerpunkt mittig im Pfeil

4.4.2 Magnetfeld - Simulationsdarstellung

Simulation

Eine Visualisierung der Simulationsdaten ist in Abb. 12 näher zu sehen.

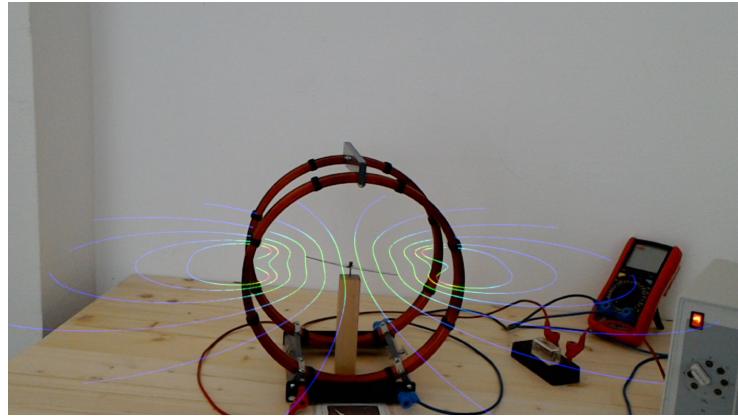


Abbildung 12: Simulation

Die numerische Lösung der Feldgleichungen erfolgte mittels der Simulationssoftware COMSOL Multiphysics. Diese Arbeit konnte hier auf eine bestehende Implementierung einer Helmholtzspule aufbauen. Hier wurden lediglich die folgenden Parameter für die Berechnung der Feldlinien gesetzt:

- Anzahl und Anordnung: 10, symmetrisch zur Z-Achse, Abstand entsprechend der Flussdichte
- Beschränkung auf die X-Z-Ebene im Radius von 2m um die Spule
- Qualitätseinstellungen auf Maximum gesetzt

Querschnitt

Zunächst ist nur eine Anordnung in der X-Z-Ebene aktiv. Da das Feld aber symmetrisch zur Z-Achse ist, kann mit diesem einen Datensatz bereits jeder Querschnitt durch die Z-Achse dargestellt werden. Bei einer anderen Ausrichtung, z.B. im 45° Winkel, würden jedoch Feldlinien durch den Tisch verlaufen, auf dem die Spule steht.

Rendering

Die Darstellung erfolgt über Unity's Low-Level *Graphics Library (GL)* mittels eines Line-Strips. Dieser ist vergleichbar mit dem von OpenGL, hat aber weniger Funktionen. Insbesondere lässt sich die Dicke der Linien nicht einstellen, sondern ist auf einen Pixel festgelegt. Der sonst in dieser Arbeit für Linien genutzte LineRenderer konnte hier nicht verwendet werden. Denn letzterer ermöglicht für eine Linie nur die Interpolation zwischen maximal 8 Farben. Eine besser Konfi-

gurierbare Darstellung wäre über ein dynamisch generiertes Mesh möglich.

Anzahl und Anordnung

Die Auswahl von 10 Feldlinien erfolgte aus praktischem Ermessen bezüglich der Sichtbarkeit aus 1,5 Metern Entfernung. Dabei wurde bewusst eine gerade Anzahl gewählt. Andernfalls entsteht eine Feldlinie, die genau auf der Z-Achse liegt und nicht geschlossen ist sondern von minus nach plus Unendlich verläuft. Dies wurde aus didaktischen Gründen vermieden.

Farbe

Die Wahl der Farbskala fiel aus mehreren Gründen auf eine Rot-Grün-Skala. Die Linien zeigen die kontinuierliche Änderung der Flussdichte, die durch einen Farbverlauf weiter hervorgehoben werden soll. Dabei kommt es nicht auf das Ablesen der numerischen Werte an, weshalb auch keine Skala mit Farbe und den dazugehörigen Werten angezeigt wird. Es geht viel mehr um das qualitative Verständnis der Darstellung. Mit der gewählten Skala unterscheiden sich die drei wesentlichen Regionen durch ihre Farbe klar voneinander:

- Inhomogenes, schwaches Feld außen: Grün
- Homogenes, mittel-starkes Feld innen: Gelb
- Inhomogenes, starkes Feld unmittelbar am Rand der Spule: Rot

Darüber hinaus sprechen technische Gründe für eine solche Farbskala. Damit die Linien in Helligkeit und Transparenz nicht variieren, sollten sich die Farbanteile im RGB-Raum stets zu einem konstanten Wert addieren. Die Rot-Grün-Skala erfüllt diese Eigenschaft, da hier der Blauanteil stets null ist und Rot und Grün über $R = 1 - G$ zusammenhängen. Möglich wären hier auch eine Regenbogenskala, die nicht selten für Magnetfelder angewandt wird². Die Skala wird jedoch aufgrund der verzerrten Wahrnehmung nicht empfohlen und wurde hier daher nicht verwendet.

Zusammenfassung

- Simulation für einen beliebigen 2D-Querschnitt orthogonal zur X-Y-Ebene, da das Feld symmetrisch zur Z-Achse ist
- Anzahl auf 10 Feldlinien festgelegt
- Darstellung über 2D-Linien
- Rot-Grün Farbskala genutzt

²Vgl. z.B. die Darstellungen in Kap. 2.2 und 2.3

4.4.3 Der Stromfluss

Beim Stromfluss ist in erster Linie die Flussrichtung durch die Spulen von Interesse, denn hiervon hängt die Ausrichtung des entstehenden Magnetfeldes ab. Diese wird über pfeil-ähnliche Indikatoren an den Spulen angezeigt. Außerdem werden die Anschlüsse mit Labels versehen, die Plus und Minus kennzeichnen.

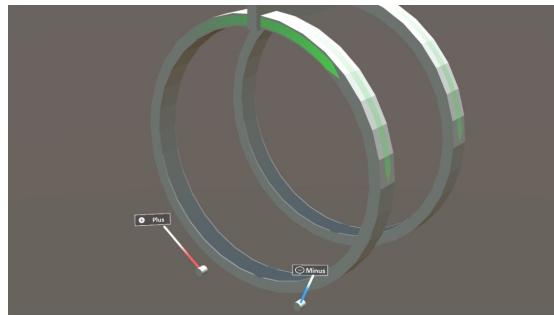


Abbildung 13: Stromfluss

Positionierung und Ausrichtung

Die Indikatoren werden abhängig von Position und Blickwinkel des Betrachters angezeigt, wie in der Abbildung zu sehen. Auf diese Weise ist die Richtung aus allen Perspektiven zu erkennen. Beim Wechsel der Darstellungen gibt es einen kontinuierlichen Übergang. In dieser Umsetzung ist die 2D-Geometrie ausreichend. Die Positionierung direkt auf bzw. an den Spulen führt dazu, dass kein zusätzlicher Screenspace, der für die Felddarstellung genutzt wird, in Anspruch genommen werden muss, da das Feld hier ohnehin von den Spulen verdeckt wird. Die Spulen bleiben weiterhin gut sichtbar, da nur ein Teil und nur eine Seite überdeckt wird. Hier haushaltet die Anwendung also mit dem ihr zur Verfügung stehenden Platz.

Ein Nachteil dieser Lösung ist jedoch, dass das zuvor erläuterte Problem mit der Akkommodation auftritt. Die Kante zwischen virtuellem Pfeil und realer Spule kann bei einer Entfernung unter 2m zu Irritationen führen, da sich das Auge auf eine Akkommodation festlegen muss und dementsprechend das andere Objekt nicht als scharf wahrnimmt. Allerdings stehen beide Objekte selten im Fokus und die Spule muss nicht detailreich betrachtet werden, deshalb überwiegen hier die Vorteile dieser Lösung.

Annotationen der Anschlüsse

Damit die Stromrichtung auch als technische Stromrichtung interpretiert und in die Schaltung eingeordnet werden kann, sind die Konnektoren mit Labels

in Form von Tooltips mit Bezeichnung, entsprechender Farbe und Icon ausgestattet. Die Labels orientieren sich dabei an der Kamera, damit sie aus allen Winkeln lesbar sind.

Zusammenfassung

- Direkt an den Spulen verankerte Indikatoren zeigen die Stromrichtung an
- Indikatoren passen sich der Position des Nutzers an
- Kennzeichnung der Konnektoren mit Plus und Minus anhand von Labels

4.4.4 Der Kompass

Der Kompass bildet sich aus dem Zusammenspiel einer realen Magnetnadel, einer virtuellen Skala sowie virtuellen Hilfslinien.

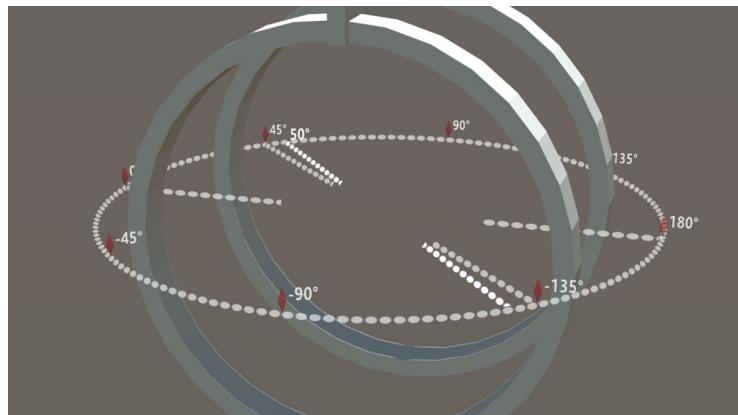


Abbildung 14: Kompass

Überblick

- Kompass entsteht aus Kombination von realer Magnetnadel und virtueller Skala
- Reale Nadel wird mittig in der Spule aufgestellt
- Virtueller Ring mit Markierungen im 45° Abstand um die Spule herum dient als Skala
- Virtuelle Kreissehnen durch den Mittelpunkt mit Ausschnitt im Mittelpunkt für den Kompass
 - Feste Nord-Süd Linie
 - Feste 45° Linie
 - Virtueller Kompass, der die theoretisch berechnete Auslenkung eines idealen Kompasses anzeigt
- Gradzahl der theoretischen Nadel wird am Kreis angezeigt
- Grau als Farbe genutzt, leicht transparent, virtueller Kompass jedoch etwas heller und daher präsenter gestaltet
- Magnetnadel von dunkelgrau zu weiß geändert für bessere Sichtbarkeit

Als Farbe wurde Grau gewählt, damit die Linien neutral und weniger dominant wirken. Dem dient auch die Wahl von gestrichelten anstelle durchgezogener Linien. Gleichzeitig wurde die zuvor dunkle Magnetnadel mit weißem Papier überklebt, damit sie zwischen den virtuellen Objekten besser zu sehen ist.

Der Kompass liegt horizontal in einer Ebene durch den Spulenmittelpunkt. Die ringförmige Skala wurde mit einem Radius von 20 cm sehr eng um die Spulen herum gelegt, damit wenig zusätzliches Sichtfeld benötigt wird. Denn je größer der Radius, desto eher wird das Element durch die Sichtfeldbegrenzung abgeschnitten. Neben den festen Gradzahlen im Abstand von 45° wird hier auch die theoretisch berechnete Gradzahl am Ende der zugehörigen Linie angezeigt.

In dieser Umsetzung wird zunächst keine Verdeckung durch die Magnetnadel berechnet. Diese ließe sich anhand der theoretischen Auslenkung berechnen. Allerdings unterliegt die reale Nadel Trägheit und Reibung, die in der Berechnung nicht berücksichtigt werden. Außerdem ist sie sehr schmal (etwa 5 mm breit), weshalb Abweichungen zwischen realem und virtuellem Modell stärker ins Gewicht fallen, als bei größeren Objekten. Daher verzichtet diese Lösung darauf, was sich jedoch negativ auf die Immersion des Anwenders auswirkt.

Der Fokus dieses Designs liegt nicht darin, die Auslenkung des Kompasses möglichst genau ablesen zu können. Vielmehr geht es darum die besonders wichtigen Auslenkungen, nämlich 0° und 45°, sichtbar zu machen. Denn Ziel des Versuches

ist es, die Nadel von 0° auf 45° auszulenken. Zwischen diesen Werten genügt eine grobe Orientierung. Außerdem sollen die theoretischen Werte mit in den Kompass integriert werden.

Die Nutzung einer virtuellen Skala erlaubt letzteres auf natürliche Weise. Dazu kommen zwei weitere, wesentliche Gründe, warum nicht eine reale Skala zum Einsatz kommt. Erstens wäre eine herkömmliche, unter der Nadel angebrachte Skala nur schwer lesbar. Das liegt an der gewünschten Entfernung, da hierfür die Skalen oft zu klein sind, aber auch am Blickwinkel. Letzterer ist viel geringer als die steilen Winkel, die normalerweise zum Ablesen der Richtung benötigt werden. Die Nadel hingegen ist mit 12cm Länge bewusst groß genug gewählt, damit sie gut zu sehen ist. Zweitens würde sie Platz im inneren der Spule einnehmen. Dieser Platz wird jedoch für die Felddarstellungen benötigt.

Die virtuelle Skala umgeht dieses Problem, da sie als Ring unmittelbar außerhalb der Spule umgesetzt ist. Lediglich die Hilfslinien bei 0° und 45° sowie die Linie des virtuellen Kompasses kommen zusätzlich in den Bereich der Felddarstellung. Die ersten beiden werden außerdem etwas abgeschwächt, indem ihre Transparenz erhöht wird. Alle drei sind jedoch in der Mitte ausgeschnitten, um die Kompassnadel nicht zu überblenden.

Dieses Design erlaubt es dem Betrachter genau festzustellen, ob die Linie der Nadel durch eine der virtuellen Linien fortgesetzt wird. Außerdem entsteht so die Vergleichbarkeit mit der theoretischen Nadel, da diese entweder stärker, schwächer oder genauso stark ausgelenkt ist. Für letztere wird außerdem die Gradzahl als Text angegeben.

Diese Lösung setzt jedoch auf eine genaue Positionsbestimmung der Spule sowie eine hohe Stabilität der Hologramme. Wenn das Modell verrutscht oder zittert schränkt das die Nutzung des Kompasses ein.

4.4.5 Das Datenpanel

Für die Darstellung weiterer Informationen sind zwei Lösungen vorgesehen: Ein Datenpanel zur Darstellung numerischer Werte in Textform sowie optional aktivierbare Labels am Versuchsaufbau.

Beides ist in Abbildung ?? skizziert.

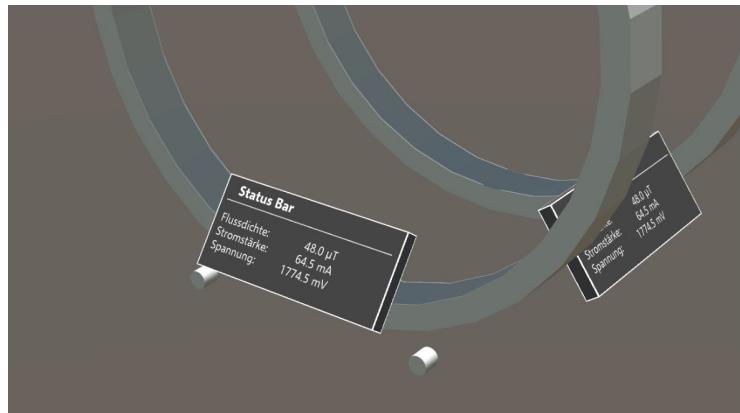


Abbildung 15: Statusbar

Überblick

- Stromstärke (gemessen) und Flussdichte (berechnet) werden auf einem Datenpanel dargestellt
- Panel hat einen dunklen Hintergrund, damit der Text besser lesbar ist
- Weitere physikalische Parameter werden über Labels an die entsprechenden Elemente angehängt (Windungszahl, Radius und Abstand der Spulen, Widerstand etc.)

- Listet gemessene und berechnete Echtzeitwerte auf: Stromstärke, Spannung, Flussdichte

- 4 Replikas, Platzierung an unteren Balken zwischen den Spulen
- Sichtbarkeit analog zu Strom-Pfeilen

Das Datenpanel dient als Informationsboard für die Echtzeitdaten. Der graue Hintergrund stellt dabei sicher, dass die Schrift gut zu lesen ist. Die Positionierung an den Verbindungsstücken liegt, wie auch bei den Indikatoren für die Stromrichtung, im Ausnutzen von Platz begründet. Hier ist die ständige Sichtbarkeit jedoch sekundär.

Der Hintergrund orientiert sich an dem des vorgefertigten Tooltips und wird einheitlich für alle Texte (abgesehen von den Buttons) verwendet. Die Objekte sind schräg gestellt (ca. 35°), so dass sie aus diesem typischen Winkel gut zu lesen sind.

Durch ihre Platzierung unmittelbar über dem Untergrund würden Drop Shadows das Präsenzgefühl stärken. Diese lassen sich hier jedoch nicht direkt umsetzen, denn der Untergrund ist real und kann durch die HoloLens nicht weiter

verdunkelt werden. Eine mögliche Lösung bestünde darin, die Schatten zu erzeugen, indem der Untergrund außerhalb des Schattens zusätzlich erhellt wird. Allerdings müssten hier wiederum die Schatten der realen Objekte mit einbezogen werden. Daher nimmt diese Lösung die fehlenden Schatten in Kauf.

Man könnte auch eine Lösung über ein Heads-Up Display in Erwägung ziehen, da es sich um numerische Werte handelt, ohne einen natürlichen Ankerpunkt in der Szene. Allerdings sind HUDs aus verschiedenen Gründen auf der HoloLens ungünstig. Deshalb rät die Dokumentation explizit vom Gebrauch solcher ab. Daher wurde hier die Variante eines fest stehenden Objektes gewählt.

Schließlich lassen sich verschiedene weitere Parameter des Versuches anzeigen. Diese müssen nicht immer sichtbar sein und können deshalb optional eingeblendet werden. Die Umsetzung erfolgt wie bei den Markierungen für Plus und Minus im Tooltip-Stil.

Weiterhin sind für alle Objekte, die in Abhängigkeit des sich ändernden Feldes stehen, Parameter für die Darstellung definiert. Diese legen für alle Elemente einen gemeinsamen Wertebereich fest, für den die Darstellung erfolgt. Außerdem werden ab dem minimalen Wert die Objekte über einen gewählten Bereich kontinuierlich eingeblendet. Dieses konsistente Verhalten dient dazu, das Verständnis der Darstellungen zu verbessern. Außerdem soll auf diese Weise transportiert werden, dass nur die Darstellungen verschwinden, nicht jedoch die physikalischen Sachverhalte, die repräsentiert werden.

4.5 Interaktion

Die Interaktion soll möglichst einfach gehalten werden und auch für Nutzer ohne Erfahrung mit der HoloLens geeignet sein. Daher folgt das Design der Empfehlung, alternative Interaktionsmöglichkeiten zur Verfügung zu stellen. Diese Lösung bietet dem Anwender drei Eingabemethoden an:

1. Klicker
2. Handgesten
3. Sprachbefehle

Der Klicker ist ein kleiner, in der Hand gehaltener Taster, der sich wie eine Maustaste verhält. Ein mal drücken wird als Klick erkannt, aber auch gedrückt halten ist möglich. Die dazu korrespondierende Handgeste ist der AirTap, der auf der HoloLens als Klick-Geste dient. Als Klick erkennt das Gerät außerdem den reservierten Sprachbefehl "Select". Weitere Sprachbefehle werden von der

Anwendung selbst definiert.

Die Lösung stellt dem Anwender die drei Eingabemethoden frei zur Verfügung. Das bedeutet, der Nutzer kann selbst entscheiden, auf welche Methoden er zurückgreift. Jede Interaktionsmöglichkeit kann jederzeit genutzt werden. Anwender, die keine Erfahrung mit der HoloLens haben, sind nicht gezwungen, zunächst die Gestensteuerung der HoloLens zu erlernen. Außerdem ist die Interaktion so auf natürliche Weise konsistent: Ein Klick mit dem Klicker ist äquivalent zu einem Klick durch die AirTap-Geste.

Während der Durchführung des Versuches sind drei Aktionen möglich:

1. Veränderung des Stromflusses über den Regler der Spannungsquelle
2. Wechsel zwischen den Darstellungsmodellen
3. Rückkehr zum Hauptmenü

Bei ersterer interagiert der Nutzer mit dem Versuchsaufbau, die Anwendung passt sich dabei automatisch an den sich ändernden Stromfluss anhand der Messwerte an. Für den Wechsel zwischen den Darstellungen sowie die Rückkehr zum Menü werden die zuvor beschriebenen Möglichkeiten angeboten. In jedem Fall reagiert die Anwendung mit visuellem oder akustischem Feedback auf ein Kommando.

4.6 Implementierung

Die Lösung sieht neben den inhaltlichen Darstellungen weitere Komponenten vor, die der Nutzbarkeit der Anwendung dienen. Das betrifft drei Bereiche: Die Steuerung des Ablaufes, die Bestimmung von Position und Ausrichtung der Spule sowie Einstellungen.

Das Menü

Über ein Menü kann der Ablauf der Anwendung gesteuert werden. Hier kann der eigentliche Versuch gestartet, die Positionsbestimmung (erneut) angestoßen oder die Einstellungen aufgerufen werden. Die Umsetzung erfolgt über Buttons, die sich automatisch der Kamera anpassen, so dass der Anwender keine Probleme hat, sie zu finden.

Die Einstellungen

Die Einstellungen bieten die Konfiguration wichtiger Parameter an. Das betrifft vor allem die gemessene Flussdichte des Erdmagnetfeldes, da sich diese von Ort zu Ort unterscheiden kann. Aber auch der gewählte Widerstand lässt sich einstellen, da hier ein Austausch in der Schaltung leicht möglich und beim Wechsel

auf eine andere Spannungsquelle unter Umständen sogar nötig ist. Auch die Einstellung der Adresse des Servers, von dem die Messwerte abgefragt werden, wird angeboten. Die Eingabe der Werte erfolgt dabei über die vom Mixed Reality Toolkit zur Verfügung gestellte, virtuelle Tastatur.

Damit die Einstellungen nicht nach jedem Neustart der Anwendung vorgenommen werden müssen, sieht die Lösung eine Speicherung auf dem lokalen Speicher der HoloLens vor. Bei der erstmaligen Verwendung werden Default-Werte geladen, auf die die Applikation auch wieder zurückgesetzt werden kann. Die Einstellungen tragen somit wesentlich zur Nutzbarkeit der Anwendung bei. Ohne diese Optionen müsste die App für jede Änderung in diesen Parametern mit der geänderten Konfiguration neu deployt werden. Insbesondere bei der Adresse des Servers wäre dies problematisch, da diese, je nach technischer Umsetzung, ggf. zum Zeitpunkt des Deployments noch gar nicht bekannt ist.

Das Tracking

Nicht zuletzt soll die Anwendung den Nutzer durch den Prozess der Positionsbestimmung der Spule führen. Die Bestimmung erfolgt über einen optischen Marker, der über die integrierte Kamera eingelesen wird. Die Verwendung eines hinreichend großen Markers erlaubt die Genauigkeit im Bereich weniger Millimeter, die von der Anwendung benötigt wird. Letztere instruiert den Nutzer dabei und informiert über den Fortschritt des Vorgangs.

Die Idee dahinter besteht darin, diesen, hier als "Tracking" bezeichneten Vorgang, nur einmalig erfolgen zu lassen. Wurden Position und Ausrichtung einmal ermittelt, werden diese gespeichert und verwendet. Hier bietet die HoloLens den sogenannten *World Anchor Store* an, in dem die Position von Objekten in Relation zum Raumverständnis dauerhaft gespeichert werden kann. Dieser Speicher ist persistent und kann die Position über mehrere Anwendungssessions hinweg speichern.

Das Design nutzt hier gezielt die Funktionalitäten der HoloLens sowie den Umstand aus, dass Spule und Magnettadel, nachdem sie einmal aufgestellt wurden, nicht weiter bewegt werden müssen. Allerdings bedeutet dieser Ansatz auch, dass die Qualität der Positionierung über mehrere Sessions hinweg abhängig vom Raumverständnis der HoloLens ist. Deshalb lässt sich das Tracking jederzeit manuell neu anstoßen, wenn die Überlagerung als nicht gut genug empfunden wird.

Solange also der Versuchsaufbau nicht bewegt wird, kann die einmalig gespeicherte Position verwendet werden. Die Anwendung erkennt automatisch, ob die gespeicherten Daten vorliegen. Dadurch verkürzt sich die Setup-Zeit und es trägt

dazu bei, dass auch unerfahrene Nutzer die Applikation verwenden können.

Zusammenfassung

- Start-Logo mit Ladevorgang
- Menü mit Start der Hauptanwendung, Tracking und Optionen, jederzeit aufrufbar
- Einstellungsmenü für IP, Feldstärke der Erde und weitere Parameter, Default-Werte vorhanden
- Einstellungen werden persistent auf der HoloLens gespeichert und lassen sich ggf. auf Default-Werte zurücksetzen
- Tracking-Sequenz zum Einlesen des Markers mit persistenter Speicherung der Position

4.7 Zusammenfassung Design

TODO...

Die vorgestellte Lösung zielt darauf ab, die physikalischen Zusammenhänge erkennbar zu machen, indem die Möglichkeiten der HoloLens genutzt, technische Einschränkungen berücksichtigt und Designempfehlungen eingearbeitet werden. Dazu wird, wenn möglich, auf bestehende, bereits für die HoloLens designete Objekte und Verhaltensweisen zurückgegriffen. Durch die räumliche und zeitliche Integration der Hologramme in den Versuchsaufbau werden die physikalischen Eigenschaften des Systems direkt in ihrem tatsächlichen Kontext dargestellt. Dabei hat der Nutzer die Kontrolle über das Verhalten des Systems, wodurch es auf natürliche Weise erforschbar wird.

Das folgende Kapitel erläutert nun die Details der Implementierung dieses Designs.

5 UMSETZUNG

Im folgenden soll erläutert werden, wie der zuvor erarbeitete Lösungsansatz umgesetzt wurde. Dazu gibt das Kapitel zunächst einen Überblick über das System und die Architektur der Anwendung. Danach geht das Kapitel genauer auf die Implementierung der Darstellungen und der Interaktion ein. Abschließend werden Details zur Performance genannt.

5.1 Aufbau des Systems

Das System ist als Client-Server-Architektur realisiert. Ein Server erfasst und verarbeitet die in der Schaltung gemessenen Werte für die Stromstärke. Diese stammen von einem Arduino, der in den Stromkreislauf eingekoppelt ist. Die Applikation auf der HoloLens tritt als Client auf und erfragt die aktuellen Werte vom Server. Einen Überblick über die Kommunikation gibt das Schema in Abbildung 16.

To Do

Abbildung 16: Schema Kommunikation Schaltung Arduino Server HoloLens

5.1.1 Client-Server Datenübertragung

Die Übertragung der Messwerte vom Arduino zur Anwendung ist so konzipiert, dass Änderungen in Echtzeit übermittelt werden, ohne dass unnötiger Netzwerktraffic entsteht. Der Client betreibt ein Polling gegen den Server, der jedoch Antworten solange zurückhält, bis ein neuer, vom vorigen abweichender Wert gemessen wurde. Dieses Verhalten veranschaulicht das Sequenzdiagramm in Abbildung 17. Das Vorgehen führt dazu, dass Änderungen durch den Nutzer am Regler der Spannungsquelle ohne wahrnehmbare Verzögerung auf der HoloLens ankommen.

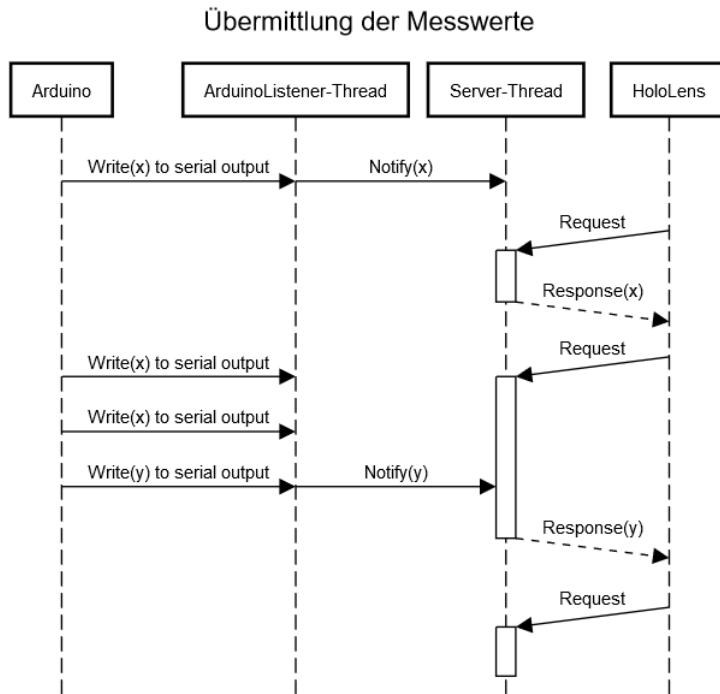


Abbildung 17: Sequenzdiagramm Kommunikation

Server

Der Server besteht aus zwei miteinander kommunizierenden Threads. Ein Thread übernimmt das Lesen und Verarbeiten der Rohdaten, die über die serielle Schnittstelle eintreffen. Bei signifikanten Änderungen wird der zweite Thread mittels einer gemeinsamen, synchronisierten Variablen über die neuen Werte informiert. Dieser beantwortet daraufhin einen ggf. ausstehenden Request vom Client. Ab wann eine Änderung als signifikant gewertet wird, lässt sich über einen Threshold einstellen. Der Server wurde mit Python und der Bibliothek pyserial umgesetzt.

Client

Der Client stellt durch die Nutzung von asynchronen Anfragen sicher, dass die Anfragen nicht blockieren. Unity bietet nur einen Thread, synchrone Anfragen würden daher zu einer Blockierung des Renderprozesses führen und so die Framerate beeinträchtigen. Da die Framerate bei 60 Hz gedeckelt ist und eine Antwort frühestens im nächsten Frame bearbeitet werden kann, beträgt die minimale Antwortzeit ca. 17 ms. Das ist ausreichend, um keine wahrnehmbare Verzögerung aufkommen zu lassen, da die Paketlaufzeit in einem lokalen Netzwerk typischerweise im einstelligen Millisekundenbereich liegt. Eine zusätzliche Wartezeit zwischen Requests kann außerdem eingestellt werden.

Setup

Damit die Kommunikation erfolgen kann, müssen erstmalig einige Einstellungen vorgenommen werden. Auf Seiten des Servers ist die IP-Adresse des Servers und der COM-Port des Arduinos in eine Config-Datei einzutragen. Außerdem muss die IP-Adresse des Servers auf der HoloLens angegeben werden. Dies geschieht über die Einstellungen.

5.1.2 Architektur der HoloLens-Anwendung

Der Hauptteil des Systems besteht in der auf der HoloLens laufenden Applikation. Die Anwendung basiert auf der Unity Engine und wird als UWP App bereitgestellt. Das Schema in Abb. 18 gibt einen Überblick über die verschiedenen Komponenten der Anwendung. Deren Aufgaben sind in der darunter zu findenden Tabelle kurz zusammengefasst.

To Do

Abbildung 18: Schema Komponenten

Überblick

Komponente	Funktion
Menu	Hauptmenü, steuert den Ablauf der Anwendung
Settings	Lädt und Speichert Einstellungen, bietet Zugang zu den Werten für andere Komponenten und steuert die Einstellungs-Oberfläche
Physics	Übernimmt alle physikalischen Berechnungen. Alle relevanten physikalischen Parameter lassen sich konfigurieren.
Tracking	Führt durch den Prozess der Positionsbestimmung und setzt den World Anchor
Model Anchor	Dient als Anker- und Container-Objekt für die einzelnen Darstellungskomponenten. Dazu gehören: Verdeckungsmodell, Kompass, die Magnetfeldmodelle, die Stromrichtungsindikatoren und das Datenpanel.
Webservice	Übernimmt die Kommunikation mit dem Server und gibt erhaltene Daten weiter
Interaction	Verarbeitet Input und Ablaufsteuerung, soweit dies nicht an einem konkreten Objekt abgewickelt wird wie z.B. Spracheingabe.

Tabelle 4: Aufgaben der einzelnen Komponenten

Eine Komponente besteht aus einer Hierarchie von Unity's GameObjects, die mit entsprechenden Skripten versehen sind. Die Komponenten kommunizieren auf unterschiedliche Weise miteinander. Die Behandlung von Events z.B. aufgrund von Nutzereingaben oder neuen Messwerten erfolgt über Callbacks. Manche Komponenten sind auch Singletons, auf die direkt zugegriffen werden kann wie z.B. die Einstellungen.

5.2 Implementierung

Die Umsetzung erfolgte mit Unity 2017.4.18f1, dem Mixed Reality Toolkit 4.3.0 sowie Version 10.0.17134.0 des Windows SDK. Im Folgenden soll die Umsetzung der Darstellung und darauf folgend die der Interaktion beschrieben werden.

5.2.1 Implementierung der Darstellungen

Die Darstellungen sind in einer Hierarchie unterhalb eines Anker-Objektes angeordnet. Dynamische Elemente wie z.B. die Felddarstellungen werden zur Laufzeit in dafür vorgesehenen Container-Objekten erzeugt und gesteuert. Dazu gehört z.B. das Ein- und Ausblenden sowie die Anpassung an aktuelle Messwerte.

Die Felddarstellungen

Die 3D-Objekte der Magnetfelder wurden in Blender erstellt, in Unity importiert und als vorgefertigte Objekte gespeichert. Diese werden von Skripten zur Laufzeit instanziert. Als Shader kommt der Standard-MRTK Shader mit den entsprechenden Einstellungen für Farbe und Transparenz zum Einsatz. Die Transparenz kann auf so jedoch nicht immer korrekt berechnet werden, wenn Teile eines Objektes sowohl vor als auch hinter einem anderen, transparenten Objekt liegen. Hier wurden jedoch aufgrund der zeitlichen Begrenzung und dem begrenzten Auftreten des Problems keine weiteren Maßnahmen, wie z.B. die Aufteilung der Geometrie in mehrere Objekte, ergriffen.

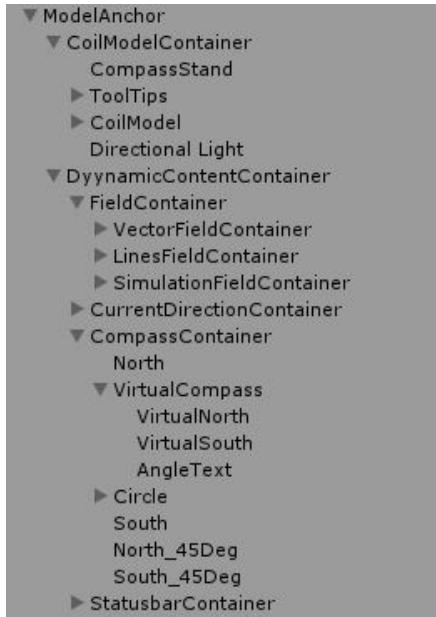


Abbildung 19: Hierarchie der einzelnen Darstellungsobjekte.

Vorberechnete Darstellung des Magnetfeldes

Die numerische Lösung der Feldgleichungen erfolgte mittels der Simulationssoftware COMSOL Multiphysics. Diese Arbeit konnte auf eine bestehende Implementierung einer Helmholtz-Spule aufbauen. Hier wurden lediglich die folgenden Parameter für die Berechnung der Feldlinien gesetzt:

- Kugelvolumen für Begrenzung der Simulation auf zwei Meter gesetzt, maximale Granularität
- 12 Feldlinien mit Anfangspunkten der X-Achse
- Qualitätseinstellungen der Darstellung auf Maximum gesetzt

Die Einstellung der maximal möglichen Qualität liegt darin begründet, Artefakte durch Ungenauigkeiten der Berechnung zu vermeiden. Bei geringeren Quali-

tätseinstellungen traten unter anderem asymmetrische Feldlinien auf, die physikalisch nicht korrekt sind und zu Irritationen führen würden.

Export, Import, Datenformat

Das Ergebnis der Simulation ist eine Liste von Datenpunkten der Form `[FeldlinienNr: Int, Position: Vector3, Betrag der Flussdichte: float]`. Dafür wurde ein CSV-Reader geschrieben, der die Daten zur Laufzeit der Applikation einliest, interpretiert und zum Rendering an GameObjects weitergibt. Folglich ließen sich weitere Simulationen vorberechnen und anzeigen. Das Einlesen der Daten erfolgt beim Startvorgang.

Filtering

Aufgrund der hohen Qualitätseinstellungen liefert die Simulationssoftware eine große Menge an Datenpunkten. Die verwendete Berechnung enthält knapp 12,000 Datenpunkte, die im Rahmen der limitierten Ressourcen nicht alle dargestellt werden können³. Daher wird ein Filter angewandt, der beim Einlesen eines Exportes nur Datenpunkte behält, die einen räumlichen Mindestabstand zum vorangegangenen Wert einhalten. Außerdem werden doppelt gezogene Linien erkannt und entfernt. Durch dieses Vorgehen reduziert sich die Datenmenge auf ca. 1,600 Datenpunkte. Dabei entsteht jedoch kein wahrnehmbarer Qualitätsverlust der Darstellung.

Der Stromfluss

Die Indikatoren werden mit Unity's LineRenderer dargestellt und sind bezüglich ihrer Größe, Positionierung und Ausrichtung parametrisiert. Bei der Annotations der Anschlüsse konnte auf ein vorgefertigtes Tooltip-Objekt des MRTK zurückgegriffen werden. Dies wurde um die entsprechenden Farben und Icons ergänzt. Die Icons basieren auf freien Icon-Packeten⁴, wurden jedoch angepasst. Da schwarze Strukturen vor transparentem Grund auf der HoloLens so nicht zu sehen sind, wurde der Hintergrund bzw. die Icon-Struktur zu weiß geändert.

Kompass

Die verschiedenen des Kompasses werden ebenfalls durch einen LineRenderer gezeichnet. Um eine gestrichelte Linie zu erhalten, wird eine Textur mit weißem Kreis vor transparentem Hintergrund auf die Länge der Linie mittels Tiling skaliert. Ein dazu angefertigtes Skript übernimmt diesen Vorgang automatisch.

³Ein Test mit knapp 9,000 Punkten führte zu einer CPU-Zeit von ca. 45 ms pro Frame und einer Framerate von ca. 20 FPS.

⁴<https://icons8.com>

Occlusion Berechnung

Für die Verdeckungsberechnung wurde die Spule anhand gemessener Größen in Blender manuell nachmodelliert. Das Spatial Mapping der HoloLens ist hier zu ungenau, um eine glaubwürdige Verdeckung zu ermöglichen. In der Standard-Einstellung wird die Spule gar nicht erkannt, was wohl auch dem Material (Kupfer) geschuldet sein dürfte. Eine Darstellung des Spatial Mappings des Versuchsaufbaus ist in Abb. 20 zu sehen. Die Geometrie wird ausschließlich in den



Abbildung 20: Spatial Mapping der Gerätschaften. Während die Spannungsquelle gut zu sehen ist, ist die Spule lediglich als Unebenheiten im Tisch zu erkennen. Die entsprechende Stelle ist durch eine Ellipse markiert.

Tiefenpuffer gerendert⁵. Das vermeidet überflüssige Draw Calls und folgt der Empfehlung der Dokumentation. Damit virtuelle Objekte aber auch dann noch verdeckt bleiben, wenn reale Objekte nah kommen, muss das Near Clipping Plane sehr nah am Kameraursprung liegen. Andernfalls würden weiter entfernte, virtuelle Objekte plötzlich doch vor realen Objekten angezeigt werden, sobald letztere zu nah sind und das Clipping die für die Verdeckung eingesetzten Objekte vom Rendering ausschließt. Das stellt bei dieser Lösung aber kein Problem dar, weil zu nahe, virtuelle Objekte ohnehin über ein eigenes Verhalten ausgeblendet werden, das nicht auf die Clippingebene aufbaut.

Near Plane Fading

Anstelle auf Basis der Clippingebene werden zu nahe Objekte über Skripte bzw. Shader kontinuierlich ausgeblendet. Dieses Verhalten ist für den Nutzer angenehmer als ein plötzliches Aufpoppen bzw. Verschwinden von Objekten in unmittelbarer Nähe.

Der für die meisten Objekte genutzt MRTK Standard Shader bietet bereits einen konfigurierbaren Bereich, über den Objekte ausgeblendet werden. Für andere Elemente wird die Transparenz über ein Skript geregelt. Hier werden für Anfang und Ende des Bereiches, über den zur Transparenz übergegangen wird,

⁵Der entsprechende Shader ist nur wenige Zeilen lang und findet sich in verschiedenen Varianten im Internet. Dieser orientiert sich an <http://wiki.unity3d.com/index.php/DepthMask>

die empfohlenen Werte von 85cm und 50cm genutzt. Lediglich die Linien des Kompasses werden 10 cm "später" ausgeblendet, damit die Ausrichtung der Nadel entlang der Linien auch aus geringerem Abstand und damit etwas besser erfasst werden kann. Insgesamt ergibt sich die Transparenz (Alpha-Wert) eines Objektes dann aus dem Minimum der Werte durch die verschiedenen Effekte.

Diese Lösung geht jedoch zu Lasten der Performance, denn für die Transparenz werden alle betroffenen Objekte von hinten nach vorne (aus Sicht der Kamera) gerendert. Auch Pixel, die durch weiter vorne gelegene Objekte eingenommen werden, müssen mehrfach gezeichnet werden, da die dichteren Objekte ggf. transparent sind und durch die Farbe anderer Objekte beeinflusst werden. Dieser sogenannte Overdraw nimmt zusätzliche Rechenzeit in Anspruch. Eine Alternative bestünde darin, Objekte schwarz anstatt transparent werden zu lassen. Auf der HoloLens macht dies optisch zunächst keinen Unterschied, da Schwarz auf der Brille nicht dargestellt wird. Allerdings bliebe so die Verdeckung durch bereits verschwundenen Objekte bestehen, was zu Irritationen führen würde.

Aus Zeitgründen wurde das Fading für das Datenpanel, die Konnektoren der Tooltips und die Linien der Simulationsdarstellung nicht umgesetzt.

Beleuchtung der Szene

Die virtuellen 3D-Objekte werden durch eine Lichtquelle oberhalb der Spule beleuchtet. Eine Schattenberechnung erfolgt nicht. Tests mit realen Gegenständen ähnlicher Größe ergaben, dass die Objekte bei typischen Lichtverhältnissen keine erkennbaren Schatten werfen würden.

Kantenglättung

Bei Darstellungen auf der HoloLens fällt der Kantenglättung eine besondere Bedeutung zu. Im Gegensatz zu anderen Anwendungen, bei denen der Nutzer die Kamera über herkömmliche Eingabegeräte steuert, ist bei der Brille die Kamera an die Kopfbewegungen des Trägers gebunden. Die Displays folgen daher den ständigen, feinen Vibrationen des Kopfes und die Kamera steht somit nie still. Deshalb können Treppeneffekte an Kanten besonders auffällig und störend wirken, da das resultierende Kantenflimmern stetig präsent ist.

Unity unterstützt standardmäßig einige Anti-Aliasing Verfahren. Dazu gehört Multisample Anti-Aliasing (MSAA), das ohne weitere Maßnahmen für die Kamera aktiviert werden kann. Im Gegensatz dazu benötigen die anderen Methoden Deferred Shading und würden eine Umstellung des Rendering Path bedeu-

⁶Standardmäßig angeboten werden außerdem Fast Approximate AA und Temporal AA

ten⁶. Im Rahmen dieser Arbeit wurde deshalb nur MSAA in Betracht gezogen.

Vor allem für die gewählte Visualisierung der Simulationsdaten über Linien ist eine Form des Anti-Aliasing relevant, da hier besonders viele Kanten entstehen. Deshalb wurde sich für Einsatz von zweifachem MSAA entschieden, obwohl damit erheblicher Rechenaufwand verbunden ist.

5.2.2 Implementierung der Interaktion

Die Interaktion erfolgt, wie in Kap. 4.5 beschrieben, durch Klicks. Sprachbefehle wurden aus Zeitgründen nur für Debugging-Funktionen implementiert. Während des Hauptteils der Anwendung belaufen sich die möglichen Aktionen auf:

- Klick: Wechsel zwischen den beiden Echtzeitdarstellungen
- Doppelklick: Wechsel zwischen Simulations- und Echtzeitdarstellungen
- Hold-Klick: Aufrufen des Hauptmenüs

Für die letzteren beiden wurden entsprechende Skripte geschrieben, die diese Gesten erkennen. Zwar erkennt das MRTK bereits eine Hold-Geste, allerdings kann hier der Nutzer beliebig lange gedrückt halten und erst beim Loslassen feuert das entsprechende Event. Zum Aufrufen des Menüs ist jedoch ein Verhalten wünschenswert, bei dem nach kurzem Gedrückt-Halten das Menü erscheint. Daher wurde hier eine eigene Lösung entwickelt.

Jeder Klick wird durch einen Klick-Sound begleitet, der als Feedback dient. Ist der Cursor aktiv, bietet dieser auch ein visuelles Feedback. Als Klick-Sound wurde ein Standard-Sound des MRTK verwendet, der auch von den Buttons genutzt wird.

Progress Indikator

Um den Anwender über länger laufende Prozesse zu informieren, kommt eine Fortschrittsanzeige zum Einsatz. Hier kann auf den aus Microsoft Windows bekannten Indikator zurückgegriffen werden, den das MRTK als vorgefertigtes Objekt anbietet. Das Mixed Reality Capture in Abb. 21 zeigt diesen beim Start der Anwendung.



Abbildung 21: Progress Indikator Laden und Tracking

Für die Kommunikation mit dem Nutzer ist bei dieser Anwendung vor allem wichtig, was das System tut. Längere Ladezeiten o.Ä. treten hier nicht auf, daher wird lediglich das Text-Element des Indikators verwendet, von der prozentualen Anzeige wird nicht Gebrauch gemacht. Komponenten, die den Indikator nutzen, stellen jedoch stets sicher, dass eine Nachricht lange genug sichtbar ist, um gelesen werden zu können. Länger laufende Operationen sind stets asynchron umgesetzt, die pro Frame nur einen Teil der Arbeit erledigen und so den Renderprozess nicht blockieren.

Tracking

Für das Erkennen der Markerposition kommt das Tracking Framework Vuforia zum Einsatz. Ein optischer Marker wird vor der Spule auf dem Untergrund platziert. Dieser wird dann über die Frontkamera der HoloLens durch das Framework erkannt und die Position und Ausrichtung bestimmt. Die Modelle werden entsprechend positioniert und ein World Anchor gesetzt. Damit ist die Positionierung abgeschlossen und der Marker kann entfernt werden. Da Vuforia nur während dieser Sequenz aktiviert ist, werden für den Rest der Anwendung Hardwareressourcen frei.

Dieser Vorgang lässt sich über das Menü jederzeit neu anstoßen und die einzelnen Schritte werden über den Progress Indikator dem Nutzer kommuniziert. Die Steuerung des Prozesses erfolgt durch den *Tracking Manager*. Dieser startet und stoppt das Framework, reagiert auf Änderungen im Tracking und informiert den Anwender über den Fortschritt. In der aktuellen Version funktioniert das nochmalige Anstoßen des Tracking-Vorgangs nur in der Entwicklungsumgebung und noch nicht auf der HoloLens.

Einstellungen

Die Einstellungen sind über ein dem Daten-Panel ähnliches Objekt realisiert,

das in Abbildung 22 zu sehen ist. Ein Klick auf eines der Input-Felder ruft die virtuelle Tastatur hervor, beide werden durch das MRTK bereitgestellt und wurden hier für numerische Eingaben konfiguriert. Die Werte werden als JSON formatiert und in das AppData-Verzeichnis der Anwendung gespeichert. Damit stehen sie auch nach einem Neustart oder Update der App noch zur Verfügung. Die Applikation sucht beim Start automatisch nach gespeicherten Einstellungen und lädt entweder diese oder die Default-Werte. Andere Komponenten werden durch ein Event über sich ändernde Einstellungen benachrichtigt und passen sich entsprechend an. Für die Formatierung als JSON wurde eine vorhandene Implementierung genutzt [Gö15].

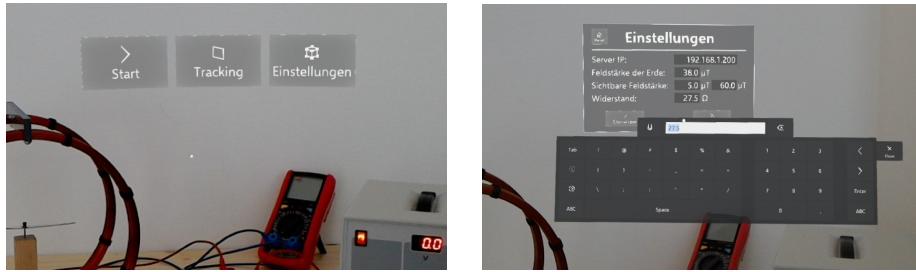


Abbildung 22: Aufnahmen von Menü und Einstellungen der HoloLens-Anwendung.

Menü

Die Umsetzung des Menüs ist ebenfalls in Abbildung 22 dargestellt. Die Form der Buttons wurde so angepasst, dass die Labels und Icons problemlos darauf Platz finden. Bei den Icons wurde auf Standard-Elemente aus dem MRTK zurückgegriffen. Das Menü wird über den *MenuController* gesteuert, von dem aus alle weiteren Vorgänge gestartet werden. Dieser aktiviert auch den Cursor, der zur Nutzung von Menu und Einstellungen dient. Sowohl das Menü, als auch die Ladeanzeige und die Einstellungen werden durch Skripte der Kameraposition angepasst und folgen dieser in festgelegten Bereichen für Abstand und Winkel. Die Skripte werden durch das MRTK bereitgestellt.

Intro-Sequenz

Es wurde eine Startsequenz entwickelt, die Aufgaben wie das Laden von Daten und Einstellungen und die Initialisierung der einzelnen Komponenten übernimmt. Hier wird ein Logo in Form eines größeren Schriftzuges und dazu der Progress Indikator angezeigt. Letzterer informiert über den Zustand des Ladevorgangs. Während des Vorgangs werden insbesondere die Einstellungen und Simulationsdaten geladen.

Diese Umsetzung erlaubt die notwendigen Ladevorgänge und ist für den Nutzer nachvollziehbar. Außerdem gibt das letzterem einige Sekunden Zeit, um sich auf die Anwendung einzustellen, bevor das Menü erscheint und eine Aktion vom Anwender verlangt.

- Tracking mit Vuforia, nur zum Erkennen des Markers aktiv
- Einstellungen werden als JSON-Datei im AppData Verzeichnis gespeichert
- Menü übernimmt Steuerung der einzelnen Vorgänge, jederzeit aufrufbar
- Startvorgang mit Intro-Sequenz lädt Daten und Einstellungen und initialisiert Komponenten

5.2.3 Performance-Optimierungen

Zuletzt sollen einige Maßnahmen genannt werden, die zu einem geringeren Resourcenverbrauch der Applikation beitragen. Zunächst ist festzuhalten, dass die durch das MRTK voreingestellten Qualitätseinstellungen genutzt wurden. Einzige Ausnahme stellt hier die Kantenglättung dar. Darüber hinaus wurden die folgenden Einstellungen angewandt:

- Single Pass Instanced Rendering
- Größe des Tiefenpuffers auf 16-Bit gesetzt (Minimum)
- Vuforia nur für den Vorgang der Positionsbestimmung aktiv
- Physics Engine deaktiviert
- Occlusion Mesh wird ausschließlich in Z-Puffer gerendert
- Unsichtbare (vollst. transparente) Objekte werden meist deaktiviert
- Reduktion der Simulationsdaten auf ca. 13%

Diese Maßnahmen basieren vorrangig auf den Empfehlungen zur Performance in der Dokumentation.

6 ERGEBNISSE UND DISKUSSION

Ziel dieser Arbeit war es, zu untersuchen, wie ein konkretes physikalisches Experiment durch eine Anwendung mit der HoloLens unterstützt werden kann. Dafür wurde ein Versuch aus der Elektrodynamik ausgewählt, Probleme identifiziert und eine Lösung erarbeitet. Diese soll nun im Hinblick auf die in der Problemstellung festgehaltenen Anforderungen bewertet werden. Die Ergebnisse werden dann im breiteren Kontext der Fragestellung diskutiert.

6.1 Ergebnisse

Die Lösung integriert virtuelle Elemente in das Experiment, die relevante, physikalische Zusammenhänge abbilden. Dazu gehören interaktive Darstellungen des Magnetfeldes sowie Messwerte, der Stromfluss und ein Kompass. Durch eine dreidimensionale Einbettung in den tatsächlichen Versuchsaufbau wird ein direkter Zusammenhang zwischen dem Verhalten der Objekte des Versuches und den physikalischen Modellen hergestellt.

Gleichzeitig berücksichtigt das Design die besonderen technischen Modalitäten der HoloLens. Auf der einen Seite wird von den verschiedenen technischen Möglichkeiten Gebrauch gemacht (Tracking, World Anchor, stereoskopisches see-through Display, Gestenerkennung, etc.). Auf der andern Seite werden technisch bedingte Anforderungen an das Design von Anwendungen berücksichtigt (Abstand, Größe, Farbe, Positionierung, Performance, etc.).

Im Weiteren sollen die Ergebnisse zunächst aus anwendungsorientierter Sicht näher vorgestellt werden, bevor auf die Resultate aus technischer Sicht eingegangen wird.

6.1.1 Unterstützung des Experimentes

Die Anwendung unterstützt die Vermittlung der physikalischen Zusammenhänge durch die Integration der entsprechenden Modelle und Darstellungen in den Versuchsaufbau und -Ablauf. Im Wesentlichen umfasst die Lösung diesbezüglich folgende, inhaltliche Funktionen:

Unterstützung des Versuches

- Visualisierung der Komponenten des Magnetfeldes in zwei Darstellungen und in Echtzeit
- Darstellung einer vorberechneten Lösung für eine ausgewählte Ebene des Feldes der Spule
- Kennzeichnung der Stromrichtung
- Integration einer virtuellen Kompass-Skala mit Hervorhebung wichtiger Zustände
- Einbettung einer virtuellen Kompassnadel auf Basis theoretischer Werte
- Numerische Darstellung gemessener und berechneter Echtzeitdaten

Durch den gewählten Designansatz werden die physikalischen Eigenschaften in ihrem realen, räumlichen und zeitlichen Kontext dargestellt. Somit kann ein direkter Zusammenhang zwischen dem Verhalten der Objekte des Versuches und den physikalischen Modellen, Darstellungen und Messwerten hergestellt werden.

TODO...

Korrektheit und Interpretierbarkeit

Die Korrektheit und Interpretierbarkeit wird weitestgehend über die Nutzung etablierter physikalischer Darstellungsmodelle gesichert. Dabei liegt der Fokus nicht auf möglichst exakten Darstellungen numerischer Werte, sondern auf einer zweckmäßigen Darstellung. Im Vordergrund steht das qualitative Verständnis.

Die Anwendung ist jedoch nicht vollständig selbsterklärend, sondern bedarf einer Anleitung durch eine fachkundige Person. Das betrifft auch den Bereich Interpretierbarkeit in den Punkten:

- Räumliche Begrenzungen aller Felddarstellungen
- Einordnung der berechneten Vektoren und Feldlinien als Komponenten des resultierenden Feldes
- Einordnung der Simulationsdarstellung als unabhängig, vorberechnet und nur für die Spule allein zutreffend (ohne Feld der Erde)
- Einordnung der Darstellungen als approximativ

Die betroffenen Eigenschaften lassen sich zwar erahnen oder indirekt ableiten, werden jedoch nicht direkt durch die Applikation kommuniziert. Dafür könnte die Anwendung um eine Einführung z.B. durch einen eingesprochenen Text mit einer eigenen Sequenz entwickelt werden.

Weitere Aspekte

Der Nutzer wird durch das Tragen der HoloLens nicht wesentlich in der Interaktion mit den Gerätschaften eingeschränkt. Alle wichtigen Elemente (Anschlüsse, Spannungsquelle, Kompassnadel, Messgeräte, Spule) bleiben sichtbar und werden wenn dann nur zu kleinen Teilen überblendet. Die Hände bleiben frei zum Einstellen der Geräte, dem Anfertigen von Notizen oder der Verwendung weiterer Lehrmittel wie z.B. Lehrbüchern oder Arbeitsblättern. Der Klicker hat eine kleine Schlaufe, so dass er nicht unbedingt festgehalten werden muss.

Die Applikation ist auch für Anwender ohne Erfahrungen mit der HoloLens oder Mixed Reality im Allgemeinen nutzbar, es müssen keine Handgesten erlernt werden. Allerdings kann die Nutzererfahrung bei unerfahrenen Nutzern durch ungünstige (z.B. hektische) Kopfbewegungen beeinträchtigt werden. Außerdem wurden die vorhandenen Gerätschaften genutzt und nur geringfügig angepasst (Überkleben der Magnetnadel).

Nachdem die inhaltlichen Ergebnisse beleuchtet wurden, sollen nun die Resultate aus technischer Seite beleuchtet werden.

6.1.2 Technische Umsetzung

Im Hinblick auf die technischen Anforderungen wurde eine Liste von Qualitätskriterien zugrunde gelegt. Die Bewertung der Lösung anhand dieses Maßstabes ist im Folgenden erörtert. Der Einschätzung liegen die zu jedem Kriterium genannten Hinweise zur Bewertung zu Grunde.

Insgesamt erfüllt die Applikation die technischen Anforderungen fast vollständig bis vollständig. Eine Aufschlüsselung der einzelnen Kriterien bietet die unten stehende Tabelle 5. Die Hologramme wirken weitestgehend stabil und glaubhaft positioniert, sie bleiben im Rahmen der Komfortzone und passen sich dem Nutzer an. Die Interaktion erfolgt zum Großteil über Standardmechanismen. Auch im Bereich Performance bleibt die Anwendung im Rahmen und liefert konstant 60 Bilder pro Sekunde aus. Allerdings beansprucht die Kantenglättung massiv Ressourcen und lässt kaum Spielraum für weitere oder komplexere Darstellungen.

Im Weiteren soll auf einzelne Aspekte kurz näher eingegangen werden.

Kriterium	Ergebnis	Bewertung
Framerate	Durchgehend 60 FPS, keine Einbrüche der Framerate.	Optimal
Stabilität der Hologramme	Hologramme erscheinen durchgehend sehr stabil, Elemente liegen im Abstand von max. 20cm zu einem Spatial Anchor und der Stabilization Plane. Seltene, minimale Sprünge sowie Wippen der simulierten Feldlinien treten auf. Objekte, die sehr dicht an realen liegen, driften bei Bewegungen leicht	Fast optimal
Positionierung	Sehr genaue Positionierung über optischen Marker. Hologramme sind glaubhaft in die Spule eingebettet. Überschneidungen von einigen Millimetern sind jedoch möglich. World Anchor nur bedingt ausreichend genau.	Fast optimal
Komfortzone	Elemente liegen in Komfortzone (Winkel und Distanz), sofern eine geeignete Unterlage vorhanden ist. Design begünstigt den gewünschten Abstand. Minimale Distanz wird über Fading sichergestellt.	Optimal
Fokuswechsel	Kaum Neufokussierungen notwendig. Nur bei Ablesen des Kompass und der Stromrichtung.	Fast optimal
FOV-Grenzen	Darstellungen passen bei empfohlener Distanz vollständig in FOV mit etwas Spielraum für Bewegungen. Durch Verankerung am realen Objekt verliert Nutzer den Kontext nicht.	Optimal
Anpassung an Nutzerposition	Text, Labels, Linien und Menüs richten sich zur Nutzerposition aus. Frei bewegliche Elemente (Menü, Progress Indikator) folgen Nutzer.	Optimal
Input Interaction Clarity	Vorhandene, einfache Standard-Interaktionsmechanismen genutzt und geringfügig erweitert. Konstistentes, akustisches Feedback. Jedoch keine Erklärung der möglichen Aktionen durch die Anwendung selbst.	Erfüllt
Interaktive Objekte	Vorhandene Buttons, Felder und Cursor genutzt.	Optimal
Ladevorgänge	Vorhandenen, animierten Progress Indikator verwendet. Lesbarkeit des Textes wird abgesichert. Vorgänge sind kurz, keine Angabe einer erwarteten Dauer notwendig.	Optimal

Tabelle 5: Bewertung der Umsetzung anhand der in Kap. 2.1.4 vorgestellten Qualitätskriterien. Die detaillierten Kriterien finden sich in [Coo]. Die Einstufung erfolgt anhand der drei vorgegebenen Stufen optimal, erfüllt und nicht erfüllt.

Stabilität

Die Stabilität der Objekte beeinflusst die Nutzererfahrung wesentlich, da durch die Einbettung in die Spule selbst geringe Abweichungen negativ auffallen. Bei einer umsichtigen Nutzung treten diesbezüglich wenige bis keine Probleme auf, die Elemente wirken stabil. Lediglich die sehr nah an der Spule positionierten Daten-Panels und Tooltips können bei Bewegungen einen leichten Drift aufweisen. Seltener sind kleinere Sprünge oder Vibrationen festzustellen. Und die Darstellung der Feldlinien wippt bei vertikalen Kopfbewegungen leicht um den Mittelpunkt. Das ist der Tatsache geschuldet, dass die Feldlinien steil auf der Stabilisations-Ebene stehen und sich von dieser bis zu 1,2 Meter ausbreiten. Der Effekt ist jedoch gering und nur auffällig, wenn er provoziert wird.

Allerdings hängt die Stabilität nicht unwesentlich von den Randbedingungen ab. Die weiter unten genannten Umstände des Tests erleichtern das Tracking und die Stabilisation. Unter weniger geeigneten Bedingungen kann die Stabilität und damit auch die Positionierung der Hologramme beeinträchtigt werden. Insbesondere kann es bei unerfahrenen Nutzern durch ungünstige Aktionen wie z.B. ruckartige Kopfbewegungen zu negativen Auswirkungen auf die Stabilität kommen.

Positionierung

Einen Eindruck von der Güte der Positionierung lässt sich anhand von Abb. 23 gewinnen. Das normalerweise nur in den Tiefenpuffer gerenderte Mesh der virtuellen Spule wird hier durch einen Standard-Shader sichtbar dargestellt. Die reale Spule ist dadurch fast gar nicht zu sehen. Zwar sind Abweichungen zwischen den beiden Objekten aus unterschiedlichen Winkeln unterschiedlich stark sichtbar, das gewählte Foto gibt jedoch einen guten Anhaltspunkt für die tatsächliche Nutzererfahrung wieder.



Abbildung 23: Überlagerung des virtuellen Modells und der realen Spule. Das virtuelle Modell deckt sich zum großen Teil mit dem realen Objekt. An den Kanten sind jedoch kleine Abweichungen zu erkennen.

Interaction Clarity

In Puncto Interaction Clarity kann die Lösung nicht als optimal eingestuft werden. Denn das Kriterium verlangt ausdrücklich, dass eine Anwendung die ihr

zu Grunde liegenden Interaktionsmöglichkeiten erklärt, sofern sie über Gewohntes hinausgehen. Das ist bei der Steuerung außerhalb des Menüs nicht der Fall. Die Lösung setzt eine Anleitung durch eine begleitende Person voraus, die den Anwender über die möglichen Aktionen informiert. Die anderen Punkte des Kriteriums werden jedoch erfüllt.

Performance

Die Performance hat maßgeblichen Einfluss auf die Stabilität der Hologramme aber auch der Erweiterbarkeit der Applikation und ist daher von besonderer Bedeutung. Deshalb soll hier der Ressourcenverbrauch etwas ausführlicher beleuchtet werden. Dazu wurde die Anwendung mit Hilfe von Unity's Profiler sowie des Performance Monitors der HoloLens-Weboberfläche analysiert. Der Profiler zeigt unter anderem an, wie lange einzelne Tasks auf Seiten von CPU und GPU benötigen. Der Performance Monitor hingegen zeigt den Ressourcenverbrauch des Gesamtsystems an.

Die Anwendung gibt konstant 60 Bilder pro Sekunde aus. Beide genannten Werkzeuge zeigen keine Einbrüche der Framerate. Der Profiler zeigt eine Renderdauer im Bereich von 11 bis 13 Millieskunden an, wie in Abbildung 24. Das liegt deutlich unter den 16,6 ms zwischen zwei Bildern bei einer Bildwiederholfrequenz 60 Hz. Die Lastverteilung zwischen CPU und GPU variiert dabei, je nach aktiver Darstellung. Die Simulationsdaten und das Tracking verlangen mehr CPU Leistung, während das Rendering der 3D-Objekte die GPU mehr in Anspruch nimmt.

TODO...

Die Kantenglättung wirkt sich deutlich auf den Ressourcenverbrauch der Anwendung aus. Eine Gegenüberstellung der Systemleistungen bei aktiviertem bzw. deaktiviertem Multisampling ist Abbildung 25 zu entnehmen. Unter gleichen Bedingungen steigt die Auslastung der GPU durch 2x MSAA von ca. 40 auf ca. 70 Prozent. Das wirkt sich auch auf den Stromverbrauch aus, der dadurch höher ausfällt, aber noch im akzeptablen Bereich liegt.

- Konstante Framerate von 60 FPS
- CPU: 60-30% Auslastung
- GPU: 40-50% Auslastung
- Stromverbrauch unregelmäßig

Testbedingungen

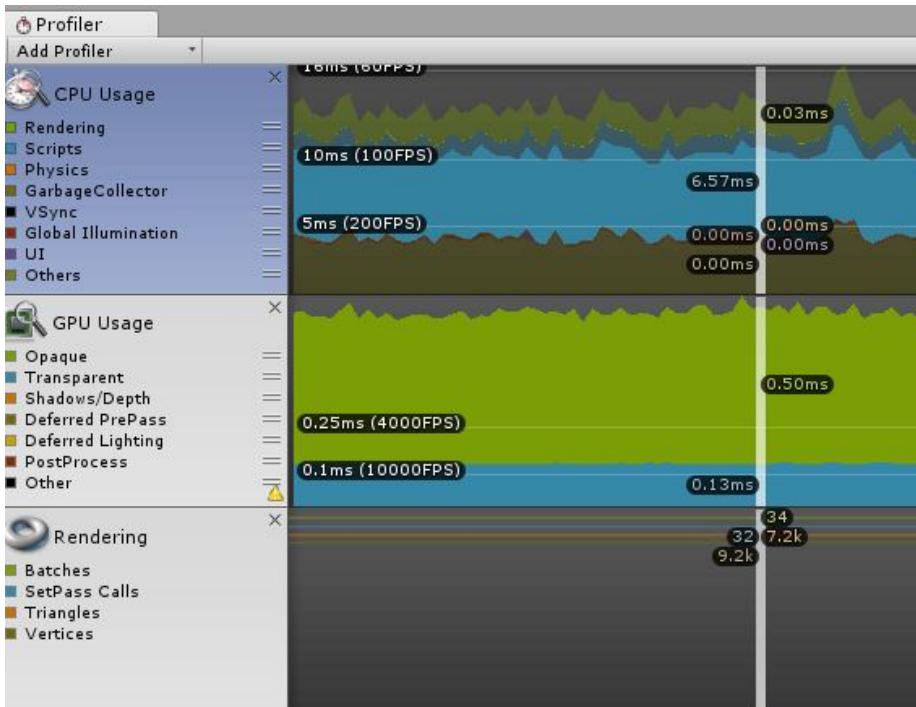


Abbildung 24:

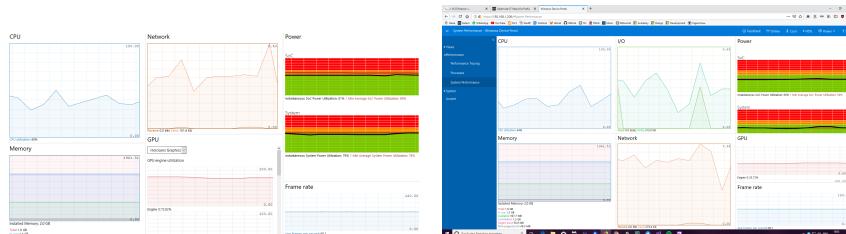


Abbildung 25: Unterschied durch Aktivierung von 2x MSAA. Links ist die Technik aktiviert, rechts nicht, bei sonst gleichen Bedingungen. Die GPU wird ohne MSAA um etwa ein Drittel weniger ausgelastet.

Die Bewertung wurde anhand von Tests unter für die Anwendung günstigen Bedingungen durchgeführt. Der Versuchsaufbau wurde so positioniert, dass die umliegenden Objekte gut für das Tracking der Brille geeignet sind. Außerdem wurde die HoloLens vorher öfter im Testraum verwendet und hatte daher bereits ein gutes Modell des Raums zur Orientierung. Weiterhin wurde die Brille auf den Tester kalibriert und ruckartige oder unnötige Kopfbewegungen vermieden.

6.1.3 Feedback

Zur Bewertung der vorgestellten Lösung wurde die Anwendung außerdem unterschiedlichen Personen vorgestellt und zum Testen überlassen. Dabei handelt es sich um ca. 15 Personen mit unterschiedlichem Grad an Expertise. Das Spektrum umfasst ungefähr zu gleichen Teilen Akademiker, Lehrer und Studenten der Physik. Deren Feedback wurde für diese Arbeit qualitativ festgehalten und zusammengefasst. Die Nutzung der Anwendung beschränkte sich dabei auf den Hauptteil mit den physikalischen Darstellungen.

Inhaltliches Feedback

Die Reaktionen lassen sich weitestgehend als positiv beschreiben. Besonders die Interaktivität und die Darstellung der Simulationsdaten wurden positiv aufgenommen. Bezuglich letzterer wurde gelegentlich nach einer volumetrischen Darstellung gefragt. Die Erfahrung wurde insgesamt meistens als "Cool" oder "Toll" beschrieben (ohne das nach einer Beschreibung gefragt wurde). Da fast alle Nutzer keine oder fast keine vorangegangenen Erfahrungen mit dem Nutzererlebnis der HoloLens hatten, trägt der "Wow-Effekt" einer erstmaligen Nutzung zu den Reaktionen bei.

Da viele der Tester Experten waren, gab es kaum Nachfragen zur inhaltlichen Bedeutung der Darstellungen. Typisch waren jedoch Nachfragen zu den Beschränkungen des Sichtfeldes ("Soll das so klein sein?"). Die Rückfrage, ob die Beschränkungen als störend wahrgenommen werden, wurde jedoch meist verneint. Auch die Stabilität wurde als gut wahrgenommen⁷. Auch zur damit verbundenen Positionierung gab es kein negatives Feedback (z.B. im Falle von nicht korrekt verdeckten Elementen). Negativ fiel hingegen das Kantenflimmern an den Textboxen auf.

Feedback zur Interaktion und Nutzung

Die Interaktion über den Klicker erwies sich als elementar wichtig. Die Verwendung der Handgeste führte bei unsicheren Nutzern oft zu unerwartetem Verhalten der Anwendung, da die HoloLens Gesten erkannte, die nicht beabsichtigt waren. Weitere Schwierigkeiten betrafen vor allem das Aufsetzen der Brille. Denn wenn diese nicht richtig sitzt, ist das ohnehin schon kleine Sichtfeld nicht vollständig sichtbar. Hier schaffte jedoch eine kurze Erklärung dazu, wie die Brille sitzen sollte, Abhilfe⁸.

⁷Einige Tester wurden ausdrücklich gebeten, ihren Eindruck von der Stabilität zu beschreiben

⁸Das Feedback zu Sichtfeld, Tragekomfort und Interaktion ist konsistent mit dem Feedback was Microsoft dazu erhalten hat. Alle drei Aspekte wurden deshalb beim Nachfolgemodell massiv verbessert.

Das Feedback ist nachfolgend noch einmal zusammengefasst.

Qualitatives Feedback

- Insgesamt positive Bewertung durch alle Nutzer
- Besonders viel positives Feedback zu:
 - Darstellung der Simulationsdaten
 - Interaktivität in Echtzeit
- Häufig gewählte Wörter zur Beschreibung der Nutzererfahrung: "Toll", "Cool" und "Beeindruckend"
- Keine negativen Äußerungen zur Stabilität und Positionierung
- Fragen nach einer berechneten Darstellung für 3D
- Klicker wurde den Handgesten stets vorgezogen
- Anmerkungen zu hohem Aufwand und Praktikabilität
- Viele wollten Fotos der Anwendung haben
- Kaum Feedback von Lernenden, fast allen Nutzern waren die physikalischen Zusammenhänge bereits zu großen Teilen oder vollständig bekannt

6.2 Diskussion

TODO...

KRITISCH MIT DER EIGENEN ARBEIT AUSEINANDERSETZTEN!!

Kantenflimmern unerwartetes Problem. Kantenglättung zu teuer und nicht ausreichend. Kanten anders glätten. Keine weißen Linien und Umrandungen verwenden.

Einige Probleme konnten bereits im Design abgemildert oder umgangen werden. Das gilt z.B. für die Aspekte Komfortzone und FOV-Grenzen. Durch die platzsparende Anordnung der Elemente werden die Hologramme seltener abgeschnitten. Außerdem sind häufige Kopfbewegungen und Hinweise auf Elemente außerhalb des FOV so nicht notwendig. Und die Berücksichtigung einer geeigneten Distanz von Beginn an vermeidet bzw. verringert Probleme mit zu dicht positionierten Objekten.

Hier wurde z.B. bei der Festsetzung von Anzahl und Größe von Objekten auf die Einschränkungen der HoloLens Rücksicht genommen. Viele Probleme werden auch durch die Nutzung von vorgefertigten Objekten und Verhaltenswei-

sen vermieden. Hier sind z.B. der Progress Indikator, Standard-Button und Standard-Shader zu nennen.

Frage: Wie HoloLens einsetzen?

- Über 3D-Darstellungen Felder im Raum anzeigen, profitiert von stereoskopischer Wahrnehmung und See-Through-Displays
- Empfohlene Verhaltensweisen durch Nutzung von vorgefertigten Elementen einbinden
- Interaktion einfach halten, z.B. durch Klicker
- Zusammenspiel von realen und virtuellen Objekten nutzen, nicht für alles muss eine softwareseitige Lösung geschaffen werden
- Virtuelle Objekte an Versuchsaufbau verankern, dadurch verliert Nutzer sie nicht
- Tracking der HoloLens nutzen, um Objekte zu positionieren, anstelle eines dauerhaft sichtbaren Markers, Stabilität ausreichend, dabei aber mögliche Störfaktoren beachten...
- ... Stabilität bei diesem Ansatz wichtig, daher Performance sehr wichtig, unbedingt beachten und Optimierungen vornehmen
- World Anchor kann für grobe Positionierung genutzt werden, um Setup-Zeit zu verringern
- Anwendung ist hochgradig zugeschnitten auf die konkreten Eigenschaften des Experimentes
- Einsatz per Streaming denkbar, dann jedoch weitere perf. Opt. notwendig oder Deaktivieren von MSAA
- Anpassbarkeit

Wie die HoloLens weiter im Kontext des gewählten Versuches verwendet werden könnte.

6.2.1 Erweiterbarkeit

Ein im Rahmen der Fragestellung wichtiger Aspekt besteht darin, wie die vorgestellte Lösung um weitere Inhalte erweitert werden könnte. Dies ist in mehreren Bereichen denkbar und soll im Folgenden diskutiert werden.

Eine zuvor bereits angedeutete Erweiterung bestünde darin, mit Erklärungen

durch die Anwendung und Durchführung des Experimentes zu führen. Dabei könnten die Darstellungsmodelle und physikalischen Zusammenhänge erläutert, aber auch Hinweise zur Nutzung gegeben werden. Auf diese Weise ließe sich beispielsweise kommunizieren, wie die Darstellungen zu interpretieren sind oder welche Interaktionsmöglichkeiten zur Verfügung stehen. Eine Umsetzung wäre beispielsweise mittels Animationen und eingesprochenen Texten denkbar. Im Zuge einer solchen Erweiterung ließe sich die Anwendung auch gezielt auf ein konkretes Einsatzszenario wie z.B. den Einsatz in einer Unterrichtsstunde auslegen.

Die in der Simulation berechneten Feldlinien geben das Feld in einem 2D-Schnitt wieder. Diese Darstellung ließe sich zu einer 3D-Darstellung erweitern. Dafür müssten auf Seiten der HoloLens zunächst keine weiteren Anpassungen vorgenommen werden, sofern die Daten in einer Datei im entsprechenden Format bereitgestellt werden. Allerdings sind die knappen Ressourcen zu berücksichtigen. Eine größere Anzahl an Feldlinien könnte zu einem Einbruch der Frame-Rate führen. Eine mögliche Lösung bestünde darin, die Anzahl und bzw. oder Granularität der Feldlinien anzupassen. Alternativ ließen sich auch Qualitäts-einstellungen (z.B. MSAA, Auflösung) auf der HoloLens verändern, um den Ressourcenverbrauch einzuschränken.

Außerdem wäre eine Variation der physikalischen Parameter umsetzbar. Dazu zählen unter anderem Radius, Windungszahl, elektrischer Widerstand und Materialeigenschaften. Die physikalischen Berechnungen sind parametrisiert und ließen sich zur Laufzeit anpassen. Dadurch könnten auch die Zusammenhänge zwischen diesen Parametern und dem entstehenden Magnetfeld beleuchtet werden.

Grundsätzlich sind auch Erweiterungen um weitere Lerninhalte denkbar, die mit dem Versuch zusammenhängen. Beispielsweise wäre eine explizite Erklärung des Zusammenhangs zwischen Stromrichtung, Flussrichtung der Elektronen und Richtung des entstehenden Magnetfeldes möglich. Dies ließe sich auch Erweitern auf eine Aufbereitung des Biot-Savart-Gesetzes, dass allgemein die Magnetfelder bewegter Ladungen im Raum beschreibt und auf dem auch die Feldgleichungen der Helmholtz-Spule beruhen. Allerdings ist die Architektur der Applikation nicht explizit auf weitere, eigenständige Szenarien ausgelegt.

6.2.2 Übertragbarkeit

Ansatz übertragen auf andere Versuche:

Neben dem vorgestellten Experiment sind mit einer Helmholtz-Spule noch weitere Versuche möglich. Ein typisches Beispiel ist die Ablenkung eines Elektronenstrahls, der durch ein Gas sichtbar gemacht wird. Die Elektronen werden im Inneren der Spule durch das Magnetfeld entsprechend dessen Stärke abgelenkt. In dem Versuch ist letztere so einzustellen, dass die Elektronen auf eine Kreisbahn gezwungen werden.

Durch die vielen Gemeinsamkeiten mit dem in dieser Arbeit behandelten Versuch liegt eine Übertragung der Lösung auf diesen Anwendungsfall nahe. Das Magnetfeld, die Stromrichtung und die Echtzeitdaten könnten hier ebenfalls in den Versuch integriert werden. Dabei wären jedoch ggf. andere Anforderungen durch den geänderten Versuchsaufbau zu berücksichtigen.

Ebenfalls denkbar wäre eine Übertragung auf ähnliche Versuche. Hier käme beispielsweise die Ablenkung eines Elektronenstrahls durch Plattenkondensatoren in Frage. Diese erzeugen ein elektrisches Feld, durch das Elektronen abgelenkt werden⁹. Die Felddarstellungen können auch für elektrische Felder genutzt werden und auch die Labels für Plus und Minus ließen sich übernehmen.

Grundsätzlich ist die Übertragbarkeit jedoch eingeschränkt, da die Lösung stark auf den Anwendungsfall und dessen Eigenschaften zugeschnitten ist. Bei einem anderen Versuch lassen sich Darstellungen ggf. nicht auf die gleiche Weise einbetten. Wenn z.B. der Nutzer ständig mit realen Objekten direkt interagieren muss, an denen die virtuellen Objekte verankert sind, wird die Empfohlene Distanz zu den Darstellungen dauerhaft unterschritten. Außerdem schaffen bewegliche Objekte, deren Position verfolgt werden muss, zusätzliche Probleme. Ein fortlaufendes Tracking durch die HoloLens über optische Merkmale nimmt massiv Ressourcen in Anspruch und führt dazu, dass keine Aufnahmen der Anwendung von der HoloLens selbst gemacht werden können.

Die Probleme können durchaus sehr individuell sein. Im Falle des zuvor genannten Versuches mit der Ablenkung des Elektronenstrahls könnte beispielsweise ein Problem mit dem Tracking auftreten. Wenn nämlich das Licht ausgeschaltet werden muss, damit der Elektronenstrahl zu erkennen ist, verliert die HoloLens ggf. aufgrund der mangelnden optischen Merkmale die Orientierung. Experi-

⁹Eine interaktive Webanwendung zu diesem Versuch findet sich hier: <https://www.didaktik.physik.uni-muenchen.de/elektronenbahnen/e-feld/hypothesen/experiment.php>

mente mit zu hellen Elementen sind jedoch auch problematisch, da dann die Hologramme schlechter sichtbar wären. Aber auch andere Quellen von Infrarotlicht sowie stark reflektierende oder transparente Materialien würden das Tracking stören. Nicht zuletzt spielt auch Sicherheitsausrüstung eine Rolle. Bei einem Experiment mit einem Laser ist ggf. eine Schutzbrille notwendig, die den Einsatz der HoloLens möglicherweise ausschließt.

Für ein konkretes Experiment ist folglich individuell zu prüfen, in wie fern die technischen Voraussetzungen der eines Einsatzes der HoloLens gegeben sind.

7 ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK

7.1 Zusammenfassung

TODO...

Die Arbeit stellt eine Lösung mit der HoloLens vor, die ein konkretes physikalisches Experiment mit einer Helmholtz-Spule durch eine AR-Anwendung unterstützt. Anhand von Positions- und Echtzeitdaten wird eine Darstellung des Magnetfeldes in den Versuchsaufbau eingebettet. Außerdem werden zusätzliche Informationen und theoretische Ergebnisse angezeigt. Die AR-Anwendung unterstützt das Experiment durch die Visualisierung andernfalls nicht sichtbarer physikalischer Eigenschaften und Zusammenhänge. Gleichzeitig berücksichtigt die Lösung technische Limitierungen der HoloLens. Die Hologramme weisen trotz der unmittelbaren Nähe zu realen Objekten eine ausreichende Stabilität auf und werden durch das begrenzte Field of View der HoloLens kaum beeinträchtigt. Außerdem vermeidet die Lösung Probleme durch zu nah positionierte Objekte und ermöglicht die Nutzung auf für unerfahrene Anwender. Allerdings ist die Übertragbarkeit der Lösung dadurch eingeschränkt, dass sie speziell an die Gegebenheiten wie Größe und Aufbau des Experiments angepasst ist. Andere Versuche mit anderen Eigenschaften erfordern ggf. andere Maßnahmen, um die HoloLens auch dort einsetzen zu können.

7.2 Ausblick

TODO...

Empirische Evaluation wäre interessant. Erweiterung der Anwendung um mehr Inhalte ebenfalls. Z.B. Aufbau des Feldes durch Überlagerung der beiden einzelnen Felder. Übertragung auf ein anderes Beispiel auch. Komplexere Anwendungen interessant, z.B. Dipol. Mit HoloLens 2 natürlich, 52° Diagonales Sichtfeld und 2k Auflösung pro Auge

A ANHANG A

A.1 Aufnahmen mit der HoloLens

Zunächst ist festzuhalten, dass herkömmliche Bildschirmaufnahmen auf der HoloLens nur eingeschränkt sinnvoll sind. Hier wären nämlich nur die gerenderten Objekte sichtbar, die so auch in einer Entwicklungsumgebung zu sehen sind. Die Nutzererfahrung entsteht jedoch durch das Zusammenspiel mit dem Hintergrund. Deshalb bietet die HoloLens eine angepasste Funktion, um möglichst das abzubilden, was der Nutzer tatsächlich sieht: Das *Mixed Reality Capture (MRC)*.

Mit dem Mixed Reality Capture lassen sich Screenshots und Screen-Videos aufnehmen. Dazu nutzt die Brille ihre integrierte Frontkamera und überlagert deren Bild mit dem gerenderten Bild. So lässt sich besser darstellen, was ein Nutzer sieht. Allerdings bringt dieses Vorgehen mehrere Einschränkungen mit sich, durch die die Resultate von den tatsächlich wahrgenommenen Bildern abweichen. Damit die folgenden Bilder richtig eingeordnet werden können, sollen die wichtigsten Faktoren hier genannt werden.

- Andere Auflösung mit geringerer Pixeldichte
- Stark vergrößertes Sichtfeld
- Verfälschte Farben und Transparenzen
- Verfälschte Positionierung
- MRC nicht möglich, wenn Kamera durch Anwendung genutzt wird

Bei einem MRC-Foto ändert sich die Auflösung von 1268x720 (720p) zu 1408x792. Obwohl die Auflösung steigt ist damit dennoch ein wesentlicher Qualitätsverlust verbunden, da die höhere Auflösung des Einzelbildes nicht mit einer höheren Pixeldichte einhergeht, sondern mit einem überproportional größeren Sichtfeld. Ein Foto repräsentiert daher nicht die tatsächlichen Begrenzungen des FOV. Außerdem sinkt die Pixeldichte.

Dazu kommt die Transparenz von virtuellen Objekten. Diese hängt stark von deren Farbe sowie der Hintergrundhelligkeit ab und entspricht nicht immer der Wahrnehmung des Nutzers. Farbige Objekte erscheinen auf Fotos stets etwas transparent, auch wenn sie den Hintergrund aus Sicht des Nutzers vollständig überdecken. Das trifft z.B. auf die blauen Objekte in den Fotos aus Abb. ?? zu. Nicht zuletzt ist auch für Fotos die Reduktion der Bildwiederholrate auf 30Hz relevant. Denn dadurch werden die Objekte nicht so gut stabilisiert und es kann zu leichten Verschiebungen auf den Fotos kommen.

Darüber hinaus gibt es Faktoren, die durch ein Foto nicht abgedeckt werden können. Dazu gehören die schon erläuterten Eigenheiten der stereoskopischen Wahrnehmung. Auf einem Foto sieht ein Objekt immer scharf aus und es gibt keine Probleme mit der Akkommodation oder Konvergenz, auch wenn ein Nutzer diese möglicherweise erfährt. Außerdem nimmt ein Nutzer die Umgebung anders wahr als auf einem Foto, da das Sichtfeld (auf die Umgebung) kaum eingeschränkt wird und nicht in Farbe und Auflösung begrenzt ist, sondern direkt wahrgenommen wird.

Diese Faktoren gilt es bei der Bewertung solcher Bilder zu berücksichtigen. Prinzipiell sind auch Aufnahmen möglich, die näher an die tatsächliche Nutzererfahrung heranreichen. Diese erfordern aber weiteres Equipment, das im Rahmen dieser Arbeit nicht zur Verfügung stand.

LITERATUR

- [Akç+16] Murat Akçayir u. a. “Augmented reality in science laboratories: The effects of augmented reality on university students’ laboratory skills and attitudes toward science laboratories”. In: *Computers in Human Behavior* 57 (2016), S. 334–342. ISSN: 07475632. DOI: 10.1016/j.chb.2015.12.054. arXiv: ISSN1648-3898.
- [Ami+18] *Preparation for Future Learning: Augmented-Reality Enhanced Interactive Physics Labs.* ACM, 2018. ISBN: 978-1-4503-5966-5/18/10.
- [Azu97] Ronald T. Azuma. *A survey of augmented reality.* 1997. DOI: 10.1162/pres.1997.6.4.355. arXiv: 1708.05006.
- [Bac+14] Jorge Bacca u. a. “Augmented reality trends in education: a systematic review of research and applications”. In: (2014).
- [Buc+09] André Buchau u. a. “Augmented reality in teaching of electrodynamics”. In: *COMPEL - The international journal for computation and mathematics in electrical and electronic engineering* 28.4 (2009), S. 948–963. DOI: 10.1108/03321640910959026.
- [Che+17] Peng Chen u. a. “A review of using augmented reality in education from 2011 to 2016”. In: *Lecture Notes in Educational Technology* 9789811024184 (2017). ISSN: 21964971. DOI: 10.1007/978-981-10-2419-1_2.
- [Com15] Wikimedia Commons. *File:Magnetfeld-Helmholtzspule.gif — Wikimedia Commons, the free media repository.* [Online; Abgerufen am 15.03.2019]. 2015.
- [Coo] Microsoft Corporation. *Qualitätskriterien für Mixed Reality Anwendungen.*
- [Coo18] Microsoft Corporation. *Mixed Reality Dokumentation.* [Online; Abgerufen am 15.03.2019]. 2018.
- [Dem13] Wolfgang Demtröder. *Experimentalphysik 2: Elektrizität und Optik.* 6. Auflage. Springer, 2013, S. 92. ISBN: 978-3642299438.
- [Fra+18] Taylor Frantz u. a. “Augmenting Microsoft’s HoloLens with vuforia tracking for neuronavigation”. In: *Healthcare Technology Letters* (2018).
- [Gmb] 3B Scientific GmbH. *Helmholtz-Spule.* [Online; Abgerufen am 15.03.2019].
- [Gö15] Markus Göbel. *SimpleJSON.* [Online; Abgerufen am 15.03.2019]. 2015 '7.

- [Hug+05] C E Hughes u. a. “Mixed reality in education, entertainment, and training”. In: *IEEE Computer Graphics and Applications* 25.6 (2005), S. 24–30. ISSN: 0272-1716. DOI: 10.1109/MCG.2005.139.
- [Ibá+14] María Blanca Ibáñez u. a. “Experimenting with electromagnetism using augmented reality: Impact on flow student experience and educational effectiveness”. In: *Computers & Education* 71 (2014), S. 1–13. ISSN: 0360-1315. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compedu.2013.09.004>.
- [IDK18] María Blanca Ibáñez und Carlos Delgado-Kloos. “Augmented reality for STEM learning: A systematic review”. In: *Computers and Education* 123 (2018), S. 109–123. ISSN: 03601315. DOI: 10.1016/j.compedu.2018.05.002.
- [JA10] Tai Fook Lim Jerry und Cheng Chi En Aaron. “The impact of augmented reality software with inquiry-based learning on students’ learning of kinematics graph”. In: *2010 2nd International Conference on Education Technology and Computer*. Bd. 2. IEEE. IE-EE, 2010, S. V2–1–V2–5. ISBN: 978-1-4244-6367-1. DOI: 10.1109/ICETC.2010.5529447.
- [JPL18] Hamraz Javaheri, Olaf Pfeiffer und Paul Lukowicz. “HolOsci: Hololens Augmented Reality Oscilloscope Based Support for Debugging Electronics Circuits”. In: *Proceedings of the 2018 ACM International Joint Conference and 2018 International Symposium on Pervasive and Ubiquitous Computing and Wearable Computers*. UbiComp ’18. New York, NY, USA: ACM, 2018, S. 1006–1010. ISBN: 978-1-4503-5966-5. DOI: 10.1145/3267305.3274125.
- [Kil03] Ulrich Kilian. *Lexikon der Physik*. Spektrum Akademischer Verlag, 2003, S. 333. ISBN: 3827414628.
- [KM08] Hannes Kaufmann und Bernd Meyer. “Simulating educational physical experiments in augmented reality”. In: *ACM SIGGRAPH ASIA 2008 educators programme on - SIGGRAPH Asia ’08* (2008), S. 1. ISSN: 2194-0827. DOI: 10.1145/1507713.1507717.
- [Li+11] N Li u. a. “Influences of AR-Supported Simulation on Learning Effectiveness in Face-to-face Collaborative Learning for Physics”. In: *2011 IEEE 11th International Conference on Advanced Learning Technologies*. 2011, S. 320–322. DOI: 10.1109/ICALT.2011.100.
- [Man+11] Florian Mannus u. a. “Augmenting magnetic field lines for school experiments”. In: *2011 10th IEEE International Symposium on Mixed*

- and Augmented Reality*. IEEE, 2011, S. 263–264. ISBN: 978-1-4577-2185-4. DOI: 10.1109/ISMAR.2011.6143893.
- [Mar+17] Sebastián Marichal u. a. “CETA: Designing Mixed-reality Tangible Interaction to Enhance Mathematical Learning”. In: *Proceedings of the 19th International Conference on Human-Computer Interaction with Mobile Devices and Services*. MobileHCI ’17. New York, NY, USA: ACM, 2017, 29:1–29:13. ISBN: 978-1-4503-5075-4. DOI: 10.1145/3098279.3098536.
- [Mat+13] S Matsutomo u. a. “Real Time Simulation Method of Magnetic Field for Visualization System With Augmented Reality Technology”. In: *IEEE Transactions on Magnetics* 49.5 (2013), S. 1665–1668. ISSN: 0018-9464. DOI: 10.1109/TMAG.2013.2240672.
- [MK94] Paul Milgram und Fumio Kishino. “A taxonomy of mixed reality visual displays”. In: *IEICE TRANSACTIONS on Information and Systems* 77.12 (1994), S. 1321–1329.
- [Pol+17] Christina Pollalis u. a. “HoloMuse: Enhancing Engagement with Archaeological Artifacts Through Gesture-Based Interaction with Holograms”. In: *Proceedings of the Eleventh International Conference on Tangible, Embedded, and Embodied Interaction*. TEI ’17. New York, NY, USA: ACM, 2017, S. 565–570. ISBN: 978-1-4503-4676-4. DOI: 10.1145/3024969.3025094.
- [RSL18] H. Reinholz, A. Sengebusch und R. Leppin. Persönliches Gespräch. Rostock, 3. Dez. 2018.
- [San+14] M E C Santos u. a. “Augmented Reality Learning Experiences: Survey of Prototype Design and Evaluation”. In: *IEEE Transactions on Learning Technologies* 7.1 (2014), S. 38–56. ISSN: 1939-1382. DOI: 10.1109/TLT.2013.37.
- [Str+17a] M P Strzys u. a. “Augmenting the thermal flux experiment: A mixed reality approach with the HoloLens(vol 55, pg 376, 2017)”. In: *The Physics Teacher* 55.8 (2017), S. 455.
- [Str+17b] M P Strzys u. a. “Physics holo.lab learning experience: Using Smartglasses for Augmented Reality labwork to foster the concepts of heat conduction”. In: *European Journal of Physics* 39.3 (2017), S. 035703. ISSN: 0143-0807. DOI: 10.1088/1361-6404/aaa8fb. arXiv: 1711.05087.
- [Zim+17] Christian Zimmer u. a. “Mobile Augmented Reality Illustrations That Entertain and Inform: Design and Implementation Issues with

the Hololens". In: *SIGGRAPH Asia 2017 Mobile Graphics & Interactive Applications*. SA '17. New York, NY, USA: ACM, 2017, 23:1–23:7. ISBN: 978-1-4503-5410-3. DOI: [10.1145/3132787.3132804](https://doi.org/10.1145/3132787.3132804).

DANKSAGUNG

Frau Prof. Dr. Heidrun Schumann danke ich für die Überlassung des Themas, der umfangreichen Betreuung der Arbeit sowie den zahlreichen, hilfreichen Diskussionen.

Frau PD Dr. Heidi Reinholtz, Frau Dr. Andrea Sengebusch und Herrn Robert Leppin danke ich für die Unterstützung der Arbeit von Seiten der Fakultät für Physik durch viele Gespräche, fachliche Expertise und der notwendigen Hardware.

Herrn Julius Zimmermann danke ich für die Bereitstellung der Simulationssoftware und die Unterstützung bei der Berechnung der Feldliniendarstellung.

Herrn Christian Lanz und der GECKO mbH danke ich für die Bereitstellung der HoloLens sowie das stete Interesse und die Unterstützung dieser Arbeit.

Darüber hinaus danke ich den Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern des Lehrstuhls für Computergraphik, die mit Anregungen und Hilfestellungen zu dieser Arbeit beigetragen haben.

Weiterhin gilt mein herzlicher Dank allen, die Zwischenstände der Arbeit gelesen und mir wichtige Hinweise gegeben haben. Hier unterstützten mich Fr. Prof. Dr. H. Schumann, Prof. Dr. J.-Ch. Kuhr, Dipl. Ing. A. Schubert, und F. Weckmann.

Nicht zuletzt möchte ich mich bei meiner Freundin und meiner Familie für ihre Anteilnahme, Verständnis und Geduld bedanken.