

Von der Idee zur Interaktion: Ein Tool zur Erstellung von inklusiven Unterrichtsmaterialien für den Tiptoi-Stift

Masterarbeit
von

Sonja Marie Kuklok

an der Fakultät für Informatik
Institut für Anthropomatik und Robotik
Zentrum für digitale Barrierefreiheit und Assistive Technologien (ACCESS@KIT)

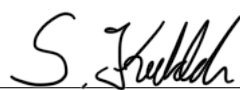
Erstgutachter:
Zweitgutachter:
Betreuende Mitarbeiter:

Prof. Dr.-Ing. Rainer Stiefelhagen
Prof. Dr. Tobias Kohn
Dr. Thorsten Schwarz
M.Sc. Lukas Schölch
Dipl.-Inform. Gerhard Jaworek

Bearbeitungszeit: 01. Januar 2025 – 01. Juli 2025

Ich erkläre hiermit, dass ich die vorliegende Arbeit selbständig verfasst und keine anderen als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel benutzt, die wörtlich oder inhaltlich übernommenen Stellen als solche kenntlich gemacht und die Satzung des KIT zur Sicherung guter wissenschaftlicher Praxis in der jeweils gültigen Fassung beachtet habe.

Karlsruhe, den 26. Juli 2025



Zusammenfassung

Die gleichberechtigte Teilhabe sehbeeinträchtigter Schülerinnen und Schüler am inklusiven Unterricht wird maßgeblich durch den mangelnden Zugang zu visuellen Informationen erschwert. Während ein Großteil kommunikativer Prozesse nonverbal erfolgen, fehlen kostengünstige und benutzerfreundliche Werkzeuge zur Erstellung interaktiver audiotaktiler Unterrichtsmaterialien zur Darstellung grafischer Inhalte. Im Rahmen dieser Masterarbeit wurde das EduTTTool entwickelt, eine webbasierte Autorensoftware, die Lehrkräften ohne Programmierkenntnisse die Erstellung audiotaktiler Materialien mit Tiptoi-Technologie ermöglicht. Basierend auf einer systematischen Anforderungsanalyse (10 Umfragen, 4 Experteninterviews) entstand eine browserbasierte Anwendung mit einem Generator für interaktive Codes zur visuellen Materialgestaltung und einem Audio-Generator zur Erstellung der Tiptoi-kompatiblen Dateien. Die Evaluation erfolgte durch ein Mixed-Methods-Design mit 15 Lehrkräften: Think-Aloud-Protokolle, SUS-Fragebögen und semistrukturierte Interviews ergänzt durch eine optionale zweiwöchige Felderprobung. Das Tool erreichte einen SUS-Score von 74,5 Punkten bei 93% Weiterempfehlungsbereitschaft. Die Felderprobung bestätigte den pädagogischen Mehrwert durch gesteigerte Selbstständigkeit, erhöhte Motivation und spontane Kooperation zwischen sehenden und sehbeeinträchtigten Lernenden. Das EduTTTool schließt erfolgreich die Lücke zwischen kostengünstigen aber funktionsbegrenzten Audio-Stiften und prohibitiv teuren Spezialsystemen. Es ermöglicht die Erstellung inklusiver Unterrichtsmaterialien, die echte Teilhabe fördern und gleichzeitig den Arbeitsaufwand für Lehrkräfte reduzieren.

Danksagung

An dieser Stelle möchte ich mich bei allen Personen bedanken, die zum Gelingen dieser Masterarbeit beigetragen haben. Mein besonderer Dank gilt meinen Betreuern Dr. Thorsten Schwarz und Lukas Schölch, die mir während der gesamten Bearbeitungszeit mit fachlicher Expertise und konstruktiven Anregungen zur Seite standen. Ihre Bereitschaft, jederzeit für Fragen und Diskussionen zur Verfügung zu stehen, war von unschätzbarem Wert für diese Arbeit. Patrick Dzierzawski von dem Institut danke ich für seine professionelle Unterstützung bei der Installation der Software auf den KIT-Servern. Ein herzlicher Dank geht an Tobias Mahnke, der nicht nur die ursprüngliche Idee zu dieser Arbeit anregte, sondern auch während der gesamten Studie umfangreiche Ressourcen an seiner Schule zur Verfügung stellte. Seine Unterstützung bei der Durchführung der Tests und der Gewinnung von Studienteilnehmenden war entscheidend für den Erfolg der empirischen Untersuchung. Abschließend danke ich allen 15 Lehrkräften, die an der Studie teilgenommen haben. Ihre Bereitschaft, Zeit für Interviews und die Erprobung des Tools zu investieren, sowie ihre wertvollen Rückmeldungen haben diese Arbeit erst ermöglicht.

Inhaltsverzeichnis

Abkürzungen	xv
1 Einleitung	1
1.1 Zielsetzung der Arbeit	2
1.2 Gliederung der Arbeit	3
2 Theoretische und technische Grundlagen	5
2.1 Inklusive Unterrichtsmaterialien	5
2.1.1 Inklusion im Bildungskontext	5
2.1.2 Herausforderungen bei Sehbeeinträchtigungen	8
2.1.3 Anforderungen an inklusive Unterrichtsmaterialien	10
2.2 Assistive Technologien für grafische Inhalte	11
2.2.1 Taktile und haptische Systeme	11
2.2.2 Audio-Tactile Reader (ATR)	13
2.2.3 Audio-Marker für statische Grafiken	16
2.2.4 Bewertung bestehender Ansätze	18
2.3 Tiptoi-Technologie	22
2.3.1 Technische Funktionsweise	22
2.3.2 Bisherige Tools zur Erstellung von Tiptoi-Materialien	25
2.3.3 Bisherige Anwendungen im Bildungskontext	26
3 Anforderungsanalyse	29
3.1 Methodisches Vorgehen	30
3.1.1 Datenerhebung und -analyse	30
3.1.2 Beschreibung der Stichprobe	31
3.2 Ergebnisse der Online-Umfrage	33
3.2.1 Materialien und Arbeitsaufwand	33
3.2.2 Priorisierung der User-Stories	35
3.2.3 Zusammenfassung	38
3.3 Ergebnisse der Interviews	39
3.3.1 Ist-Zustand: Probleme und Arbeitsweisen	39
3.3.2 Soll-Zustand: Erwartungen an das Tool	40
3.3.3 Zusammenfassung	43
3.4 Schlussfolgerungen	45
3.4.1 Zentrale Erkenntnisse	45
3.4.2 Konkrete Anforderungen an die Webanwendung	46
4 Konzeption und Entwicklung	49
4.1 Konzeptionelle Grundlagen	49

4.1.1	Der OID-Generator	49
4.1.2	Der GME-Generator	52
4.1.3	Anwendungsworkflow	52
4.2	Systemarchitektur	53
4.2.1	Architekturüberblick	53
4.2.2	Kernkomponenten	54
4.2.3	Externe Integration	56
4.2.4	Architekturbezogene Designentscheidungen	58
4.3	Benutzeroberfläche	61
4.3.1	Designphilosophie und Grundprinzipien	61
4.3.2	Benutzeroberfläche und zentrale Komponenten	61
4.4	Zusammenfassung der Anforderungserfüllung	66
5	Evaluation	69
5.1	Methodisches Vorgehen	69
5.1.1	Studiendesign	69
5.1.2	Datenerhebung	70
5.1.3	Datenanalyse	71
5.2	Beschreibung der Stichprobe	74
5.3	Ergebnisse	75
5.3.1	Ergebnisse des SUS-Fragebogens	75
5.3.2	Ergebnisse der Think-Aloud-Protokoll Analyse	77
5.3.3	Ergebnisse der Interview-Analyse	82
5.3.4	Praxiserfahrungen aus der Felderprobung	84
5.4	Diskussion	88
5.4.1	Bewertung der technischen Umsetzung	88
5.4.2	Bewertung des pädagogischen Mehrwerts	89
5.4.3	Gesamtbewertung	89
6	Zusammenfassung und Ausblick	93
	Literaturverzeichnis	95
A	Anhang	101
A.1	Online-Fragebogen – Anforderungsanalyse	101
A.2	Interviewleitfaden – Anforderungsanalyse	116
A.3	Interviewleitfaden – Hauptstudie (15min)	118
A.4	Interviewleitfaden – Felderprobung	119

Abbildungsverzeichnis

1.1	Verwendung des Tiptoi-Stiftes mit einer taktilen sogenannten Schwellgrafik (eigene Aufnahme)	2
2.1	Beispiel einer Grafik hergestellt mit dem Schwellpapierverfahren (eigene Aufnahme)	12
2.2	Beispiel einer Grafik hergestellt mit dem Prägedruckverfahren [RMSM ⁺ 23]	12
2.3	Taktiler Display von Graphiti, bestehend aus 60×40 aktualisierbaren Pins, die eine Meereswelle darstellen [HABDS ⁺ 22]	13
2.4	Beispiel einer PDF-Abbildung im System [MSSM ⁺ 22]	14
2.5	Beispiel einer taktilen Display-Darstellung [MSSM ⁺ 22]	14
2.6	TPad-System mit einigen Beispielgrafiken [MMSJ ⁺ 20]	15
2.7	Tactonom-Reader [RMSM ⁺ 23]	15
2.8	Anybook-Reader als Beispiel für einen Audiostift [Mill25]	16
2.9	Audio-Tactile Indoor Maps (ATIM)-Software zur interaktiven Nutzung tastbarer Raumkarten	17
2.10	Vergrößerte Optical Identifiers (OID)-Codes mit Rasterpunkten . . .	23
2.11	Struktur und Aufbau eines OID-Codes	23
3.1	Häufigkeit der verwendeten Unterrichtsmaterialien	34
3.2	Häufigkeit der verwendeten Dateiformate	34
3.3	Zeitaufwand für die Materialerstellung (n=10)	34
3.4	Priorisierung von User Stories (nach Median sortiert)	35
4.1	Screenshot der Download-Formate	51
4.2	UML-Klassendiagramm der OID-basierten Datenmodellierung	55
4.3	Factory Pattern für die Spielmodus-Erzeugung	59
4.4	Screenshot des oberen Teils der About-Seite	62
4.5	Screenshot des Willkommensbildschirms	63

4.6	Screenshot des OID-Generator mit dem Upload Bild Tulpe von [Open16]	64
4.7	Screenshot des OID-Generator mit zugeklappten Produkteinstellungen mit dem Upload Bild Tulpe von [Open16]	64
4.8	Screenshot des Game Media Extension (GME)-Generator mit Audiupload	66
5.1	Individuelle System Usability Scale (SUS)-Scores der Teilnehmer (n=15)	75
5.2	Verteilung der SUS-Score-Kategorien (n=15) nach [BaKM09]	76
5.3	Antwortverteilung der SUS-Items (n=15)	76
5.4	Anzahl identifizierter Usability-Probleme pro Teilnehmenden (n=15) .	78
5.5	Usability-Probleme: Häufigkeit und Erklärungsbedarf	80

Tabellenverzeichnis

2.1	Vergleich assistiver Technologien für grafische Inhalte	19
3.1	Kategoriensystem für die Inhaltsanalyse	31
3.2	Übersicht der demografischen Daten (n=10)	32
3.3	Vollständige User-Stories mit Priorisierungsmetriken	37
4.1	Kategorisierung der Backend-Services nach funktionalen Domänen . .	54
4.2	Zusammenfassung der Anforderungserfüllung im EduTTTool	67
5.1	Übersicht der demografischen Daten (n=15)	74
5.2	Definition der häufigsten Usability-Probleme	79
5.3	Hauptvorteile des TipToi-Tools aus Sicht der Lehrkräfte (n=14) . . .	82
5.4	Mehrwert gegenüber konventionellen Unterrichtsmaterialien (n=14) .	83

Abkürzungen

ATIM Audio-Tactile Indoor Maps

ATR Audio-Tactile Reader

GME Game Media Extension

MINT Mathematik, Informatik, Naturwissenschaften, Technik

OID Optical Identifiers

RTD Refreshable Tactile Displays

SuS Schülerinnen und Schüler

SUS System Usability Scale

UDL Universal Design for Learning

YAML YAML Ain't Markup Language

1. Einleitung

Die gleichberechtigte Teilhabe an Bildung ist ein fundamentales Menschenrecht, das in Artikel 24 der UN-Behindertenrechtskonvention verankert ist und ein inklusives Bildungssystem auf allen Ebenen fordert [Vere14]. Seit Deutschlands Beitritt zur Konvention im Jahr 2009 hat sich die Bildungslandschaft grundlegend gewandelt: Von den 9.529 Schülerinnen und Schüler (SuS) mit Sehbeeinträchtigung werden mittlerweile 51,3% inklusiv an Regelschulen unterrichtet [Sek24]. Trotz dieser positiven Entwicklung stellt die praktische Umsetzung inklusiver Bildung für sehbeeinträchtigte Lernende nach wie vor eine komplexe Herausforderung dar.

Die Zugänglichkeit zu visuellen Informationen bildet dabei eine zentrale Barriere: Etwa 75 Prozent aller kommunikativen Prozesse erfolgen nonverbal [LaTh17], was die fundamentale Bedeutung grafischer Darstellungen im Lernprozess verdeutlicht. Besonders in Schlüsseldisziplinen wie den MINT-Fächern ist das Verstehen und Interpretieren grafischer Inhalte unverzichtbar [MSSM⁺22]. Für sehbeeinträchtigte Lernende entstehen dadurch systematische Barrieren, die durch traditionelle Adaptionsansätze nur unzureichend kompensiert werden können.

Die Herausforderungen manifestieren sich auf mehreren Ebenen: Die Adaption von Unterrichtsmaterialien für sehbeeinträchtigte Lernende erweist sich als außerordentlich ressourcenintensiv und zeitaufwändig, was die fristgerechte Bereitstellung zu einer permanenten Herausforderung macht. Zusätzlich erschwert die sequentielle Natur der taktilen Wahrnehmung im Vergleich zum simultanen visuellen Erfassen den Zugang zu komplexen grafischen Inhalten [Bödi25].

Die aktuell verfügbaren assistiven Technologien zur Erfassung grafischer Inhalte weisen deutliche Limitationen auf: Einfache Audio-Stifte, wie der Anybook-Reader, beschränken sich auf grundlegende Audiowiedergabe ohne interaktive Elemente, während hochfunktionale Systeme, wie beispielsweise der Tactonom Reader, mit Anschaffungskosten von über 3.000€ eine deutlich höhere Investition erfordern im Vergleich zu 110€ für den Anybook-Reader [Mill25, Inve25]. Weitere Technologien werden im Verlauf der Arbeit vorgestellt.

Das Tiptoi-System von Ravensburger bietet einen vielversprechenden Lösungsansatz, der diese Lücke zwischen Funktionalität und Erschwinglichkeit schließen könn-

te: Mit Anschaffungskosten von etwa 50€ pro Tiptoi-Stift kombiniert es die Kosteneffizienz einfacher Audio-Stifte mit erweiterten interaktiven Funktionen [Rave25]. Erste Studien zeigen bereits das Potenzial des Systems für inklusive Bildungsansätze, sowohl im musealen Kontext als auch im schulischen Umfeld [ZiBW18, Pusc17].

Jedoch stellt die Erstellung eigener Tiptoi-Materialien ein wesentliches Hindernis dar: Während das Open-Source-Tool „tttool“ [Brei23] die technischen Möglichkeiten zur Erstellung komplexer interaktiver Materialien bietet, handelt es sich um ein kommandozeilenbasiertes Programm, das Programmierkenntnisse voraussetzt. Alternative grafische Tools wie ttmp32gme [Kort22] oder soundolino [Arn22] vereinfachen zwar die Bedienung, ermöglichen jedoch nur einfache Audio-Code-Zuordnungen ohne die für inklusive Lernmaterialien wichtigen Logik- und Spielfunktionen. Diese technischen Hürden wirken für den praktischen Einsatz im Schulalltag prohibitiv und limitieren das didaktische Potenzial der Technologie erheblich. An dieser Problemstellung setzt die vorliegende Arbeit an.

1.1 Zielsetzung der Arbeit

Das übergeordnete Ziel dieser Masterarbeit ist die Entwicklung einer benutzerfreundlichen Webanwendung, die es Lehrkräften ohne umfangreiche technische Vorkenntnisse ermöglicht, inklusive, audio-taktile Unterrichtsmaterialien, wie in Abb. 1.1, für den Tiptoi-Stift zu erstellen. Diese Autorensoftware soll die Vorteile der Tiptoi-Technologie – niedrige Kosten, kompakte Bauweise und interaktive Funktionalitäten – für den inklusiven Bildungsbereich erschließen.

Die zu entwickelnde Anwendung zielt darauf ab, die komplexe Kommandozeilennutzung des tttool durch eine intuitive grafische Benutzeroberfläche zu ersetzen, die den typischen Arbeitsablauf von Lehrkräften unterstützt. Dabei sollen sowohl die Integration bestehender Unterrichtsmaterialien als auch die Erstellung neuer interaktiver Inhalte ermöglicht werden.



Abbildung 1.1: Verwendung des Tiptoi-Stiftes mit einer taktilen sogenannten Schwellgrafik (eigene Aufnahme)

Ein zentrales Anliegen ist die Förderung echter Inklusion im Klassenzimmer durch die Erstellung audio-taktile Tiptoi-Materialien, die sowohl von sehenden als auch von sehbeeinträchtigten Schülerinnen und Schülern gemeinsam genutzt werden können. Die entwickelte Autorensoftware soll es ermöglichen, Unterrichtsmaterialien zu erstellen, die Segregationseffekte reduzieren und kollaborative Lernprozesse fördern.

Durch systematische Nutzerforschung - bestehend aus einer initialen Anforderungsanalyse und einer abschließenden Evaluation - soll sowohl die Benutzerfreundlichkeit der entwickelten Webanwendung als auch die pädagogische Wirksamkeit der damit erstellten Tiptoi-kompatiblen Unterrichtsmaterialien bewertet werden. Diese

Erkenntnisse sollen zur Optimierung der Autorensoftware beitragen und aufzeigen, inwieweit audio-taktile Materialien mit Tiptoi-Technologie das inklusive Lernen im Klassenzimmer unterstützen können.

Daraus ergibt sich die **zentrale Forschungsfrage** dieser Arbeit:

Wie kann ein audiotaktiler Tool, das taktile Hervorhebungen und Tiptoi-Technologie kombiniert, entwickelt werden, um das inklusive Lernen im Klassenzimmer zu fördern?

1.2 Gliederung der Arbeit

Die vorliegende Masterarbeit ist in sechs Hauptkapitel strukturiert, die systematisch aufeinander aufbauen und gemeinsam die Entwicklung einer webbasierten Autorensoftware zur Erstellung inklusiver, audio-taktile Unterrichtsmaterialien dokumentieren.

Kapitel 1 - Die Einleitung stellt die Motivation, Problemstellung und Zielsetzung der Arbeit dar.

Kapitel 2 - Die theoretischen und technischen Grundlagen schaffen das konzeptionelle Fundament der Arbeit. Es gliedert sich in drei zentrale Bereiche: Zunächst werden die Grundlagen inklusiver Unterrichtsmaterialien erläutert, beginnend mit dem Konzept der Inklusion im Bildungskontext einschließlich seiner rechtlichen Grundlagen und didaktischen Prinzipien. Ein besonderer Fokus liegt dabei auf den spezifischen Herausforderungen bei der Inklusion sehbeeinträchtigter Lernender, aus denen konkrete Anforderungen an inklusive Unterrichtsmaterialien abgeleitet werden. Anschließend erfolgt eine systematische Analyse assistiver Technologien für grafische Inhalte, die von taktilen und haptischen Systemen über Audio-Tactile Reader bis hin zu Audio-Markern für statische Grafiken reicht und mit einer vergleichenden Bewertung bestehender Ansätze abschließt. Den dritten Schwerpunkt bildet die detaillierte Betrachtung der Tiptoi-Technologie in ihrer technischen Funktionsweise, bestehenden Erstellungstools und bisherigen Bildungsanwendungen.

Kapitel 3 - Die Anforderungsanalyse dokumentiert die empirische Erhebung der Nutzerbedürfnisse und bildet die methodische Grundlage für die Softwareentwicklung. Das methodische Vorgehen umfasst sowohl eine Online-Umfrage mit zehn Teilnehmenden als auch vertiefende Experteninterviews mit vier Lehrkräften. Die Ergebnisse werden strukturiert nach Materialien und Dateiformaten, zeitlichen Ressourcen sowie der Priorisierung von User-Stories präsentiert. Die Schlussfolgerungen münden in einen konkreten Anforderungskatalog, der sowohl funktionale als auch nicht-funktionale Anforderungen an die zu entwickelnde Webanwendung definiert.

Kapitel 4 - Die Konzeption und Entwicklung beschreiben die systematische Umsetzung der identifizierten Anforderungen in eine funktionsfähige Webanwendung. Die konzeptionellen Grundlagen umfassen die Architektur der Bereiche zur visuellen Gestaltung interaktiver Materialien sowie zur Erstellung der Tiptoi-kompatiblen Audiodateien. Der Anwendungsworkflow wird detailliert erläutert, gefolgt von der

technischen Systemarchitektur mit ihren Kernkomponenten und der externen Integration des *tttool*. Das Kapitel schließt mit der Darstellung der Benutzeroberfläche, ihrer Designphilosophie und zentralen Komponenten.

Kapitel 5 - Die Evaluation präsentiert die empirische Bewertung der entwickelten Software durch ein zweiphasiges Mixed-Methods-Design. Die Methodik kombiniert eine kontrollierte Nutzerstudie mit 15 Teilnehmenden mit einer optionalen Felderprobung im realen Unterrichtskontext. Die Ergebnisse werden differenziert nach SUS-Fragebogen-Bewertungen, Think-Aloud-Protokoll-Analysen und Felderprobungserfahrungen dargestellt. Die Diskussion reflektiert sowohl die Usability-Ergebnisse als auch methodische Limitationen und entwickelt Prioritäten für die Weiterentwicklung.

Kapitel 6 - Die Zusammenfassung und der Ausblick fassen die zentralen Erkenntnisse der Arbeit zusammen und reflektieren die Erreichung der formulierten Ziele. Es wird aufgezeigt, inwieweit die entwickelte Autorensoftware zur Verbesserung des inklusiven Unterrichts beitragen kann und welche weiterführenden Forschungs- und Entwicklungsbedarfe sich ergeben.

2. Theoretische und technische Grundlagen

Die Entwicklung einer Autorensoftware für audiotaktile Unterrichtsmaterialien erfordert ein fundiertes Verständnis der pädagogischen und technischen Anforderungen. Dieses Kapitel behandelt drei zentrale Themenbereiche:

Inklusives Lernen: Zunächst werden die begrifflichen, rechtlichen und didaktischen Grundlagen inklusiver Bildung erläutert, mit besonderem Fokus auf die Inklusion sehgeschädigter Lernender als Zielgruppe der geplanten Lösung.

Assistive Technologien: Die Analyse und Bewertung assistiver Technologien für grafische Inhalte - von taktilen Systemen bis zu Audio-Markern - demonstriert, wie eine kostengünstige und für den Unterricht sinnvolle Lösung bislang fehlt.

Tiptoi-Technologie: Abschließend wird die technische Funktionsweise des Tiptoi-Systems analysiert, einschließlich verfügbarer Erstellungstools und deren bisherigen Einsatz im Bildungsbereich. Diese Analyse zeigt Möglichkeiten und Grenzen der Technologie auf.

Diese theoretischen Grundlagen fundieren das Vorhaben wissenschaftlich und bilden den Bewertungsmaßstab für Entwicklung und Evaluation der Autorensoftware. Sie gewährleisten, dass die technische Umsetzung den pädagogischen Zielen entspricht und echten Mehrwert schafft.

2.1 Inklusive Unterrichtsmaterialien

2.1.1 Inklusion im Bildungskontext

Der Begriff „Inklusion“ hat in den letzten Jahren zunehmend an Bedeutung gewonnen und ist insbesondere im Bildungsbereich zentral geworden. Die historische Entwicklung und die inhaltlichen Dimensionen dieses Begriffs werden im Folgenden analysiert.

Ein entscheidender Meilenstein wurde mit dem Beitritt Deutschlands zur UN-Behindertenrechtskonvention im Jahr 2009 erreicht [Vere14]. Artikel 24 der UN-BRK fordert ein inklusives Bildungssystem auf sämtlichen Ebenen und etabliert den Anspruch auf diskriminierungsfreie Bildung. Diese internationale Verpflichtung stellt separate Bildungseinrichtungen grundsätzlich infrage und fordert stattdessen Bildung im regulären Schulsystem [BBDD⁺20].

Diese internationale vertraglich festgehaltene Vereinbarung markierte nicht nur den rechtlichen, sondern auch den begrifflichen Wendepunkt in der deutschen Bildungspolitik [LöWe13].

Begriffserklärung

[LiLK15] unterscheiden zwischen einem engen und einem weiten Inklusionsbegriff:

Im engen Sinne bezieht sich Inklusion primär auf Menschen mit Behinderungen, denen gesellschaftliche Teilhabe ermöglicht werden soll. Bildungsinstitutionen sollen sich den Bedürfnissen von Menschen mit Behinderungen anpassen [Schw16].

Im weiten Sinne stehen alle Menschen mit ihrer Individualität im Fokus. Inklusion wird als Herausforderung für generelle Heterogenität begriffen und umfasst die Vision einer Gesellschaft, in der jeder Mensch unabhängig von seinen individuellen Merkmalen gleichermaßen teilhaben kann [NoBo20].

Die Abgrenzung zum Begriff der Integration ist dabei zentral: [Hinz02] kritisiert, dass Integration lediglich die räumliche Verlagerung von Sonderpädagogik in die allgemeine Schule ohne systemische Veränderung bedeute. Inklusion hingegen erfordert eine grundlegende Transformation der Schule, um alle Kinder unabhängig von ihren Differenzen einzubeziehen.

Im weiteren Verlauf dieser Arbeit wird konsequent der Begriff Inklusion im weiten Sinne verwendet, wie ihn auch die Gesellschaft für Fachdidaktik vertritt [GGHH⁺15]. Der spezifische Fokus auf SuS mit einer Sehbehinderung stellt dabei keinen Widerspruch zu diesem weiten Verständnis dar. Vielmehr werden SuS mit Sehbehinderung als ein Beispiel für die Vielfalt individueller Unterschiede und Bedürfnisse betrachtet, die im inklusiven Bildungssystem berücksichtigt werden müssen. Die Analyse konkreter Bedürfnisse einer spezifischen Gruppe ermöglicht es, exemplarisch zu zeigen, wie inklusive Bildung praktisch umgesetzt werden kann - nämlich durch die Anpassung der Lernumgebung an die individuellen Voraussetzungen aller Lernenden. Diese Fokussierung zielt nicht darauf ab, SuS mit Sehbehinderung als separate Gruppe zu betrachten, sondern sie als gleichwertige Mitglieder einer diversen Lerngemeinschaft zu verstehen. Die Untersuchung ihrer spezifischen Bedürfnisse dient dazu, Barrieren im Bildungssystem zu identifizieren und abzubauen - ein Ansatz, der letztendlich allen Lernenden zugutekommt.

Didaktische Prinzipien inklusiver Bildung

In der pädagogischen Forschung wurden verschiedene didaktische Konzepte entwickelt, die eine inklusive Unterrichtsgestaltung unterstützen sollen. Im Folgenden werden ausgewählte Ansätze vorgestellt, die in der Literatur als besonders bedeutsam

für die Förderung gleichberechtigter Teilhabe hervorgehoben werden.

Binnendifferenzierung ermöglicht innerhalb einer Lerngruppe vielfältige Lernwege. Inhalte, Methoden und Materialien werden dabei an die unterschiedlichen Voraussetzungen und Lernstile der SuS angepasst, etwa durch variierende Schwierigkeitsgrade oder Darstellungsformen [BrLLW23].

In der wissenschaftlichen Literatur ist die Binnendifferenzierung eine weit verbreitete Methode in der inklusiven Didaktik. [Feus08] betont das „Lernen durch Kooperation am gemeinsamen Gegenstand“, während [Wilh09] die Binnendifferenzierung explizit als „methodisches Fundament inklusiven Unterrichts“ bezeichnet [Gies19].

Das Konzept des **Universal Design for Learning (UDL)** erweitert die Perspektive traditioneller Differenzierungsansätze grundlegend um die Zugänglichkeit von Inhalten und vielfältige Ausdrucksmöglichkeiten der SuS [NoBo20].

Bei der Unterrichtsgestaltung bietet das UDL Lehrkräften eine wertvolle Orientierung. Dieser Ansatz gestaltet Bildungsprozesse von Anfang an für alle Lernenden zugänglich [Rala11]. Im Grunde unterteilt sich das UDL in drei Kategorien der Unterrichtsgestaltung [uni18]. Dazu gehören:

- Multiple Mittel der Repräsentation von Informationen
- Multiple Mittel der Informationsverarbeitung und der Darstellung von Lernergebnissen
- Multiple Möglichkeiten der Förderung von Lernengagement und Lernmotivation

Studien belegen, dass die Methoden des UDL positive Effekte auf den Lernprozess erwirken, indem es die Zugänglichkeit des Unterrichts verbessert, die Beteiligung aller Lernenden fördert und zu besseren Lernergebnissen sowohl in spezifischen Fachbereichen als auch in allgemeinen Bildungskontexten führt [AAAM⁺23].

Die vielseitigen Zugänge zu Lerninhalten verweisen auf die grundlegende Bedeutung, die Medien und Technologien für die Umsetzung des UDL-Konzepts haben [NoBo20]. Der folgende Abschnitt beleuchtet daher die damit verbundenen Möglichkeiten und Grenzen näher.

In der wissenschaftlichen Diskussion werden **digitale Medien** zunehmend als bedeutsames Instrument für inklusive Bildungsprozesse betrachtet. Im Fachdiskurs haben sich entsprechend Konzepte wie „inklusive Medienbildung“ oder „Diklusion“ etabliert, die den Zusammenhang zwischen Digitalität und inklusiver Teilhabe systematisch beleuchten [WFKPR⁺23].

Digitale Medien können sprachliche Barrieren überwinden und Lernenden mit verschiedenen Leistungsniveaus gleichberechtigte Teilnahme ermöglichen. Allerdings

zeigt die Praxis auch Risiken: Lehrkräfte bestimmen oft als „Gatekeeper“ den Medieneinsatz, wobei kreative Anwendungen selten vorkommen. Problematisch ist zudem, dass unzureichend begleitete digitale Lernarrangements bestehende Ungleichheiten sogar verstärken können [FLLH22].

Die aufgezeigten didaktischen Konzepte und technologischen Möglichkeiten verdeutlichen die Vielschichtigkeit inklusiver Bildung. Um deren praktische Umsetzung zu konkretisieren und spezifische Herausforderungen zu identifizieren, wird im Folgenden exemplarisch die Situation sehbeeinträchtigter Lernender analysiert.

2.1.2 Herausforderungen bei Sehbeeinträchtigungen

Um die allgemeinen Prinzipien inklusiver Bildung zu konkretisieren, wird im Folgenden exemplarisch die Situation sehbeeinträchtigter SuS betrachtet. Diese Zielgruppe verdeutlicht besonders eindrücklich die Bedeutung multimodaler Lernmaterialien und zeigt auf, welche Anforderungen an inklusive Unterrichtsmaterialien gestellt werden. Die hier entwickelten Erkenntnisse sind dabei nicht nur für diese spezielle Gruppe relevant, sondern lassen wichtige Rückschlüsse auf allgemeine Designprinzipien inklusiver Bildungsmaterialien zu.

Aktuelle schulische Situation

Die statistischen Daten des Schuljahres 2023/2024, herausgegeben durch das Sekretariat der Ständigen Konferenz der Kultusminister der Länder in der Bundesrepublik Deutschland IVC/Statistik [Sek24], zeichnen ein differenziertes Bild der schulischen Inklusion. Unter den 9.529 SuS mit Sehbeeinträchtigung verteilt sich der Schulbesuch nahezu gleichmäßig: Knapp unter der Hälfte (48,7%, entsprechend 4.638 Personen) wird an speziellen Förderschulen unterrichtet, während etwas mehr als die Hälfte (51,3%, entsprechend 4.891 Personen) inklusiv an Regelschulen lernt. Gemessen an der Gesamtschülerschaft der Klassenstufen eins bis zehn machen Lernende mit Förderbedarf im Bereich Sehen lediglich 0,12% aus. Diese nahezu gleichmäßige Verteilung zwischen Förder- und Regelschulen verdeutlicht eindringlich, dass der Weg zu einer vollständig inklusiven Bildungslandschaft noch nicht abgeschlossen ist und sowohl spezialisierte als auch inklusive Ansätze gleichermaßen ihre Berechtigung haben.

[Bödi25] beschreibt in ihrer Analyse verschiedene Ansätze zur Verwirklichung inklusiver Bildung für SuS mit Sehbeeinträchtigungen. Nach ihren Erkenntnissen haben sich drei grundlegende Modelle herausgebildet, die vorrangig Anwendung finden: die Integration einzelner Lernender in Regelklassen, der Besuch spezieller Integrationsklassen sowie die Beschulung an inklusiven Schwerpunktschulen. Die Autorin hebt hervor, dass diese inklusiven Ansätze durch ein Netzwerk an Unterstützungsstrukturen ergänzt werden, darunter ambulante Beratungsdienste, spezialisiertes sonderpädagogisches Fachpersonal sowie verschiedene Formen der Schulassistenz.

Die nahezu gleichmäßige Verteilung sehgeschädigter SuS zwischen Förder- und Regelschulen sowie die verschiedenen inklusiven Modelle verdeutlichen zentrale Anforderungen an Unterrichtsmaterialien: Diese müssen von unterschiedlich qualifiziertem Personal - von Regelschullehrkräften bis hin zu spezialisierten Sonderpädagogen und

Schulassistenzen - effektiv einsetzbar sein, was klare Handreichungen und intuitive Bedienbarkeit erfordert.

Angesichts der geringen Prävalenz von nur 0,12% der Gesamtschülerschaft müssen die Materialien besonders ressourceneffizient und leicht zugänglich konzipiert werden, da Regelschulen oft nur sporadisch mit sehgeschädigten Lernenden arbeiten. Zudem erfordert die Vielfalt der Beschulungsformen - von Einzelintegration über Integrationsklassen bis zu Schwerpunktschulen - eine flexible und modulare Materialkonzeption, die sich verschiedenen Settings anpassen lässt.

Herausforderungen für Unterrichtsmaterialien

Die Umsetzung inklusiver Bildung für SuS mit Sehbeeinträchtigung stellt vielfältige und komplexe Anforderungen an Unterrichtsmaterialien. Die Forschungsarbeit von [Bödi25] identifiziert mehrere wesentliche Herausforderungen, wobei auf grundlegende Erkenntnisse von Lang und Kollegen zurückgegriffen wird.

[LaTh17] thematisieren die eingeschränkte Zugänglichkeit zu nonverbaler Kommunikation, die etwa 75 Prozent aller kommunikativen Prozesse ausmacht. Dies unterstreicht die Notwendigkeit, visuelle Informationen in Unterrichtsmaterialien adäquat zu verbalisieren oder taktil zugänglich zu machen, um Informationsverluste zu minimieren.

Ergänzend dazu heben [LaHo17] weitere bedeutsame Aspekte hervor: Besonders gravierend stellt sich die Ressourcenintensität bei der Adaption von Lernmaterialien dar. Die Anfertigung taktiler Darstellungen beschreiben sie metaphorisch als „kraftraubende Irrfahrt“, ein Prozess, der erhebliche Energie und Zeit beansprucht. Die fristgerechte Verfügbarkeit angepasster Unterrichtsmaterialien wird dadurch zu einer permanenten Herausforderung mit weitreichenden Implikationen für die Unterrichtsgestaltung. Ein weiteres fundamentales Problem liegt in der temporalen Dimension des taktilen Wahrnehmungsprozesses. Anders als beim visuellen Erfassen, das weitgehend simultan erfolgt, müssen Personen mit Sehbeeinträchtigungen Informationen sequentiell verarbeiten. Diese erhöhte Verarbeitungszeit für komplexe Strukturen und Details erfordert eine entsprechende Berücksichtigung bei der Materialkonzeption sowie die Integration alternativer Zugangswege. Zusätzlich thematisieren die Autoren ein psychosoziales Spannungsfeld: Das Streben nach Normalität kann bei betroffenen SuS paradoxerweise dazu führen, dass sie notwendige assistive Technologien ablehnen. Diese Ambivalenz zwischen Unterstützungsbedarf und Normalitätswunsch macht eine besonders feinfühlige und durchdachte Materialgestaltung erforderlich, die Unterstützung bietet, ohne Andersartigkeit zu betonen.

Diese Herausforderung steht in direktem Zusammenhang mit dem von [Walt22] betonten Konzept der Selbstständigkeit in der Sehbehindertenpädagogik. Im Vordergrund steht dabei die Befähigung von Lernenden mit Sehbeeinträchtigungen, ohne fremde Hilfe arbeiten zu können. Unterrichtsmaterialien müssen daher so konzipiert sein, dass sie eigenständiges Handeln ermöglichen und gleichzeitig die notwendige Strukturierung bieten. Dies bedeutet konkret, dass Materialien intuitiv erschließbar, barrierefrei zugänglich und in ihrer Komplexität angemessen reduziert sein sollten, ohne inhaltliche Abstriche zu machen. Die Balance zwischen ausreichender Unterstützung und Ermöglichung autonomer Lernprozesse stellt somit eine zentrale An-

forderung an die Materialgestaltung dar.

2.1.3 Anforderungen an inklusive Unterrichtsmaterialien

Die angeführten Herausforderungen verdeutlichen die vielschichtige Komplexität bei der Konzeption inklusiver Unterrichtsmaterialien für Lernende mit Sehbeeinträchtigungen. Die Analyse der vorangegangenen Aspekte zeigt zudem, dass der Gestaltung inklusiver Unterrichtsmaterialien eine Schlüsselrolle im Bildungsprozess zukommt. Während strukturelle und organisatorische Rahmenbedingungen zweifelsohne bedeutsam sind, manifestiert sich Inklusion letztlich in der konkreten Unterrichtspraxis und den dort eingesetzten Materialien.

Aus der systematischen Betrachtung aller diskutierten Problemfelder – von den grundlegenden Herausforderungen der Materialadaption bis hin zur heterogenen Bildungslandschaft – kristallisieren sich folgende zentrale Anforderungen an inklusive Unterrichtsmaterialien für SuS mit Sehbeeinträchtigungen heraus:

- **Multimodale Zugänglichkeit:** Materialien sollten verschiedene Sinneskanäle ansprechen und sowohl für sehende als auch nicht sehende SuS ohne Einschränkungen nutzbar sein, um echte gemeinsame Lernprozesse zu ermöglichen.
- **Systemübergreifende Kompatibilität:** Die Konzeption muss sowohl für spezialisierte Förderschulen als auch für inklusive Regelschulen funktionieren und dabei unterschiedliche Expertise-Level berücksichtigen.
- **Ressourceneffizienz und Skalierbarkeit:** Die Herstellung und Bereitstellung muss mit vertretbarem Zeit- und Arbeitsaufwand realisierbar sein, um eine zeitgerechte Verfügbarkeit zu gewährleisten und die strukturelle Ressourcenknappheit zu kompensieren.
- **Expertise-Integration:** Die Lösung sollte vorhandenes Fachwissen spezialisierter Einrichtungen nutzbar machen und über Netzwerkstrukturen weitergeben können, um die beschriebenen Beratungsdienste zu unterstützen.
- **Autonomieförderung:** Die Konzeption sollte selbstständiges Arbeiten ermöglichen und spezifische Unterstützung bieten, ohne Stigmatisierung zu verstärken oder das von [Walt22] betonte Selbstständigkeitsprinzip zu untergraben.
- **Adaptive Flexibilität:** Eine flexible Anpassung an individuelle Bedürfnisse und Kompetenzniveaus sollte möglich sein, um unterschiedliche Verarbeitungsgeschwindigkeiten beim taktilen Erfassen zu berücksichtigen und dem Spannungsfeld zwischen Unterstützungsbedarf und Normalitätswunsch gerecht zu werden.

Diese Anforderungen bilden den theoretisch fundierten Bewertungsmaßstab, anhand dessen im Folgenden konkrete technologische Lösungsansätze für inklusiven Unterricht analysiert werden. Sie verdeutlichen, dass die Entwicklung inklusiver Unterrichtsmaterialien nicht nur eine technische, sondern eine gesamtsystemische Herausforderung darstellt, die pädagogische, organisatorische und soziale Dimensionen gleichermaßen berücksichtigen muss.

2.2 Assistive Technologien für grafische Inhalte

Während das vorangegangene Kapitel die allgemeinen Herausforderungen inklusiver Unterrichtsmaterialien veranschaulichte, erfordern grafische Darstellungen besondere Aufmerksamkeit. Wie bereits erwähnt, erfolgen etwa 75 Prozent aller kommunikativen Prozesse nonverbal [LaTh17], was die fundamentale Bedeutung visueller Information im Lernprozess verdeutlicht. Für sehbeeinträchtigte Lernende entstehen dadurch systematische Barrieren beim Zugang zu grafischen Inhalten.

Besonders taktile Grafiken – Darstellungen mit fühlbaren, erhöhten Strukturen, die durch Berührung mit Fingern oder Handflächen erfasst werden – erweisen sich als problematisch. Im Gegensatz zu Textinhalten, die bereits durch bewährte Hilfsmittel wie Screenreader-Software oder Braille-Displays erfolgreich barrierefrei gestaltet werden können, stellen bildliche Informationen nach wie vor eine ungelöste Schwierigkeit dar. Diese Problematik ist von erheblicher Tragweite, da das Verstehen und Interpretieren grafischer Inhalte in Schlüsseldisziplinen wie den Wirtschaftswissenschaften, MINT-Fächern (Mathematik, Informatik, Naturwissenschaften, Technik) sowie im Ingenieurwesen unverzichtbar ist. [MSSM⁺22].

Die Transformation grafischer Inhalte in taktile Form bringt spezifische technische und pädagogische Herausforderungen mit sich: Der begrenzte Raum für Braille-Text in taktilen Grafiken, die zeitaufwändige manuelle Erstellung sowie die Gefahr der Informationsüberlastung durch zu viele Details [AlSH02].

Diese spezifischen Anforderungen haben zur Entwicklung verschiedener assistiver Technologien geführt – technische Hilfsmittel und Softwarelösungen, die Menschen mit Behinderungen dabei unterstützen, digitale Inhalte zu nutzen und gleichberechtigt am gesellschaftlichen Leben teilzuhaben. Im Bereich grafischer Darstellungen zielen diese Technologien darauf ab, visuelle Informationen durch alternative Sinneskanäle zugänglich zu machen. Die folgende Analyse betrachtet systematisch die verfügbaren technologischen Ansätze, ihre jeweiligen Stärken und Limitationen sowie ihre Eignung für den Einsatz im inklusiven Bildungskontext.

2.2.1 Taktile und haptische Systeme

Im Bereich der assistiven Technologien für taktile Grafiken haben sich verschiedene Ansätze etabliert, die sich grundlegend in ihrer Herangehensweise zur Bereitstellung haptischer Informationen unterscheiden.

Konventionelle taktile Lernhilfen

Es gibt verschiedene gängige Verfahren zur Erstellung konventioneller taktiler Grafiken, die sich hinsichtlich ihrer technischen Implementierung und Einsatzbereiche voneinander abgrenzen.

Das am häufigsten verwendete Verfahren zur Herstellung taktiler Grafiken ist das sogenannte **Schwellpapierverfahren**. Dieses Verfahren basiert auf der Verwendung von chemisch behandeltem Schwellpapier mit einer thermisch reagierenden Beschichtung. Das Grundprinzip beruht auf Mikrokapseln, die eine Flüssigkeit wie Alkohol

enthalten und bei Hitzeeinwirkung expandieren [PWCS⁺22]. Neben dieser in der Literatur beschriebenen Methode existieren auch andere Beschichtungstechnologien, wie beispielsweise PVC-basierte Systeme mit aufschäumbarem Kunststoff.

Der Herstellungsprozess gliedert sich in zwei aufeinanderfolgende Schritte: Zunächst werden die gewünschten Grafiken mit schwarzer Tinte, beispielsweise mittels Laserdrucker, auf das vorbereitete Schwellpapier aufgetragen. Anschließend wird das bedruckte Papier in einer speziellen Maschine, der sogenannten Pictures-in-a-Flash (PIAF), einem kontrollierten Erhitzungsprozess unterzogen.

Das physikalische Prinzip beruht auf der unterschiedlichen Wärmeabsorption: Die schwarzen, bedruckten Bereiche absorbieren deutlich mehr Wärme als die unbedruckten Stellen. Durch diese gezielte Hitzeeinwirkung kommt es zur thermischen Aktivierung der Beschichtung, wodurch taktil wahrnehmbare, erhabene Strukturen entstehen (siehe Abb. 2.1).

Zusätzlich werden Braille-Drucker bei dem **Prägedruckverfahren** eingesetzt, die sich insbesondere für Ausdrücke von Text in der taktilen Blindenschrift eignen (siehe Abb. 2.2). Bedingt können sie auch für den Druck von Bildmaterial verwendet werden, jedoch können hierbei kontinuierliche Elemente wie Linien und Flächen nur durch ein Punktraster approximiert werden.

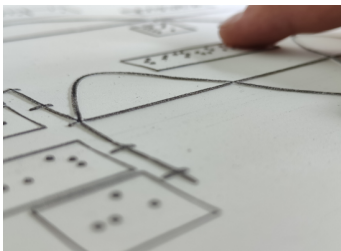


Abbildung 2.1: Beispiel einer Grafik hergestellt mit dem Schwellpapierverfahren (eigene Aufnahme)

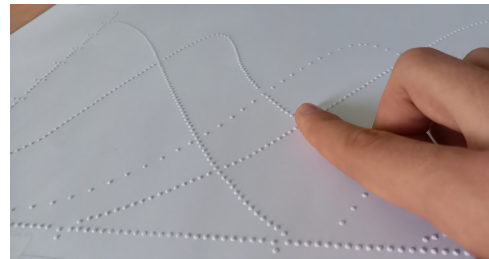


Abbildung 2.2: Beispiel einer Grafik hergestellt mit dem Prägedruckverfahren [RMSM⁺23]

Zusätzlich zu den digitalen Methoden finden auch **Tiefziehverfahren** Anwendung. Bei diesen wird zunächst manuell eine feste, plastische Vorlage hergestellt. Im nächsten Schritt wird eine thermoplastische Folie erhitzt und durch Unterdruck an die Form der Vorlage angepasst. Mit Hilfe dieser Verfahren lassen sich besonders plastische Darstellungen erzeugen, die sich durch vielfältige Krümmungen und feine Höhenunterschiede auszeichnen. [Götz17].

In der Praxis zeigen sich jedoch deutliche Einschränkungen: Der Herstellungsprozess ist zeit- und arbeitsintensiv, und professionell erstellte taktile Grafiken sind häufig überfrachtet und weisen unzureichende taktile Kontraste auf [PWCS⁺22]. Diese grundlegenden Herausforderungen haben zur Entwicklung technologisch fortgeschrittener Systeme geführt.

Aktualisierbare taktile Displays - Grundlagen und Technologie

Aktualisierbare taktile Displays, auch bekannt als Refreshable Tactile Displays (RTD), repräsentieren eine wegweisende Entwicklung im Bereich assistiver Technologien für Menschen mit Sehbeeinträchtigungen. Diese Systeme ermöglichen die elektronische

Generierung und Modifikation taktiler Grafiken mittels einer Matrix von Pins, welche präzise angehoben und abgesenkt werden können, um komplexe zweidimensionale Darstellungen zu erzeugen [HABDS⁺22]. Die technologische Bedeutung dieser Geräte liegt in ihrer Fähigkeit zur dynamischen Anpassung taktiler Inhalte, wodurch sie sich von statischen taktilen Medien grundlegend unterscheiden.

Eine umfassende Analyse von 18 kommerziell verfügbaren RTD-Systemen durch [Ramô22] identifiziert zwei distinkte Systemkategorien basierend auf ihrer Oberflächenauflösung: hochauflösende Systeme mit mehr als 7.000 Pins sowie Systeme mit geringerer Auflösung von weniger als 7.000 Pins. Diese Kategorisierung reflektiert nicht nur technische Unterschiede, sondern auch verschiedene Anwendungsfelder und Nutzungsszenarien. Besonders problematisch ist die geringe Auflösung im Vergleich zu konventionellen taktilen Grafiken: Klassische Prägemethoden bieten die Möglichkeit zur Darstellung feiner Nuancen und zusammenhängender Linienzüge, RTDs hingegen sind auf eine punktweise Abbildung durch die separaten Pins angewiesen. [HABDS⁺22].



Abbildung 2.3: Taktiler Display von Graphiti, bestehend aus 60×40 aktualisierbaren Pins, die eine Meereswelle darstellen [HABDS⁺22]

Trotz dieser Einschränkungen bieten RTDs einzigartige Vorteile: Sie ermöglichen erstmals die Darstellung taktiler Animationen und interaktiver Inhalte, wie beispielsweise einer Welle (siehe Abb. 2.3). Eine umfassende Studie von [HABDS⁺22] mit 12 blinden Erwachsenen (Alter 23-68 Jahre, Durchschnittsalter 46,9 Jahre) untersuchte die Wirksamkeit von RTDs im Vergleich zu herkömmlichen taktilen Grafiken. Die Studie zeigt, dass Nutzer Bewegung und Veränderungen über die Zeit besser verstehen können als durch statische Sequenzen, insbesondere bei einfachen Animationen wie Wellen oder Wasserfällen, bei denen die Veränderungen in einem begrenzten Bereich auftreten. Zudem erlauben RTDs die sofortige Anpassung von Inhalten an individuelle Bedürfnisse, was bei konventionellen taktilen Grafiken einen aufwändigen Neudruck erfordern würde.

2.2.2 Audio-Tactile Reader (ATR)

Eine vielversprechende Entwicklung stellen Systeme dar, die taktile Grafiken mit Audio-Feedback kombinieren, sogenannte Audio-Tactile Reader (ATR). Im Folgenden werden drei innovative Ansätze vorgestellt, die unterschiedliche technische Realisierungen dieser Kombination exemplifizieren.

Taktiler Display mit Audiointegration

Das ATR-System von [MSSM⁺22] stellt eine innovative Software-Implementierung dar, die das zum damaligen Zeitpunkt verfügbare HyperBraille S Display der Firma Metec Ingenieur-AG mit spezialisierten Interaktionskonzepten für die multimodale Informationsdarstellung erweitert. Das zugrundeliegende 2D-Pin-Matrix-Display

verfügt über 6.240 einzeln ansteuerbare Pins in einer 104×60 -Konfiguration. Mit einem Pinabstand von 2,5 mm erstreckt sich die aktive Tastfläche über 26×15 cm und ermöglicht somit die Darstellung großflächiger grafischer Strukturen.

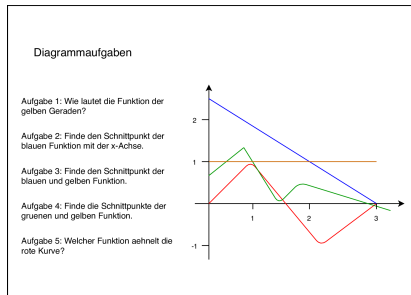


Abbildung 2.4: Beispiel einer PDF-Abbildung im System [MSSM⁺22]

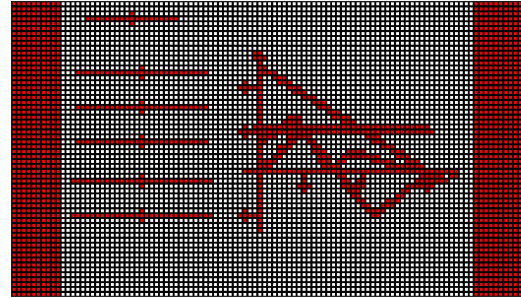


Abbildung 2.5: Beispiel einer taktilen Display-Darstellung [MSSM⁺22]

Die von [MSSM⁺22] entwickelte ATR-Software implementiert einen modularen Verarbeitungsansatz: Zunächst erfolgt eine automatische Segmentierung von PDF-Dokumenten, bei der textuelle Komponenten systematisch identifiziert und deren geometrische Attribute erfasst werden. Im Anschluss generiert das System eine bildliche Repräsentation der Seite, die ausschließlich grafische Komponenten wie Linienverläufe, Diagrammstrukturen und eingebettete Bildelemente berücksichtigt. Textregionen werden dabei durch pulsierende Markierungen unterschiedlicher Dimensionen auf der taktilen Oberfläche substituiert. Diese Marker fungieren als interaktive Schnittstellen, über die Nutzende mittels Doppeltipp-Gesten oder dedizierter Bedienelemente die zugehörigen Textinformationen als Sprachausgabe aktivieren können. Die Transformation von PDF-Dokumenten zur grafischen Darstellung auf der ATR ist von Abb. 2.4 zu Abb. 2.5 zu erkennen. Zur Bewältigung der spezifischen Herausforderungen taktiler Grafikdarstellung integriert die ATR-Software zwei zentrale Funktionalitäten: Vergrößerungsoperationen gestatten die detaillierte Untersuchung komplexer Bildregionen, während farbbasierte Filtermechanismen die isolierte Betrachtung spezifischer grafischer Komponenten ermöglichen.

Die empirische Validierung des ATR-Systems erfolgte durch eine Studie von [MSSM⁺22] mit vier blinden Studierenden (Alter 22-51 Jahre, Durchschnittsalter 29,5 Jahre), wobei eine Korrektheit von 91% bei der Beantwortung Mathematik, Informatik, Naturwissenschaften, Technik (MINT)-bezogener Fragestellungen erzielt wurde. Die Mehrheit der Probanden bevorzugte das entwickelte ATR-System gegenüber herkömmlichen taktilen Grafikverfahren.

TPad-System - Touchscreen-basierte Lösung

Eine besondere Kategorie bilden Systeme, die herkömmliche Touchscreen-Displays mit taktilen Overlays kombinieren. Das TPad-System von [MMSJ⁺20] repräsentiert einen innovativen Ansatz in diesem Bereich: Es kombiniert ein Standard-Tablet mit aufgelegten taktilen Grafiken, die mittels eines 3D-gedruckten Rahmens befestigt werden, wie in Abb. 2.6 dargestellt ist. Trotz der Platzierung der physischen taktilen Grafiken auf dem Touchscreen bleibt die Touch-Funktionalität erhalten. Durch Doppeltipp-Gesten können Nutzende kontextspezifische Audioinformationen zu verschiedenen Bereichen der Grafik abrufen, ohne dabei die für die taktile Exploration wichtige beidhändige Erkundung unterbrechen zu müssen.

Das System nutzt Standard-Software wie LibreOffice Draw, in der Lehrkräfte für jedes Grafikelement textuelle Beschreibungen über das Menü „Format → Beschreibung“ hinterlegen können. Diese werden automatisch in SVG-Dateien eingebettet und über ein Raspberry Pi-Repository an Standard-Tablets, wie beispielsweise ein Apple iPad, der SuS verteilt. SuS erkunden die aufgelegten taktilen Grafiken und erhalten per Doppeltipp Audio-Beschreibungen über Text-to-Speech.

Im Rahmen der Arbeit von [MMSJ⁺20] wurde eine Studie mit 5 blinden Teilnehmenden (Alter 19-39 Jahre, Durchschnittsalter 25,8 Jahre) durchgeführt, die alle täglich Laptops, Screenreader und Touch-Geräte nutzen. Zusätzlich waren 2 sehende Lehrkräfte einer Schule für sehbeeinträchtigte SuS beteiligt. Die Evaluationsergebnisse zeigen signifikante Vorteile gegenüber traditionellen Methoden: Die Explorationszeit verkürzte sich auf 111 Sekunden (gegenüber 277 Sekunden bei digitalen und 359 Sekunden bei Braille-Methoden), und 80% der SuS konnten Gedächtnisfragen nach der TPad-Nutzung korrekt beantworten. Besonders innovativ ist die Linienunterscheidung in mathematischen Diagrammen durch dynamische Audiosignale (0,5-Sekunden-Sonar-Ping) und variable Tonhöhen zur Y-Achsen-Orientierung. QR-Codes auf der Grafikkrückseite ermöglichen schnelles Laden (4,6 vs. 11,4 Sekunden über Menü). Lehrkräfte benötigen für die Materialerstellung nur 2-10 Minuten pro Grafik, wobei keine Braille-Kenntnisse oder Spezialsoftware erforderlich sind. [MMSJ⁺20].



Abbildung 2.6: TPad-System mit einigen Beispielgrafiken [MMSJ⁺20]

Tactonom Reader - Kamerabasierte Fingererkennung

Ein anderer Ansatz wird vom Tactonom Reader (siehe Abb. 2.7) verfolgt, der von der Firma Inventivio GmbH entwickelt wurde.



Dieses Gerät kombiniert geprägte oder geschwellte Papiergrafiken mit punktgenauen Audioerklärungen durch kamerabasierte Fingerspitzenenerkennung. Der Tactonom Reader verfügt über eine RGB-Kamera zur Fingererkennung und sieben taktile Tasten für die Benutzerinteraktion auf einer magnetischen Metalloberfläche von 29×43 cm, die Grafiken bis DIN A3 unterstützt [RMSM⁺23].

Abbildung 2.7: Tactonom-Reader [RMSM⁺23]

[RMSM⁺23] entwickelten eine erweiterte Benutzeroberfläche für den Tactonom Reader zur Unterscheidung von Linien in mathematischen Diagrammen. Das System kombiniert dynamische Audiosignale (0,5-Sekunden-Sonar-Ping beim Erreichen neuer Linien) mit Filterfunktionen, die durch variable Tonhöhe die Orientierung entlang der Y-Achse ermöglichen.

In einer Evaluationsstudie mit vier blinden Erwachsenen (Alter 18-47 Jahre) testeten die Forscher sowohl die Standard- als auch die neue Benutzeroberfläche anhand mathematischer Grafiken unterschiedlicher Komplexität (3, 6 und 9 Linien). Die Ergebnisse zeigen, dass die audio-taktile Schnittstelle den Zugang zu komplexen 2D-Informationen ermöglicht und sich die erweiterte Benutzeroberfläche besonders bei der detaillierten Exploration mathematischer Grafiken als hilfreich erwies, obwohl die Teilnehmer für komplexere Diagramme mehr Zeit benötigten [RMSM⁺23].

Für den Bildungsbereich bietet das System besondere Vorteile: Lehrkräfte können mit der kostenlosen Online-App „Tactonom Designer“ eigenständig Audio-Erklärungen zu taktilen Darstellungen hinzufügen und bestehende Grafiken anreichern. Der Zugang zur App erfolgt über die sogenannte „Share“-Datenbank auf der Webseite von [ProB25]. Die Datenbank bietet eine umfangreiche Sammlung von tausenden kostenlosen taktilen Grafiken, die durch die Kooperation mit ProBlind kontinuierlich erweitert wird. Weiterhin verfügt der Tactonom Reader über verschiedene Modi: Erkunden, Navigieren, Quiz und interaktive Funktionen, die das eigenständige Lernen zu Hause und im Unterricht ermöglichen [Inve25].

2.2.3 Audio-Marker für statische Grafiken

Neben den taktilen Ansätzen haben sich audio-basierte Systeme als eine weitere wichtige Säule assistiver Technologien für grafische Inhalte etabliert. Diese Technologien nutzen Sprachsynthese und Audio-Feedback, um Informationen zugänglich zu machen, ohne dabei auf aufwändige Hardware-Systeme angewiesen zu sein. Während etablierte Screenreader bereits erfolgreich bei textbasierten Inhalten eingesetzt werden [Gebh16], zeigen spezialisierte Audio-Stifte neue Wege für den Umgang mit grafischen Darstellungen und gedruckten Materialien auf.

Freie Aufnahmesysteme

Freie Aufnahmesysteme ermöglichen es Nutzern und Lehrkräften, eigene Audio-Inhalte zu erstellen und mit grafischen Materialien zu verknüpfen. Diese Flexibilität macht sie besonders attraktiv für den Bildungsbereich, da Inhalte individuell angepasst und in verschiedenen Sprachen aufgenommen werden können.

Zu den bekannten Systemen gehören beispielsweise der Anybook Reader der Firma Millennium 2000 Digital [Mill25] (zu sehen in Abb. 2.8), welcher speziell für den Bildungskontext angeboten wird, sowie der PenFriend des Blinden



Abbildung 2.8: Anybook-Reader als Beispiel für einen Audiostift [Mill25]

Hilfsmittel Vertriebs Dresden [Blin25], welcher ursprünglich als Hilfsmittel für Blinde und Sehgeschädigte im alltäglichen Leben dient. Die Funktionsweise beider Systeme basiert auf einem vergleichbaren technischen Prinzip, welches am Beispiel des Anybook Readers veranschaulicht werden soll: Das stiftförmige Sprachausgabegerät verfügt über einen integrierten optischen Sensor an der Spitze, der zur Erkennung spezifischer Codes auf den zugehörigen Aufklebern dient. Diese Codes bestehen aus sechsstelligen numerischen Kennungen, die eine eindeutige Zuordnung zu den entsprechenden Audiodateien ermöglichen. Nach der Codeerkennung erfolgt die Wiedergabe der verknüpften Audioaufnahme über den integrierten Lautsprecher des Geräts. Das System bietet eine Gesamtspeicherkapazität von 200 Stunden für Audioaufnahmen, die permanent im Gerätespeicher abgelegt werden können. Für den Einsatz im Bildungsbereich stellt der Hersteller eine spezialisierte Software-Umgebung zur Verfügung. Die Anybook Studio Software ermöglicht es Anwendern, digitale Materialien mit entsprechenden Audiocodes zu versehen und diese für den Druck aufzubereiten. Durch den Erwerb entsprechender Lizenzen können Nutzer eigenständig Lernmaterialien erstellen, diese am Computer vertonen und mit den erforderlichen Codes ausstatten, was eine individualisierte Gestaltung von Unterrichtsinhalten ermöglicht [Mill25].

Beide Systeme ermöglichen jedoch ausschließlich die Wiedergabe von Audioinhalten ohne sonstige logische Verknüpfungen. Dennoch eignen sie sich durch die nachträgliche Anbringung der Aufkleber ideal für die Zugänglichmachung bestehender taktiler Grafiken, Arbeitsblätter und Reliefkarten. Lehrkräfte können somit vorhandene Materialien ohne Neuerstellung mit Audio-Inhalten anreichern und an die spezifischen Bedürfnisse ihrer Lernenden anpassen.

Digitale Stift-Systeme

Eine besonders innovative Entwicklung zeigt sich in Anwendungen, die Digital Pen Systeme neu interpretieren: Ursprünglich zur Digitalisierung handschriftlicher Notizen konzipiert, können diese Technologien nun für die Erstellung interaktiver audio-taktiler Karten eingesetzt werden.

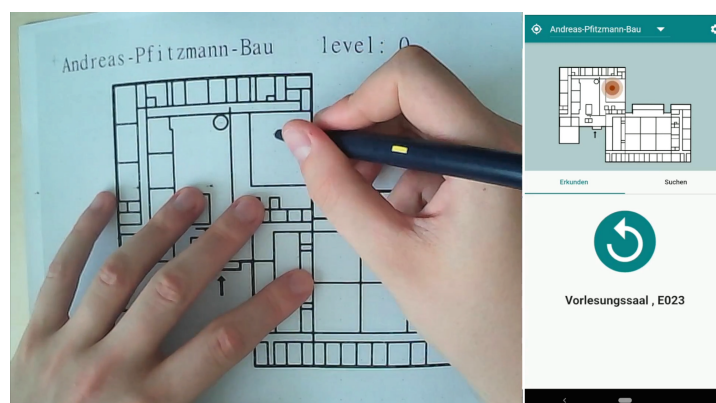


Abbildung 2.9: Mithilfe der ATIM-Software lässt sich die tastbare Raumkarte interaktiv nutzen. Der Anwender konnte im Navigationsmodus durch Berühren der Kartenoberfläche mit dem Digitalstift bestimmte Areale aktivieren (links). Basierend auf der Art der Eingabegeste erhielt der Nutzer entsprechende Audioinformationen zum ausgewählten Kartenbereich (rechts) [EnWe22]

Diese Technologie bietet drei wesentliche Vorteile: Erstens können wie bei freien Aufnahmesystemen individuelle Inhalte erstellt werden, zweitens ermöglicht sie komplexere Interaktionen durch verschiedene Gesten wie mehrmaliges Tippen, und drittens generiert sie Kartenmaterial automatisch aus verfügbaren Geodaten.

Das von [EnWe22] vorgestellte ATIM-System (Audio-Tactile Indoor Maps) nutzt den Neo Smartpen, welcher über ein Software Development Kit (SDK) programmierbare Schnittstellen für verschiedene Betriebssysteme bereitstellt. Im Gegensatz zu den zuvor beschriebenen Systemen fungiert der Stift dabei ausschließlich als Positionssensor, der über eine Infrarotkamera spezielle Code-Punktmuster auf dem Papier erkennt und die Koordinaten via Bluetooth an eine Smartphone-App übermittelt. Die gesamte Verarbeitung und Audio-Ausgabe erfolgt über das verbundene Mobilgerät, wodurch dynamische Inhalte, Internetkonnektivität und erweiterte Smartphone-Funktionen wie Vibration oder GPS genutzt werden können. Das ATIM-System ermöglicht die automatisierte Generierung taktiler Innenkarten basierend auf OpenStreetMap-Daten und unterstützt verschiedene Interaktionsmodi: Ein Erkundungsmodus bietet bedarfsgerechte Detailinformationen über verschiedene Berührungsgesten (einfaches Antippen, doppeltes Antippen, längeres Gedrückt-halten), während ein Suchmodus durch Sonifikation bei der Zielfindung unterstützt – die Audiofrequenz steigt mit der Annäherung an das gesuchte Objekt. Durch die Smartphone-Integration können Inhalte jederzeit aktualisiert, in verschiedenen Sprachen bereitgestellt und um kontextuelle Informationen ergänzt werden [EnWe22].

Diese Architektur eröffnet neue Möglichkeiten für die Entwicklung individueller Unterrichtsmaterialien, erfordert jedoch im Gegensatz zu den etablierten Systemen grundlegende Programmierkenntnisse für die App-Entwicklung.

2.2.4 Bewertung bestehender Ansätze

Die vorangegangene Analyse hat eine Vielzahl technologischer Ansätze für die Zugänglichmachung grafischer Inhalte aufgezeigt – von konventionellen taktilen Verfahren bis hin zu hochentwickelten audio-taktilen Hybridsystemen. Um deren Eignung für den inklusiven Unterricht fundiert bewerten zu können, bedarf es einer systematischen Gegenüberstellung anhand praxisrelevanter Kriterien.

Dabei stellt sich die zentrale Frage, inwieweit die verschiedenen Technologien den in Abschnitt 2.1.3 identifizierten Anforderungen an inklusive Unterrichtsmaterialien gerecht werden. Besondere Bedeutung kommt dabei den Aspekten zu, die über die reine technische Funktionalität hinausgehen:

- Welche Systeme lassen sich realistisch in bestehende Schulstrukturen integrieren?
- Welcher Aufwand entsteht für Lehrkräfte bei der Materialerstellung?
- Wie verhält sich das Kosten-Nutzen-Verhältnis im Kontext begrenzter Bildungsbudgets?

Tabelle 2.1 bietet hierzu eine strukturierte Übersicht der wichtigsten Systemkategorien und ermöglicht eine direkte Vergleichbarkeit anhand der für den Schulalltag relevantesten Dimensionen.

Tabelle 2.1: Vergleich assistiver Technologien für grafische Inhalte

System	Modalität	Kosten	Grafische Interaktion	Audio-Funktionen	Erstellungsaufwand	Platzbedarf
Schwellpapierverfahren	Rein taktil	Niedrig (100-500€)	Statisch	Keine	Mittel	Gering
Basis-RTD-Systeme	Rein taktil	Sehr hoch (>20.000€)	Dynamisch (Animationen, Echtzeitänderung)	Nur durch Software-Erweiterung	Niedrig	Mittel
RTD mit ATR-Software	Audio-taktil	Sehr hoch (>30.000€)	Dynamisch (Zoom, Filter, Segmentierung)	Kontextuelle Sprachausgabe, automatische Textverarbeitung	Niedrig	Mittel
TPad-System	Audio-taktil	Niedrig-Mittel (500-1.000€)	Statisch mit Touch-Erkennung	Kontextuelle Audioinformationen, einfache Zuordnung	Mittel	Gering
Tactonom Reader	Audio-taktil	Mittel-Hoch ($\approx$ 4.500€)	Statisch mit Fingererkennung	Interaktive Modi (Quiz, Navigation, Exploration)	Niedrig-Mittel	Mittel
Audio-Stifte	Rein auditiv	Niedrig (100-250€)	Keine (nur Code-Erkennung)	Einfache Audiowiedergabe, einfache Zuordnung	Mittel	Gering
ATIM-System	Audio-taktil	Mittel (200-400€ + Entwicklung)	Statisch mit Gestenerkennung	Sonifikation, logische Verknüpfungen, Suchmodi	Hoch (Programmierung)	Gering

Die systematische Gegenüberstellung der assistiven Technologien in Tabelle 2.1 offenbart deutliche Unterschiede in ihrer Eignung für inklusiven Unterricht, wenn sie anhand der theoretisch fundierten Anforderungen aus Abschnitt 2.1.3 bewertet werden.

Multimodale Zugänglichkeit und systemübergreifende Kompatibilität

Bezüglich der multimodalen Zugänglichkeit zeigen sich fundamentale Unterschiede zwischen den Technologieansätzen. Rein taktile Systeme wie das Schwellpapierverfahren und Basis-RTD-Systeme ohne Audio-Software erfüllen diese Anforderung nur partiell, da sie ausschließlich auf den Tastsinn setzen und damit gemeinsame Lernprozesse zwischen sehenden und nicht sehenden SuS erschweren. Audio-taktile Hybridlösungen wie RTD-Systeme mit ATR-Software, das TPad-System und der Tactonom Reader bieten hier deutliche Vorteile: Sie ermöglichen sowohl die taktile Exploration als auch die auditive Informationsaufnahme und schaffen damit Brücken zwischen verschiedenen Wahrnehmungskanälen.

Für die systemübergreifende Kompatibilität erweisen sich insbesondere kostengünstige Lösungen wie Audio-Stifte und das TPad-System als vorteilhaft. Diese können sowohl in spezialisierten Förderschulen als auch in Regelschulen ohne umfangreiche Infrastrukturänderungen implementiert werden, während High-End-Systeme wie RTDs oder ATR-Geräte aufgrund ihrer hohen Anschaffungskosten (>20.000€) primär für spezialisierte Einrichtungen geeignet sind.

Ressourceneffizienz und Skalierbarkeit

Die Analyse des Erstellungsaufwands verdeutlicht erhebliche Unterschiede in der praktischen Umsetzbarkeit. Während das ATIM-System durch erforderliche Programmierkenntnisse limitiert sind, bieten Systeme wie der Tactonom Reader und RTDs durch niedrigen bis mittleren Erstellungsaufwand deutliche Vorteile für den Schulalltag. Besonders bemerkenswert ist die Positionierung des TPad-Systems, das trotz mittleren Erstellungsaufwands durch die Nutzung von Standard-Software (LibreOffice) und 3D-Druck eine gute Balance zwischen Funktionalität und Praktikabilität erreicht.

Der Platzbedarf als Indikator für Skalierbarkeit zeigt, dass mobile Lösungen wie Audio-Stifte, das TPad-System und das ATIM-System deutliche Vorteile für den flexiblen Klasseneinsatz bieten, während stationäre High-End-Systeme primär für Einzelarbeitsplätze konzipiert sind.

Expertise-Integration und Autonomieförderung

Hinsichtlich der Expertise-Integration stechen Cloud-basierte Systeme wie der Tactonom Reader hervor, der durch seine Online-Datenbank und den kollaborativen Tactonom Designer eine systematische Nutzung und Weitergabe von Fachwissen ermöglicht. Das ATR-System unterstützt diese Anforderung durch automatische PDF-Verarbeitung, wodurch vorhandenes digitales Material ohne Neubearbeitung zugänglich gemacht werden kann.

Die Autonomieförderung wird besonders durch Systeme mit interaktiven Modi unterstützt. Der Tactonom Reader bietet Quiz-, Navigations- und Explorationsmodi, während das ATIM-System durch Sonifikation und Suchmodi selbstständiges Lernen ermöglicht. RTD-Systeme fördern Autonomie durch ihre Echtzeitanpassungsfähigkeiten, sind jedoch durch hohe Kosten in ihrer Verbreitung limitiert.

Adaptive Flexibilität

Die adaptive Flexibilität variiert erheblich zwischen den Systemen. RTD- und ATR-Systeme bieten durch ihre digitale Natur maximale Anpassungsmöglichkeiten an individuelle Bedürfnisse, während statische Verfahren wie Schwellpapier keine nachträglichen Modifikationen ermöglichen. Audio-taktile Hybridsysteme nehmen eine Mittelposition ein: Sie erlauben Anpassungen in der digitalen Audio-Komponente, während die taktile Basis statisch bleibt.

Gesamtbewertung

Die vergleichende Analyse zeigt, dass keine der untersuchten Technologien alle Anforderungen optimal erfüllt. Vielmehr kristallisieren sich drei distinkte Kategorien heraus:

- **Kostengünstige Basislösungen:** Audio-Stifte und Schwellpapier erfüllen grundlegende Zugänglichkeitsanforderungen, weisen jedoch Defizite bei Multimodalität und Flexibilität auf.
- **High-End-Systeme:** RTDs und RTDs mit ATR-Software bieten maximale Funktionalität, sind aber durch prohibitive Kosten für die meisten Bildungseinrichtungen unzugänglich.
- **Pragmatische Mittelwege:** TPad-System und Tactonom Reader zeigen das größte Potenzial für den inklusiven Schulalltag, da sie ein ausgewogenes Verhältnis zwischen Funktionalität, Kosten und praktischer Umsetzbarkeit bieten und dabei die meisten der identifizierten Anforderungen adressieren.

Die vergleichende Analyse verdeutlicht dennoch eine **signifikante Lücke** im Spektrum verfügbarer Lösungen: Während kostengünstige Audio-Stifte durch einfache Handhabung und niedrige Anschaffungskosten überzeugen, beschränken sie sich auf primitive Audio-Wiedergabe ohne logische Verknüpfungen oder interaktive Elemente. Gleichzeitig bieten teure Systeme wie der Tactonom Reader zwar erweiterte Funktionen wie Quiz- und Navigationsmodi, sind jedoch für viele Bildungseinrichtungen finanziell mit hohen Kosten verbunden. Eine vielversprechende Entwicklungsrichtung könnte daher in der Kombination bewährter Ansätze liegen: Ein weiterentwickeltes Audio-Stift-System, das die Kosteneffizienz und Mobilität herkömmlicher Audio-Marker mit erweiterten Logik- und Spielfunktionen verbindet und dabei auf standardisierte, hochwertige taktile Grafiken zurückgreift. Ein solches Hybridsystem würde die Vorteile kostengünstiger Hardware mit den pädagogischen Möglichkeiten interaktiver Lernmodi vereinen und könnte somit die identifizierte Lücke zwischen Funktionalität und Erschwinglichkeit schließen.

2.3 Tiptoi-Technologie

Die vorangegangene Bewertung bestehender assistiver Technologien hat eine deutliche Lücke zwischen kostengünstigen, aber funktionsbegrenzten Systemen und hochfunktionalen, aber prohibitiv teuren Lösungen aufgezeigt. Insbesondere die Identifikation des Bedarfs nach einem erweiterten Audio-Stift-System mit Logik- und Spielfunktionen lenkt den Blick auf bereits etablierte Technologien, die diese Eigenschaften möglicherweise mitbringen.

Eine solche Technologie stellt das Tiptoi-System von Ravensburger dar, das ursprünglich für den allgemeinen Bildungsmarkt entwickelt wurde, jedoch Charakteristika aufweist, die es für den inklusiven Unterricht mit sehbeeinträchtigten Lernenden prädestinieren könnten. Das System verbindet die Kosteneffizienz von nur etwa 40-50€ pro Stift und Mobilität klassischer Audio-Stifte mit erweiterten interaktiven Funktionen und nutzt dabei gedruckte Materialien als Basis – eine Kombination, die den zuvor identifizierten Anforderungen bemerkenswert nahekommt.

Im Folgenden wird zunächst die technische Funktionsweise des Systems erläutert, bevor bisherige Anwendungen zur Materialerstellung sowie bestehende Anwendungen im Bildungskontext betrachtet werden.

2.3.1 Technische Funktionsweise

Der Tiptoi-Stift ist ein digitales Lernwerkzeug von Ravensburger, das Kindern interaktives Lernen ermöglicht. Das Besondere an diesem System ist die Fähigkeit, auf spezielle Bücher, Spiele oder Figuren zu tippen, wodurch situationsabhängig Geräusche, Musik oder Erklärungen abgespielt werden. Im Folgenden wird die technische Funktionsweise detailliert erläutert, wobei die Darstellung auf den Forschungsergebnissen von [Pusc17] sowie auf Erkenntnissen aus Community-getriebenen technischen Analysen basiert [Brei20].

Optische Erkennungstechnologie der Tiptoi-Systeme

Die innovative Technologie des Tiptoi-Stifts basiert auf einer hochpräzisen Infrarot-Bilderkennungseinheit, welche mikroskopisch kleine Identifikationscodes – als OID bezeichnet – auf Tiptoi-Produkten dekodieren kann [Pusc17].

Die OID-Codierung basiert nach [Pusc17] auf einem hochkompakten Punktraster mit 4×4 Punkten pro Quadratmillimeter. Von den insgesamt 16 Rasterpunkten werden neun Punkte zur eigentlichen Wertkodierung verwendet, während sieben Punkte als geometrische Referenzmarker fungieren (visualisiert in Abb. 2.10 und 2.11). Die Kodierung erfolgt durch diagonale Verschiebungen der Wertepunkte aus ihrer Zentralposition, bei der jeder Punkt vier Positionen einnehmen kann. Mathematisch resultiert dies in einem theoretischen Codierungspotenzial von $4^8 = 65.536$ möglichen Codewerten, wobei ein Punkt als Prüfsumme reserviert bleibt.

Die Dekodierung der neun informativen Pixel erfolgt systematisch: Das Pixel in der oberen linken Ecke fungiert als Checksumme beziehungsweise Paritätsbit, während die verbleibenden acht Pixel zeilenweise von links oben (höchstwertiges Bit) nach

rechts unten (niedrigstwertiges Bit) ausgelesen werden. Zur Veranschaulichung dieses Dekodierungsprozesses steht ein interaktiver HTML/JavaScript-basierter OID-Decoder¹ zur Verfügung. Der Rohwert der dekodierten Ganzzahl wird durch eine Zuordnungstabelle beziehungsweise einen Offset verschleiert.

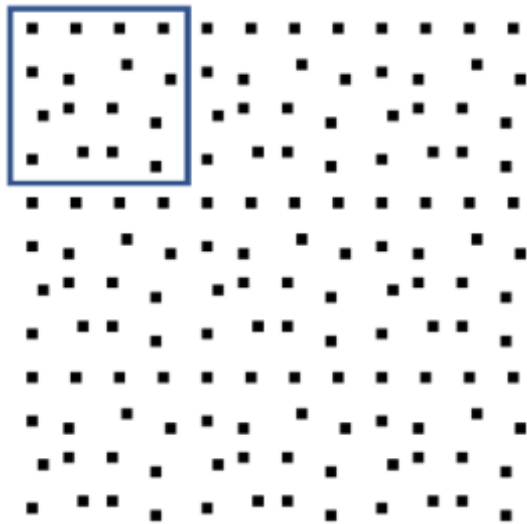


Abbildung 2.10: Vergrößerte OID-Codes. Eingerahmt ist ein einzelner Code bestehend aus 4×4 Punkten. Zu erkennen sind die regelmäßigen Rasterpunkte und die Verschiebungen aus der Mitte in vier Richtungen (vgl. dazu Abb. 2.11).

Quelle: [Pusc17], S. 261.

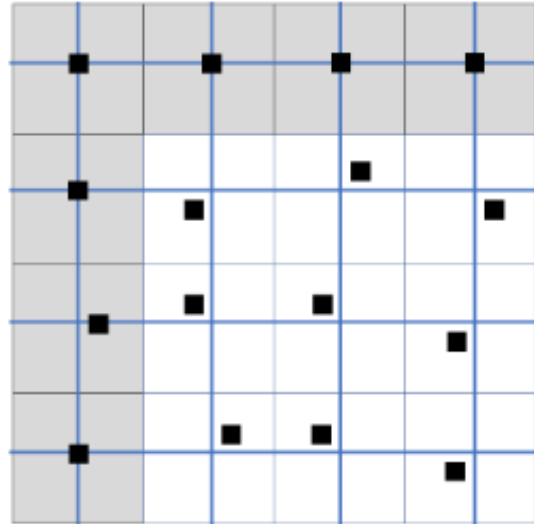


Abbildung 2.11: Struktur eines OID-Codes. Graue Felder: 7 Rasterpunkte. Weiße Felder: 9 Wertepunkte. Zu erkennen sind die Verschiebungen der 9 Wertepunkte diagonal aus der Mitte (blaues Gitter) sowie die geradlinige Verschiebung eines Rasterpunktes.

Quelle: [Pusc17], S. 261.

Systematik der OID-Code-Zuordnung

Das Tiptoi-System implementiert eine strukturierte 16-Bit-Codierung (Wertebereich 0 bis 65.535), die eine direkte Korrespondenz zu den systeminternen Registern aufweist. Die Code-Systematik folgt einer hierarchischen Struktur:

- **Mediencodes (0–999):** Diese kodieren die Produkt-ID im Anschaltfeld des jeweiligen Tiptoi-Produkts. Sprachvarianten werden rückwärts von 999 nummeriert (999 für Deutsch, 998 für Französisch, 997 für Niederländisch), während Ravensburger eine aufsteigende Nummerierung ab 1 für die Produktpalette verwendet.
- **Object-OIDs (1.000–14.999):** Diese identifizieren interaktive Objekte innerhalb der Tiptoi-Produktskripte und ermöglichen dem Stift die Erkennung spezifischer Elemente auf dem Spielmaterial.
- **Systemfunktionen:** Vordefinierte Codes implementieren grundlegende Operationen: Code 12.159 aktiviert die Replay-Funktion für die Wiederholung der

¹Verfügbar unter: <http://htmlpreview.github.io/?https://github.com/entropia/tip-toi-reveng/blob/master/oid-decoder.html>

zuletzt ausgegebenen Audiodatei, während Code 12.158 die aktuelle Audioausgabe stoppt. Der spezielle Raw-Code 65.535 wird für neutrale Bereiche verwendet, die vom System ignoriert werden sollen.

Datenverarbeitung und Programmlogik

Der Tiptoi-Stift funktioniert nach dem Prinzip eines endlichen Automaten, wie [Pusc17] darlegt. Die technische Architektur basiert auf der Trennung von Datenstrukturen und Ausführungslogik, wobei sowohl Audiodateien als auch die zugehörige Programmlogik in GME-Dateien gespeichert werden.

Jede GME-Datei gehört zu einem spezifischen Tiptoi-Produkt und enthält sämtliche für die Interaktion notwendigen Daten. Die eindeutige Zuordnung zwischen OID-Codes und Skripten wird in einer Zuordnungstabelle innerhalb der GME-Datei gespeichert. Bei der Aktivierung eines Produkts durchsucht der Stift sämtliche verfügbare GME-Dateien und lädt diejenige mit der entsprechenden Produkt-ID.

Um zwischen verschiedenen Produkten unterscheiden zu können, besitzt jedes Tiptoi-Produkt eine eigene Produkt-OID als initialen Aktivierungspunkt. Diese muss zuerst angetippt werden, bevor andere Codes auf dem Material genutzt werden können, wodurch der Stift den korrekten Kontext für nachfolgende Interaktionen herstellt.

Technische Limitationen und Möglichkeiten

Die Technologie des Tiptoi-Stifts unterliegt gewissen Einschränkungen, bietet aber auch vielfältige didaktische Möglichkeiten. Eine technische Limitation besteht in der begrenzten Speicherkapazität des Stifts, was die Größe und Anzahl der GME-Dateien limitiert. Zudem ist die Audioqualität durch die verbauten Lautsprecher begrenzt, kann jedoch durch den Anschluss von Kopfhörern verbessert werden.

Der Druck von Tiptoi-Code stellt besondere Herausforderungen dar: Die korrekte Wiedergabe der Punktmuster erfordert hochauflösende Drucker (mindestens 600 dpi), da bereits geringfügige Abweichungen in der Punktgröße oder -position zu Erkennungsfehlern führen können. Handelsübliche Tintenstrahldrucker weisen häufig Probleme bei der Präzision der Punktplatzierung auf. Zusätzlich kann die Tintenbeschaffenheit die Infrarot-Reflexion beeinträchtigen. Laserdrucker erzielen dagegen präzisere Ergebnisse, da der Tonerauftrag gleichmäßiger erfolgt und von der Infrarotkamera des Stifts zuverlässiger erkannt wird. Da moderne Bildungseinrichtungen üblicherweise mit Laserdruckern ausgestattet sind, sollten die technischen Voraussetzungen für den präzisen Druck von Tiptoi-Codes grundsätzlich gegeben sein.

Die Papierqualität spielt ebenfalls eine Rolle, da saugfähige Oberflächen die Punktkonturen verwischen und die Erkennungsrate des Stifts beeinträchtigen können. Darüber hinaus führen Farbabweichungen oder ungleichmäßige Druckverteilung zu inkonsistenter Code-Erkennung. Bei der Verwendung von Schwellpapier zeigten eigene Voruntersuchungen, dass verschiedene Mikrokapsel-Systeme unterschiedliche Erkennungsraten aufweisen können. So erzielte das Tangible Magic Paper der Firma Harpo [HarpoD] bessere Ergebnisse als das Papier der Firma Zychem [ZychoD]. Dies könnte auf die unterschiedlichen Oberflächeneigenschaften durch verschiedene Beschichtungstechnologien nach dem Erhitzungsprozess zurückzuführen sein.

Besonders hervorzuheben ist die Möglichkeit, bedingte Abläufe zu programmieren, die auf Nutzereingaben reagieren. So können beispielsweise gestufte Lernhilfen oder

adaptive Feedbacksysteme realisiert werden, die je nach Antwort des Lernenden unterschiedliche Audioinhalte wiedergeben. Diese Funktionalität erlaubt es, interaktive Lernmaterialien zu gestalten, die auf verschiedene Lernbedürfnisse eingehen können [Pusc17]. Die technische Funktionsweise des Tiptoi-Stifts verdeutlicht dessen Potenzial für inklusive Bildungsansätze: Die Verbindung von haptischer Interaktion mit auditiver Rückmeldung ermöglicht einen multisensorischen Zugang zu Lernmaterialien, was besonders für Lernende mit Sehbeeinträchtigungen vorteilhaft sein könnte.

2.3.2 Bisherige Tools zur Erstellung von Tiptoi-Materialien

Die Erstellung eigener Tiptoi-Materialien wird durch verschiedene Softwarelösungen ermöglicht, die sich hinsichtlich ihrer Bedienbarkeit und ihres Funktionsumfangs unterscheiden. Im Folgenden werden die wichtigsten existierenden Tools vorgestellt und deren Einsatzmöglichkeiten sowie Limitationen diskutiert.

Das tttool

Für die wissenschaftliche und pädagogische Forschung ist von besonderer Relevanz, dass die Erstellung eigener Tiptoi-Materialien zwar technisch ermöglicht wird, diese Möglichkeit jedoch bislang kaum in Bildungseinrichtungen genutzt wird. Die Open-Source-Software „tttool“ [Brei23] ermöglicht die Generierung eigener GME-Dateien sowie der dazugehörigen OID-Codes. Diese Software verwendet das YAML Ain't Markup Language (YAML)-Format zur Programmierung und kann Audiodateien in die für den Stift verständliche Form konvertieren. Die erzeugten OID-Codes können als Bilddateien exportiert und mit Bildbearbeitungssoftware in selbst erstellte Materialien integriert werden. Anschließend können diese Materialien mit handelsüblichen Laserdruckern (Mindestauflösung 600 dpi) ausgedruckt werden, während die zugehörigen GME-Dateien per USB-Verbindung auf den Stift übertragen werden. In den ausgedruckten Materialien sind die Bereiche mit OID-Codes für das bloße Auge als leicht graue Einfärbungen erkennbar.

Da es sich beim tttool um ein Kommandozeilenprogramm handelt, wird es bislang vorwiegend von Hobby-Tüftlern im privaten Gebrauch eingesetzt. In Schulen fand das Tool trotz seines didaktischen Potenzials noch keine großflächige Verbreitung, was vermutlich auf die relativ hohe Einstiegshürde durch die ungewohnte Bedienung über die Kommandozeile zurückzuführen ist.

Grafische Tools

Auf Basis des tttool wurden mehrere benutzerfreundlichere Anwendungen mit grafischen Oberflächen entwickelt, die den Zugang zur Tiptoi-Technologie auch für weniger technikaffine Nutzer erleichtern sollen. Allerdings ist die Möglichkeit Spiele zu hinterlegen, was den Stift schließlich auszeichnet, bei keiner der Lösungen gegeben.

Andreas Grimme hat mit ttaudio eine Windows-GUI erstellt, die sich besonders für Anwender eignet, die lediglich Audiodateien auf den Tiptoi-Stift laden möchten [Grim18].

Till Korten entwickelte mit ttmp32gme eine plattformübergreifende grafische Anwendung für Windows, macOS und Linux. Diese Software ermöglicht nicht nur das Übertragen von Audiodateien auf den Stift, sondern generiert auch ansprechende Übersichten zum Antippen, die ausgedruckt werden können [Kort22].

Die in der Schweiz entwickelte Anwendung soundolino bietet eine kommerzielle Lösung zur Erstellung von Tiptoi-kompatiblen Materialien [Arn22]. Die Plattform richtet sich insbesondere an pädagogische Fachkräfte und bietet einen vereinfachten Workflow. Bei soundolino ist eine Einarbeitung kaum noch notwendig, was den Einstieg für Lehrkräfte erheblich erleichtert.

Limitationen bisheriger Lösungen

Trotz der Verfügbarkeit verschiedener Tools zur Erstellung von Tiptoi-Materialien bestehen weiterhin fundamentale Einschränkungen für deren breiten Einsatz im Bildungskontext. Die aktuell verfügbaren Lösungen stellen Lehrkräfte vor ein Dilemma: Entweder sie nutzen Tools mit grafischer Benutzeroberfläche, die zwar den Erstellungsprozess vereinfachen, aber lediglich die simple Zuordnung von einer Audiodatei zu jeweils einem bestimmten Code ermöglichen. Oder sie greifen auf das komplexe tt-tool zurück, welches über eine spezielle Skriptsprache in YAML-Dateien die vollständige Programmierung des Tiptoi-Stifts mit umfangreichen Logikfunktionen erlaubt, jedoch ausschließlich als Kommandozeilenprogramm ohne grafische Benutzeroberfläche funktioniert. Die Erstellung tiefgehender Logik, wie sie für interaktive Spiele oder mehrmaliges Tippen für weitere Audioinhalte notwendig wäre, erfordert somit den Verzicht auf benutzerfreundliche Oberflächen sowie das Vorhandensein von anfänglichen Programmierkenntnissen. Diese Einschränkung limitiert das didaktische Potenzial erheblich.

Ein weiteres Problem stellt die Trennung der Arbeitsschritte dar. Das Platzieren der OID-Codes muss bei allen vorgestellten Tools weiterhin separat in externen Bildbearbeitungsprogrammen erfolgen. Dieser zusätzliche Arbeitsschritt erhöht die Komplexität des Erstellungsprozesses und erfordert Kenntnisse in der Bildbearbeitung. Als Alternative können lediglich Aufkleber erstellt werden, was die gestalterischen Möglichkeiten einschränkt.

Darüber hinaus sind die Kollaborationsmöglichkeiten bei den existierenden Tools begrenzt. Der Austausch und die gemeinsame Entwicklung von Tiptoi-Materialien zwischen Lehrkräften werden durch die aktuellen Lösungen nur unzureichend unterstützt.

Diese Limitationen verdeutlichen den Bedarf an einer speziell für Lehrkräfte konzipierten Lösung, die nicht nur technische Hürden reduziert, sondern auch die Erstellung komplexerer Interaktionen ermöglicht, didaktische Unterstützung bietet und sich nahtlos in den pädagogischen Alltag integrieren lässt.

2.3.3 Bisherige Anwendungen im Bildungskontext

Die Einsatzmöglichkeiten von tiptoi-Stiften wurden in verschiedenen Kontexten bereits untersucht, wobei sich drei wesentliche Anwendungsbereiche herauskristallisieren: schulische Bildung, häusliches Umfeld und kulturelle Bildungsangebote. Im Folgenden steht die schulische Bildung im Vordergrund mit einer zusätzlichen Betrachtung im kulturellen Bereich.

Schulische Anwendungen

Im schulischen Kontext untersuchte [Pusc17] in einer mehrwöchigen empirischen Studie die Einsatzmöglichkeiten dieser Technologie. In seiner Untersuchung mit 25

SuS einer dritten Klasse erprobte der Autor über einen Zeitraum von mehreren Wochen zehn selbst erstellte interaktive tiptoi-Arbeitsblätter in zwölf Unterrichtsstunden zum Thema Luft und Luftdruck. Die Datenerhebung erfolgte mittels Interviews, Videoanalysen und Fragebogenevaluation. Der Autor identifiziert mehrere vielversprechende Anwendungskonzepte, darunter mehrsprachige Lernmaterialien für den sprachsensiblen Fachunterricht, gestufte Lernhilfen und automatisiertes Feedback. Die empirischen Befunde zeigen, dass die SuS vor allem die Funktionen zum Vorlesen von Aufgabenstellungen und zur Lösungsüberprüfung nutzten. Neben der lernförderlichen Wirkung beobachtete [Pusc17] auch positive Nebeneffekte wie eine Geräuschreduzierung im Klassenraum durch den Einsatz von Kopfhörern. Die Arbeit deutet das besondere Potenzial mehrsprachiger tiptoi-Materialien zur Unterstützung von Lernenden mit Deutsch als Zweitsprache sowie zur Förderung bei Leseschwächen an.

Kulturelle Bildungsangebote

Im Bereich der kulturellen Bildung zeigen [ZiBW18] in ihrer Arbeit eine innovative Anwendung des tiptoi-Stifts im musealen Kontext. Die Autoren führten vom 12. bis 14. Januar 2017 eine empirische Nutzerbefragung mit insgesamt 15 Besuchern durch, darunter elf sehende, zwei geburtsblinde, eine erblindete und eine sehbehinderte Person. Im Rahmen einer Ausstellung im Kupferstich-Kabinett Dresden entwickelten sie ein dreidimensionales Tastmodell einer historischen Druckgrafik (Giovanni Battista Piranesi „Der runde Turm“), das mit dem tiptoi-System erweitert wurde. Die Datenerhebung erfolgte mittels verbaler Nutzerumfragen und systematischer Beobachtung des Nutzerverhaltens beim Einsatz des Vorlesestiftes. Besonders hervorzuheben ist der mehrstufige Informationsansatz, bei dem bis zu drei verschiedene Audioinhaltebenen durch mehrmaliges Antippen derselben Stelle abgerufen werden können. Die empirischen Befunde zeigten, dass die Kombination aus taktilen Modell und auditiver Information durch den tiptoi-Stift ein „interessantes und Freude bereitendes Erlebnis“ für alle Besucher schafft. Insbesondere für blinde und sehbehinderte Nutzer ermöglichte diese technische Lösung ein selbstständiges Erkunden der Ausstellungsinhalte ohne auf permanent verfügbare menschliche Assistenz angewiesen zu sein.

Einordnung und Forschungslücken

Die dargestellten Studien verdeutlichen das vielseitige Anwendungspotenzial des tiptoi-Systems jenseits seiner ursprünglichen Zielgruppe und bieten wichtige Erkenntnisse für den inklusiven Bildungsbereich. Sowohl [Pusc17] als auch [ZiBW18] demonstrieren, dass das System erfolgreich zur Unterstützung unterschiedlicher Lernbedürfnisse eingesetzt werden kann – von mehrsprachigen Lernumgebungen bis hin zur Barrierefreiheit für sehbeeinträchtigte Personen. Besonders bemerkenswert ist die Flexibilität des Systems bei der Bereitstellung gestufter Informationen und die Möglichkeit zur selbstständigen Exploration, was zentrale Anforderungen inklusiver Lernumgebungen erfüllt.

Trotz dieser ermutigenden Befunde offenbaren die Studien auch deutliche Forschungslücken. Beide Untersuchungen konzentrieren sich auf relativ kleine Stichproben und kurze Erprobungszeiträume, wodurch Aussagen zur langfristigen Wirksamkeit und Nachhaltigkeit begrenzt bleiben. Insbesondere fehlen systematische Studien, die das

tiptoi-System spezifisch für sehbeeinträchtigte Lernende im schulischen Kontext evaluieren. Während [ZiBW18] vielversprechende Ansätze für den musealen Bereich aufzeigen, sind direkte Übertragungen dieser Erkenntnisse auf den regulären Unterricht noch nicht empirisch belegt.

Aus technologischer Perspektive stellt das tiptoi-System eine interessante Weiterentwicklung innerhalb der in Abschnitt 2.2.3 analysierten Audio-Stift-Kategorie dar. Während herkömmliche Audio-Stifte wie der Anybook Reader oder PenFriend ausschließlich einfache Audiowiedergabe ermöglichen, bietet tiptoi erweiterte interaktive Funktionen, die an die Quiz- und Navigationsmodi des deutlich teureren Tactonom Readers erinnern. Diese Eigenschaften – mehrstufige Informationsebenen, logische Spielverknüpfungen und interaktive Modi – positionieren tiptoi als kosteneffiziente Alternative, die die dort identifizierte Lücke zwischen funktionsbegrenzten und prohibitiv teuren Systemen adressieren könnte.

Dennoch bleiben zwei kritische Aspekte weitgehend unerforscht:

1. Es fehlt eine systematische wissenschaftliche Evaluation des Tiptoi-Systems im Kontext assistiver Technologien für grafische Inhalte, insbesondere im Vergleich zu etablierten Lösungen wie dem Tactonom Reader oder TPad-System.
2. Es mangelt an praxistauglichen Werkzeugen zur eigenständigen Erstellung Tiptoi-kompatibler Unterrichtsmaterialien durch Lehrkräfte. Während [ZiBW18] das Open-Source-Projekt „tttool“ erwähnen, bleibt unklar, inwieweit solche Lösungen den Anforderungen des Schulalltags entsprechen und welcher Erstellungsaufwand tatsächlich entsteht.

Diese Lücken in Evaluierung und Materialerstellung stellen zentrale Hindernisse für eine breitere Implementierung des Systems im inklusiven Bildungsbereich dar und motivieren die im folgenden Kapitel durchgeführte systematische Anforderungsanalyse zur Entwicklung einer entsprechenden Autorensoftware.

3. Anforderungsanalyse

Die theoretischen Grundlagen haben bereits erste Anforderungen an ein audiotaktilles Autorenwerkzeug aufgezeigt und sowohl die Herausforderungen im inklusiven Unterricht mit sehbeeinträchtigten SuS als auch die Potentiale der Tiptoi-Technologie verdeutlicht. Für die Entwicklung eines praxistauglichen Tools ist jedoch eine systematische Erhebung der konkreten Erwartungen, Arbeitsweisen und technischen Rahmenbedingungen der Lehrkräfte als primäre Zielgruppe unerlässlich.

Die vorliegende Anforderungsanalyse verfolgt daher das Ziel, die in den theoretischen Grundlagen entwickelten ersten Anforderungen durch empirische Erkenntnisse zu ergänzen, zu präzisieren und zu validieren. Hierbei stehen folgende Leitfragen im Mittelpunkt:

- Welche konkreten Herausforderungen erleben Lehrkräfte im inklusiven Unterricht mit sehbeeinträchtigten Schülerinnen und Schülern?
- Welche Materialien und Dateiformate werden in der Praxis bevorzugt eingesetzt?
- Welche technischen Rahmenbedingungen herrschen an den Bildungseinrichtungen vor?
- Welche Funktionalitäten und Features werden von einem Autorenwerkzeug zur Erstellung audiotaktile Materialien erwartet?
- Welcher zeitliche Aufwand für die Materialerstellung wird als akzeptabel erachtet?
- Welche Bedenken oder Hindernisse werden hinsichtlich der Einführung neuer technologischer Lösungen gesehen?

Durch die Beantwortung dieser Fragen soll nicht nur ein umfassendes Verständnis der Nutzerbedürfnisse entwickelt, sondern auch eine fundierte Grundlage für die nutzerorientierte Gestaltung der Autorensoftware geschaffen werden. Die Anforderungsanalyse bildet somit die entscheidende Brücke zwischen den theoretischen

Erkenntnissen und der praktischen Umsetzung eines Tools, das tatsächlich zur Verbesserung des inklusiven Unterrichts beitragen kann.

3.1 Methodisches Vorgehen

Die Anforderungsanalyse wurde in einem zweistufigen Verfahren durchgeführt, um die Bedürfnisse der Zielgruppe systematisch zu erfassen. Zunächst erfolgte eine Online-Umfrage mit 10 Teilnehmenden, die Einblicke in bevorzugte Materialien, Dateiformate und zeitliche Ressourcen lieferte. Im Anschluss wurden mit vier Teilnehmenden vertiefende Experteninterviews geführt, um spezifische Anforderungen und Nutzungskontexte detaillierter zu ergründen.

Die Umfrage wurde per E-Mail verteilt und zeitlich unabhängig von den Interviews durchgeführt. Teilnehmende der Umfrage erhielten die Möglichkeit, einen Termin für ein anschließendes Interviewgespräch zu vereinbaren. Die Auswertung erfolgte durch deskriptive Statistik der Umfrageergebnisse sowie strukturierte Analyse der Interviews, wobei der Fokus auf der Identifikation wiederkehrender Anforderungsmuster und der Priorisierung von Features lag.

3.1.1 Datenerhebung und -analyse

Teilnehmerrekrutierung

Die Rekrutierung der Teilnehmenden erfolgte über zwei verschiedene Wege: Primär wurden Lehrkräfte einer inklusiven Schule direkt angesprochen. Ergänzend wurden sämtliche in der Wikipedia-Liste der Blindenschulen¹ aufgeführten Schulen kontaktiert, mit der Bitte um Weiterleitung der Studieninformationen an interessierte Kolleginnen und Kollegen. Es ist anzumerken, dass die Mehrheit der Teilnehmenden ausschließlich aus der erstgenannten Schule stammt. Dieser Umstand ist bei der Interpretation der Ergebnisse kritisch zu berücksichtigen, da schulspezifische Faktoren wie interne Strukturen, vorhandene Ressourcen und etablierte Unterrichtspraktiken die wahrgenommenen Anforderungen und Bedürfnisse maßgeblich beeinflussen können.

Online-Umfrage

Die Online-Umfrage dient der Erfassung grundlegender Informationen wie dem Erfahrungshintergrund der Lehrkräfte, den verwendeten Dateiformaten und Materialien sowie einer ersten Priorisierung vorgegebener User-Stories. Die Umfrage wurde mit SoSci Survey durchgeführt und ist vollständig im Anhang A.1 dokumentiert. Die Vorab-Befragung gibt den Teilnehmenden die Möglichkeit, sich bereits im Vorfeld mit dem Konzept des Tools vertraut zu machen und erste Überlegungen dazu zu entwickeln. Gleichzeitig können erste Erkenntnisse über die Rahmenbedingungen und priorisierten Funktionen gewonnen werden.

Die Auswertung der Umfragedaten erfolgte durch direkte Übertragung der Ergebnisse in LaTeX-Diagramme. Für die Visualisierung der Priorisierung der User-Stories wurde ein Python-Skript zur Erstellung eines Boxplots verwendet.

¹https://de.wikipedia.org/wiki/Liste_von_Blindenschulen, abgerufen am 24.01.2025

Experteninterviews

Die semistrukturierten Einzelinterviews wurden online via BigBlueButton und OBS Studio durchgeführt und aufgezeichnet. Der Interviewleitfaden gliedert sich in drei Teile: Erfassung der aktuellen Arbeitsweise und technischen Rahmenbedingungen, Präsentation und Diskussion des Autorensoftware-Konzepts sowie eine detaillierte Feedback-Runde zu Verbesserungen und Anwendungsszenarien. Der vollständige Leitfaden ist im Anhang A.2 dokumentiert.

Für die Auswertung wurde die qualitative Inhaltsanalyse nach Mayring gewählt, da sie eine systematische Analyse des Materials ermöglicht [MaFe19]. Konkret wurde die induktive Kategorienbildung angewandt, bei der Kategorien direkt aus dem Material entwickelt werden. Dieses Vorgehen ist für die explorative Anforderungsanalyse besonders geeignet, da es alle relevanten Nutzerperspektiven und unerwartete Anforderungen erfasst.

Die Analyse erfolgte nach dem Ablaufmodell der induktiven Kategorienbildung: Nach der Transkription wurden die Analyseeinheiten festgelegt (Kodiereinheit: einzelne Bedeutungszusammenhänge, Kontexteinheit: vollständige Themenblöcke, Auswertungseinheit: gesamtes Interviewmaterial). Nach der Analyse der ersten beiden Interviews wurden ähnliche Kategorien zusammengefasst und das Abstraktionsniveau angepasst.

Das finale Kategoriensystem umfasst sechs Hauptkategorien:

Tabelle 3.1: Kategoriensystem für die Inhaltsanalyse

Kategorie		Beschreibung
Zu lösende Probleme		Identifikation aktueller Herausforderungen im Unterrichtsalldtag
Unterrichtlicher Wert	Mehrwert	Evaluation des pädagogischen Nutzens
Technische Bedingungen	Rahmenbedingungen	Analyse der vorhandenen technischen Infrastruktur und Kompetenzen
Materialien und Kombination	Tool-Kombination	Erfassung der verwendeten Unterrichtsmaterialien und deren Zusammenspiel mit dem geplanten Tool
Tool-Anforderungen		Sammlung konkreter funktionaler und nicht-funktionaler Anforderungen
Noch zu lösende Probleme		Erfassung möglicher Grenzen und künftiger Entwicklungsbedarfe

Im endgültigen Materialdurchgang wurde das Kategoriensystem auf alle Interviews angewandt. Mehrfachkodierungen wurden zugelassen, um der Komplexität der Aussagen gerecht zu werden. Die induktive Kategorienbildung ermöglicht es, qualitative Daten systematisch zu verdichten und sowohl manifeste als auch latente Inhalte zu berücksichtigen, wodurch neben explizit geäußerten auch implizite Anforderungen erfasst werden können [MaFe19].

3.1.2 Beschreibung der Stichprobe

Zur systematischen Einordnung der Stichprobe wurden relevante demografische Daten erhoben. Diese umfassen die Schulart, die berufliche Position (Lehrkraft oder

anderweitig Mitarbeitende an der Schule), das Alter sowie die unterrichteten Klassenstufen. Eine detaillierte Übersicht dieser Informationen findet sich in Tabelle 3.2. Die begrenzte Stichprobengröße von zehn Teilnehmenden bei der Online-Umfrage und lediglich vier Teilnehmenden bei den vertiefenden Experteninterviews schränkt die Generalisierbarkeit der Ergebnisse erheblich ein. Es handelt sich somit um eine explorative Studie, deren Befunde vorrangig erste Einblicke in die Anforderungen an eine solche Anwendung ermöglichen und als Ausgangspunkt für umfassendere Untersuchungen dienen können.

Bei näherer Betrachtung der demografischen Zusammensetzung zeigt sich, dass sieben der zehn Teilnehmenden an Gymnasien tätig sind, während drei an Sonderpädagogischen Bildungs- und Beratungszentren (SBBZ) arbeiten. Die Altersverteilung gestaltet sich heterogen mit einem Schwerpunkt (40%) in der Altersgruppe 36-45 Jahre. Hinsichtlich der unterrichteten Klassenstufen ergibt sich ein klares Muster: Während alle Teilnehmenden in der Sekundarstufe I unterrichten, sind sieben zusätzlich in der Sekundarstufe II und drei in der Primarstufe tätig. Diese Verteilung ermöglicht eine differenzierte Betrachtung der Anforderungen in verschiedenen Bildungsstufen.

Tabelle 3.2: Übersicht der demografischen Daten (n=10)

ID	Alter	Beruf	Schulart	Unterrichtete Stufen		Interview
P1	46 - 55	Lehrkraft	Gym	Sek1	Sek2	x
P2	56+	Lehrkraft	Gym	Sek1	Sek2	
P3	26 - 35	Lehrkraft	Gym	Sek1	Sek2	x
P4	26 - 35	Mitarbeiter/in	Gym	Sek1	Sek2	
P5	46 - 55	Lehrkraft	Gym	Sek1	Sek2	x
P6	36 - 45	Lehrkraft	SBBZ	Prim	Sek1	
P7	36 - 45	Lehrkraft	Gym	Sek1	Sek2	
P8	36 - 45	Lehrkraft	Gym	Sek1	Sek2	
P9	26 - 35	Lehrkraft	SBBZ	Prim	Sek1	
P10	36 - 45	Lehrkraft	SBBZ	Prim	Sek1	x

Legende: Gym = Gymnasium, SBBZ = Sonderpädagogisches Bildungs- und Beratungszentrum, Prim = Primarstufe, Sek1 = Sekundarstufe 1, Sek2 = Sekundarstufe 2, x = teilgenommen

Für die qualitative Vertiefung durch Experteninterviews stellten sich vier Teilnehmende bereit, die eine gewisse Diversität hinsichtlich der demografischen Merkmale aufweisen: drei Gymnasiallehrkräfte (P1, P3, P5) und eine Lehrkraft eines SBBZ (P10). Diese Auswahl ermöglicht den Vergleich verschiedener schulischer Kontexte und pädagogischer Perspektiven. Die begrenzte Anzahl der Interviews erlaubt zwar keine umfassende Abbildung aller relevanten Sichtweisen, bietet jedoch wertvolle Einblicke in die spezifischen Herausforderungen und Bedürfnisse der Zielgruppe.

3.2 Ergebnisse der Online-Umfrage

Im Rahmen der Online-Umfrage wurde erhoben, welche Arbeitsweise bei den Teilnehmenden vorherrscht. Dabei ging es explizit um die Materialien und Dateiformate, die von den Befragten bevorzugt in ihrer täglichen Arbeit eingesetzt werden. Aber auch der Zeitaufwand, den sie zur Erstellung von Unterrichtsmaterialien aufwenden möchten wurde abgefragt. Weiterhin wurde befragt, wie sie eine Gruppe von User-Stories priorisieren würden in Zusammenhang mit dem Tool.

Diese Daten liefern wichtige Hinweise für die Entwicklung eines Tools, das mit bestehenden Arbeitsabläufen kompatibel sein und diese optimal unterstützen soll. Im Folgenden werden die Ergebnisse der Umfrage kategorisiert nach unterschiedlichen Aspekten vorgestellt.

3.2.1 Materialien und Arbeitsaufwand

Die Auswertung der Befragungsdaten zeigt eindeutige Präferenzen hinsichtlich der im Unterricht verwendeten Materialien (vgl. Abbildung 3.1). Mit neun von zehn Nennungen wird normales Papier (NP) am häufigsten eingesetzt, was dessen zentrale Bedeutung als Basismedium unterstreicht. Mit jeweils acht Nennungen folgen 3D-Modelle und Schwellpapier (SP), während Tiefdruckgrafiken (TD) von sieben Befragten regelmäßig genutzt werden. Lediglich ein Teilnehmer gab die Verwendung sonstiger Materialien an, was in diesem Fall der Angabe von „UV-Druckgrafiken“ entsprach.

Die nahezu universelle Nutzung von normalem Papier verdeutlicht dessen Rolle als flexibles Standardmedium in pädagogischen Kontexten. Besonders bemerkenswert ist jedoch die hohe Relevanz taktiler Medien wie 3D-Modelle und Schwellpapier. Diese Erkenntnis ist für die Toolentwicklung von entscheidender Bedeutung, da eine Kompatibilität mit normalem Papier als auch entsprechenden taktilen Elementen offensichtlich einem konkreten Bedarf entspricht.

Bei den Dateiformaten (vgl. Abbildung 3.2) zeigt sich eine deutliche Dominanz etablierter Dokumentenformate. DOCX-Dateien werden von acht der zehn Teilnehmenden verwendet und stellen somit das meistgenutzte Format dar. PDF-Dateien werden von sieben Befragten eingesetzt und nehmen damit den zweiten Rang ein. Im Vergleich dazu spielen Bildformate eine untergeordnete Rolle, wie in Abb. 3.2 deutlich zu erkennen ist. Die vergleichsweise geringe Nutzung von Bildformaten, insbesondere des für grafische Anwendungen vorteilhaften vektorbasierten SVG-Formats, deutet darauf hin, dass komplexe grafische Inhalte in der aktuellen Praxis der Befragten eine nachgeordnete Rolle einnehmen.

Ein weiterer wichtiger Aspekt der Arbeitsweise ist der Zeitaufwand, den die Teilnehmenden für die Erstellung von Unterrichtsmaterialien investieren möchten. Die Ergebnisse zeigen eine deutliche Präferenz für einen geringen bis mittleren Aufwand.

Wie in Abbildung 3.3 dargestellt, gaben 60% der Befragten (sechs Teilnehmende) an, lediglich 1-2 Stunden für die Materialerstellung aufwenden zu wollen. Weitere 30% (drei Teilnehmende) sind bereit, 3-4 Stunden zu investieren, während nur 10% (ein Teilnehmender) einen höheren Zeitaufwand von 5-6 Stunden in Kauf nehmen würden.

Verwendete Unterrichtsmaterialien (n=10)

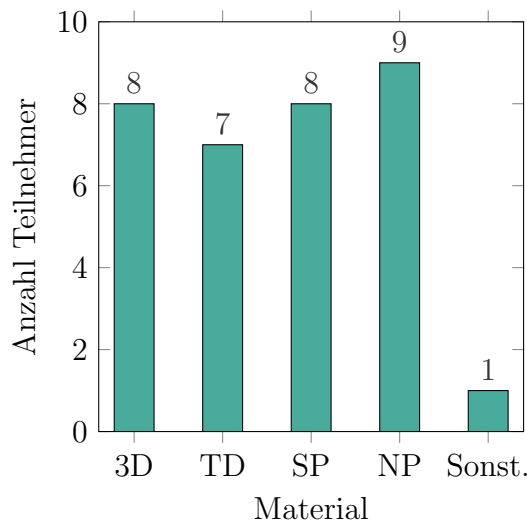


Abbildung 3.1: Häufigkeit der verwendeten Unterrichtsmaterialien

Verwendete Dateiformate (n=10)

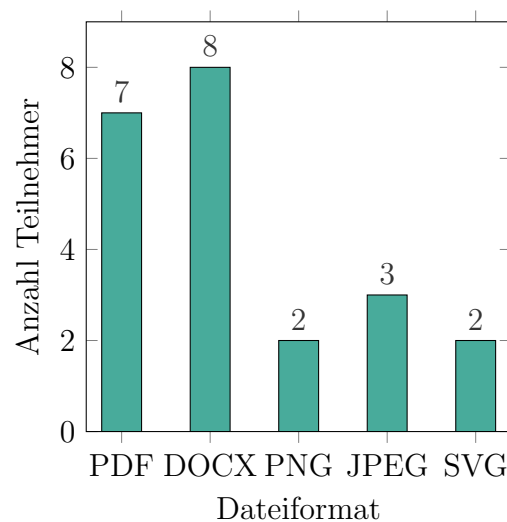


Abbildung 3.2: Häufigkeit der verwendeten Dateiformate

Legende für Abbildung 1: 3D = 3D-Modelle, TD = Tiefdruckgrafiken, SP = Schwellpapier, NP = Normales Papier, Sonst. = Sonstige (UV-Druckgrafiken)

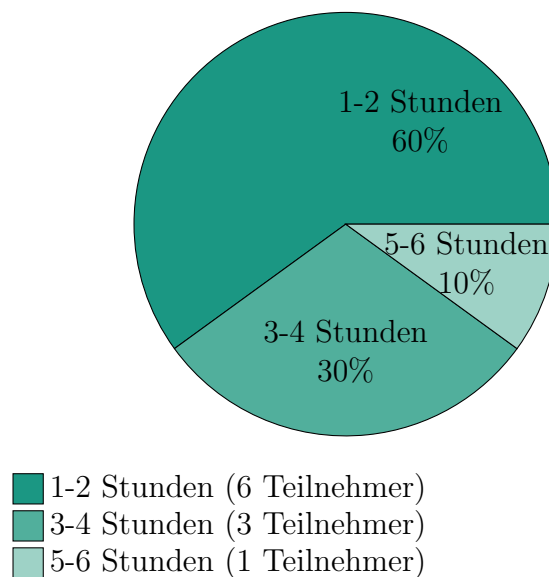


Abbildung 3.3: Zeitaufwand für die Materialerstellung (n=10)

Diese Verteilung unterstreicht die hohe Relevanz einer effizienten, zeitsparenden Lösung für die Erstellung von Unterrichtsmaterialien. Die deutliche Mehrheit der Zielgruppe strebt nach einem Tool, das eine schnelle und unkomplizierte Materialerstellung ermöglicht.

Die Kombination dieser Erkenntnisse – der Bedarf an taktilen Materialien bei gleichzeitig begrenzten zeitlichen Ressourcen – verdeutlicht die Notwendigkeit eines effizienten Tools zur Erstellung hochwertiger taktiler Unterrichtsmaterialien. Das zu entwickelnde Tool muss somit nicht nur die inhaltlichen Anforderungen erfüllen,

sondern auch einen hohen Grad an Benutzerfreundlichkeit und Effizienz aufweisen, um in den Arbeitsalltag der Zielgruppe integriert werden zu können.

3.2.2 Priorisierung der User-Stories

Die Priorisierungsergebnisse der User-Stories (US) (vgl. Abb. 3.4) offenbaren einen ausgeprägten workflow-orientierten Ansatz der Befragten bei der Bewertung des zu entwickelnden Tools. Die Visualisierung zeigt eine klare Hierarchisierung, die grundlegende Ein- und Ausgabefunktionen gegenüber erweiterten Interaktionsfeatures priorisiert.

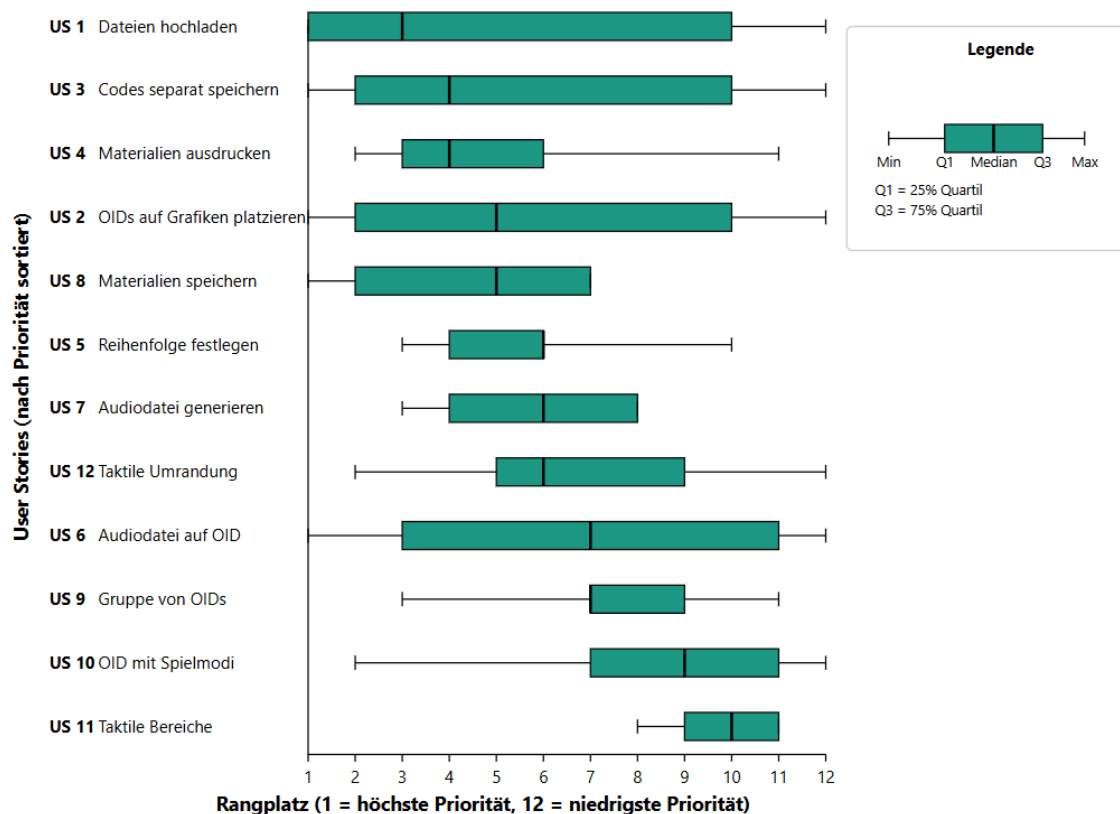


Abbildung 3.4: Priorisierung von User Stories (nach Median sortiert)

Interpretation im Kontext der Unterrichtsmaterialerstellung

Die Priorisierung spiegelt deutlich die praktischen Anforderungen des Lehrmittelerstellungsprozesses wider. Die höchste Bewertung von Grundfunktionen wie „Dateien hochladen“ (US 1), „Codes speichern und drucken“ (US 3) sowie „Materialien ausdrucken“ (US 4) entspricht dem typischen Workflow von Lehrkräften, die bestehende Materialien digitalisieren, anpassen und wieder in physische Form überführen müssen. Diese Präferenz deckt sich mit den theoretischen Erkenntnissen zur Materialerstellung, wonach Effizienz und nahtlose Integration in bestehende Arbeitsabläufe entscheidende Akzeptanzfaktoren darstellen.

Bemerkenswert ist die mittlere Bewertung didaktisch orientierter Features wie „Reihenfolge festlegen“ (US 5) oder „Gruppe von OIDs“ (US 9). Dies deutet darauf hin, dass die Befragten zunächst die technische Funktionsfähigkeit des Tools sicherstellen möchten, bevor erweiterte pädagogische Funktionen relevant werden.

Die niedrige Priorisierung komplexerer Interaktionsmöglichkeiten wie „OID mit Spielmodi“ (US 10) oder „Taktile Bereiche“ (US 11) lässt sich als pragmatische Einschätzung interpretieren: Lehrkräfte bevorzugen zunächst ein stabiles, zuverlässiges Grundtool gegenüber experimentellen Features.

Abgleich mit theoretischen Anforderungen

Im Vergleich zu den aus der Literatur abgeleiteten Anforderungen an die Erstellung von Unterrichtsmaterialien aus Kapitel 2.1.3 zeigt sich eine weitgehende Übereinstimmung. Die Priorisierung von Flexibilität (separate Code-Speicherung), Wiederverwendbarkeit (Material speichern) und Effizienz (direkter Ausdruck) entspricht den identifizierten Kernbedürfnissen von Lehrkräften. Gleichzeitig wird deutlich, dass didaktische Innovation zunächst nachgeordnet wird – ein Befund, der die Notwendigkeit einer behutsamen, nutzerorientierten Einführung neuer Technologien unterstreicht. Die vollständigen User-Stories mit ihren Priorisierungsmetriken sind in Tabelle 3.3 dargestellt, um die Transparenz der Bewertungsgrundlage zu gewährleisten.

Methodenkritische Reflexion

Bei kritischer Betrachtung der Ergebnisse wurden jedoch erst nach Durchführung und Auswertung der Befragung methodische Schwächen in der Formulierung und Strukturierung der User-Stories erkannt, die die Validität der Priorisierung beeinträchtigen könnten.

Die User-Stories weisen erhebliche Unterschiede in ihrer Grundlegendheit auf. Während US 4 (Materialien drucken) und US 6 (Audiodatei auf OID) fundamentale Funktionalitäten für die Tiptoi-Kompatibilität beschreiben, stellen US 10 (Spielmodi) und US 11 (Taktile Bereiche) erweiterte Features dar. Diese Ungleichheit in der Fundamentalität erschwert eine faire Priorisierung, da essentielle Funktionen naturgemäß höher bewertet werden.

Zusätzlich variiert der Konkretisierungsgrad erheblich: Während US 12 sehr spezifisch formuliert ist („Bei der Hinterlegung von OIDs automatisch eine taktile Umrandung erzeugen“), bleibt US 5 vergleichsweise vage („Eine richtige Reihenfolge festlegen können“). Diese Diskrepanz könnte die Interpretation und Bewertung beeinflussen haben.

Problematisch ist auch, dass die Priorisierung technische Abhängigkeiten nicht immer widerspiegelt. US 6 (Audiodatei auf OID hinterlegen) erhielt eine niedrigere Priorität als US 2 (OIDs platzieren), obwohl letztere eine Voraussetzung für erstere darstellt. Dies deutet auf unvollständiges Verständnis der technischen Zusammenhänge hin.

Die teils extreme Streuung der Bewertungen weist auf erhebliche Interpretationsunterschiede hin, was die Notwendigkeit eindeutigerer Formulierungen für zukünftige Studien unterstreicht.

Trotz der methodischen Limitationen liefern die Ergebnisse wertvolle Hinweise für eine nutzerorientierte Entwicklungsstrategie. Die Priorisierung unterstützt einen agilen Entwicklungsansatz, bei dem zunächst die Grundfunktionalitäten implementiert werden, um frühzeitig ein nutzbares Produkt bereitzustellen.

ID	Vollständige User-Story	Median-Rang	Streuung (Min-Max)
US 1	Dateien hochladen können, damit ich existierende Materialien verwenden kann.	3	1-12
US 3	Die Codes separat speichern und drucken können, damit ich sie flexibel verwenden kann.	4	1-12
US 4	Fertige Materialien direkt ausdrucken können, damit ich schneller mit ihnen arbeiten kann.	4	2-11
US 2	OIDs auf meine Grafiken platzieren können, damit ich interaktive Bereiche definieren kann.	5	1-12
US 8	Meine erstellten Materialien speichern können, damit ich sie wieder verwenden kann.	5	1-7
US 5	Eine richtige Reihenfolge festlegen können, um eine Aufgabe stellen zu können.	6	3-10
US 7	Eine Audiodatei mit Text generieren können, damit ich nicht alle selbst aufnehmen muss.	6	3-8
US 12	Bei der Hinterlegung von OIDs automatisch eine taktile Umrandung erzeugen, damit klar ist, wo der Code zu finden ist.	6	2-12
US 6	Eine Audiodatei auf ein OID hinterlegen, damit mehr Text in einem Punkt vermittelt werden kann.	7	1-12
US 9	Eine Gruppe von OIDs festlegen können, um eine Multiple-Choice-Aufgabe stellen zu können.	7	3-11
US 10	Einen OID-Code mit einem Spielmodi hinterlegen können, damit zwischen Spiel und Information gewechselt werden kann.	9	2-12
US 11	Taktile Bereiche hinterlegen können, damit diese nicht vorher festgelegt werden müssen.	10	8-11

Tabelle 3.3: Vollständige User-Stories mit Priorisierungsmetriken

3.2.3 Zusammenfassung

Die Online-Umfrage bestätigt einen klar definierten Bedarf für ein effizientes Tool zur Erstellung taktiler Unterrichtsmaterialien. Drei zentrale Erkenntnisse kristallisieren sich heraus:

- **Materialvielfalt als Anforderung:** Die breite Nutzung verschiedener taktiler Medien neben normalem Papier verdeutlicht, dass das Tool Flexibilität in der Materialkompatibilität bieten muss. Die Dominanz etablierter Dokumentenformate weist zudem auf die Notwendigkeit nahtloser Integration in bestehende Workflows hin.
- **Effizienz als Schlüsselfaktor:** Die deutliche Präferenz für geringen Zeitaufwand bei der Materialerstellung unterstreicht, dass Benutzerfreundlichkeit und schnelle Ergebnisse entscheidende Erfolgsfaktoren darstellen.
- **Pragmatische Funktionspriorisierung:** Die Priorisierung der User-Stories offenbart einen workflow-orientierten Ansatz, bei dem Grundfunktionalitäten vor erweiterten Features stehen. Dies entspricht den theoretischen Erkenntnissen zur Technologieadoption im Bildungsbereich.

Diese Befunde bilden zusammen mit den Experteninterviews die empirische Grundlage für die nachfolgende Anforderungsanalyse und unterstreichen die Relevanz einer nutzerorientierten Entwicklungsstrategie.

3.3 Ergebnisse der Interviews

Die Analyse der Experteninterviews ergab umfangreiche Erkenntnisse zu aktuellen Herausforderungen, konkreten Erwartungen an das Tool sowie Rahmenbedingungen für dessen Implementierung. Die Ergebnisse werden in drei zentralen Bereichen dargestellt: Ist-Zustand, Soll-Zustand und Umsetzungsvoraussetzungen.

3.3.1 Ist-Zustand: Probleme und Arbeitsweisen

Die Untersuchung des aktuellen Zustands im inklusiven Unterricht für sehbehinderte und blinde SuS offenbart verschiedene strukturelle Herausforderungen, die durch technische Rahmenbedingungen und Materialanforderungen geprägt sind.

Zu lösende Probleme

Die Experteninterviews identifizierten mehrere zentrale Herausforderungen, die durch die Entwicklung der Autorensoftware adressiert werden sollen.

Das größte Problem stellt die Orientierung bei taktilen Darstellungen dar: „Wenn man mit einer Legende arbeitet, dann switchen die immer hin und her, dann hat man eine Hand auf der Legende, eine auf der Abbildung und ist sich doch immer nicht sicher“ (P5). Besonders komplex wird dies in bildlastigen Fächern, wie beispielsweise den „kompliziertesten Abbildungen [...] in der Biologie“ (P5).

Diese Orientierungsschwierigkeiten führen zu starker Lehrerabhängigkeit („Und man ist ständig als Lehrer dabei und gibt Rückmeldungen“ (P5)), was negative psychologische Auswirkungen haben kann: „Ich hoffe, dass der Stift mir da was abnehmen kann, sodass der Schüler auch nicht immer das Gefühl hat, er ist dümmer als die Sehenden“ (P5).

Zusätzlich stoßen herkömmliche taktile Materialien bei dynamischen Inhalten an ihre Grenzen: „Das Blöde [...] ist, dass sie eben halt [...] statisch sind und man deshalb für dynamische Vorgänge [...] entweder mehrere Abbildungen braucht“ (P1). Der hohe Platzbedarf von Punktschrift verschärft diese Problematik weiter („Punktschrift ist nun mal auch sehr groß [...] und das bedeutet, wenn wir etwas beschreiben wollen, dann brauchen wir immer sehr viel Platz“ (P1)).

Moderne spielbasierte Lernkonzepte bleiben größtenteils unzugänglich, da sie „immer auf irgendwelchen Bildchen“ (P5) basieren. Bestehende technische Lösungen wie der Taktonom-Reader erweisen sich als unpraktisch („da habe ich ein Riesengerät, was ich immer mit mir rumschleppen muss“ (P1)), während die Organisation audiofähiger Stifte zusätzlichen Verwaltungsaufwand verursacht.

Technische Rahmenbedingungen

Die technischen Rahmenbedingungen an den Bildungseinrichtungen zeigen eine heterogene Ausstattungslandschaft, die entscheidend für die Anforderungen an die Autorensoftware ist.

Die Interviews verdeutlichen eine umfangreiche Ausstattung mit spezialisierten Geräten zur Herstellung taktiler Materialien. Dazu gehören die Schwellkopie-Technologie („Wir haben einen Fuser, wo man eben so Dinge erhaben machen kann“ (P10)),

Prägedrucker, Tiefziehmaschinen, 3D-Drucker sowie Präzisionsgeräte wie Lasercutter und UV-Direktdrucker (P1). Besonders hervorzuheben sind Kombidrucker, die „Schwarzschrift und Punktschrift in einem Gang drucken“ (P1) können.

Die persönliche Ausstattung der Lehrkräfte variiert erheblich. Während einige über Schul-PCs mit Spezialsoftware verfügen, arbeiten andere hauptsächlich mit privaten Geräten. Bei der Softwarenutzung dominieren Standardprogramme wie Word, da diese „am einfachsten barrierefrei für Punktschrift, Schwarzschrift [...] sich umsetzen lässt“ (P5).

Entscheidend für die Verfügbarkeit technischer Möglichkeiten ist die Anbindung an spezialisierte Medienzentren, die sowohl Equipment als auch Expertise bereitstellen. Die technischen Kompetenzen der Lehrkräfte unterscheiden sich stark: Während einige Schwellkopien selbstständig erstellen, delegieren andere komplexere Aufgaben wie 3D-Druck an Kolleginnen und Kollegen, die dafür extra angestellt sind.

Diese Analyse zeigt, dass die Autorensoftware sowohl für technisch versierte Nutzer mit umfangreicher Ausstattung als auch für Lehrkräfte mit begrenzten Möglichkeiten konzipiert werden muss. Besonders wichtig ist die Integration in bestehende Workflows mit Standardsoftware und Medienzentren sowie die Kompatibilität mit den unterschiedlichen Geräten.

Materialien und Tool-Kombinationen

Die Materialvielfalt im inklusiven Unterricht erfordert eine durchdachte Integrationsstrategie für die Autorensoftware.

Textbasierte Materialien dominieren den Unterrichtsaltag („zu 90 Prozent sind es Word-Dateien mit reinem Text“ (P3)) und werden über E-Book-Standards oder direkt in Punktschrift bereitgestellt.

Drei Haupttypen taktiler Materialien wurden identifiziert: Schwellkopien (selbst erstellbar, aber mit taktilen Einschränkungen), Tiefziehgrafiken (langlebiger, aber mit längerer Produktionszeit) und alternative taktile Markierungen wie Window-Color-Stifte, die „eine richtig feste Linie, fast als wäre da eine Schnur geklebt“ (P10) erzeugen. Ergänzend kommen dreidimensionale Materialien aus dem 3D-Drucker zum Einsatz.

Daraus ergeben sich zentrale Anforderungen an die Autorensoftware: Kompatibilität mit verschiedenen Materialtypen, Integration in Schwellkopien (OID-Codes müssen den Produktionsprozess überstehen), Anpassungsfähigkeit an externe Produktionsprozesse und die Möglichkeit zur nachträglichen Ergänzung bestehender Materialien. Die Software muss sich nahtlos in bewährte Arbeitsabläufe einfügen, da die Erstellung inklusiver Unterrichtsmaterialien bereits einen erheblichen Zeitaufwand darstellt.

3.3.2 Soll-Zustand: Erwartungen an das Tool

Die Analyse der Experteninterviews zeigt konkrete Erwartungen an die geplante Autorensoftware auf, die sich in zwei wesentliche Bereiche gliedern: den didaktischen Mehrwert für den Unterricht und spezifische technische Anforderungen an die Implementierung.

Gewinn für den Unterricht

Die identifizierten Vorteile der geplanten Autorensoftware erstrecken sich über verschiedene Dimensionen des inklusiven Unterrichts und zeigen das Potenzial für eine grundlegende Verbesserung der Lernbedingungen.

Der zentrale Mehrwert liegt in der Förderung autonomen Arbeitens: „Ich erhoffe mir davon, dass die Schüler selbstständiger mit taktilen Abbildungen arbeiten können“ (P5). Diese Selbstständigkeit reduziert die Lehrerabhängigkeit erheblich („Eine gute Möglichkeit ist, besonders auch in mehr selbstständiges Arbeiten reinzukommen und nicht, wenn die Lehrkraft ständig daneben steht“ (P3)) und ermöglicht differenzierten Unterricht in heterogenen Lerngruppen.

Durch die Reduzierung des direkten Betreuungsaufwands können Lehrkräfte ihre Aufmerksamkeit gezielter einsetzen, ohne „die ganze Zeit dabei stehen“ (P3) zu müssen. Dies schafft Raum für individuellere Förderung und ermöglicht eine effizientere Unterrichtsgestaltung.

Das Tool eröffnet neue didaktische Möglichkeiten durch seinen spielerischen Charakter („macht einfach vielleicht auch Spaß, mit so einem Gerät zu arbeiten“ (P5)) und ermöglicht innovative Übungsformate. Besonders wertvoll ist die Unterstützung interaktiven Lernens, bei dem Schülerinnen und Schüler „die Inhalte [...] in einem interaktiven Prozess“ (P1) erlernen können.

Die Software kann komplexe Inhalte durch zusätzliche Informationsebenen zugänglicher machen, wodurch beispielsweise bei biologischen Abbildungen „natürlich klarer [wird], wo ist was“ (P3). Dies ist besonders in bildlastigen Fächern wie den Naturwissenschaften von Bedeutung.

Ein besonderer Mehrwert liegt in der Unterstützung des gemeinsamen Lernens: „Wenn meine sehenden Schülerinnen und Schüler auch mit dem Tiptoi-Stift genauso arbeiten können wie die Blinden, dann habe ich ein wirklich inklusives Setting“ (P1). Dies ermöglicht die gemeinsame Arbeit an identischen Materialien und reduziert Benachteiligungen.

Der fächerübergreifende Nutzen erstreckt sich von den Naturwissenschaften („die auch mit Abstand am meisten mit Abbildungen arbeiten“ (P1)) über Gesellschaftswissenschaften mit Kartenarbeit bis hin zu Sprachen, wo Ausspracheprobleme gelöst werden können, und Sport, wo Bewegungsabläufe beschrieben werden können.

Anforderungen an das Tool

Die technischen Anforderungen an die Autorensoftware basieren auf den praktischen Bedürfnissen der Lehrkräfte und wurden nach Häufigkeit und Relevanz der Erwähnungen priorisiert.

Die browserbasierte Umsetzung ohne lokale Installation stellt die wichtigste Anforderung dar: „ich kann auf die Webseite gehen und meine Materialien, die ich habe [...] da abändern“ (P3). Dies steht im Kontrast zu bestehenden Lösungen, die als „bisschen schrecklich kompliziert“ (P1) empfunden werden.

Entscheidend ist die Integration bestehender Materialien, wodurch Lehrkräfte „nicht wieder von Grund auf von Null zu Beginn“ (P3) arbeiten müssen. Die Flexibilität

bei der Materialverwendung wird besonders geschätzt: sowohl das Online-Hochladen als auch das nachträgliche Aufkleben von OID-Codes auf Modelle soll möglich sein.

Bei der OID-Code-Gestaltung wurden zwei grundlegende Ansätze identifiziert: die Integration in bestehende Strukturen („den Code in der Struktur hinterlegt“ (P5)) versus separate Markierungen („einen ganz kleinen Bereich [...] wo ich mit dem Stift draufgehen kann“ (P1)). Die Wahl sollte kontextabhängig erfolgen, da „es ganz schwer ist zu sagen, das funktioniert für alles“ (P5).

Für separate Markierungen ist die Formgebung zur Funktionssignalisierung wichtig: „die Form des Codes schon Informationen darüber gibt, was in dem Code drinstecken könnte“ (P1). Dabei muss die taktile Erkennbarkeit gewährleistet bleiben („Je schwieriger das zu ertasten ist, desto schwieriger ist es ja dann auch zu wissen, was habe ich jetzt gerade für eine Form vor mir liegen“ (P1)).

Die automatische Text-zu-Sprache-Umwandlung wird als zeitsparende Alternative zur manuellen Audioaufnahme geschätzt, da letztere „ein bisschen umständlich“ (P10) ist und zusätzliche Ressourcen erfordert.

Eine zentrale Funktionalität stellt die mehrstufige Informationsabfrage dar: „mit diesen einmal, zweimal, dreimal drauf tippen, da wird mir jeweils was anderes gesagt“ (P1). Dies ermöglicht eine hierarchische Informationsstruktur und differenzierte Lernprozesse.

Die Integration von Spielfunktionen wird als wertvolle Erweiterung betrachtet, die „unglaublich tolle Möglichkeiten“ (P1) für interaktives Lernen eröffnet und neue Übungselemente im Unterricht ermöglicht.

Für sehbehinderte Schülerinnen und Schüler ist die Farbumterstützung essentiell: „spielen bei uns [...] Farben eine sehr große Rolle, weil wir da mit entsprechenden Kontrasten arbeiten“ (P1). Dabei müssen die OID-Codes selbst nicht farbig sein, solange das umgebende Material Farbkontraste bietet.

Die taktile Differenzierung zwischen Abbildungselementen und Codes kann durch unterschiedliche Linienarten erreicht werden: „die durchgezogenen Linien sind die, die zur Abbildung gehören und der gepunktete Kreis [...] gehört dann zu den Codes“ (P1).

Zusätzliche wünschenswerte Funktionen umfassen Audio-Upload-Optionen für präzise Sprachausgabe in Fremdsprachen und die Kompatibilität mit bestehenden Punkt-schrift-Materialien, um diese nachträglich mit OID-Codes ergänzen zu können.

Noch zu lösende Probleme

Die identifizierten Herausforderungen gliedern sich in mehrere Kernbereiche, die bei der Entwicklung und Implementierung berücksichtigt werden müssen.

Der erforderliche Zeitaufwand für die Einarbeitung stellt eine zentrale Hürde dar: „eine Hürde ist bestimmt auf alle Fälle erstmal, dass ich mich damit nicht auskenne, und ich muss mich erstmal damit auseinandersetzen“ (P5). Diese Einarbeitungszeit wird durch den Zeitdruck im schulischen Alltag verschärft, da „man [...] nicht wirklich so viel Zeit [hat], um wirklich Innovatives zu entwickeln“ (P5).

Die Akzeptanz neuer Technologien variiert stark im Kollegium. Während einige Lehrkräfte aufgeschlossen sind („oh nee, finde ich total cool, würde ich total gerne mal ausprobieren“ (P5)), zeigen andere Zurückhaltung („ja wieso, das haben wir ja noch nie gebraucht“ (P5)). Die realistische Einschätzung zeigt, dass nur „die Hälfte des Kollegiums [...] sich da aktiv mit einbringen“ (P1) würde.

Rechtliche Herausforderungen entstehen durch Urheberrechtsfragen bei der Nutzung proprietärer Technologien. An öffentlichen Einrichtungen müssen offizielle Genehmigungen eingeholt werden: „da muss ich eben halt in Kontakt kommen mit der Firma und mir das okay holen, dass ich das nutzen darf“ (P1).

Die Einführung bei Lernenden erfordert zusätzliche Unterrichtszeit, da „viele unserer Schülerinnen und Schüler [...] TipToi nicht [kennen]“ (P1) und „mindestens mal [...] eine Stunde“ (P1) für die Einarbeitung benötigt wird. Jedoch rechtfertigen die langfristigen Vorteile diesen Aufwand, da das einmal erlernte System fächerübergreifend nutzbar ist.

Die Materialvorbereitung ist zeitintensiv („Da muss ich mich mal eine Stunde hinsetzen über so eine Abbildung, vielleicht auch mal zwei“ (P1)), aber durch die jahrelange Wiederverwendbarkeit gerechtfertigt.

Technische Einschränkungen betreffen insbesondere die Farbauswahl, da „nicht mehr jede Farbe ausgewählt werden kann“ (P5). Dies muss mit den Anforderungen für hohe Kontraste in der Sehbehindertenarbeit abgewogen werden.

Praktische Herausforderungen im Unterricht umfassen akustische Probleme („Wenn man halt so im Klassenraum mehrere von den Stiften hat, braucht man dringend [...] Kopfhörer“ (P5)) und die Verfügbarkeit ausreichender Gerätezahlen.

Die potenzielle Ablehnung durch ältere Lernende, die das System als „Babyspielzeug“ (P5) empfinden könnten, erfordert eine didaktisch durchdachte Präsentation als „neue Methode“ (P3) für komplexe Aufgaben.

Die taktile Unterscheidung zwischen Abbildungselementen und OID-Codes kann problematisch werden („Würde das dann ablenken von der eigentlichen Grafik?“ (P3)). Als Lösungsansatz werden unterschiedliche Linienarten vorgeschlagen: „die QR-Codes (OIDs) umrandet man mit einer gestrichelten, gepunkteten [...] [Linie], sodass in der Haptik nochmal ein Unterschied ist“ (P3).

Zur erfolgreichen Implementation werden konkrete Maßnahmen vorgeschlagen: Schritt-für-Schritt-Anleitungen für die praktische Nutzung, die Einbindung der Medienzentren als Serviceabteilungen („wir setzen das um“ (P1)), systematische Schulungen von Kollegium und Schülerschaft sowie Präsentationen in Gesamtkonferenzen.

Die Analyse zeigt, dass eine erfolgreiche Implementierung der Autorensoftware neben einem gut gestalteten technischen Tool auch durchdachte Begleitmaßnahmen erfordert, die organisatorische, didaktische und zeitliche Faktoren gezielt adressieren.

3.3.3 Zusammenfassung

Die Experteninterviews identifizierten drei zentrale Themenbereiche für die Toolentwicklung:

- **Aktuelle Herausforderungen:** Orientierungsschwierigkeiten bei taktilen Darstellungen, hohe Lehrerabhängigkeit und Limitierungen statischer Materialien prägen den Unterrichtsalltag. Die technische Ausstattung variiert stark zwischen den Einrichtungen.
- **Erwarteter Mehrwert:** Förderung autonomen Arbeitens, Entlastung der Lehrkräfte und Ermöglichung inklusiver Lernszenarien mit gemeinsamen Materialien stehen im Fokus. Browserbasierte Umsetzung und flexible OID-Code-Gestaltung werden als Kernfunktionen gefordert.
- **Implementierungsbarrieren:** Einarbeitungszeit, unterschiedliche Technikaffinität im Kollegium und rechtliche Hürden erfordern systematische Begleitmaßnahmen für eine erfolgreiche Einführung.

Diese Befunde bilden zusammen mit den Umfrageergebnissen die empirische Grundlage für die nachfolgende Anforderungsanalyse.

3.4 Schlussfolgerungen

Die durchgeführte Anforderungsanalyse, bestehend aus Online-Umfragen und Experteninterviews, liefert ein umfassendes Bild der Bedürfnisse und Anforderungen an eine Webanwendung zur Erstellung audiotaktile Unterrichtsmaterialien. Im Folgenden werden die theoretischen Einordnungen der Befunde präsentiert und zentrale Erkenntnisse für die Toolentwicklung abgeleitet.

3.4.1 Zentrale Erkenntnisse

Aus den Ergebnissen der Online-Umfrage (vgl. Abschnitt 3.3.1) und der Experteninterviews (vgl. Abschnitt 3.3.2) lassen sich folgende übergreifende Erkenntnisse ableiten:

Aktuelle Herausforderungen im Unterricht mit Sehbeeinträchtigten

Die Interviews identifizierten verschiedene Probleme, die durch eine entsprechende Webanwendung adressiert werden sollten. Besonders relevant sind dabei die Orientierungsschwierigkeiten bei komplexen taktilen Darstellungen, der hohe Betreuungsaufwand und die daraus resultierende eingeschränkte Selbstständigkeit der Lernenden, sowie die Limitierungen konventioneller taktiler Materialien bei der Darstellung dynamischer Inhalte. Diese Befunde bestätigen die in der Literatur dokumentierte „kraftraubende Irrfahrt“ bei der Materialadaption [LaTh17] und unterstreichen das von [Walt22] betonte Selbstständigkeitsprinzip in der Sehbehindertenpädagogik. Zudem wurde die mangelnde Zugänglichkeit zu spielerischen Lernmethoden für sehbeeinträchtigte SuS hervorgehoben, was die Notwendigkeit multimodaler Zugänglichkeit entsprechend den UDL-Prinzipien verdeutlicht.

Pädagogischer Mehrwert

Der potenzielle pädagogische Mehrwert der zu entwickelnden Webanwendung zeigt sich in mehreren Dimensionen: Förderung der Selbstständigkeit der Lernenden, Entlastung der Lehrkräfte, Erhöhung der Lernmotivation durch interaktive Elemente, Erweiterung der didaktischen Möglichkeiten sowie verbesserte Zugänglichkeit komplexer Inhalte. Diese Aspekte entsprechen zentral den UDL-Prinzipien der „multiplen Mittel der Repräsentation von Informationen“ und „multiplen Möglichkeiten der Förderung von Lernengagement und Lernmotivation“ [uni18]. Besonders bedeutsam ist auch der Beitrag zu einem wirklich inklusiven Unterricht, bei dem sehende und nicht-sehende SuS mit denselben Materialien arbeiten können – ein Kernaspekt des weiten Inklusionsbegriffs.

Materialien und Dateiformate

Die empirischen Befunde zeigen eine klare Präferenz für etablierte Arbeitsabläufe: Papier als Basismedium kombiniert mit bewährten Dokumentenformaten (DOCX/PDF). Diese Materialvielfalt entspricht den theoretischen Anforderungen an inklusive Unterrichtsmaterialien nach multimodaler Zugänglichkeit und systemübergreifender Kompatibilität, wie in Kapitel 2.1.3 „Anforderungen an inklusive Unterrichtsmaterialien“ beschrieben. Die nachgeordnete Rolle von Bildformaten unterstreicht die Bedeutung nahtloser Integration in bestehende Workflows.

Zeitlicher Rahmen

Die strikte Zeitbegrenzung (90% der Befragten wollen maximal 1-4 Stunden investieren) deckt sich mit dem allgemeinen Arbeitsalltag von Lehrpersonen, die in der Regel unter erheblichem Zeitdruck stehen und verschiedene Aufgaben parallel bewältigen müssen [MuHa24]. Diese Befunde korrespondieren direkt mit der theoretischen Forderung nach Ressourceneffizienz und Skalierbarkeit inklusiver Unterrichtsmaterialien aus Kapitel 2.1.3.

Technische Rahmenbedingungen

Die Analyse der technischen Rahmenbedingungen aus den Interviews offenbart eine heterogene Ausstattungslandschaft mit unterschiedlichen Kompetenz- und Ressourcenniveaus an den Bildungseinrichtungen. Dies unterstreicht die Notwendigkeit einer browserbasierten Anwendung ohne Installationsaufwand, die sowohl für technisch versierte Nutzer als auch für weniger erfahrene Lehrkräfte zugänglich ist. Diese Anforderung entspricht der identifizierten Notwendigkeit systemübergreifender Kompatibilität und Expertise-Integration, um vorhandenes Fachwissen spezialisierter Einrichtungen nutzbar zu machen und über Netzwerkstrukturen weiterzugeben (vgl. Kapitel 2.1.3).

3.4.2 Konkrete Anforderungen an die Webanwendung

Basierend auf den gesammelten Erkenntnissen lassen sich folgende konkrete Anforderungen für die zu entwickelnde Webanwendung definieren:

Funktionale Anforderungen (F-ANF)

1. **Unterstützung gängiger Dokumentformate:** Die Webanwendung muss primär DOCX- und PDF-Dateien verarbeiten können, um eine nahtlose Integration in bestehende Arbeitsabläufe zu gewährleisten.
2. **Upload-Funktionalität für bestehende Materialien:** Lehrkräfte müssen vorhandene Unterrichtsmaterialien hochladen und mit OID-Codes ergänzen können, ohne sie komplett neu erstellen zu müssen.
3. **Flexible OID-Code-Gestaltung:** Die Software muss sowohl die Integration von Codes in bestehende Strukturen als auch separate Markierungen mit unterschiedlichen Formgebungen ermöglichen, um verschiedene didaktische Ansätze zu unterstützen.
4. **Mehrschichtige Audioinformationen:** Durch mehrmaliges Tippen auf denselben OID-Code sollen verschiedene Informationsebenen abrufbar sein, um komplexe Inhalte stufenweise zu erschließen.
5. **Text-to-Speech-Funktionalität:** Die automatische Umwandlung von Text in Sprache soll den Erstellungsprozess vereinfachen und den manuellen Aufwand reduzieren.
6. **Speicher- und Druckfunktionen:** Die erstellten Materialien müssen sowohl digital gespeichert als auch in druckfähigen Formaten exportiert werden können.

7. **Interaktive Lernfunktionen:** Die Software soll spielerische Elemente und Übungsformate integrieren, die das selbstständige Lernen und die Festigung von Inhalten unterstützen.
8. **Optimierte visuelle Gestaltung:** Für sehbehinderte Nutzer müssen angemessene Farben und Kontraste einstellbar sein, um die visuelle Wahrnehmbarkeit zu verbessern.
9. **Taktile Differenzierung:** OID-Codes müssen sich durch spezifische Gestaltungsmerkmale (z.B. gestrichelte Umrandungen) von anderen taktilen Elementen unterscheiden lassen.
10. **Audio-Upload-Option:** Neben der Text-to-Speech-Funktion sollte auch das Hochladen eigener Audiodateien möglich sein, insbesondere für authentische Aussprachebeispiele im Sprachunterricht.

Nicht-funktionale Anforderungen (NF-ANF)

1. **Browserbasierte Umsetzung:** Die Anwendung soll webbasiert und ohne lokale Installation nutzbar sein, um technische Barrieren zu minimieren.
2. **Intuitive Bedienbarkeit:** Die Benutzeroberfläche muss auch für technisch weniger versierte Lehrkräfte leicht verständlich sein und einen effizienten Workflow ermöglichen.
3. **Effizienzorientierung:** Angesichts des begrenzten Zeitbudgets der Zielgruppe muss die Webanwendung intuitive Bedienung, Automatisierungsfunktionen und optimierte Workflows bieten, die eine schnelle Materialerstellung ermöglichen.
4. **Kompatibilität mit gängiger Software:** Die nahtlose Integration in bestehende Workflows mit Standardsoftware wie Word ist entscheidend für die praktische Anwendbarkeit.
5. **Unterstützung verschiedener Produktionsprozesse:** Die Software muss mit verschiedenen Herstellungstechniken für taktile Materialien kompatibel sein, von selbst erstellten Schwellkopien bis hin zu extern produzierten Tiefziehgrafiken.
6. **Flexibilität und Anpassbarkeit:** Die Webanwendung sollte verschiedene Optionen für unterschiedliche Anwendungsfälle, Fachgebiete und Zielgruppen bieten, da es kein universelles „Schema F“ gibt, das für alle Szenarien gleichermaßen geeignet wäre.

Die aus der Anforderungsanalyse abgeleiteten funktionalen und nicht-funktionalen Anforderungen bildeten die Grundlage für die systematische Konzeption und prototypische Entwicklung einer Webanwendung zur Erstellung audiotaktilel Unterrichtsmaterialien. Der im Folgenden beschriebene Entwicklungsprozess orientierte sich dabei konsequent an den identifizierten Nutzerbedürfnissen und technischen Rahmenbedingungen.

4. Konzeption und Entwicklung

Basierend auf den identifizierten Anforderungen wurde ein umfassendes Konzept für eine webbasierte Anwendung zur Erstellung audiotaktile Unterrichtsmaterialien entwickelt. Das resultierende sogenannte EduTTTool¹ orientiert sich dabei sowohl an den funktionalen Spezifikationen aus der Anforderungsanalyse als auch an den nicht-funktionalen Rahmenbedingungen bezüglich Benutzerfreundlichkeit und technischer Zugänglichkeit.

In diesem Kapitel werden zunächst die aus den Anforderungen abgeleiteten konzeptionellen Grundlagen des EduTTTools dargestellt, anschließend die technische Umsetzung durch Systemarchitektur und Benutzeroberfläche beschrieben.

4.1 Konzeptionelle Grundlagen

Das EduTTTool präsentiert sich als intuitive Webanwendung, die ohne Installation über einen Browser zugänglich ist und damit die Anforderung nach browserbasierter Umsetzung (NF-ANF1) erfüllt. Die Benutzeroberfläche gliedert sich in mehrere funktionale Bereiche: Die **About**-Seite mit grundlegenden Erklärungen zum Tool und Anleitungen zur Nutzung nach dem Download; der **OID-Generator** als Hauptarbeitsbereich zur Erstellung und Bearbeitung interaktiver Materialien; sowie der **GME-Generator** als Werkzeug zur Erstellung der für den Tiptoi-Stift notwendigen Audiodateien und Logikstrukturen. Diese übersichtliche Strukturierung der Benutzeroberfläche folgt dem typischen Arbeitsablauf bei der Erstellung interaktiver Materialien und führt den Benutzer schrittweise durch den Prozess, wodurch ein Teil der Anforderung nach intuitiver Bedienbarkeit (NF-ANF2) umgesetzt wird.

4.1.1 Der OID-Generator

Der OID-Generator bildet das Kernstück des EduTTTools und ermöglicht die visuelle Erstellung interaktiver Elemente auf Unterrichtsmaterialien. Der Arbeitsablauf gliedert sich in mehrere aufeinander aufbauende Schritte.

¹<https://eduttttool.access.kit.edu/> (Zuletzt aufgerufen am 20.06.2025)

Einrichtung des Basisdokuments

Zu Beginn kann der Benutzer entweder ein neues Projekt starten oder ein bereits erstelltes Produkt laden. Der Nutzer kann ein bestehendes Arbeitsblatt als Bilddatei oder PDF hochladen, wodurch die Anforderung nach Unterstützung gängiger Dokumentformate sowie dem Upload bereits erstellter Materialien (F-ANF1 und F-ANF2) erfüllt wird. Das hochgeladene Material wird automatisch auf das A4-Format ausgerichtet, um eine korrekte Druckausgabe zu gewährleisten und damit die Speicher- und Druckfunktionen (F-ANF6) zu unterstützen. Jedes Arbeitsblatt wird dabei als eigenständiges Produkt definiert.

OID-Erstellung und Bearbeitung

Nach der Grundkonfiguration können beliebig viele interaktive Elemente erstellt und bearbeitet werden. Der Erstellungsprozess beginnt mit der Definition des ersten Interaktionstextes, der beim initialen Antippen der OID abgespielt wird. Anschließend kann über dasselbe Textfeld eine neue OID generiert werden, die zunächst einheitlich in der linken oberen Ecke der Bildvorschau erscheint, um eine konsistente visuelle Darstellung zu gewährleisten.

Die erstellten OIDs können mittels intuitiver Drag-and-Drop-Funktionalität an beliebige Positionen des Arbeitsblatts verschoben werden. Dabei lassen sich Form und Größe jeder OID individuell an die spezifischen Anforderungen anpassen, wodurch die geforderte flexible OID-Code-Gestaltung (F-ANF3) realisiert wird. Für jede OID können bis zu vier aufeinander aufbauende Interaktionstexte definiert werden: ein Primärtext für das erste Antippen sowie bis zu drei weitere Audiotexte, die bei wiederholtem Antippen derselben OID sequenziell aktiviert werden. Diese mehrschichtige Audiostruktur setzt die Anforderung nach gestuften Audioinformationen (F-ANF4) direkt um und ermöglicht eine schrittweise Erschließung komplexer Lerninhalte.

Eine integrierte Vorschaufunktion erlaubt die kontinuierliche Visualisierung des Arbeitsstandes und erleichtert die präzise Positionierung der interaktiven Elemente auf dem Arbeitsblatt.

Spielmodus-Integration

Eine zentrale Funktionalität des EduTTtools ist die Integration interaktiver Übungsmodi, wodurch die Anforderung nach spielerischen Lernfunktionen (F-ANF7) erfüllt wird. Nach der Erstellung aller erforderlichen OIDs können zwei verschiedene Spielmodi implementiert werden: das Multiple-Choice-Spiel für Identifikationsaufgaben und das Sequence-Spiel für Reihenfolgenübungen.

Die Konfiguration erfolgt durch die Definition spezifischer Anweisungs- und Feedbacktexte sowie die Festlegung der korrekten Antwort-OIDs für die jeweiligen Fragestellungen. Im Multiple-Choice-Modus müssen Schülerinnen und Schüler bestimmte Elemente identifizieren und antippen, während im Sequence-Modus eine vorgegebene Reihenfolge durch sequenzielles Antippen der entsprechenden OIDs abgearbeitet werden muss.

Nach der Spielmodus-Konfiguration wird automatisch eine Mode-OID generiert, die als Umschalter zwischen dem Standard-Wissensmodus und dem jeweiligen Spielmodus fungiert. Diese Funktionalität ermöglicht es, ein Arbeitsblatt sowohl zur Wissensvermittlung als auch zur interaktiven Überprüfung und Festigung der Lerninhalte zu nutzen. Dabei ist immer ein Spiel pro Arbeitsblatt bzw. Produkt möglich.

Download und Export

Nach Abschluss des Bearbeitungsprozesses bietet der OID-Generator vielfältige Download- und Exportoptionen, die verschiedene Produktionsworkflows und Anwendungsszenarien unterstützen. Diese Flexibilität entspricht der Anforderung nach Unterstützung verschiedener Produktionsprozesse (NF-ANF5).

Download Formate

Format auswählen

- ☒  Gesamte Grafik (PNG)
- ☐  Gesamte Grafik (PDF)
- ☐  2-in-1 PDF (Prägung + Bild)
- ☐  Nur Prägemaske (PDF)
- ☐  Nur OID-Bilder (PNGs in ZIP)

Bildformat (PNG):

Die OIDs werden als hochauflösendes PNG-Bild heruntergeladen.

Bitte wählen Sie ein Format und klicken Sie dann auf die Schaltfläche "Herunterladen" unten.

Datei herunterladen

Abbildung 4.1: Screenshot der Download-Formate

Wie in Abbildung 4.1 dargestellt, stehen für die Materialausgabe vier spezialisierte Exportformate zur Verfügung:

1. **PNG-Dateien** zur weiteren Bearbeitung in Grafikprogrammen wie LibreOffice Draw
2. **PDF-Dateien** für den direkten Ausdruck der fertigen Materialien
3. **Prägedateien** für automatisierte Prägedrucker, verfügbar sowohl als kombinierte 2-in-1-Datei als auch als separate Prägemaske mit automatisch generierten OID-Umrandungen
4. **Einzelne OID-Codes** zum Aufkleben auf 3D-Objekte oder extern produzierte taktile Grafiken wie Tiefziehformen

Zusätzlich ermöglicht der JSON-Export die vollständige Sicherung aller Projektdaten, einschließlich OID-Konfigurationen, Positionierungen, Interaktionstexten, Hintergrundbildern und Spielmodus-Einstellungen. Diese Funktion unterstützt sowohl die Zwischenspeicherung von Arbeitsprojekten als auch die kollaborative Weiterbearbeitung durch andere Lehrkräfte, wodurch die Anforderung nach Speicher- und Druckfunktionen (F-ANF6) sowie die gewünschten Kollaborationsmöglichkeiten realisiert werden.

4.1.2 Der GME-Generator

Nach der visuellen Gestaltung des interaktiven Arbeitsblatts ermöglicht der GME-Generator die Erstellung der für den Tiptoi-Stift notwendigen Audiodateien und Logikstrukturen. Dieser Prozess gliedert sich in drei Hauptschritte:

1. **YAML-Datei-Erstellung:** Als erster Schritt wird eine YAML-Datei generiert, die als Zwischendatei fungiert und die programmtechnische Logik in einem strukturierten Format enthält. Diese Datei definiert die Zuordnung von OIDs zu entsprechenden Audiodateien, die Reaktionslogik bei mehrfachem Antippen derselben OID sowie die Spielmodusregeln und Auswertungslogik. Die Datei wird hauptsächlich für das integrierte tttool erstellt, welches mit der eigenen Skriptsprache die Programmierung des Tiptoi-Stiftes ermöglicht. Sie wird demnach nur intern erzeugt, weiter verarbeitet und bleibt dem Nutzer verborgen.
2. **Audiodatei-Generierung:** Für die akustische Komponente bietet das EduTT-Tool zwei Hauptoptionen: den Audio-Upload, bei dem selbst aufgenommene oder vorproduzierte Audiodateien hochgeladen werden können (F-ANF10), sowie die Audio-Generierung, bei der alternativ Texte mittels einfacher Text-to-Speech-Funktionalität in Audiodateien umgewandelt werden können (F-ANF5). Diese flexible Handhabung der Audioquellen ermöglicht es Lehrkräften, entweder mit eigener Stimme personalisierte Aufnahmen zu nutzen oder auf computergestützte Sprachausgabe zurückzugreifen.
3. **GME-Datei-Kompilierung:** Im abschließenden Schritt werden die YAML-Logikdatei und die Audiodateien zu einer GME-Datei mittels tttool kompiliert, die direkt auf den Tiptoi-Stift übertragen werden kann. Der Kompilierungsprozess erfolgt automatisiert und erzeugt eine mit dem Tiptoi-System compatible Datei, welche direkt gedownloadet wird.

4.1.3 Anwendungsworkflow

Der vollständige Arbeitsablauf zur Erstellung interaktiver Unterrichtsmaterialien mit dem EduTTTool gestaltet sich in drei Hauptphasen:

1. **Materialerstellung im OID-Generator:** Hochladen oder Erstellen eines Arbeitsblatts, Ausrichtung des A4-Formates, Konfiguration der Produktparameter, Platzierung und Konfiguration von OIDs, optionale Erstellung eines Spielmodus und Export des fertiggestellten Materials.
2. **Audiodatei-Erstellung im GME-Generator:** Generierung der YAML-Logikdatei, Upload oder Text-to-Speech-gestützte Generierung von Audiodateien, Kompilierung zur GME-Datei und deren Download.
3. **Implementierung:** Übertragung der GME-Datei auf den Tiptoi-Stift, Ausdruck des erstellten Arbeitsblatts und Einsatz im Unterricht.

4.2 Systemarchitektur

4.2.1 Architekturüberblick

Die Systemarchitektur des EduTTTool basiert auf einem modernen Schichtenmodell, das die grundlegenden Ziele des Software-Entwurfs wie Änderbarkeit, Wartbarkeit und Wiederverwendbarkeit in den Mittelpunkt stellt [ent07]. Als technologische Basis dient Spring Boot 3.4.0 für das Backend und Vaadin 24.6.0 mit React-Komponenten für das Frontend. Die Vaadin Hilla-Technologie ermöglicht dabei eine nahtlose Integration von TypeScript/React mit Java und stellt typisierte Schnittstellen für die Kommunikation zwischen den Schichten bereit.

Die Gesamtarchitektur folgt dem bewährten Drei-Schichten-Modell, das sich aus Dialogschicht, Fachkonzeptschicht und Datenhaltungsschicht zusammensetzt. Durch diese Schichtenbildung wird eine hohe Unabhängigkeit zwischen den Komponenten erreicht, die Implementierung einzelner Schichten kann relativ leicht ausgetauscht werden, und die Abhängigkeiten zwischen Komponenten werden minimiert [ent07].

Die Gesamtarchitektur gliedert sich in vier Hauptkomponenten, die in ihrem Zusammenspiel den vollständigen Workflow zur Erstellung interaktiver Unterrichtsmaterialien abbilden:

1. **Präsentationsschicht (Dialogschicht):** Realisiert die Benutzungsoberfläche der Anwendung und umfasst drei Hauptansichten (About-Seite, OID-Generator, GME-Generator). Diese Schicht ist für die Dialogsteuerung und die Präsentation aller Daten zuständig [ent07]. Die React-Komponenten kommunizieren über Vaadin-Signale mit dem Backend und folgen damit dem Model-View-Controller-Muster.
2. **Geschäftslogikschicht (Fachkonzeptschicht):** Modelliert den funktionalen Kern der Anwendung und implementiert die fachliche Funktionalität durch spezialisierte Services [ent07]. Diese Services werden über eine zentrale Fassade angesprochen und steuern die Kernprozesse der Anwendung.
3. **Externe Integrationsschicht:** Kapselt die Interaktion mit dem TTTool zur OID-Erzeugung und GME-Datei-Kompilierung. Diese Schicht isoliert externe Abhängigkeiten vom Kerncode und ermöglicht dadurch eine lose Kopplung der Anwendungslogik von der Datenhaltung.
4. **Datenverwaltungsschicht (Datenhaltungsschicht):** Organisiert die strukturierte Speicherung von Produktdaten, Bildern, OIDs und Audiodateien in einem definierten Verzeichnissystem. Die Datenspeicherung wird dabei von der Fachkonzeptschicht durch Einführung separater Klassen getrennt [ent07].

Durch die Trennung der Schichten werden die Daten von der Darstellung und die Darstellung von der Steuerung getrennt, was mehrfach begründet ist: Die Dialogschicht und die Fachkonzeptschicht haben grundsätzlich unterschiedliche Anliegen, eine saubere Arbeitsteilung in der Entwicklung wird ermöglicht, und die Dialogschnittstelle kann ausgetauscht werden, ohne dass grundsätzliche Änderungen am Fachkonzept notwendig werden [ent07].

Der Arbeitsablauf innerhalb dieser Architektur folgt einem klaren Muster, das den in Abschnitt 4.1.3 beschriebenen Anwendungsworkflow technisch umsetzt: Vom Upload und der Verarbeitung eines Hintergrundbildes über die Positionierung von OIDs und die Definition von Spielmodi bis hin zur Generierung der finalen GME-Datei für den Tiptoi-Stift.

4.2.2 Kernkomponenten

Backend-Services

Das Backend der Anwendung implementiert eine modulare Service-Architektur, die sich an bewährten Entwurfsmustern orientiert. Als zentrale Koordinationsstelle fungiert die `EduTTToolFacade`, die das Facade-Pattern umsetzt und eine einheitliche Schnittstelle zwischen Frontend und den dahinterliegenden Services bereitstellt.

Tabelle 4.1: Kategorisierung der Backend-Services nach funktionalen Domänen

Kategorie	Service	Kernfunktionalität
Kernlogik	<code>ProductService</code>	Zentrale Verwaltung der Produktdaten, Geschäftslogik für Produktoperationen
	<code>ScriptService</code>	Steuerung der Interaktionslogik, Zuweisung und Verwaltung von OID-Codes
Medienverarbeitung	<code>ImageService</code>	Bildverarbeitung, Formatkonvertierung und Optimierung
	<code>OIDImageService</code>	Spezialisierte Verarbeitung OID-spezifischer Bildoperationen
	<code>AudioService</code>	Verwaltung und Verarbeitung von Audiodateien
Integration & Export	<code>ExportService</code>	Generierung von YAML- und PDF-Exporten
	<code>TTToolExecution-Service</code>	Integration und Ausführung externer Tools

Diese Architekturentscheidung reduziert die Komplexität für das Frontend und minimiert die Kopplung zwischen den verschiedenen Systemschichten. Die Service-Struktur folgt konsequent dem Prinzip der Trennung von Verantwortlichkeiten (Separation of Concerns), wodurch jeder Service eine klar abgegrenzte Domäne verwaltet. Diese Aufteilung verbessert nicht nur die Wartbarkeit und Testbarkeit des Systems, sondern ermöglicht auch eine flexible Erweiterung durch das Hinzufügen neuer Services ohne Modifikation bestehender Komponenten [aus07].

Die Backend-Services gliedern sich in drei funktionale Hauptkategorien, die in Tabelle 4.1 dargestellt sind: Die Kernlogik-Services bilden das fachliche Herzstück der Anwendung und implementieren die grundlegenden Geschäftsregeln. Die Medienverarbeitungs-Services kapseln die komplexe Logik für die Verarbeitung verschiedener

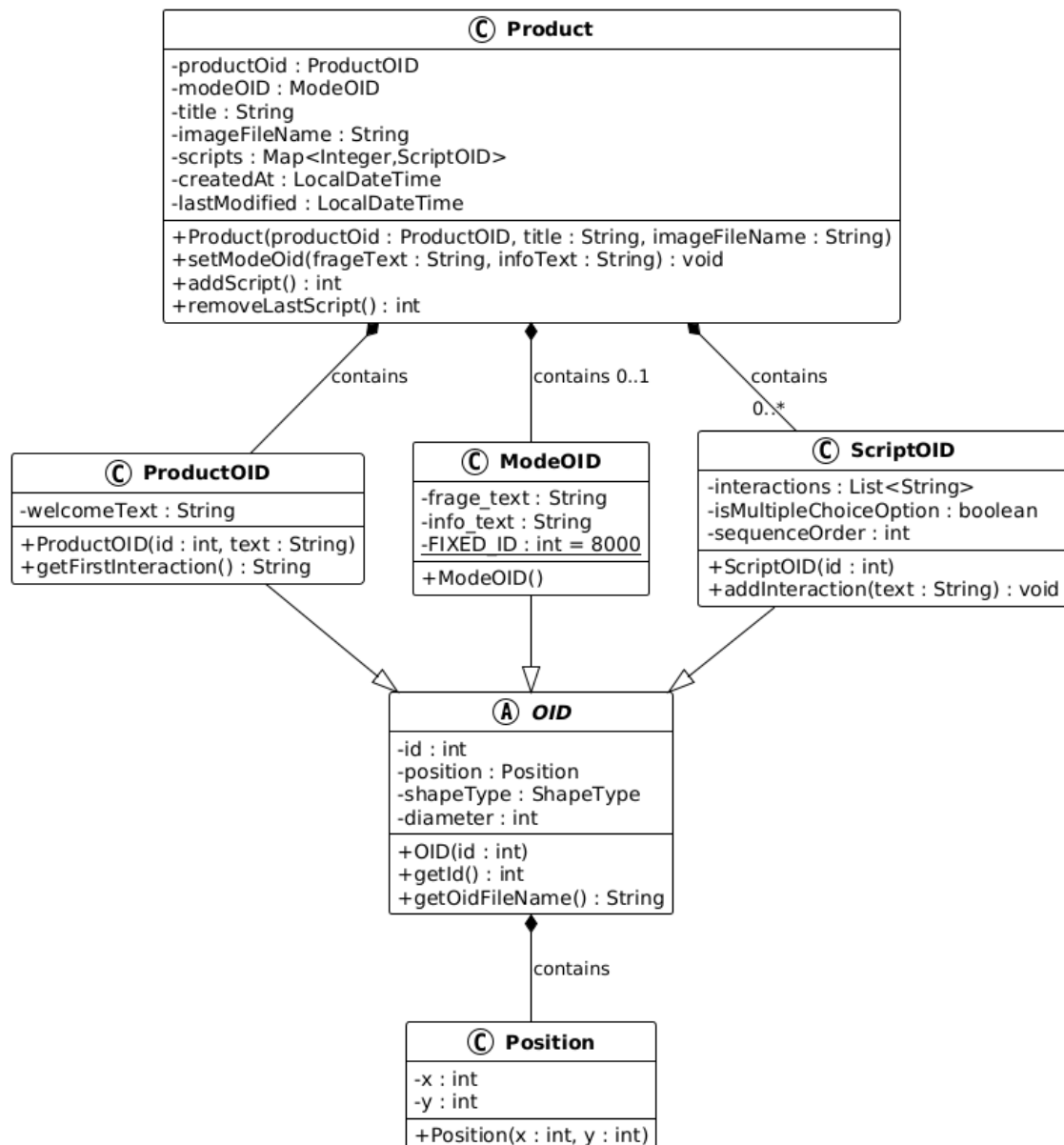


Abbildung 4.2: UML-Klassendiagramm der OID-basierten Datenmodellierung

Medientypen, während die Integrations-Services die Schnittstellen zu externen Systemen und Exportfunktionalitäten bereitstellen.

Diese strukturierte Aufteilung gewährleistet eine hohe Kohäsion innerhalb der Services bei gleichzeitig loser Kopplung zwischen ihnen. Dadurch können einzelne Services unabhängig entwickelt, getestet und erweitert werden, was die Gesamtarchitektur flexibel und zukunftssicher macht.

Datenmodell

Das Datenmodell der Anwendung orientiert sich am Domain Model-Ansatz, der die in der Analysephase vorgefundenen Objekte des betrachteten Problemereichs möglichst unverändert im Entwurf umsetzt [ent07].

Das UML-Klassendiagramm in Abbildung 4.2 zeigt die zentrale Architektur des OID-basierten Datenmodells. Die Klasse **Product** fungiert als Aggregator-Entität

und verwaltet alle produktbezogenen Daten wie Titel, Bilddatei und Zeitstempel. Über Kompositionsbeziehungen koordiniert sie die verschiedenen OID-Typen, wodurch eine klare Trennung der Verantwortlichkeiten erreicht wird.

Die OID-Komponenten folgen einer klassischen Vererbungshierarchie, die die verschiedenen Interaktionstypen des tiptoi-Systems widerspiegelt. Die abstrakte Basis-Klasse `OID` definiert die gemeinsamen Eigenschaften aller tiptoi-Codes, insbesondere die eindeutige ID, die räumliche Position und geometrische Attribute wie Form und Durchmesser. Diese Basisklasse kapselt die grundlegenden Funktionalitäten zur Generierung der OID-Dateinamen, die für die Erstellung der tiptoi-Medien benötigt werden.

Die drei spezialisierten Unterklassen erweitern diese Basis um typspezifische Funktionalitäten. `ProductOID` verwaltet den Begrüßungstext, der beim ersten Antippen eines Produkts abgespielt wird. `ScriptOID` implementiert die eigentliche Interaktionslogik durch eine Liste von Textinhalten sowie Attribute für verschiedene Spielmodi wie Multiple-Choice-Optionen oder Sequenzreihenfolgen. `ModeOID` stellt eine Besonderheit dar, da sie eine feste ID (8000) verwendet und die Texte für den Wechsel zwischen Übungs- und Wissensmodus verwaltet. Diese Struktur ermöglicht polymorphe Behandlung aller OID-Typen bei gleichzeitiger Spezialisierung der Funktionalitäten.

Die Kompositionsbeziehungen zwischen `Product` und den OID-Klassen verdeutlichen die existenzielle Abhängigkeit der OIDs von ihrem übergeordneten Produkt. Während jedes Produkt genau eine `ProductOID` benötigt, sind sowohl `ModeOID` (0..1) als auch `ScriptOIDs` (0..*) optional, was die Flexibilität des Systems bei der Produkterstellung ermöglicht. Die Einbettung der `Position`-Klasse als Komponente der `OID` zeigt die räumliche Modellierung der tiptoi-Codes, die für die korrekte Platzierung auf den gedruckten Medien erforderlich ist.

4.2.3 Externe Integration

Eine besondere architektonische Herausforderung stellte die Integration des externen `tttool` von [Brei23] dar, das für die Generierung von OID-Codes und die Kompilierung von GME-Dateien essentiell ist. Diese Integration folgt dem Prinzip der Kapselung externer Abhängigkeiten, um die Änderbarkeit und Wartbarkeit des Systems zu gewährleisten [ent07]. Zur Implementierung dieser Kapselung wurde der `TTToolExecutionService` als dedizierte Komponente entwickelt, die die komplexe `tttool`-Kommunikation abstrahiert und anderen Systemkomponenten eine einheitliche Schnittstelle bietet. Diese Designentscheidung ermöglicht eine potenzielle zukünftige Anpassung oder den Austausch des externen Tools, ohne dass weitreichende Änderungen an der Kernarchitektur erforderlich wären.

`tttool`-Kommandos und deren Anwendung

Das `tttool` bietet verschiedene Kommandos für die unterschiedlichen Arbeitsschritte bei der TipToi-Entwicklung. In der vorliegenden Implementierung werden primär zwei Kernfunktionen genutzt:

1. **OID-Code-Generierung:** Für die Erzeugung der optischen Identifikationscodes wird das Kommando `oid-code` verwendet:

```
1 tttool --dpi 600 --image-format PNG oid-code <OID-Nummer>
```

Dieses Kommando generiert PNG-Dateien mit einer Auflösung von 600 DPI, die für den Druck ausreichende Qualität gewährleisten. Die hohe Auflösung ist dabei wichtig für die zuverlässige Erkennung durch den TipToi-Stift. Die Auflösung von 600 dpi hat sich in mehreren praktischen Tests bewährt und wurde daher standardmäßig festgelegt.

2. **GME-Datei-Kompilierung:** Die Kompilierung der YAML-Dateien zu ausführbaren GME-Dateien erfolgt über das `assemble`-Kommando:

```
1 tttool assemble <YAML-Datei>
```

Dieser Befehl transformiert die strukturierte YAML-Konfiguration in das binäre GME-Format, das vom TipToi-Stift interpretiert werden kann.

Automatisierte YAML-Generierung

Ein zentraler Bestandteil der Architektur ist die automatisierte Generierung von YAML-Dateien, die über ein spezialisiertes Generator-Pattern realisiert wurde. Dieses Pattern ermöglicht die flexible Erstellung verschiedener Interaktionslogiken entsprechend den unterschiedlichen Spielmodi. Das System implementiert eine Generator-Delegation mit der Klasse `YAMLGenerator` als Haupteinstiegspunkt. Diese wählt basierend auf dem Spielmodus-Typ den entsprechenden spezialisierten Generator aus und delegiert die spezifische Generierung an diesen:

- `InfoYamlGenerator`: Für den reinen Informationsmodus ohne Spiellogik
- `MultipleChoiceYamlGenerator`: Für Multiple-Choice-Spiele mit Zustandsverwaltung
- `SequenceYamlGenerator`: Für sequenzbasierte Lernspiele

Jeder Generator erzeugt dynamische für das `tttool` verständliche Script-Anweisungen basierend auf den Produktkonfigurationen. Beispielsweise wird für Reihenfolge-Spiele automatisch eine Zustandsmaschine generiert, die zwischen Wissens- und Übungsmodus pro OID wechselt und dabei die korrekte Sequenz überwacht:

```
1 product-id: 100
2 comment: Tulpe
3 welcome: welcome_text
4 language: de
5 init: $c00:=0 $p0:=0 $counter:=0
6 scripts:
7   '1000':
8     - $p0==0? $c00==0? $c00:=1 P(sound_1000)
9     - $p0==0? $c00==1? $c00:=0 P(sound_1000_1)
10    - $counter==2? $counter:=0 P(sound_1000) P(erfolg) P(
      quiz_neu_gestartet)
11    - P(sound_1000) P(antwort_ist_falsch)
12   '1001':
13     - $p0==0? P(sound_1001)
14     - $counter==1? $counter:=2 P(sound_1001) P(antwort_ist_richtig)
15     - P(sound_1001) P(antwort_ist_falsch)
16   '1002':
```

```

17 - $p0==0? P(sound_1002)
18 - $counter==0? $counter:=1 P(sound_1002) P(antwort_ist_richtig)
19 - P(sound_1002) P(antwort_ist_falsch)
20 '8000':
21 - $p0==0? $p0:=1 $counter:=0 P(frage)
22 - $p0==1? $p0:=0 P(info)
23 speak:
24 welcome_text: Hallo die Tulpe freut sich dich kennenzulernen.
25 sound_1000: Das ist die Bluete.
26 sound_1000_1: Die Bluete ist rot.
27 sound_1001: Das ist ein Blatt
28 sound_1002: Das ist ein Staengel
29 frage: Du bist jetzt im Uebungsmodus. In welcher Reihenfolge
    waechst die Tulpe.
30 info: Du bist jetzt im Wissensmodus. Tippe und Lerne.
31 antwort_ist_richtig: Das ist richtig, weiter so.
32 antwort_ist_falsch: Das ist leider falsch. Versuch es nochmal.
33 erfolg: Glueckwunsch, du hast alle gefunden.
34 quiz_neu_gestartet: Die Suche startet nun von vorne. Tippe auf den
    Uebungsmodus, wenn du ihn aendern moechtest.

```

In diesem Beispiel implementiert der SequenceYamlGenerator eine Zustandsmaschine für ein Tulpen-Lernspiel. Die OID 8000 fungiert als Modusschalter zwischen Wissens- ($p0 == 0$) und Übungsmodus ($p0 == 1$). Im Übungsmodus müssen die Pflanzenteile in der korrekten Reihenfolge (Stängel → Blatt → Blüte) angetippt werden, wobei die Variable *counter* den Fortschritt verfolgt. Die OID 1000 (Blüte) besitzt zusätzlich mehrere Interaktionen, die über die Variable *c00* zyklisch durchlaufen werden. Das System generiert automatisch die erforderlichen Initialisierungsvariablen für die jeweiligen Spielmodi.

Ressourcenverwaltung

Die Ressourcenverwaltung erfolgt über eine strukturierte Verzeichnishierarchie, die dem Prinzip der logischen Trennung von Datentypen folgt:

- **uploads/**: Speicherort für hochgeladene Hintergrundbilder
- **oids/**: Enthält die generierten OID-Bilder in verschiedenen Formen und Größen
- **tools/Audio/**: Speicherplatz für die Audiodateien
- **yamlFiles/**: Ablage für die generierten YAML-Dateien zur Steuerung der TipToi-Logik

Der `FileCleanupService` überwacht diese Verzeichnisse und sorgt für eine effiziente Ressourcennutzung durch regelmäßige Bereinigung nicht mehr benötigter Dateien.

4.2.4 Architekturbezogene Designentscheidungen

Die Architektur des EduTTTool basiert auf bewährten Entwurfsmustern zur Verbesserung der Systemqualität [aus07]. Diese Muster fördern die Wartbarkeit, Erweiterbarkeit und Testbarkeit des Systems durch klare Trennung der Verantwortlichkeiten

und lose Kopplung zwischen den Komponenten.

Ein prägnantes Beispiel für die konsequente Anwendung von Entwurfsmustern stellt die Implementierung der Spielmodus-Erzeugung dar. Das in Abbildung 4.3 dargestellte Factory Pattern kapselt die komplexe Objekterzeugung von Spielmodi und entkoppelt Client-Code von konkreten Implementierungen. Die Enum-Klasse **GameModeType** fungiert als Factory und stellt für jeden Spielmodus-Typ eine statische Factory-Methode `createGameMode()` bereit, die entsprechende Instanzen der konkreten Implementierungen erzeugt.

Das **GameMode**-Interface definiert das gemeinsame Produktinterface, das von allen konkreten Spielmodi wie **NoGameMode**, **MultipleChoiceGame** und **SequenceGame** implementiert wird. Diese Struktur ermöglicht es, neue Spielmodi hinzuzufügen, indem lediglich ein neuer Enum-Wert und die entsprechende konkrete Implementierung erstellt werden, ohne bestehenden Client-Code zu modifizieren. Die zusätzliche Methode `fromGameMode()` ermöglicht die Rückrichtung von konkreten Instanzen zu Enum-Werten, was für Serialisierung und Persistierung wichtig ist.

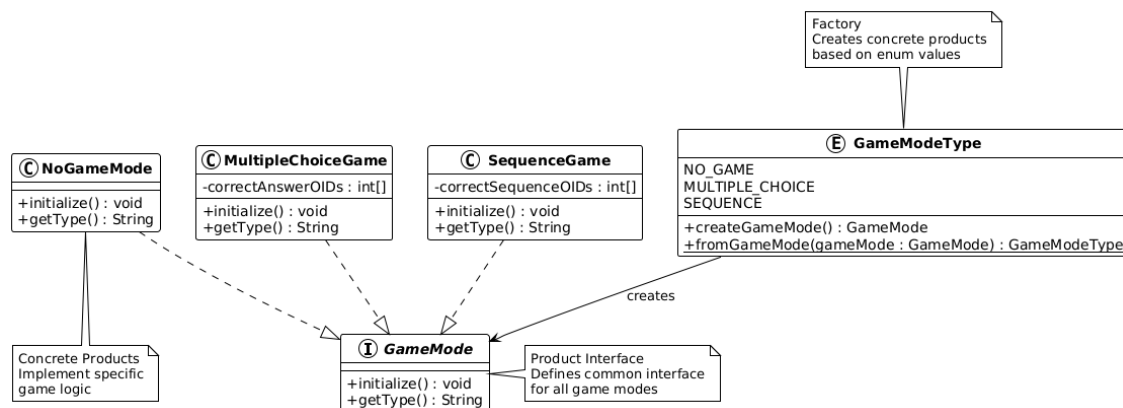


Abbildung 4.3: Factory Pattern für die Spielmodus-Erzeugung

Ergänzend zum Factory Pattern kommen weitere bewährte Entwurfsmuster zum Einsatz: Die **EduTTToolFacade** verbirgt die Komplexität des Backend-Systems vor dem Frontend und bietet eine kohärente API, was die Kopplung zwischen den Schichten reduziert. Durch die Verwendung von Vaadin-Signalen wird ein Observer-Muster implementiert, bei dem UI-Komponenten automatisch auf Änderungen des Anwendungszustands reagieren.

Die Modularisierung erfolgt sowohl vertikal entlang der klassischen Schichten (Präsentation, Geschäftslogik, Datenverwaltung) als auch horizontal durch funktionale Abgrenzung innerhalb der Schichten. Diese Trennung unterstützt die Maintainability durch lokale Änderungsbegrenzung und ermöglicht die schrittweise Erweiterung ohne strukturelle Eingriffe in bestehende Module.

Das Projekt verwendet Maven als Build-Management-Tool mit verschiedenen Plugins zur Automatisierung des Entwicklungsprozesses. Spotless mit Palantir Java Format und Prettier sorgt für konsistente Code-Formatierung sowohl im Java-Backend

als auch im TypeScript-Frontend. Diese Maßnahmen tragen zur langfristigen Wartbarkeit des Codes bei und reduzieren die Einarbeitungszeit für neue Entwickler.

Zusammenfassend zeichnet sich die Systemarchitektur des EduTTTool durch einen durchdachten, modularen Aufbau aus, der auf bewährten Entwurfsmustern basiert und eine klare Trennung der Verantwortlichkeiten gewährleistet. Diese Architektur bildet das technische Fundament für die beschriebenen Funktionalitäten und ermöglicht nicht nur eine effiziente Implementierung der aktuellen Anforderungen, sondern bietet auch die nötige Flexibilität für zukünftige Erweiterungen und Anpassungen.

4.3 Benutzeroberfläche

Die Benutzeroberfläche des EduTTTool wurde mit besonderem Fokus auf Benutzerfreundlichkeit und intuitive Bedienbarkeit entwickelt, um Lehrkräften ohne spezifische technische Vorkenntnisse einen unkomplizierten Einstieg in die Erstellung interaktiver Unterrichtsmaterialien zu ermöglichen. Die Gestaltung orientiert sich an bewährten Webdesign-Prinzipien nach [Lidw10] und folgt einem durchgängigen, aufgabenorientierten Ansatz, der den Arbeitsablauf von der Bilderstellung bis zum fertigen tiptoi-Material strukturiert und nachvollziehbar gestaltet.

Technisch basiert die Implementierung auf modernen Web-Technologien mit React als primärem Frontend-Framework. Die Integration in die Vaadin-Plattform ermöglicht eine nahtlose Verbindung zwischen React-Komponenten und Java-basierten Backend-Services durch typisierte Schnittstellen. Für die Zustandsverwaltung kommt eine maßgeschneiderte Signal-basierte Lösung zum Einsatz, die das Beobachter-Muster implementiert und eine entkoppelte Kommunikation zwischen Komponenten ermöglicht. Diese Architektur unterstützt die reaktive Synchronisation von UI-Zuständen und trägt zur Stabilität und Wartbarkeit der Anwendung bei.

Die folgenden Abschnitte erläutern zunächst die zugrundeliegenden Designprinzipien und deren Umsetzung, bevor die konkreten Ansichten und ihre spezialisierten Komponenten im Detail beschrieben werden.

4.3.1 Designphilosophie und Grundprinzipien

Bei der Konzeption der Benutzeroberfläche wurde besonderer Wert auf eine aufgabenorientierte Strukturierung gelegt, die dem natürlichen Arbeitsablauf bei der Erstellung interaktiver Materialien folgt und Benutzer schrittweise durch den Prozess führt. Ein zentrales Prinzip stellt dabei die progressive Offenlegung von Funktionalitäten dar – komplexe Funktionen werden erst dann angezeigt, wenn sie im Arbeitsablauf benötigt werden, um kognitive Überlastung zu vermeiden [Lidw10]. Jede Benutzeraktion wird durch unmittelbares visuelles Feedback bestätigt, was die Orientierung erleichtert und Unsicherheiten reduziert.

Die Benutzeroberfläche folgt einem einheitlichen Gestaltungssystem für Farben, Typografie, Icons und Interaktionsmuster, mit dem Ziel, die Lernkurve für Anwender zu minimieren und die Bedienung intuitiver zu gestalten. Das Farbschema basiert auf einer harmonischen Palette mit Blau als Primärfarbe, ergänzt durch kontrastierende Akzentfarben für unterschiedliche Funktionalitäten. Bei der typografischen Gestaltung wurde besonderer Wert auf Lesbarkeit und klare Hierarchien gelegt, während die Integration von Icons die visuelle Orientierung unterstützt.

4.3.2 Benutzeroberfläche und zentrale Komponenten

Die Benutzeroberfläche des EduTTTool gliedert sich in drei Hauptansichten, die über eine zentrale Navigationsleiste am oberen Bildschirmrand zugänglich sind: die About-Seite, der OID-Generator und der GME-Generator. Jede Ansicht nutzt spezialisierte UI-Komponenten, die für die spezifischen Anforderungen der jeweiligen Funktionalität entwickelt wurden.

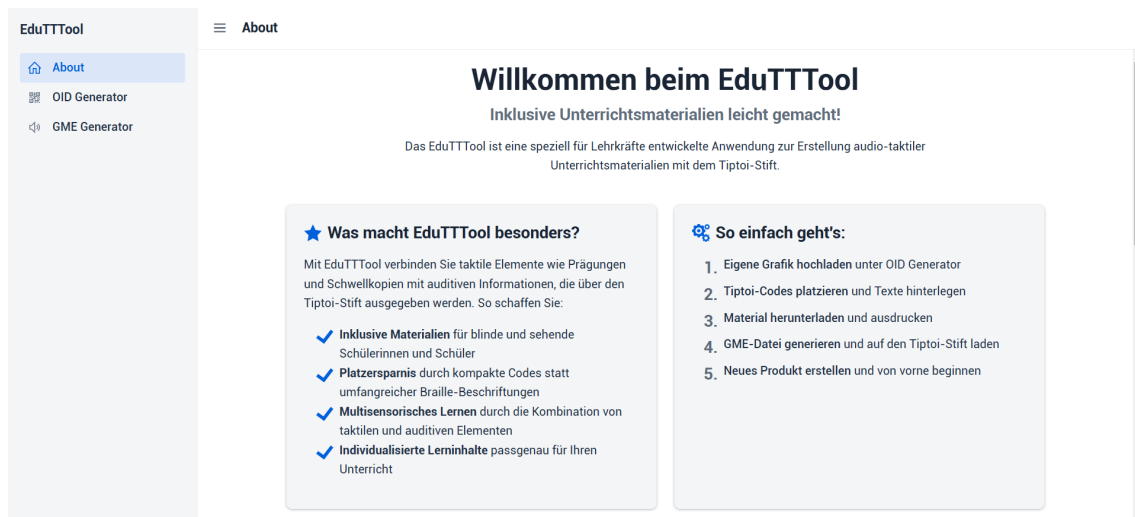


Abbildung 4.4: Screenshot des oberen Teils der About-Seite

About-Seite

Die About-Seite dient als Einstiegspunkt und Übersichtsseite für neue Benutzer. Sie bietet eine prägnante Einführung in das EduTTTool mit Erläuterung der grundlegenden Konzepte und einem illustrierten Überblick über den typischen Arbeitsablauf. Die Seite ist in mehrere inhaltliche Bereiche gegliedert, indem das Prinzip des Chunkings umgesetzt wird [Lidw10]: Zunächst wird ein allgemeiner Überblick über das Tool und seine Einsatzmöglichkeiten gegeben gemeinsam mit einer Darstellung der besonderen Vorteile für den inklusiven Unterricht. Ein weiterer Abschnitt erklärt in fünf einfachen Schritten den grundlegenden Arbeitsablauf von der Bilderstellung bis zum Einsatz im Unterricht. Ein Ausschnitt der Seite mit beiden Bereichen ist Abbildung 4.4 zu sehen, wo eindeutig zwischen den zwei Chunks unterschieden werden kann.

Besonders praxisorientiert sind die Bereiche zu den Themen „Korrektes Drucken der Materialien“ und „GME-Datei auf den Tiptoi-Stift laden“, die wichtige Hinweise für die erfolgreiche Anwendung nach dem Download der erstellten Materialien bieten. Der Gestaltungsansatz folgt dabei dem Prinzip „abnehmender Detailtiefe“, sodass Benutzer zuerst die grundlegenden Informationen erfassen und bei Bedarf detailliertere Erklärungen abrufen können [Lidw10].

OID-Generator

Der OID-Generator bildet das Kernstück der Anwendung und präsentiert sich mit einer klar strukturierten Benutzeroberfläche. Er ist in mehrere funktionale Bereiche gegliedert, die dem typischen Arbeitsablauf bei der Erstellung interaktiver Materialien folgen. So kommt auch hier das Prinzip des Chunkings zum Einsatz.

Willkommensbildschirm: Bei erstmaligem Aufruf wird ein Willkommensbildschirm angezeigt, der durch die speziell entwickelte `WelcomeScreen`-Komponente realisiert wird. Diese bietet zwei Hauptoptionen: das Erstellen eines neuen Produkts oder das Laden eines bestehenden Produkts. Die klare Trennung, wie in Abbildung 4.5 zu erkennen, erleichtert Benutzern die Orientierung und vermeidet Überforderung

durch zu viele gleichzeitige Optionen. Die Komponente erklärt den grundlegenden Arbeitsablauf und bietet direkte Einstiegspunkte in die entsprechenden Funktionen, wobei besonderer Wert auf Klarheit und Zugänglichkeit gelegt wurde, um auch unerfahrenen Benutzern einen intuitiven Einstieg zu ermöglichen. Gleichzeitig führt der ähnliche Aufbau zur About-Seite zu einem konsistenten Aussehen.

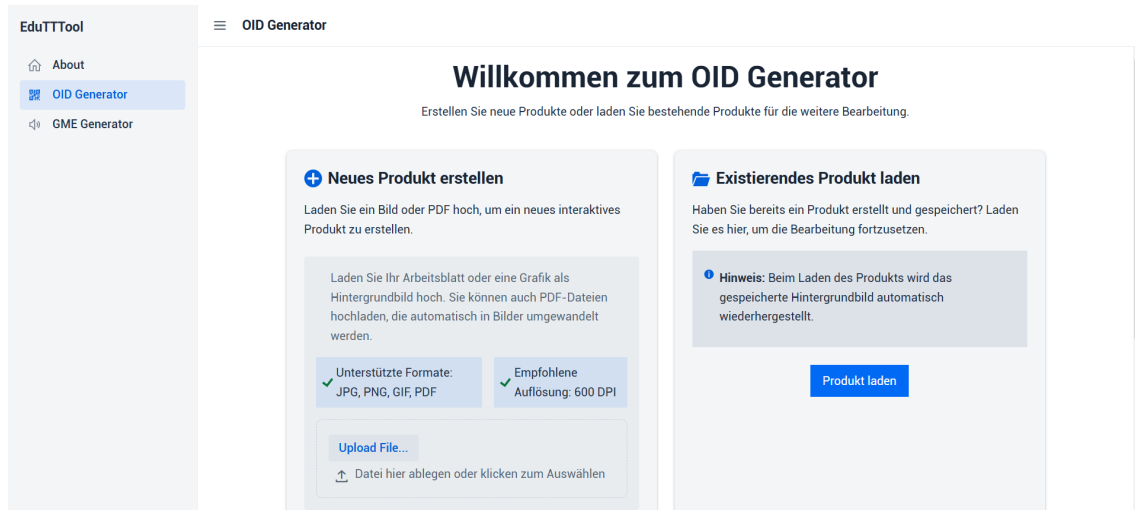


Abbildung 4.5: Screenshot des Willkommensbildschirms

Bildanpassung: Beim Erstellen eines neuen Produkts erfolgt zunächst die Bildanpassung durch die `A4ImageContainer`-Komponente. Diese dient der intelligenten Anpassung hochgeladener Bilder an das A4-Format und ermöglicht es dem Benutzer, zwischen Hoch- und Querformat zu wählen sowie das Bild in 90-Grad-Schritten zu rotieren. Die Komponente zeigt eine maßstabsgetreue Vorschau und berechnet automatisch den korrekten Skalierungsfaktor für den späteren Druck. Besondere Aufmerksamkeit wurde auf die Benutzerführung gelegt, mit klaren visuellen Hinweisen zur Ausrichtung des Dokuments und zur Auswirkung der gewählten Einstellungen im Sinne des „Feedback Principle“ [Lidw10]. Je nach gewählter Ansicht erhält die Datei beim Download beispielsweise die Kennzeichnung „HOCHFORMAT“ im Dateinamen, um auf die richtige Auswahl beim Drucken hinzuweisen.

Hauptarbeitsumgebung: Nach der Bildanpassung gelangt der Benutzer zur Hauptarbeitsumgebung des OID-Generators, die aus mehreren spezialisierten Komponenten besteht:

Die Produkteinstellungen werden über die `ProductSettingsPanel`-Komponente realisiert (siehe Abb. 4.6), die als aufklappbares Panel gestaltet ist, um die visuelle Komplexität der Benutzeroberfläche zu reduzieren, wenn diese Einstellungen nicht aktiv bearbeitet werden. Das Panel ist in zwei Hauptbereiche unterteilt: Produktdetails für die Basiskonfiguration (Produkt-ID, Titel und Begrüßungstext) und Spielmodus für die Definition interaktiver Übungen. Eine klare visuelle Hierarchie und Gruppierung verdeutlicht die Beziehung zwischen den verschiedenen Einstellungen.

Der zentrale Bereich der Bildvorschau wird durch die `ImagePreviewSection`-Komponente bereitgestellt, die eine interaktive Vorschau des Arbeitsblatts mit allen platzierten OIDs zeigt und deren direkte Manipulation durch Drag-and-Drop ermöglicht.

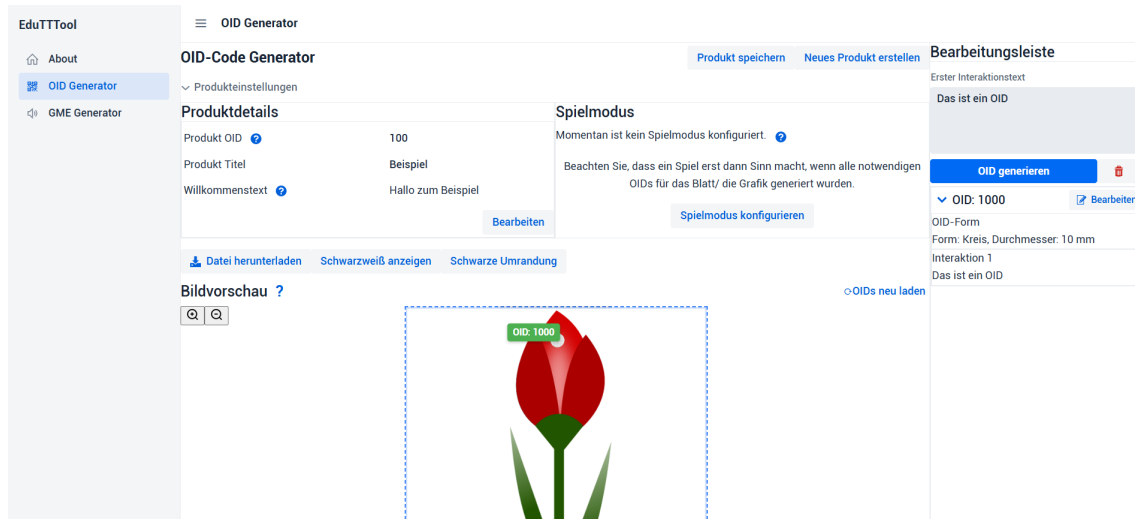


Abbildung 4.6: Screenshot des OID-Generator mit dem Upload Bild Tulpe von [Open16]

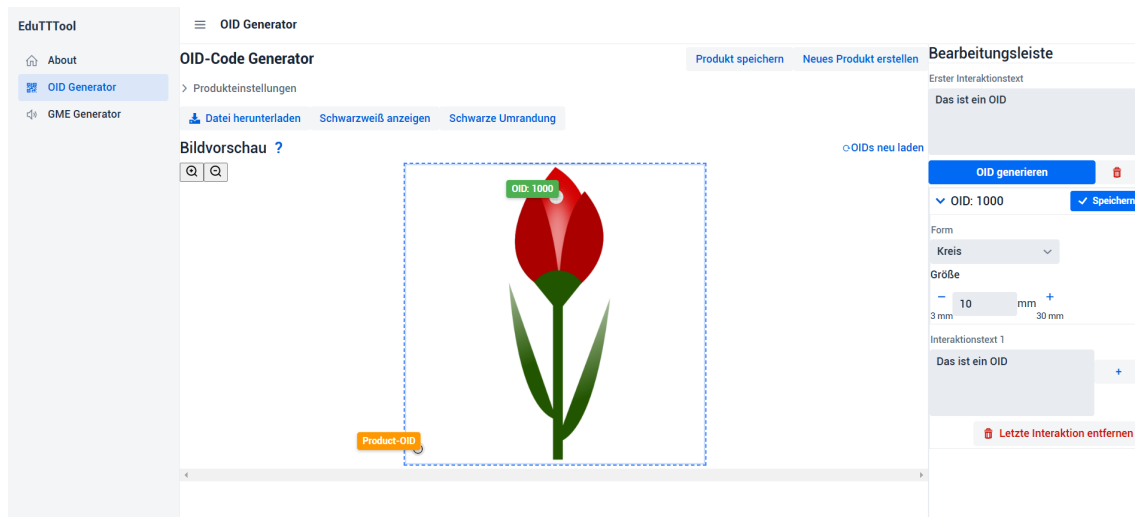


Abbildung 4.7: Screenshot des OID-Generator mit zugeklappten Produkteinstellungen mit dem Upload Bild Tulpe von [Open16]

Die Komponente visualisiert sowohl statische Elemente (Product-OID, Mode-OID) als auch verschiebbare Skript-OIDs und ist robust gegenüber Datenverlust gestaltet. Sie implementiert mehrere Fallback-Strategien für das Laden von Bilddaten, falls die primären Signale nicht verfügbar sind, sowie einen integrierten Debug-Modus zur Erleichterung von Entwicklung und Fehlerbehebung.

Die Bearbeitungsleiste am rechten Bildschirmrand wird durch die **EditProduct-Sidebar**-Komponente realisiert, die als schmale, rechts positionierte Seitenleiste die zentrale Schnittstelle für die Erstellung und Bearbeitung von OIDs bildet. Im oberen Bereich bietet sie ein Texteingabefeld für den ersten Interaktionstext sowie Schaltflächen zum Generieren neuer OIDs und zum Löschen des zuletzt generierten Elements. Im unteren Bereich werden die bereits erstellten OIDs aufgelistet, wobei für jede OID die zugehörigen Interaktionstexte, die Form und die Größe bearbeitet wer-

den können. Die Komponente implementiert eine spezielle Scrollfunktion, um auch bei zahlreichen OIDs die Übersichtlichkeit zu wahren.

Die Möglichkeit des Zuklappens der Produkteinstellungen bietet eine bessere Sicht auf das gesamte Arbeitsblatt und fokussiert die Bearbeitung auf die Erstellung von OIDs. Abbildung 4.7 zeigt die fokussierte Ansicht im Vergleich zu Abbildung 4.6. Zudem ist in Abbildung 4.7 die Bearbeitungsansicht eines OID zu sehen.

GME-Generator

Der GME-Generator implementiert eine forrschreitende Offenlegung von Informationen durch eine dreistufige Benutzeroberfläche und nutzt „Visibility“ sowie „Wayfinding“ Prinzipien nach [Lidw10] durch den horizontalen Fortschrittsindikator und beschreibende Überschriften, um Benutzer durch den Audiodatei-Erstellungsprozess zu leiten. In Abbildung 4.8 ist der Fortschrittsbalken im oberen Bereich der Webseite zu finden.

Schritt 1 - YAML-Generierung: Im ersten Schritt wird die YAML-Datei generiert, die als Grundlage für die spätere GME-Datei dient. Dieser Prozess läuft automatisch ab und bereitet die Strukturdaten für die nachfolgende Audibearbeitung vor.

Schritt 2 - Audiomethoden-Auswahl: Nach erfolgreicher Generierung erfolgt im zweiten Schritt die Auswahl der Audiomethode. Hier kann der Benutzer zwischen automatischer Text-to-Speech-Generierung und dem manuellen Upload eigener Audiodateien wählen. Bei der Wahl der Upload-Option werden alle benötigten Audiodateien in einer übersichtlichen Liste dargestellt, mit Angabe des zugehörigen Textes und des Upload-Status (siehe Abb. 4.8). Diese Darstellung folgt dem Prinzip der klaren Informationsarchitektur und ermöglicht es Benutzern, den Fortschritt ihrer Uploads zu verfolgen.

Schritt 3 - GME-Kompilierung: Im dritten Schritt erfolgt die Kompilierung zur GME-Datei, die anschließend automatisch zum Download angeboten wird. Der gesamte Prozess wird durch visuelle Fortschrittsanzeigen und Statusmeldungen begleitet, um Transparenz über den aktuellen Verarbeitungsstand zu gewährleisten und dem Benutzer Feedback über den Systemzustand zu geben.

Die beschriebenen Komponenten werden konsistent über die gesamte Anwendung hinweg eingesetzt und folgen gemeinsamen Designprinzipien wie dem Chunking-Prinzip für die Informationsstrukturierung, dem Feedback Principle für die Benutzerführung und dem Progressive Disclosure Prinzip für die schrittweise Offenlegung von Funktionalitäten. Diese einheitliche Anwendung von UI/UX-Prinzipien nach [Lidw10] trägt zur Konsistenz und Benutzerfreundlichkeit der gesamten Anwendung bei.

Hilfesystem und Onboarding

Das EduTTTool implementiert ein mehrschichtiges Hilfe- und Onboarding-System, das Benutzer bei den ersten Schritten unterstützt und auch bei komplexeren Aufgaben Hilfestellung bietet. Dieses System umfasst verschiedene Komponenten, die je nach Kontext und Benutzeraktion aktiviert werden.

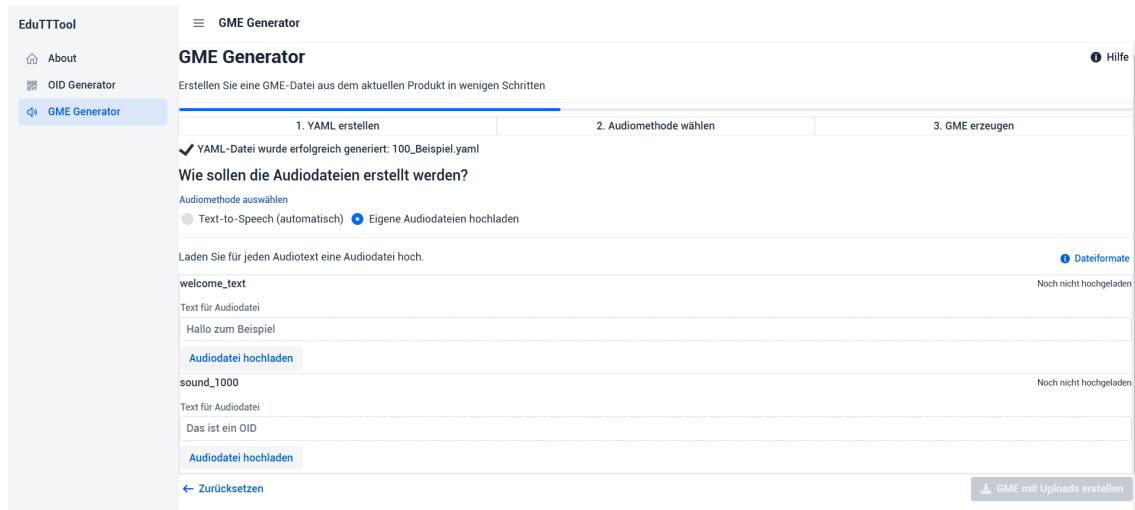


Abbildung 4.8: Screenshot des GME-Generator mit Audioupload

Die About-Seite dient als primärer Einstiegspunkt und bietet eine umfassende Einführung in die Grundkonzepte und Arbeitsabläufe. Sie ist bewusst als separate Ansicht gestaltet, um neuen Benutzern die Möglichkeit zu geben, sich zunächst mit den Grundlagen vertraut zu machen, bevor sie mit der eigentlichen Erstellung beginnen.

Der Welcome-Screen im OID-Generator bietet eine fokussierte Einführung in die spezifischen Funktionen dieses Bereichs und leitet den Benutzer zu den ersten Schritten. Durch die klare Unterteilung in „Neues Produkt erstellen“ und „Existierendes Produkt laden“ wird der Einstieg vereinfacht und die kognitive Belastung reduziert.

Kontextbezogene Hilfe-Icons neben komplizierten Funktionen oder neu eingeführten Begriffen öffnen bei Bedarf Erläuterungsdialoge mit detaillierten Informationen. Diese Just-in-time-Hilfe ermöglicht es Benutzern, genau dann Unterstützung zu erhalten, wenn sie benötigt wird, ohne den Arbeitsfluss zu unterbrechen.

Diese mehrschichtige Hilfestruktur ermöglicht es sowohl Einsteigern als auch erfahrenen Benutzern, effizient mit dem Tool zu arbeiten.

4.4 Zusammenfassung der Anforderungserfüllung

Das entwickelte EduTTTool wurde konsequent auf Basis der in Kapitel 2.1.3 identifizierten Anforderungen konzipiert und implementiert. Tabelle 4.2 dokumentiert systematisch, wie alle 16 funktionalen und nicht-funktionalen Anforderungen im finalen System umgesetzt wurden.

Tabelle 4.2: Zusammenfassung der Anforderungserfüllung im EduTTTool

ID	Anforderung	Umsetzung im EduTTTool	Status
Funktionale Anforderungen			
F-ANF1	Unterstützung gängiger Dokumentformate	Upload-Funktion für PDF- und Bilddateien im Willkommensbildschirm	Erfüllt
F-ANF2	Upload-Funktionalität für bestehende Materialien	Drag-&-Drop Interface und Datei-Upload im Willkommensbildschirm	Erfüllt
F-ANF3	Flexible OID-Code-Gestaltung	Anpassbare Form (Kreis/ Quadrat/ Stern/ Dreieck) und Größe der OIDs über EditProductSidebar	Erfüllt
F-ANF4	Mehrschichtige Audioinformationen	Bis zu vier aufeinander aufbauende Interaktionstexte pro OID	Erfüllt
F-ANF5	Text-to-Speech-Funktionalität	Integrierte TTS-Generierung im GME-Generator (Schritt 2)	Erfüllt
F-ANF6	Speicher- und Druckfunktionen	Multiple Exportformate (PDF, PNG, JSON) mit A4-Optimierung	Erfüllt
F-ANF7	Interaktive Lernfunktionen	Multiple-Choice- und Sequence-Spielmodi mit automatischer Mode-OID	Erfüllt
F-ANF8	Optimierte visuelle Gestaltung	Kontrastreiches UI-Design und anpassbare OID-Darstellung	Erfüllt
F-ANF9	Taktile Differenzierung	Automatische OID-Umrandungen in Prägedateien für taktile Erkennbarkeit	Erfüllt
F-ANF10	Audio-Upload-Option	Upload eigener Audiodateien als Alternative zur TTS-Generierung	Erfüllt
Nicht-funktionale Anforderungen			
NF-ANF1	Browserbasierte Umsetzung	Vaadin-basierte Webanwendung ohne Installation	Erfüllt
NF-ANF2	Intuitive Bedienbarkeit	Aufgabenorientierte UI mit Progressive Disclosure und Welcome Screen	Erfüllt
NF-ANF3	Effizienzorientierung	Automatisierte Workflows und Drag-&-Drop-Funktionalitäten	Erfüllt
NF-ANF4	Kompatibilität mit gängiger Software	Unterstützung Standard-Dokumentformate und A4-Optimierung	Erfüllt
NF-ANF5	Unterstützung verschiedener Produktionsprozesse	Multiple Exportoptionen (Prägedateien, einzelne OIDs, kombinierte Formate)	Erfüllt
NF-ANF6	Flexibilität und Anpassbarkeit	Modulare Architektur mit verschiedenen Spielmodi und Anpassungsoptionen	Erfüllt

5. Evaluation

Die systematische Entwicklung des EduTTTools gemäß den identifizierten Anforderungen bildet die Grundlage für eine empirische Evaluation der praktischen Anwendbarkeit. Im Rahmen einer Nutzerstudie wurde die Anwendung evaluiert. Die Studie verfolgt einen zweifachen Ansatz: die systematische Untersuchung der Usability aus Sicht der Lehrkräfte sowie die Erfassung des pädagogischen Mehrwerts audiotaktile Materialien mit dem Tiptoi-Stift für den inklusiven Unterricht. Die gewonnenen Erkenntnisse sollen die Qualität des entwickelten Tools validieren und konkrete Hinweise für zukünftige Optimierungen liefern.

5.1 Methodisches Vorgehen

Die Evaluation folgte einem Mixed-Methods-Ansatz mit zweiphasigem Design, das eine kontrollierte Laboruntersuchung mit einer Felderprobung im realen Unterrichtskontext kombinierte. Die zentralen Forschungsfragen der Studie lauteten:

1. **Usability:** Wie effektiv und intuitiv können Lehrkräfte das EduTTTool zur Erstellung audiotaktile Unterrichtsmaterialien nutzen?
2. **Pädagogischer Mehrwert:** Inwiefern unterstützen die mit dem EduTTTool erstellten audiotaktile Materialien das Lernen und die Teilhabe von Schülerinnen und Schülern im inklusiven Unterricht?

5.1.1 Studiendesign

Das Studiendesign umfasste zwei aufeinander aufbauende Phasen mit insgesamt fünf strukturierten Komponenten:

1. **Erste Phase (ca. 2 Stunden):** Systematische Nutzerstudie mit standardisiertem Ablauf

Nach einer 20-minütigen Einführung, die den Studienablauf erläuterte und die wesentlichen Tool-Funktionen demonstrierte (Upload von Bildern/PDFs,

Erstellung von Produkten mit OIDs, Konfiguration des Spielmodus, Export), folgte eine 10-minütige Phase der freien Exploration, in der die Teilnehmer das Tool eigenständig unter Anwendung der Think-Aloud-Methode erkunden konnten. Der Kern der Studie bildete eine 30-45-minütige strukturierte Aufgabenbearbeitung mit zwei spezifischen Aufgaben: der Erstellung einer Grafik mit vier OIDs (je zwei mit mehreren Interaktionen) sowie der Erstellung einer Grafik mit 3-6 OIDs und einem Spiel nach Wahl. Anschließend wurden in einer 10-minütigen Phase personenbezogene Daten erhoben und die Usability mittels des SUS-Fragebogens bewertet. Den Abschluss bildete ein 15-minütiges Interview, in dem die erstellten Materialien mit dem Tiptoi-Stift getestet und der pädagogische Mehrwert diskutiert wurde.

2. Zweite Phase (über 2 Wochen): Optionale zweiwöchige Felderprobung im realen Unterrichtskontext

Von 15 Teilnehmenden der Hauptstudie zeigten sechs Interesse an der zweiwöchigen Felderprobung. Zwei Lehrkräfte setzten das Tool erfolgreich im Unterricht ein und nahmen am abschließenden 30-minütigen Online-Interview teil, welches explizit die praktischen Erfahrungen im Unterrichtskontext erfasste.

5.1.2 Datenerhebung

Für die Teilnehmerrekrutierung wurden 60 Schulen (Grundschulen und Bildungseinrichtungen für Blinde und Sehgeschädigte) im Umkreis von Wetzlar und Karlsruhe angeschrieben. Zusätzlich konnten über persönliche Kontakte weitere freiwillige Teilnehmende gewonnen werden. Die Studiensessions fanden direkt an den jeweiligen Schulen statt, um eine authentische Arbeitsatmosphäre zu gewährleisten.

Zur umfassenden Datenerhebung wurde ein multimethodisches Vorgehen gewählt, das sowohl quantitative als auch qualitative Erkenntnisse ermöglichte. Während der freien Exploration und der Aufgabenbearbeitung wurden die Probanden gebeten, ihre Gedanken kontinuierlich zu verbalisieren (Think-Aloud-Methode). Diese Methode gewährte tiefe Einblicke in kognitive Prozesse und Herausforderungen während der Nutzung des Tools. Die Probanden erhielten dabei folgende Instruktion:

„In dieser Studie möchte ich Sie bitten, während der Bearbeitung der Aufgabe laut zu denken. Das bedeutet, dass Sie alles aussprechen, was Ihnen durch den Kopf geht, während Sie die Anwendung nutzen. Es geht nicht darum, Ihre Handlungen zu erklären oder zu rechtfertigen, sondern wirklich Ihre Gedanken laut auszusprechen, als ob Sie mit sich selbst sprechen würden. Es ist völlig in Ordnung, unvollständige Sätze zu verwenden oder Ihre Verwirrung auszudrücken. Bitte sprechen Sie durchgehend und versuchen Sie, keine längeren Pausen entstehen zu lassen. Falls Sie für einen Moment still werden, werde ich Sie freundlich daran erinnern, weiter laut zu denken.“

Zur Einübung dieser Methode wurde eine etablierte Aufwärmübung nach [Will04] durchgeführt, bei der die Teilnehmer die Anzahl der Fenster in ihrer Wohnung zählen und dabei ihre Gedanken verbalisieren sollten.

Ergänzend zu den Think-Aloud-Protokollen wurden die Bildschirmaktivitäten sowie verbale Äußerungen der Probanden während der Testsessions videoaufgezeichnet, um eine detaillierte nachträgliche Analyse zu ermöglichen. Zur quantitativen Bewertung der Benutzerfreundlichkeit kam der System Usability Scale (SUS) zum Einsatz, ein etabliertes und validiertes Instrument zur Erfassung der subjektiven Usability-Bewertung [GBKP13].

Das Datenerhebungsdesign wurde durch semistrukturierte Interviews vervollständigt, die sowohl nach der Hauptstudie als auch nach der Felderprobung durchgeführt wurden. Während sich die Interviews nach der Hauptstudie auf den pädagogischen Mehrwert der erstellten Materialien konzentrierten, erfassten die Online-Interviews nach der Felderprobung explizit die praktischen Erfahrungen im Unterrichtskontext.

5.1.3 Datenanalyse

Die erhobenen Daten wurden mittels einer Kombination aus quantitativen und qualitativen Analysemethoden ausgewertet, um sowohl objektive Usability-Metriken als auch detaillierte Einsichten in spezifische Problembereiche zu generieren.

Quantitative Analyse des SUS-Fragebogens

Die Ergebnisse des SUS-Fragebogens wurden gemäß der standardisierten Auswertungsmethodik nach [Broo96] analysiert. Die SUS-Scores wurden durch Transformation der 5-Punkt-Likert-Skalen-Antworten berechnet: Für Fragen mit positiver Formulierung (Items 1, 3, 5, 7, 9) wurde der Skalenwert um 1 reduziert, für negativ formulierte Fragen (Items 2, 4, 6, 8, 10) wurde 5 minus dem Skalenwert gerechnet. Die Summe aller Items wurde anschließend mit 2,5 multipliziert, um Werte zwischen 0 und 100 zu erhalten.

Aufgrund der begrenzten Stichprobengröße ($n=15$) wurden deskriptive statistische Verfahren angewandt: Mittelwert, Standardabweichung, Median sowie Minimum- und Maximumwerte. Die Standardabweichung wurde nach der Stichprobenformel berechnet:

$$s = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n - 1}}$$

wobei s die Stichprobenstandardabweichung, x_i die einzelnen SUS-Scores, $\bar{x}$ den Mittelwert der Stichprobe und n die Stichprobengröße darstellt. Diese Formel wurde verwendet, da es sich um eine Stichprobe aus der Grundgesamtheit aller potentiellen Nutzer handelt. Die Standardabweichung dient als Maß für die Variabilität der Usability-Bewertungen zwischen den Teilnehmenden.

Die individuellen SUS-Scores wurden entsprechend der etablierten Kategorien von [BaKM09] klassifiziert. Zusätzlich wurde eine Item-Analyse durchgeführt, bei der die Antwortverteilungen der einzelnen SUS-Items in positive, neutrale und negative Bewertungen kategorisiert wurden. Dies ermöglichte die Identifikation spezifischer Usability-Dimensionen, die besonders gut oder schlecht bewertet wurden. Mehrere Studien bestätigen die hohe Reliabilität und Validität der SUS als Instrument zur Usability-Bewertung [BaKM09, BoFL09].

Qualitative und quantitative Analyse der Think-Aloud-Protokolle

Die Analyse der Think-Aloud-Protokolle erfolgte in einem mehrstufigen Verfahren, das sowohl qualitative als auch quantitative Elemente umfasste.

Zunächst wurden alle Aufzeichnungen vollständig durchgehört und alle identifizierten Usability-Probleme dokumentiert. Dabei wurde jedes Problem mit einer präzisen Beschreibung, der Anzahl betroffener Teilnehmender und einer Klassifikation nach funktionalen Systembereichen kategorisiert:

- Bildvorschau (z.B. Zoom-Funktionalität, OID-Aktivierung)
- Bearbeitungsleiste (z.B. OID-Generierung, Interaktionsebenen)
- Spielmodus (z.B. Fragetext-Verständnis, Antworteneingabe)
- Gesamtübersicht (z.B. Navigation)
- Produkt speichern (z.B. Download-Verwechslungen)
- Sonstiges (z.B. technische Probleme, Interface-Elemente)

Nach der initialen Problemidentifikation erfolgte eine quantitative Analyse durch systematisches Zählen und Kategorisieren der aufgetretenen Probleme.

Die quantifizierten Probleme wurden mittels Balkendiagrammen visualisiert, um die häufigsten und schwerwiegendsten Usability-Probleme zu identifizieren. Zusätzlich wurde die Problemverteilung pro Teilnehmendem analysiert, um individuelle Unterschiede in der Usability-Erfahrung aufzuzeigen.

Die beobachteten Usability-Probleme aus den Think-Aloud-Protokollen wurden mit den SUS-Bewertungen abgeglichen, um zu prüfen, ob sich objektive Probleme auch in der subjektiven Wahrnehmung der Teilnehmenden widerspiegeln. Übereinstimmungen und Widersprüche zwischen beiden Datenquellen wurden systematisch analysiert.

Qualitative Analyse der Interviews

Die Auswertung der leitfadengestützten 15-minütigen Interviews erfolgte mittels qualitativer Inhaltsanalyse nach Mayring [MaFe19]. Zunächst wurden alle Audioaufzeichnungen vollständig transkribiert und in einem ersten Durchgang zur Vertrautheit mit dem Material gesichtet. Anschließend wurde ein induktives Kategoriensystem entwickelt, das sich aus den Antworten der Probanden auf die Leitfragen ableitet. Der vollständige Interviewleitfaden ist im Anhang A.3 dokumentiert. Die Kategorienbildung orientierte sich an den thematischen Schwerpunkten der Interviews: Nutzungsbereitschaft, wahrgenommene Vorteile, Mehrwert gegenüber bestehenden Lösungen, Verbesserungsvorschläge und Weiterempfehlungsbereitschaft.

Zur quantitativen Verdichtung der qualitativen Daten wurden Häufigkeitsauszählungen der identifizierten Kategorien vorgenommen. Dabei wurden sowohl eindeutige Ja/Nein-Antworten als auch thematische Nennungen erfasst, wobei Mehrfachnennungen pro Interview nicht beachtet wurden.

Bei den Interviews der Felderprobung (siehe Anhang A.4) wurde ein ähnliches Vorgehen angewandt: Die Analyse erfolgte durch eine systematische Auswertung der 30-minütigen Online-Interviews mit den teilnehmenden Lehrkräften sowie der dokumentierten technischen Probleme bei den nicht erfolgreichen Teilnahmen. Die Interviewtranskripte wurden mittels qualitativer Inhaltsanalyse in Anlehnung an [MaFe19] ausgewertet, wobei sowohl deduktive Kategorien aus den theoretischen Vorannahmen zum inklusiven Lernen als auch induktive Kategorien aus dem Datenmaterial entwickelt wurden. Die Kodierung erfolgte entlang der Hauptdimensionen: technische Umsetzung, Schülerreaktionen, inklusiver Mehrwert und Anforderungen an die Weiterentwicklung. Die technischen Problembeschreibungen der ausgefallenen Teilnehmenden wurden ergänzend dokumentiert und kategorisiert, um kritische Schwachstellen in der praktischen Anwendung zu identifizieren. Durch die Triangulation von Lehrkräfte-Perspektiven, beobachteten Schülerreaktionen und technischen Befunden konnten sowohl Potenziale als auch Herausforderungen des EduTTTools im realen Unterrichtskontext differenziert herausgearbeitet werden.

5.2 Beschreibung der Stichprobe

An der Nutzerstudie nahmen insgesamt 15 Personen teil. Die Rekrutierung erfolgte gezielt im schulischen Umfeld, um eine möglichst praxisnahe Evaluation des EduTT-Tools zu gewährleisten.

Tabelle 5.1: Übersicht der demografischen Daten (n=15)

ID	Alter	Beruf	Schulart	Unterrichtete Stufen		Teil 2
T1	36 - 45	Lehrkraft	SBBZ	Prim	Sek1	
T2	36 - 45	Lehrkraft	SBBZ	Prim	Sek1	
T3	46 - 55	Lehrkraft	SBBZ	Prim		
T4	36 - 45	Lehrkraft	GS	Prim		o
T5	36 - 45	Lehrkraft	GS	Prim		
T6*	56+	Lehrkraft	GS	Prim		o
T7	46 - 55	Lehrkraft	Gym		Sek1	Sek2
T8	46 - 55	Mitarbeiter/in	SBBZ	Prim	Sek1	Sek2
T9	36 - 45	Lehrkraft	Gym		Sek1	Sek2
T10	26 - 35	Lehrkraft	Gym		Sek1	Sek2
T11	46 - 55	Lehrkraft	Gym		Sek1	Sek2
T12	46 - 55	Lehrkraft	Gym		Sek1	Sek2
T13	36 - 45	Lehrkraft	Gym		Sek1	Sek2
T14	46 - 55	Lehrkraft	SBBZ	Prim	Sek1	
T15	26 - 35	Lehrkraft	Gym		Sek1	Sek2

Legende: Gym = Gymnasium, SBBZ = Sonderpädagogisches Bildungs- und Beratungszentrum, Prim = Primarstufe, Sek1 = Sekundarstufe 1, Sek2 = Sekundarstufe 2, x = teilgenommen, o = Interesse geäußert, aber nicht teilgenommen, * = Teilnahme mit iPad statt Laptop

Die Stichprobe (vgl. Tab. 5.1) repräsentiert eine heterogene Gruppe von Lehrkräften verschiedener Schularten und Unterrichtsstufen, was eine breite Perspektive auf die Einsatzmöglichkeiten des Tools ermöglicht. Die Verteilung umfasst sowohl spielerisch-multisensorische Kontexte der Primarstufe als auch fachspezifischere Bereiche der Sekundarstufen.

Eine Besonderheit stellte die Teilnahme von T6 dar, die als einzige Person das EduTTTool auf einem iPad testete, während alle anderen Teilnehmenden Laptops verwendeten. Dies ermöglichte zusätzliche Erkenntnisse zur plattformübergreifenden Nutzbarkeit des Tools.

Für den zweiten Studienteil, die praktische Anwendung im Unterricht, zeigten zunächst sechs Personen Interesse (T4, T6, T7, T10, T13, T14). Von den sechs interessierten Personen setzten zwei Teilnehmende (T7, T10) das Tool erfolgreich im Unterricht ein. Die anderen vier (T4, T6, T13, T14) konnten die Unterrichtserprobung nicht realisieren – teils aufgrund organisatorischer Hindernisse, teils wegen technischer Probleme mit dem Tool oder den entwickelten Materialien.

Die freiwillige Teilnahme sowie das Interesse an innovativen Unterrichtsmethoden als Rekrutierungskriterium deutet auf eine grundsätzlich aufgeschlossene Haltung gegenüber digitalen Werkzeugen hin, was bei der Interpretation der Ergebnisse zu berücksichtigen ist. Die Stichprobengröße von $n=15$ ist für eine formative qualitative Evaluation angemessen, erlaubt jedoch keine statistisch repräsentativen Aussagen.

5.3 Ergebnisse

Im Folgenden werden die Ergebnisse der Nutzerstudie nach den einzelnen Erhebungsmethoden vorgestellt.

5.3.1 Ergebnisse des SUS-Fragebogens

Im Folgenden werden die Ergebnisse des System Usability Scale (SUS) vorgestellt. Der SUS-Fragebogen liefert einen standardisierten Score zwischen 0 und 100 Punkten, wobei höhere Werte eine bessere wahrgenommene Usability indizieren. Die erhobenen Daten zeigen eine überwiegend positive Bewertung des Tools durch die Teilnehmenden.

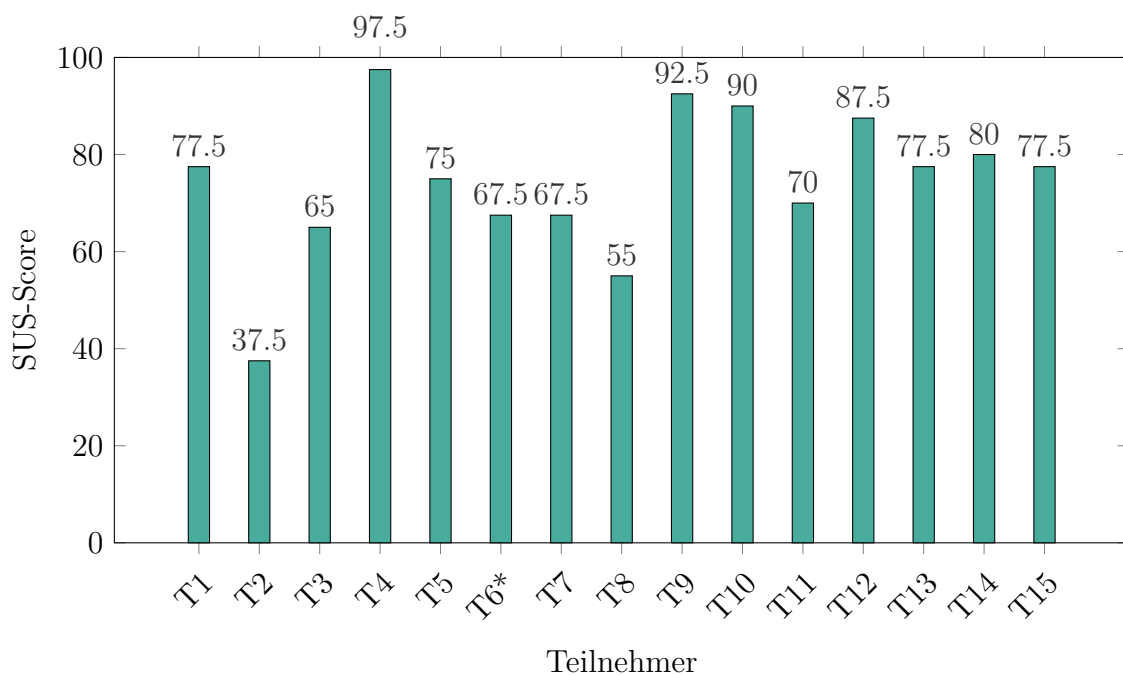


Abbildung 5.1: Individuelle SUS-Scores der Teilnehmer ($n=15$)

Deskriptive Statistik der SUS-Scores

Die Teilnehmenden erreichten einen durchschnittlichen SUS-Score von 74,5 Punkten mit einer Standardabweichung von 15,4. Der Median lag bei 75,0 Punkten, was auf eine leicht rechtsschiefe Verteilung hindeutet. Die Spannweite reichte von 37,5 bis 97,5 Punkten. Abbildung 5.1 zeigt die individuellen Ergebnisse der Teilnehmenden. Nach der Interpretationsskala von [BaKM09] bewerteten zwei Drittel der Teilnehmenden (66,7%) das Tool mit “gut” oder “exzellent”, während nur ein Teilnehmer eine “schlechte” Bewertung abgab (siehe Abb. 5.2).

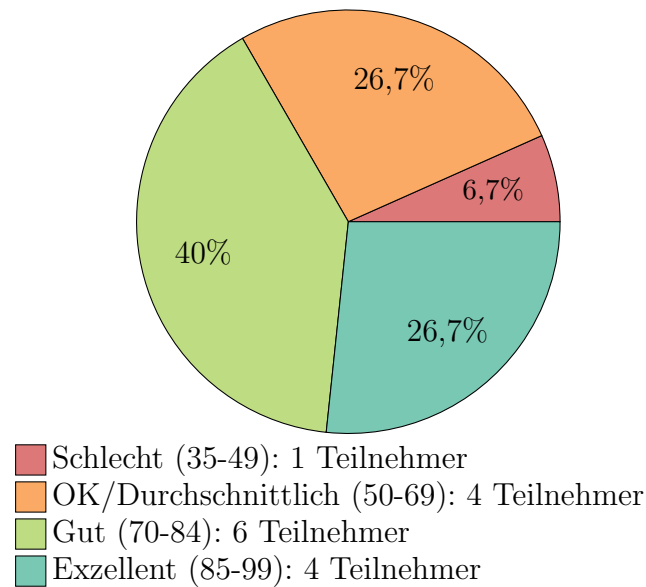


Abbildung 5.2: Verteilung der SUS-Score-Kategorien (n=15) nach [BaKM09]

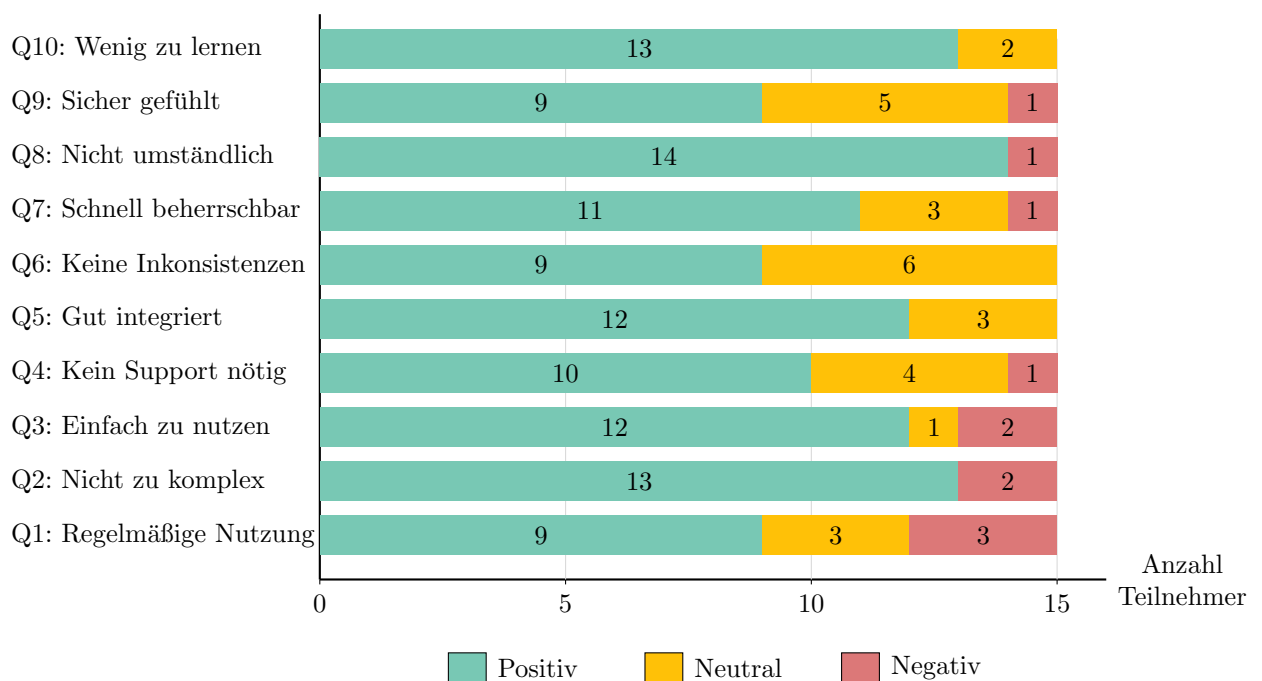


Abbildung 5.3: Antwortverteilung der SUS-Items (n=15)

Analyse der einzelnen SUS-Items

Die Item-Analyse (Abbildung 5.3) zeigt spezifische Stärken und Verbesserungspotenziale des EduTTTools. Besonders hervorgehoben werden können drei zentrale Usability-Aspekte: die intuitive Bedienbarkeit (93% positive Bewertungen bei “nicht umständlich”), die geringe wahrgenommene Komplexität (87% bei “nicht zu komplex”) und der minimale Lernaufwand (87% bei “wenig zu lernen”). Diese Bewertungen zeigen, dass das Tool die grundlegenden Usability-Anforderungen erfüllt.

Verbesserungspotenzial identifiziert die Analyse hingegen bei systemspezifischen Aspekten: 40% der Teilnehmenden äußerten sich neutral bezüglich möglicher Inkonsistenzen und 33% zum Sicherheitsgefühl bei der Nutzung. Diese neutralen Bewertungen deuten auf Unsicherheiten hin, die durch gezieltes Nutzertraining oder Interface-Verbesserungen adressiert werden könnten.

Einordnung der Ergebnisse in den wissenschaftlichen Kontext

Nach der etablierten Bewertungsskala von [BaKM09] repräsentiert ein SUS-Score von 85 oder höher außergewöhnliche Usability, während ein Score unter 70 inakzeptable Usability darstellt. Mit einem Wert von 73,5 Punkten positioniert sich das EduTTTool somit im akzeptablen bis guten Bereich der Usability-Bewertung. Die beobachtete Variabilität in den Bewertungen reflektiert unterschiedliche Vorerfahrungen mit digitalen Tools, wie sie typischerweise in SUS-Studien beobachtet wird.

Die Item-Analyse bestätigt besondere Stärken in den Bereichen Einfachheit der Bedienung und geringem Lernaufwand, was mit der empirisch identifizierten Zweifaktoren-Struktur der SUS übereinstimmt [BoFL09]. Die identifizierten Verbesserungsbereiche bei Systemsicherheit und -konsistenz stellen wichtige Ansatzpunkte für die Weiterentwicklung des Tools dar.

Die Bewertungsverteilung mit nur einem „schlechten“ Score bei überwiegend positiven Urteilen entspricht erfolgreichen Usability-Tests und deutet darauf hin, dass das EduTTTool die Grundanforderungen an ein benutzerfreundliches Bildungswerkzeug erfüllt [BaKM09].

5.3.2 Ergebnisse der Think-Aloud-Protokoll Analyse

Die qualitative Analyse der Think-Aloud-Protokolle ergänzt die quantitativen SUS-Ergebnisse um detaillierte Einsichten in spezifische Usability-Probleme des EduTTTools. Während der SUS-Fragebogen eine Gesamtbewertung der Benutzerfreundlichkeit liefert, ermöglicht die Think-Aloud-Methode die Identifikation konkreter Problemstellen und deren Schweregrad. Die spezifischen Probleme, die durch die iPad-Nutzung bei T6 auftraten, wurden separat betrachtet und flossen nicht in die allgemeine Betrachtung der Probleme im Vergleich zu den anderen mit ein.

Problemverteilung nach Teilnehmenden

Die Analyse der Problemhäufigkeit pro Teilnehmendem zeigt eine erhebliche Variabilität in der Anzahl aufgetretener Usability-Probleme (siehe Abbildung 5.4). Die Spannweite reichte von 0 Problemen (T9) bis zu 12 Problemen (T3), bei einem Durchschnitt von 6,7 Problemen pro Person. Während ein Drittel der Teilnehmenden ($n=5$) zwischen 1 und 5 Probleme erlebte, hatten mehr als die Hälfte ($n=8$) zwischen 7 und 11 Probleme. Lediglich zwei Teilnehmende (T3, T1) wiesen mit 12 bzw. 11 Problemen eine besonders hohe Problembelastung auf.

Der Vergleich mit den SUS-Scores zeigt interessante Zusammenhänge: Teilnehmende mit den höchsten Problemzahlen (T3: 12 Probleme, T1: 11 Probleme) erreichten mittlere SUS-Scores von 65 bzw. 77,5 Punkten (siehe Abbildung 5.1). Umgekehrt erzielten Teilnehmende mit wenigen oder keinen Problemen nicht zwangsläufig die besten Usability-Bewertungen: T9 mit 0 Problemen erreichte einen SUS-Score von

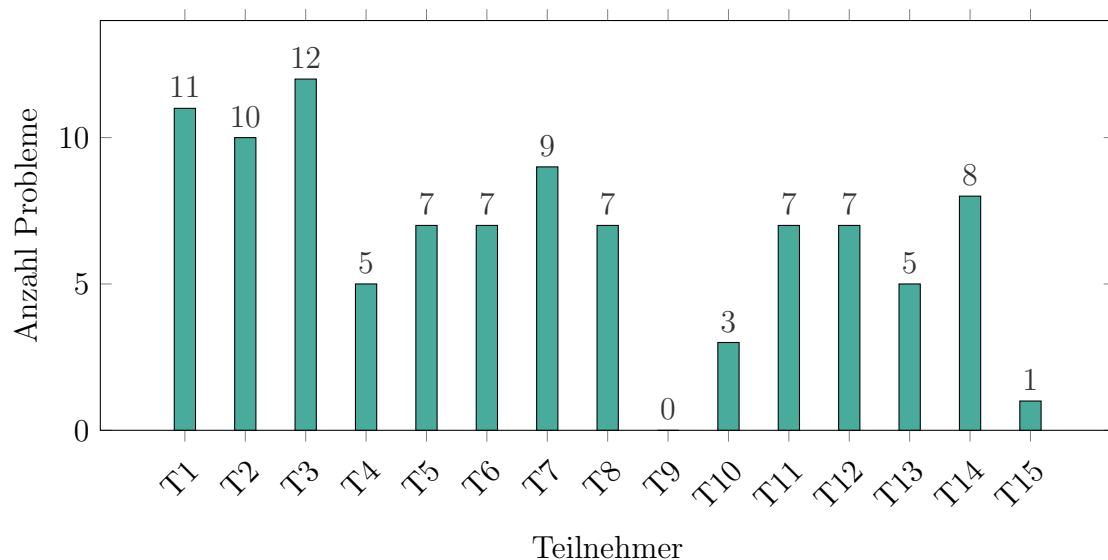


Abbildung 5.4: Anzahl identifizierter Usability-Probleme pro Teilnehmenden (n=15)

92,5 Punkten, während T15 mit nur 1 Problem einen deutlich niedrigeren Score von 77,5 Punkten erzielte. Bemerkenswert ist, dass die höchsten SUS-Scores (T4: 97,5; T9: 92,5; T10: 90 Punkte) nicht ausschließlich bei Teilnehmenden mit wenigen Problemen auftraten. Dies deutet darauf hin, dass die subjektive Usability-Bewertung nicht linear mit der objektiven Problemanzahl korreliert und möglicherweise andere Faktoren wie die Schwere der Probleme oder individuelle Toleranzschwellen eine Rolle spielen. So sticht unter anderem der Wert von T8 hervor mit einem Usability-Score von nur 55, dem zweitschlechtesten Ergebnis, jedoch einer Problemanzahl von 7, was ziemlich genau im mittleren Feld liegt.

Häufigste Einzelprobleme

Zur systematischen Analyse der kritischsten Usability-Probleme wurden zunächst die acht häufigsten Problemkategorien definiert und operationalisiert (siehe Tabelle 5.2).

Die Analyse dieser Problemkategorien zeigt charakteristische Muster in der Art und Schwere der Benutzungshindernisse auf (siehe Abbildung 5.5). Das Balkendiagramm visualisiert sowohl die absolute Häufigkeit der acht identifizierten Hauptprobleme als auch deren unterschiedliche Komplexitätsgrade durch die farbliche Aufschlüsselung zwischen selbstständig gelösten Problemen (grün) und solchen, die eine Erklärung durch den Versuchsleiter erforderten (rot).

Kategorie 1: Systemische Orientierungsprobleme

Das Problem „Zoom unklar“ stellt mit einer Betroffenheitsrate von 60% und einem Hilfsbedarf von 78% der betroffenen Nutzer das gravierendste Usability-Problem dar. Diese Kombination aus hoher Frequenz und geringer Selbstlösungsrate deutet auf eine fundamentale Designschwäche hin, die über oberflächliche Interface-Probleme hinausgeht.

Ähnlich verhält es sich beim Problem „Spielmodus unklar“, das zwar nur ein Drittel der Teilnehmenden betraf, jedoch eine Selbstlösungsrate von null aufweist. Diese

Tabelle 5.2: Definition der häufigsten Usability-Probleme

Problem	Beschreibung
Zoom unklar	Nutzer erkennen nicht, dass das Bild zu stark vergrößert ist und wichtige Bedienelemente außerhalb des sichtbaren Bereichs liegen. Zoom-out-Funktionalität wird nicht gefunden oder verstanden
Prozess unklar	Fundamentale Orientierungsprobleme im Workflow: Nutzer wissen nicht, wo sie beginnen sollen, welche Schritte in welcher Reihenfolge durchzuführen sind, oder was der nächste logische Schritt nach einer Aktion ist
OID generieren	Verwirrung über den Zusammenhang zwischen Texteingabe und OID-Generierung. Nutzer verstehen nicht, dass zuerst Text eingegeben werden muss, bevor eine OID erstellt werden kann, oder sind unsicher über den Generierungsprozess
Datei herunterladen	Nutzer können nicht zwischen dem Speichern des Projekts (JSON-Format) und dem Download der finalen GME-Datei unterscheiden. Unklarheit über verschiedene Dateiformate und deren Verwendungszweck
Fragetext unklar	Nutzer verstehen nicht, wo und wie Fragen für den Spielmodus eingegeben werden. Verwirrung über die Zuordnung von Fragen zu OIDs und die Funktionsweise des Frage-Antwort-Systems
OID aktiv	Unverständnis des Konzepts, dass nur eine OID aktiv bewegt (grün markiert) werden kann. Nutzer erwarten, mehrere OIDs gleichzeitig bewegen zu können oder verstehen die Aktivierungslogik nicht (sofort)
Spielmodus unklar	Fundamentales Unverständnis der Spielmodus-Funktionalität: Wie funktioniert das mehrfache Antippen, wie werden Fragen und Antworten zugeordnet, und wie unterscheidet sich der Spielmodus vom normalen Modus
Neues Produkt	Schwierigkeiten beim Lokalisieren der Funktion für neue Projekte oder Verwirrung zwischen „Neues Produkt erstellen“ und „Existierendes Produkt laden“. Unklarheit über den Startpunkt für neue Projekte

absolute Abhängigkeit von externer Hilfe charakterisiert es als „Usability-Barriere“ – ein Hindernis, das ohne Intervention unüberwindbar bleibt und damit die Benutzererfahrung fundamental beeinträchtigt.

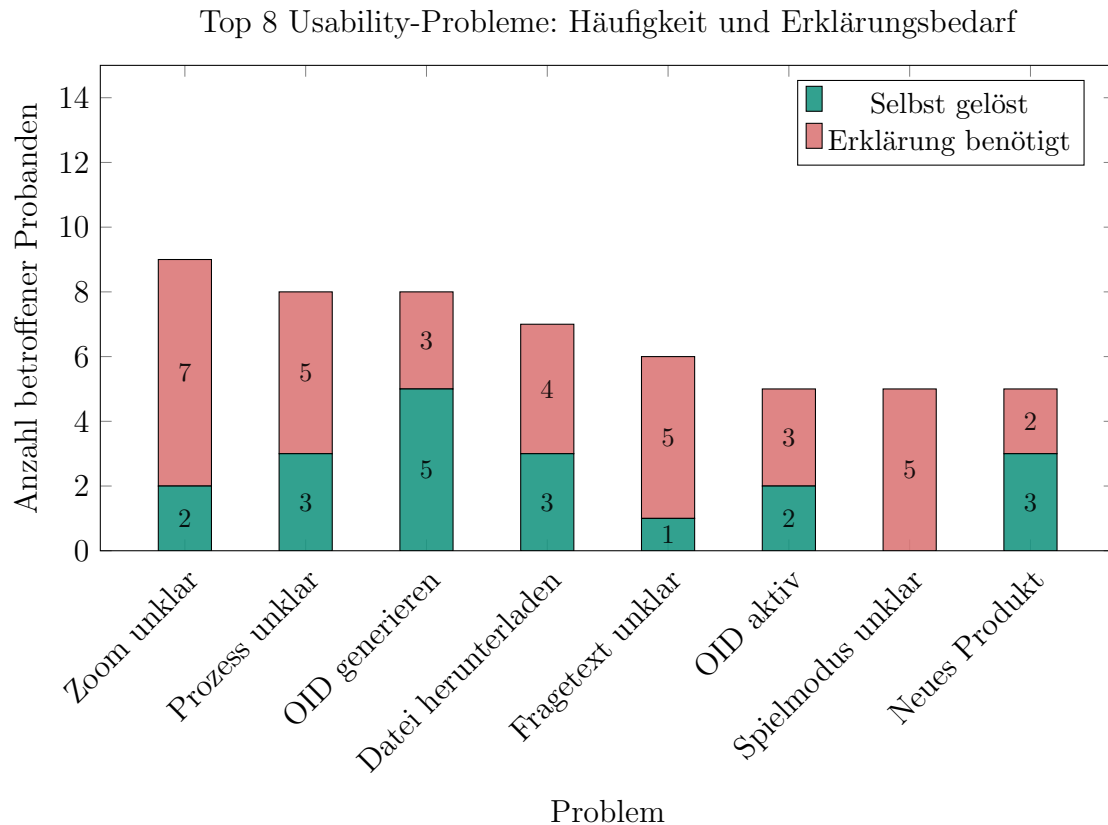


Abbildung 5.5: Usability-Probleme: Häufigkeit und Erklärungsbedarf

Kategorie 2: Adaptive Lernprobleme

Das Problem „OID generieren“ demonstriert ein interessantes Paradoxon: Trotz hoher initialer Verwirrung (53% Betroffenheit) zeigt es die höchste Selbstlösungsrate (63% der Betroffenen). Dies charakterisiert es als „Lernbarriere“ – ein Problem, das durch Exploration und Gewöhnung überwunden werden kann, aber unnötige kognitive Belastung in der Einarbeitungsphase verursacht.

Kategorie 3: Strukturelle Orientierungsdefizite

Das Problem „Prozess unklar“ manifestiert sich als umfassendes Orientierungsdefizit, das verschiedene Workflow-Phasen durchzieht. Die qualitative Analyse der Nutzeräußerungen („Ja es fängt schon damit an, dass ich nicht weiß, wie ich anfangen soll“) offenbart eine Diskrepanz zwischen dem systemseitigen Prozessdesign und den Nutzererwartungen bezüglich der Aufgabenstrukturierung. Mit 63% Hilfsbedarf unter den Betroffenen deutet dies auf systematische Schwächen in der Prozessführung hin.

Die Probleme „Datei herunterladen“ und „Fragetext unklar“ zeigen ausgewogene Lösungsverteilungen, was sie als „Interface-Optimierungspotenziale“ charakterisiert – Probleme, die durch gezielte Designanpassungen ohne grundlegende Systemrestrukturierung behoben werden können.

Spezifische Herausforderungen bei der iPad-Nutzung

Die Nutzung des EduTTTools auf dem iPad (T6) offenbarte gerätespezifische Usability-Probleme, die bei der Laptop-basierten Evaluation nicht auftraten. Besonders

problematisch erwies sich die Touch-Bedienung: Das Unterscheiden zwischen Scrollbewegungen und dem gezielten Verschieben von OIDs gestaltete sich schwierig, wobei die Nutzung des Apple Pencils eine deutliche Verbesserung brachte. Zusätzlich führten Darstellungsprobleme zu einer beeinträchtigten Nutzererfahrung - beim Ausklappen des Menüs überlagerten sich Bedienelemente, und nach dem Speichern von Produkten wurde die Ansicht nicht automatisch aktualisiert. Ein weiteres Problem stellte das Ausbleiben von Feedback-Nachrichten dar, die auf anderen Geräten zur Nutzerführung angezeigt werden. Trotz dieser Einschränkungen erwies sich das Tool als grundsätzlich funktionsfähig auf dem iPad: Mit kurzen Erklärungen zu den spezifischen Besonderheiten konnte P6 alle wesentlichen Funktionen erfolgreich nutzen.

Bemerkenswert ist, dass P6 trotz der iPad-spezifischen Probleme einen SUS-Score von 67,5 Punkten erreichte, was im Bereich der „OK/durchschnittlichen“ Usability-Bewertung liegt und die grundsätzliche Gebrauchstauglichkeit des Tools auch auf Touch-Geräten bestätigt. Die identifizierten Probleme spiegelten sich somit nur geringfügig in der Gesamtbewertung wider. Diese Beobachtungen verdeutlichen, dass das EduTTTool prinzipiell iPad-kompatibel ist, jedoch eine plattformspezifische Optimierung der Touch-Interaktion, der responsiven Darstellung und der Feedback-Mechanismen die Nutzererfahrung erheblich verbessern würde.

Einordnung der qualitativen Ergebnisse

Die Think-Aloud-Analyse bestätigt die grundsätzlich positive Bewertung des EduTTTools aus dem SUS-Fragebogen, zeigt jedoch spezifische Verbesserungsbereiche auf. Besonders kritisch ist die hohe Anzahl von Problemen, die externe Hilfe erfordern (60% aller identifizierten Probleme), was auf grundlegende Designdefizite hinweist, die eine intuitive Nutzung erschweren.

Die Diskrepanz zwischen den positiven SUS-Scores und der teilweise hohen Problembelastung einzelner Teilnehmender unterstreicht die Bedeutung einer kombinierten quantitativ-qualitativen Evaluation. Während der SUS-Fragebogen die generelle Akzeptanz und Zufriedenheit mit dem Tool misst, ermöglicht die Think-Aloud-Methode die Identifikation konkreter Usability-Barrieren, die in der retrospektiven Gesamtbewertung möglicherweise weniger gewichtet werden.

Die identifizierten Hauptproblembereiche – insbesondere die Zoom-Funktionalität, die Prozessführung und der Spielmodus – zeigen deutliche Ansatzpunkte für iterative Designverbesserungen. Die Tatsache, dass bestimmte Probleme (wie „Spielmodus unklar“) von keinem Teilnehmenden selbstständig gelöst werden konnten, während andere (wie „OID generieren“) mehrheitlich selbst bewältigt wurden, deutet auf unterschiedliche Kategorien von Usability-Problemen hin, die verschiedene Lösungsansätze erfordern.

Diese Ergebnisse unterstreichen die Notwendigkeit einer nutzerzentrischen Weiterentwicklung des EduTTTools, bei der die identifizierten Usability-Probleme systematisch adressiert werden, um die bereits vorhandene positive Grundhaltung der Lehrkräfte durch eine verbesserte Benutzerführung zu stärken.

Zusätzliche Beobachtungen

Neben den systematisierten Usability-Problemen offenbarten die Think-Aloud-Protokolle weitere aufschlussreiche Aspekte: Mehrere Teilnehmende reflektierten spontan über inklusive Anwendungsszenarien (T1: schwarze Umrandung für SuS mit

Restsehvermögen; T3: Melodien statt Audiotexte) und entwickelten eigenständig didaktische Ideen (T14: mehrere Fragen hinterlegen, durch mehrmaliges Tippen). Gleichzeitig wurden technische Herausforderungen wie WLAN-abhängige Stabilitätsprobleme dokumentiert (T2, T14), die über reine Interface-Probleme hinausgehen. Besonders bei T2, der erhebliche WLAN-Probleme erlebte, könnte dies den vergleichsweise niedrigen SUS-Score von 37,5 Punkten beeinflusst haben. Bemerkenswert ist auch die große Bandbreite in der technischen Vorerfahrung der Lehrkräfte, die von ausgeprägtem Explorationsverhalten (T15) bis hin zu dem expliziten Wunsch nach strukturierten Anleitungen (T7) reichte.

5.3.3 Ergebnisse der Interview-Analyse

Die qualitative Analyse der 14 von 15 durchgeführten Interviews mit Lehrkräften zeigt eine eindeutig positive Bewertung des entwickelten EduTTTools zur Erstellung audio-taktiler Unterrichtsmaterialien. Aus technischen Gründen fehlt dabei das Interview mit T4.

Nutzungsbereitschaft und Akzeptanz

Die Bereitschaft zur unterrichtlichen Nutzung erwies sich als außerordentlich hoch: Alle 14 Befragten würden die Materialien nutzen, 13 von 14 (92,9%) auch selbst erstellen. Lediglich T2 äußerte Vorbehalte aufgrund ihrer spezifischen Schülerschaft mit schweren Mehrfachbehinderungen, was neben den bereits erwähnten WLAN-Problemen den niedrigen SUS-Score erklären könnte. Drei Lehrkräfte bevorzugten sogar die eigenständige Erstellung zur besseren Anpassung an ihre Lerngruppen:

„Ich finde es deshalb eigentlich ganz gut, wenn ich es selber erstelle, weil es dann einfach angepasst ist auf genau die Situation, in der ich das jetzt einsetzen möchte.“ (T12)

Wahrgenommene Vorteile

Die Analyse der Begründungen für die Toolnutzung ergab sechs zentrale Kategorien (siehe Tabelle 5.3).

Tabelle 5.3: Hauptvorteile des TipToi-Tools aus Sicht der Lehrkräfte (n=14)

Kategorie	Häufigkeit
Mehrere Sinneskanäle	14
Einfache Erstellung	14
Für alle SuS einsetzbar	10
Selbstständigkeit der SuS	9
Motivation/Interaktivität	9
Differenzierung möglich	8

Als bedeutsamste Vorteile erweisen sich die Ansprache mehrerer Sinneskanäle und die einfache Erstellung der Materialien. Die vielseitige Einsetzbarkeit für alle SuS wird ebenfalls hoch geschätzt, wobei besonders hervorgehoben wurde, dass die Materialien sowohl für Sehende als auch für Sehgeschädigte Vorteile bieten und gemeinsames Arbeiten ermöglichen. Auch andere Barrieren wie Lese-Rechtschreib-Schwäche

oder Deutsch als Zweitsprache könnten laut Probanden durch die Unterrichtsmaterialien überwunden werden. Weitere wichtige Aspekte sind die Förderung der Selbstständigkeit der Lernenden sowie die motivierenden und interaktiven Eigenschaften der Materialien.

Ein Proband verdeutlicht den Aspekt der einfachen Erstellung folgendermaßen:

„Also das ging ja jetzt relativ schon schnell, obwohl ich es das erste Mal gemacht habe. Also ich bin begeistert, wir brauchen sonst sehr viel länger, um Materialien zu erstellen.“ (T9)

Mehrwert gegenüber bestehenden Lösungen

Die Befragten identifizierten verschiedene Vorteile der entwickelten Lösung gegenüber anderen Unterrichtsmaterialien, wie reinen Schwellkopien oder anderen Audiostiften. Tabelle 5.4 gibt einen Überblick über die häufigsten Nennungen.

Tabelle 5.4: Mehrwert gegenüber konventionellen Unterrichtsmaterialien (n=14)

Mehrwert	Häufigkeit
Spielfunktionalität	10
Mehrfaches Tippen (mehr Informationen)	9
Selbstständiges Lernen	6
Audio-Funktionalität	5
Bessere Differenzierung	4
Intuitive Nutzung durch SuS	4

Besonders hervorzuheben ist die Möglichkeit, umfangreiche Textinformationen platzsparend in der Abbildung zu verankern:

„Wenn ich ein ähnliches System in Braille hinterlegen würde, wäre das einfach unglaublich viel Text“ (T8)

Ein weiterer zentraler Vorteil liegt in der erhöhten Selbstständigkeit, welche bereits bei der generellen Nutzung häufig genannt wurde (neun Nennungen):

„Bei uns ist es so, dass die Kinder ganz oft differenziert arbeiten. [...] Und deswegen ist alles gut, was mich entlastet, also was die Erklärung von mir wegnimmt und das würde ja dann der Stift übernehmen.“ (T1)

Auch gegenüber bestehenden Audio-Stiften zeigten sich deutliche Vorteile. Neun der 14 Probanden (64%) kannten bereits den Anybook-Reader, drei weitere Audio-Stifte wie PenFriend oder Ting. Trotz dieser Vorerfahrungen sahen die Lehrkräfte klare Alleinstellungsmerkmale des TipToi-Stifts, insbesondere den Spielmodus und die Funktion des mehrfachen Tippens (siehe Tab. 5.4):

„Der kann [...] einfach mehr als der Anybook-Reader, gerade durch diese spielerische Version, [...] das kann der Anybook-Reader nicht.“ (T3)

Bemerkenswert ist, dass digitale Displays als Alternative überhaupt nicht erwähnt wurden. Lediglich der Tactonom Reader fand zweimal Erwähnung, wobei sowohl Vor- als auch Nachteile benannt wurden. Als Vorteil wurde hervorgehoben, dass das gesamte Arbeitsblatt auditiv erkundet werden kann, ohne dass spezifische Codes gesucht werden müssen – im Gegensatz zu den punktuellen Codes des EduTTTools, die zunächst lokalisiert werden müssen. Als problematisch wurde hingegen die mangelnde Handlichkeit des Geräts beschrieben:

„[...] und das Gerät steht bei dem Schüler zu Hause, weil es schwer zum Transportieren ist. Diesen Tiptoi-Stift kann ich ja wirklich in die Tasche packen.“ (P14)

Gesamtbewertung und Optimierungspotenzial

Trotz der positiven Grundeinstellung zum Tool identifizierten die Befragten durchaus Verbesserungspotenzial. Die Analyse der Funktionswünsche ergab verschiedene Kategorien, wobei erweiterte Spielmöglichkeiten mit zehn Nennungen den häufigsten Wunsch darstellten. Die Befragten wünschten sich zusätzliche Spielmodi und die Möglichkeit, mehrere Fragen pro Arbeitsblatt zu integrieren. Als zweitwichtigster Aspekt wurde die Sprachqualität der automatisch generierten Audiodateien genannt (drei Nennungen), gefolgt vom Wunsch nach einer Austauschplattform für erstellte Materialien (drei Nennungen).

Bemerkenswert ist, dass drei Befragte keine konkreten Verbesserungsvorschläge äußerten, was auf eine hohe Zufriedenheit mit der bestehenden Funktionalität hindeutet. Obwohl anzunehmen ist, dass eine längere Nutzungsdauer und vertiefte Erfahrung mit dem Tool zusätzliche Funktionswünsche hervorbringen würde, zeigen die ersten Eindrücke der Befragten bereits ein differenziertes und überwiegend positives Bild der entwickelten Lösung.

Die konstruktiven Verbesserungsvorschläge stehen der grundsätzlich hohen Akzeptanz des Tools nicht entgegen: 13 von 14 Probanden (93%) würden das Tool Kolleginnen und Kollegen empfehlen. Als Hauptgründe wurden die einfache Bedienung (acht Nennungen), die motivierende Wirkung (sechs Nennungen) und die Förderung der Selbstständigkeit (fünf Nennungen) genannt.

„Ich finde es toll. Ich bin total begeistert davon und ich bin sehr, sehr beeindruckt [...] was du daraus gemacht hast im Rahmen deiner Arbeit.“ (P12)

5.3.4 Praxiserfahrungen aus der Felderprobung

Die zweiwöchige Felderprobung war ursprünglich für sechs interessierte Lehrkräfte (T4, T6, T7, T10, T13, T14) geplant, konnte jedoch nur von zwei Teilnehmenden (T7 und T10) erfolgreich durchgeführt werden. Diese setzten audiotaktile Materialien erfolgreich in ihrem Unterricht ein und lieferten durch 30-minütige Online-Interviews vertiefte Einblicke in die praktische Anwendung des EduTTTools. Die Erfahrungen dokumentieren sowohl die Potenziale als auch die praktischen Herausforderungen beim Einsatz im realen Unterrichtskontext.

Technische und organisatorische Herausforderungen

Die Felderprobung konnte lediglich von zwei der ursprünglich sechs interessierten Lehrkräfte erfolgreich durchgeführt werden. Diese hohe Ausfallquote von 67% deutet auf systematische Probleme in der praktischen Anwendbarkeit des Tools hin. Während bei Lehrkraft T4 organisatorische Gründe unabhängig vom Tool selbst zur Nichtteilnahme führten, deuten die übrigen Ausfälle auf systematische Probleme in der praktischen Anwendbarkeit des Tools hin. Lehrkraft T6 konnte die Felderprobung aufgrund von Druckproblemen beim Einsatz mobiler Endgeräte nicht durchführen. Konkret zeigten von iPad oder iPhone gedruckte Dateien eine fehlerhafte Darstellung mit schwarzem Hintergrund und verzerrten Linien. Da ausschließlich das MacBook einer Kollegin eine korrekte Ausgabe ermöglichte, war eine autonome Durchführung der Felderprobung nicht realisierbar. Diese Problematik weist auf unzureichende plattformübergreifende Kompatibilität hin.

Die inkonsistente Benutzerführung des Tools führte dazu, dass Lehrkraft T14 nicht erfolgreich Schwellkopien erstellen konnte. Im Gegensatz zu anderen Ausgabeformaten, bei denen die entsprechenden Einstellungen unmittelbar vor dem Download konfiguriert werden können, muss die schwarze Umrandung der OIDs bereits während der Materialerstellung in einer separaten Einstellung aktiviert werden. Ohne diese präventive Konfiguration bleiben die OIDs haptisch nicht erfassbar, wodurch das Material für den intendierten Zweck unbrauchbar wird. Diese Inkonsistenz in der Benutzerführung stellt eine bedeutende Usability-Schwäche dar.

Bei Lehrkraft T13 trat eine besonders komplexe Problematik auf. Nach anfänglichen Schwierigkeiten mit dem eigenen Audio-Upload funktionierten sowohl die Materialerstellung als auch der Druckvorgang ordnungsgemäß. Beim anschließenden Test wurden jedoch weder die hochgeladenen Audiodateien noch die automatische Text-to-Speech-Variante wiedergegeben. Stattdessen erschien die Fehlermeldung, dass ein Stift mit Aufnahmefunktion für das Produkt erforderlich sei. Besonders aufschlussreich war die Beobachtung, dass derselbe Stift mit einer von einer Kollegin erstellten GME-Datei mittels EduTTTool problemlos funktionierte. Diese Tatsache weist auf eine spezifische Problematik der verwendeten GME-Datei hin. Die Analyse legt nahe, dass die eingesetzte Produkt-OID 140 bereits herstellerseitig durch Ravensburger vordefiniert ist. Infolgedessen greift der Stift auf die werkseitige Konfiguration zurück, anstatt die individuell erstellte GME-Datei zu berücksichtigen. Diese Hypothese wird durch das unterschiedliche Verhalten des Stifts bei verschiedenen GME-Dateien gestützt und deutet darauf hin, dass vordefinierte Produkt-OIDs die Verwendung benutzerdefinierter Konfigurationen verhindern können. Zusätzlich traten wiederholt Probleme mit fehlenden OIDs in der JSON-Datei auf, obwohl bewusst die letzte funktionsfähige Version gespeichert worden war. Diese Art von Speicherungsfehlern ist bei dem EduTTTool bislang nicht dokumentiert. Die Kombination aus der problematischen GME-Datei-Konfiguration und instabiler Zwischenspeicherung führte schließlich zum Abbruch der Felderprobung durch T13.

Unterrichtliche Implementierung und Schülerreaktionen

Die erfolgreiche Felderprobung ergab folgende Ergebnisse: T7 setzte das Material im Chemie-Leistungskurs zur Erarbeitung eines Reaktionsmechanismus ein, während T10 eine Anatomie-Abbildung des Auges in der Oberstufe Biologie verwende-

te. Beide Einsätze erfolgten in Selbsterarbeitungsphasen, wobei die Materialien als Ergänzung zu bestehenden Arbeitsblättern fungierten.

Die Schülerreaktionen waren durchweg positiv und bestätigten die in den initialen Interviews identifizierten Mehrwerte. T10 berichtet von deutlich gesteigerter Motivation: „Also, man hat auch gemerkt, der Spieltrieb war dann erwacht. Er musste dann alle Codes natürlich dann testen“ (T10). Diese intrinsische Motivation führte zu intensiver Auseinandersetzung mit den Lerninhalten, auch wenn dies teilweise den geplanten Unterrichtsverlauf beeinflusste.

Besonders bemerkenswert war die spontane Reflexion der Schülerinnen und Schüler über den Einsatz der Technologie. T7 schildert eine Diskussion, in der die Lernenden eigenständig die Vor- und Nachteile verschiedener Einsatzszenarien abwägten und zu dem Schluss kamen, dass die Materialien „bestimmt, ja, ganz gut ist, nochmal Erklärungen zu bekommen, ohne dass man den ganzen Text da nochmal lesen muss“ (T7).

Inklusiver Mehrwert in der Praxis

Die praktischen Erfahrungen bestätigten das inklusive Potenzial der audiotaktilen Materialien eindrucksvoll. T7 beschreibt erfolgreiche Kooperationen zwischen sehenden und blinden Schülerinnen und Schülern: „die haben halt dann mit einem Sehenden zusammengearbeitet [...] dann hat halt der Nachbar getippt und konnten sie halt dann hören, was an der Stelle gesagt wurde“. Diese Form der Zusammenarbeit entstand spontan und wurde von den Lernenden als bereichernd empfunden.

P10 betont die universelle Einsetzbarkeit: „der Stift ist ja für alle Schüler was. Also nicht nur für die Blinden und Sehbehinderten“ und verweist auf Erfahrungen mit geistig beeinträchtigten Lernenden, bei denen sprechende Stifte erfolgreich eingesetzt werden. Die Materialien ermöglichen es, dass „alle vielleicht auch an einer Abbildung sitzen können“ (T10), was die soziale Integration fördert und den Vorbereitungsaufwand für Lehrkräfte reduziert.

Technische Aspekte und Materialqualität

Die Felderprobung deckte wichtige technische Erkenntnisse auf, die für die praktische Nutzung relevant sind. T10 identifizierte Herausforderungen bei der OID-Größe und -Erkennbarkeit: Bei einer Größe von 7mm ohne schwarze Umrandung waren einige OIDs für sehbeeinträchtigte Lernende nicht erkennbar, während die Kombination aus Größe 7 und schwarzer Umrandung von 18 Pixeln die Stift-Erkennung beeinträchtigte. Diese Problematik entstand, weil das EduTTTool beim Hinzufügen der schwarzen Umrandung die eigentliche OID-Größe reduziert – ein Umstand, der der Lehrkraft zunächst nicht bewusst war. Erst durch die Vergrößerung der OIDs auf 10 mm bei Beibehaltung der 18-Pixel-Umrandung konnte eine zuverlässige Funktionalität erreicht werden. Für zukünftige Entwicklungen sollte das Tool dahingehend optimiert werden, dass die Umrandung außerhalb der OID hinzugefügt wird, ohne deren Größe zu beeinträchtigen.

Ein wesentlicher Kritikpunkt betraf die Sprachqualität der automatischen Text-zu-Sprache-Funktion. T7 berichtet von Ausspracheproblemen bei Fachbegriffen: „die Sprachausgabe hat nicht Ethen [e'te:n] (Betonung auf der zweiten Silbe) gesagt, sondern Ethen ['e:tən] (Betonung auf der ersten Silbe)“. Ein blinder Schüler bestätigte diese Problematik durch Vergleich mit professioneller Screenreader-Software und regte eine Verbesserung der Sprachausgabe an.

Didaktische Erkenntnisse

Die praktische Nutzung offenbarte wichtige didaktische Aspekte der Informationsstrukturierung. T7 implementierte ein System mit zwei Informationsebenen pro OID, stellte jedoch fest, dass die Lernenden nicht wussten, welche OIDs zusätzliche Informationen enthielten. Dies führte zu der Erkenntnis, dass „man das vielleicht einfach vorher einplanen [muss], dass man das, ja, kommuniziert“ (P7).

P10 nutzte konsequent zwei Ebenen für alle OIDs (Name und Funktion), was zu einer klareren Struktur führte. Beide Lehrkräfte bestätigten den Mehrwert der Mehrschichtigkeit: Die erste Ebene ermöglichte eine schnelle Orientierung, während die zweite Ebene vertiefte Informationen bot, ohne die Abbildung mit Text zu überladen.

Anforderungen an die Weiterentwicklung

Aus den Praxiserfahrungen ergaben sich konkrete Verbesserungsvorschläge, die die Benutzerfreundlichkeit erheblich steigern würden. Als wichtigste Funktion wurde die Möglichkeit des Grafik-Austauschs identifiziert: „kann ich die OIDs auch irgendwie kopieren oder kann ich die Grafik einfach tauschen?“ (T7). Diese Funktion würde besonders bei der Verwendung paralleler Materialien in Schwarz- und Brailleschrift den Arbeitsaufwand reduzieren.

Weitere gewünschte Funktionen umfassen die Unterstützung des A3-Formats, da „wir haben halt auch bei uns die Möglichkeit, auf A3 zu schwellen“ (T7), sowie flexiblere Spielmodi, die eine teilweise Nutzung von OIDs in Reihenfolge-Spielen ermöglichen würden.

Die Schülerinnen und Schüler selbst äußerten den Wunsch nach mehreren Spielmodi pro Abbildung, was T10 als Indikator für das hohe Motivationspotenzial der interaktiven Elemente interpretiert: „der hätte auch sich gewünscht, dass er mehr spielen kann“.

Nachhaltigkeit und Weiterempfehlung

Beide Lehrkräfte bestätigten ihre Absicht zur weiteren Nutzung und aktiven Weiterempfehlung des Tools. T7 plant die Anschaffung weiterer Tiptoi-Stifte, während T10 bereits Kolleginnen und Kollegen für das Tool begeistern konnte. Die Praxistauglichkeit wird durch die Einschätzung bestätigt, dass der Erstellungsaufwand angemessen ist und mit zunehmender Erfahrung deutlich reduziert wird.

5.4 Diskussion

Die vorliegende Evaluation des EduTTTools liefert wichtige Erkenntnisse sowohl für die praktische Anwendbarkeit der entwickelten Autorensoftware als auch für die theoretische Diskussion um inklusive Bildungstechnologien. Im Folgenden werden die Ergebnisse systematisch eingeordnet, die Beantwortung der Forschungsfragen reflektiert und methodische Limitationen diskutiert.

5.4.1 Bewertung der technischen Umsetzung

Gesamtbewertung der Benutzerfreundlichkeit

Die SUS-Ergebnisse (Durchschnitt: 74,5 Punkte) positionieren das EduTTTool im „guten“ Bereich nach [BaKM09] und bestätigen grundsätzlich die erfolgreiche Umsetzung der nicht-funktionalen Anforderungen nach intuitiver Bedienbarkeit (NF-ANF2) und browserbasierten Zugänglichkeit (NF-ANF1). Die überdurchschnittlich positiven Bewertungen bei „nicht umständlich“ (93% positive Bewertungen) und „wenig zu lernen“ (87% positive Bewertungen) bestätigen die erfolgreiche Umsetzung der Anforderung nach Effizienzorientierung (NF-ANF3) und unterstreichen die Praxistauglichkeit der entwickelten Lösung. Trotz dieser grundsätzlich positiven Bewertungen deckt die Think-Aloud-Analyse jedoch systematische Designschwächen auf, die die praktische Nutzung beeinträchtigen. Besonders problematisch erweist sich das „Zoom unklar“-Problem mit 60% Betroffenheit und 78% Hilfsbedarf, das eine fundamentale Verletzung des Prinzips der „Visibility“ nach [Lidw10] darstellt. Die Kategorisierung der Usability-Probleme in „Systemische Orientierungsprobleme“, „Adaptive Lernprobleme“ und „Strukturelle Orientierungsdefizite“ verdeutlicht unterschiedliche Interventionsbedarfe, wobei systemische Orientierungsprobleme grundlegende Designrevisionen erfordern, während adaptive Lernprobleme durch Nutzergewöhnung überwunden werden können.

Kritische Verbesserungsbedarfe

Die qualitative Analyse identifizierte drei kritische Problembereiche, die vorrangig adressiert werden sollten:

- **Zoom-Funktionalität:** Als häufigstes und schwerwiegendstes Problem (60% Betroffenheit, 78% benötigten Hilfe) erfordert die Zoom-Funktion eine grundlegende Überarbeitung der Benutzerführung.
- **Prozessführung:** Die mangelnde Orientierung im Workflow betraf 53% der Teilnehmenden. Eine verbesserte Navigation und klarere Prozessvisualisierung könnten hier Abhilfe schaffen.
- **Spielmodus-Konfiguration:** Das Problem, dass alle betroffenen Teilnehmenden (33%) externe Hilfe benötigten, macht diesen Bereich zu einer Priorität für Redesign-Maßnahmen.
- **Sprachqualität:** Die Text-to-Speech-Funktion zeigte Probleme bei der korrekten Aussprache von Fachbegriffen und erfordert eine technische Optimierung für den fachspezifischen Einsatz.

Erweiterte Funktionswünsche

Die Evaluation identifizierte konkretes Entwicklungspotential für zukünftige Versionen des EduTTTools. Die Lehrkräfte äußerten folgende prioritäre Funktionswünsche:

- **Mehrere Spiele pro Arbeitsblatt:** Mit zehn Nennungen der am häufigsten gewünschte Funktionsumfang
- **Grafik-Austausch bei OID-Beibehaltung:** Aus der Felderprobung als wichtigste Funktion identifiziert, um parallele Materialien in Schwarz- und Brailleschrift effizienter zu erstellen
- **Erweiterte Spielmodi:** Zusätzliche Spielvarianten und flexiblere Reihenfolge-Spiele mit teilweiser OID-Nutzung
- **A3-Format-Unterstützung:** Für die Erstellung von Schwellkopien

Diese konstruktiven Verbesserungsvorschläge stehen der grundsätzlich hohen Akzeptanz des Tools nicht entgegen, sondern zeigen Potential für eine nutzerorientierte Weiterentwicklung auf.

5.4.2 Bewertung des pädagogischen Mehrwerts

Bestätigung theoretischer Anforderungen

Die Interview-Ergebnisse bestätigen die in Kapitel 2.1.3 theoretisch abgeleiteten Anforderungen an inklusive Unterrichtsmaterialien. Die Betonung der Selbstständigkeitsförderung entspricht dem Konzept der Autonomieförderung nach [Walt22]. Die Differenzierungsmöglichkeiten spiegeln die Relevanz von Binnendifferenzierung als methodisches Fundament inklusiven Unterrichts wider [Wilh09] und erfüllen die Anforderung nach adaptiver Flexibilität.

Besonders bedeutsam ist die spontane Reflexion der Lehrkräfte über inklusive Anwendungsszenarien, die Potenzial für eine breite inklusive Anwendung über die ursprünglich anvisierte Zielgruppe hinaus zeigt. Diese Beobachtung steht im Einklang mit den von [FLLH22] diskutierten Potenzialen digitaler Medien zur Überwindung sprachlicher Barrieren und zur Ermöglichung gleichberechtigter Teilnahme.

Multimodale Zugänglichkeit in der Praxis

Die von T7 beobachtete spontane Kooperation zwischen sehenden und sehbeeinträchtigten SuS („die haben halt dann mit einem Sehenden zusammengearbeitet“) bestätigt die theoretischen Annahmen zur Förderung gemeinsamer Lernprozesse. Diese Beobachtung ist besonders wertvoll, da sie die von [LaHo17] kritisierte Segregation durch spezialisierte Hilfsmittel aktiv überwindet. Die universelle Nutzbarkeit, die T10 betont („der Stift ist ja für alle Schüler was“), entspricht den Prinzipien des Universal Design for Learning (UDL) nach [uni18] und demonstriert die erfolgreiche Umsetzung der Anforderung nach multimodaler Zugänglichkeit aus Kapitel 2.1.1.

5.4.3 Gesamtbewertung

Für eine abschließende Bewertung des EduTTTools müssen sowohl die erreichten Verbesserungen gegenüber bestehenden Lösungen als auch die methodischen Grenzen der vorliegenden Evaluation berücksichtigt werden.

Positionierung gegenüber bestehenden Ansätzen

Die in Kapitel 2.2.4 identifizierte Lücke zwischen kostengünstigen, funktionsbegrenzten Audio-Stiften und prohibitiv teuren Systemen wird erfolgreich adressiert. Mit etwa 50€ Anschaffungskosten pro Tiptoi-Stift sowie der zusätzlichen Spielfunktion positioniert sich die Lösung optimal zwischen dem Anybook Reader (110€ ohne Spielfunktion) und Tactonom Reader (4.500€ mit Spielfunktion).

Während audiotaktile Displays, Tactonom Reader und andere Systeme primär hinsichtlich technischer Funktionalität in Laborstudien untersucht wurden, berücksichtigt die vorliegende Arbeit erstmals systematisch die in Kapitel 2.1.3 identifizierten zentralen Anforderungen inklusiver Unterrichtsmaterialien: Autonomieförderung, systemübergreifende Kompatibilität für die heterogene Bildungslandschaft, multimodale Zugänglichkeit inklusive Stigmatisierungsvermeidung sowie adaptive Flexibilität im realen Schulkontext. Die dokumentierten Vorteile - von der einfachen Erstellung bis zu vielseitigen Differenzierungsmöglichkeiten - wurden bei vergleichbaren Technologien bislang nicht im Kontext inklusiver Bildungsanforderungen erfasst.

Methodische Reflexion und Limitationen

Die gewählte Kombination aus quantitativen und qualitativen Methoden erwies sich als zielführend. Dennoch weist die Studie mehrere methodische Limitationen auf, die bei der Interpretation der Ergebnisse berücksichtigt werden müssen. Die geringe Teilnehmerzahl ($n=15$) erlaubt keine statistisch repräsentativen Aussagen oder valide Analysen demografischer Einflussfaktoren. Die freiwillige Rekrutierung technologieaffiner Lehrkräfte führt zu einem Selektionsbias, der die Übertragbarkeit der Ergebnisse auf die Grundgesamtheit einschränkt.

Besonders kritisch ist die hohe Ausfallquote bei der praktischen Unterrichtserprobung (vier von sechs interessierten Teilnehmenden konnten das Tool nicht einsetzen). Diese systematischen Implementierungsbarrieren relativieren die positiven Laborergebnisse erheblich und deuten auf eine Diskrepanz zwischen kontrollierter Evaluation und realer Unterrichtspraxis hin. Die dokumentierten Ausfallgründe (organisatorische Hindernisse, technische Probleme) verdeutlichen, dass die gemessene Usability unter idealen Testbedingungen die praktische Einsatzfähigkeit möglicherweise überschätzt.

Fazit

Das EduTTTool stellt trotz identifizierter Usability-Probleme einen bedeutsamen Fortschritt für die inklusive Unterrichtspraxis dar. Die erfolgreiche Kombination aus kostengünstiger Technologie (ca. 50€), multimodaler Zugänglichkeit und pädagogischer Flexibilität schließt eine wichtige Lücke im Spektrum verfügbarer Hilfsmittel. Besonders die spontan beobachtete kooperative Nutzung durch sehende und sehbeeinträchtigte Schülerinnen und Schüler bestätigt das Potenzial zur Überwindung segregierender Ansätze.

Die methodischen Limitationen dieser Evaluation – insbesondere die geringe Teilnehmerzahl und hohe Ausfallquote bei der Praxiserprobung – relativieren jedoch die Aussagekraft der positiven Laborergebnisse erheblich. Die dokumentierten Implementierungsbarrieren verdeutlichen, dass zwischen kontrollierter Evaluation und

realer Unterrichtspraxis eine erhebliche Kluft besteht, die in zukünftigen Entwicklungszyklen prioritär adressiert werden muss.

Für die praktische Weiterentwicklung ergeben sich zwei zentrale Handlungsbedarfe: die Behebung der kritischen Usability-Probleme (insbesondere Zoom-Funktionalität und Prozessführung) sowie eine systematische Untersuchung der Implementierungsbarrieren in realen Schulkontexten. Erst durch diese Maßnahmen kann das theoretisch nachgewiesene Potenzial des EduTTTools für die inklusive Bildungspraxis vollständig realisiert werden.

6. Zusammenfassung und Ausblick

Diese Masterarbeit entwickelte das EduTTTool, eine webbasierte Autorensoftware zur Erstellung audiotaktile Unterrichtsmaterialien mit Tiptoi-Technologie für inklusiven Unterricht. Nach systematischer Anforderungsanalyse (10 Umfragen, 4 Experteninterviews) entstand eine browserbasierte Anwendung mit OID- und GME-Generator. Die Mixed-Methods-Evaluation mit 15 Lehrkräften ergab einen SUS-Score von 74,5 Punkten und 93% Weiterempfehlungsbereitschaft. Die Felderprobung bestätigte pädagogischen Mehrwert durch gesteigerte Selbstständigkeit, Motivation und spontane Kooperation zwischen sehenden und sehbeeinträchtigten Lernenden.

Beantwortung der Forschungsfrage

Die zentrale Forschungsfrage wurde erfolgreich beantwortet: Ein audiotaktiler Tool lässt sich durch webbasierte Autorensoftware entwickeln, die Lehrkräften ohne Programmierkenntnisse die Erstellung interaktiver Materialien ermöglicht. Das EduTT-Tool zeigt, dass die Kombination aus kostengünstiger Tiptoi-Technologie, benutzerfreundlicher Oberfläche und systematischer Nutzerorientierung zu einem praktisch einsetzbaren Werkzeug führt, das inklusives Lernen wirksam unterstützt. Die Evaluation belegt sowohl technische Realisierbarkeit als auch pädagogischen Mehrwert: Die erstellten Materialien stärken die Selbstständigkeit sehbeeinträchtigter Lernender, entlasten Lehrkräfte und ermöglichen echte inklusive Lernprozesse. Damit wurde die Lücke zwischen einfachen Audio-Stiften und teuren Spezialsystemen geschlossen.

Ausblick

Kurzfristig müssen kritische Usability-Probleme wie Zoom-Funktionalität und plattformübergreifende Kompatibilität behoben werden. Technisch vielversprechend ist die automatische Flächenerkennung zur OID-Code-Füllung zusammenhängender Bereiche, was den Erstellungsaufwand reduzieren würde. Die Zielgruppenerweiterung auf Lernende mit Leseschwächen, Deutsch als Zweitsprache oder kognitiven Beeinträchtigungen sowie mehrsprachige Unterstützung würden den inklusiven Ansatz verstärken. Integration in Lernmanagementsysteme und kollaborative Plattformen für Materialaustausch könnten das Potenzial weiter steigern.

Abschließende Bewertung

Das EduTTTool demonstriert, dass inklusive Bildungstechnologien weder komplex noch teuer sein müssen. Die Kombination aus Consumer-Technologie und theoretisch fundierter Pädagogik schafft eine praktikable Lösung für inklusiven Unterricht. Trotz Optimierungsbedarfs stellt die Lösung einen bedeutsamen Fortschritt zur Verwirklichung echter Inklusion dar.

Literaturverzeichnis

- [AAAM⁺23] Q. I. Almegdad, A. M. Alodat, M. F. Alquraan, M. A. Mohaidat und A. K. Al-Makhzoomy. The effectiveness of universal design for learning: A systematic review of the literature and meta-analysis. *Cogent Education* 10(1), Dezember 2023, S. 1–24.
- [AlSH02] F. Aldrich, L. Sheppard und Y. Hindle. First steps towards a model of tactile graphicacy. *British Journal of Visual Impairment* 20(2), Mai 2002, S. 62–67.
- [Arn22] A. Arn. Soundolino. <https://www.soundolino.ch/>, 2022. Zuletzt aufgerufen am 01.06.2025.
- [aus07] Ausgewählte Entwurfsmuster mit Beispielen. In K.-H. Rau (Hrsg.), *Objektorientierte Systementwicklung*, S. 209–253. Vieweg, Wiesbaden, 2007.
- [BaKM09] A. Bangor, P. Kortum und J. Miller. Determining what individual SUS scores mean: Adding an adjective rating scale. *Journal of Usability Studies* 4(3), 2009, S. 114–123.
- [BBDD⁺20] P. Bartelheimer, B. Behrisch, H. Daßler, G. Dobslaw, J. Henke und M. Schäfers. Teilhabe in unterschiedlichen sozialpolitischen Handlungsfeldern. In *Teilhabe – eine Begriffsbestimmung*, S. 5–18. Springer Fachmedien Wiesbaden, Wiesbaden, 2020.
- [Blin25] Blinden Hilfsmittel Vertrieb Dresden. Penfriend 3 das einfache Markierungssystem für Blinde und Sehbehinderte. <https://www.penfriend3.de/>, 2025. Zuletzt aufgerufen am 01.06.2025.
- [Bödi25] A. Bödicker. Making/Doing Dis/ability: Inklusion vs. Segregation von Schüler*innen mit Sehbeeinträchtigung. In *Jugend - Schule - Dis/ability*, S. 57–73. Springer Fachmedien Wiesbaden, Wiesbaden, 2025. Series Title: Blinden- und Sehbehindertenpädagogik im Kontext Lebenslangen Lernens.
- [BoFL09] S. Borsci, S. Federici und M. Lauriola. On the dimensionality of the System Usability Scale: a test of alternative measurement models. *Cognitive Processing* 10(3), August 2009, S. 193–197.
- [Brei20] J. Breitner. Tip-Toi-Reveng Wiki. <https://github.com/entropia/tip-toi-reveng/wiki>, Dezember 2020. Zuletzt aufgerufen am 01.06.2025.

- [Brei23] J. Breitner. tttool. <https://github.com/entropia/tip-toi-reveng/releases>, Februar 2023.
- [BrLLW23] R. Bruder, H. Linneweber-Lammerskitten und B. Wälti. Differenzierung. In R. Bruder, A. Büchter, H. Gasteiger, B. Schmidt-Thieme und H.-G. Weigand (Hrsg.), *Handbuch der Mathematikdidaktik*, S. 619–646. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, 2023.
- [Broo96] J. Brooke. SUS: A quick and dirty usability scale. *Usability Evaluation in Industry* Band 189, 1996.
- [ent07] Entwurf der Systemarchitektur. In K.-H. Rau (Hrsg.), *Objektorientierte Systementwicklung*, S. 179–208. Vieweg, Wiesbaden, 2007.
- [EnWe22] C. Engel und G. Weber. ATIM: Automated Generation of Interactive, Audio-Tactile Indoor Maps by Means of a Digital Pen. In K. Miesenberger, G. Kouroupetroglou, K. Mavrou, R. Manduchi, M. Covarrubias Rodriguez und P. Penáz (Hrsg.), *Computers Helping People with Special Needs*, Band 13341, S. 123–133. Springer International Publishing, Cham, 2022. Series Title: Lecture Notes in Computer Science.
- [Feus08] G. Feuser. Didaktik integrativen Unterrichts. Eine Problemskizze. In *Integration konkret: Begründung, didaktische Konzepte, inklusive Praxis*, S. 121–135. Verlag Julius Klinkhardt, Bad Heilbrunn, 1. Aufl. Auflage, 2008.
- [FLLH22] H. Friedrichs-Liesenkötter, F. Lemke und J. Hüttmann. Teilhabe durch Digitalität? – Potenziale und Limitierungen digitalisierter Bildungsarrangements für die (Bildungs-)Teilhabe geflüchteter Jugendlicher. In T. Damberger, I. Schell-Kiehl und J. Wahl (Hrsg.), *Pädagogik, Soziale Arbeit und Digitalität: Education, Social Work and Digitality*. Beltz Juventa, Erscheinungsort nicht ermittelbar, 2022.
- [GBKP13] R. A. Grier, A. Bangor, P. Kortum und S. C. Peres. The System Usability Scale: Beyond Standard Usability Testing. *Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society Annual Meeting* 57(1), September 2013, S. 187–191.
- [Gebh16] M. Gebhardt. Assistive Technologien für Menschen mit Sehschädigung im inklusiven Unterricht. *Zeitschrift für Heilpädagogik*, Januar 2016.
- [GGHH⁺15] E. Gläse, T. Goll, M. Hemmer, A. Hüttner, J. Menthe, S. Prediger, B. Ralle, C. Rosebrock und J. Helmut Vollmer. Position der Gesellschaft für Fachdidaktik zum inklusiven Unterricht unter fachdidaktischer Perspektive, November 2015.
- [Gies19] M. Giese. *Inklusive Didaktik: Eine symbol- und bildungstheoretische Skizze*. Edition Fachdidaktiken. Springer Fachmedien Wiesbaden, Wiesbaden. 2019.

- [Götz17] T. Götzelmann. 3D-Druck für blinde Menschen: Vom statischen Druck zu interaktiven Objekten. *Informatik-Spektrum* 40(6), Dezember 2017, S. 511–515.
- [Grim18] A. Grimme. ttaudio. <https://github.com/sidiandi/ttaudio#readme>, März 2018.
- [HABDS⁺22] L. Holloway, S. Ananthanarayan, M. Butler, M. T. De Silva, K. Ellis, C. Goncu, K. Stephens und K. Marriott. Animations at Your Fingertips: Using a Refreshable Tactile Display to Convey Motion Graphics for People who are Blind or have Low Vision. In *Proceedings of the 24th International ACM SIGACCESS Conference on Computers and Accessibility*, Athens Greece, Oktober 2022. ACM, S. 1–16.
- [HarpoD] Harpo. Tangible Magic Paper. <https://piaf-tactile.com/tangible-magic-paper/>, o.D. Zuletzt aufgerufen am 23.06.2025.
- [Hinz02] A. Hinz. Von der Integration zur Inklusion - terminologisches Spiel oder konzeptionelle Weiterentwicklung? *Zeitschrift für Heilpädagogik* Band 53, 2002, S. 354–361.
- [Inve25] Inventivio GmbH. Tactonom Reader. <https://www.tactonom.com/tactonom-reader/>, 2025. Zuletzt aufgerufen am 01.06.2025.
- [Kort22] T. Korten. ttmp32gme. <https://github.com/thawn/ttmp32gme>, April 2022.
- [LaHo17] M. Lang und U. Hofer. *Didaktik des Unterrichts mit blinden und hochgradig sehbehinderten Schülerinnen und Schülern*, Band Band 2: Fachdidaktik. Verlag W. Kohlhammer. zitiert nach Bödicker, Anne: Making/Doing Dis/ability: Inklusion vs. Segregation von Schüler*innen mit Sehbeeinträchtigung. In: Jugend - Schule - Dis/ability. Wiesbaden: Springer Fachmedien, 2025, 1. Auflage. Auflage, 2017.
- [LaTh17] M. Lang und M. Thiele. *Schüler mit Sehbehinderung und Blindheit im inklusiven Unterricht: Praxistipps für Lehrkräfte*. Ernst Reinhardt Verlag, Basel, München. zitiert nach Bödicker, Anne: Making/Doing Dis/ability: Inklusion vs. Segregation von Schüler*innen mit Sehbeeinträchtigung. In: Jugend - Schule - Dis/ability. Wiesbaden: Springer Fachmedien, 2025, 1. Auflage. Auflage, 2017.
- [Lidw10] W. Lidwell. *Universal principles of design: 125 ways to enhance usability, influence perception, increase appeal, make better design decisions, and teach through design*. Rockport Publishers, Beverly, Mass. 2nd ed.. Auflage, 2010.
- [LiLK15] C. Lindmeier und B. Lütje-Klose. Inklusion als Querschnittsaufgabe in der Erziehungswissenschaft. *Erziehungswissenschaft* 26(2), November 2015, S. 7–16.
- [LöWe13] J. M. Löser und R. Werning. Inklusion aus internationaler Perspektive – ein Forschungsüberblick. *Zeitschrift für Grundschulforschung* 6(1), 2013, S. 21–33.

- [MaFe19] P. Mayring und T. Fenzl. Qualitative Inhaltsanalyse. In N. Baur und J. Blasius (Hrsg.), *Handbuch Methoden der empirischen Sozialforschung*, S. 633–648. Springer Fachmedien Wiesbaden, Wiesbaden, 2019.
- [Mill25] Millennium 2000 Digital GmbH. Anybook Pro Audiostift. <https://anybookreader.de/>, 2025. Zuletzt aufgerufen am 01.06.2025.
- [MMSJ⁺20] G. Melfi, K. Müller, T. Schwarz, G. Jaworek und R. Stiefelhagen. Understanding what you feel: A Mobile Audio-Tactile System for Graphics Used at Schools with Students with Visual Impairment. In *Proceedings of the 2020 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, Honolulu HI USA, April 2020. ACM, S. 1–12.
- [MSSM⁺22] G. Melfi, L. Schölch, T. Schwarz, K. Muller und R. Stiefelhagen. Audio-Tactile Reader (ATR): Interaction Concepts for Students with Blindness to Explore Digital STEM Documents on a 2D Haptic Device. In *2022 IEEE Haptics Symposium (HAPTICS)*, Santa Barbara, CA, USA, März 2022. IEEE, S. 1–6.
- [MuHa24] F. Mußmann und T. Hardwig. Lehrkräfte in der Gratifikationskrise, 2024.
- [NoBo20] M. Nolte und A. S. Bock. Fragen zur Umsetzung von Inklusion in der Schule. *Lernen und Lernstörungen* 9(4), Oktober 2020, S. 225–234.
- [Open16] OpenClipart. Tulip Simple Red Flower 3color with Slight Glow. <https://openclipart.org/detail/239885/tulip-simple-red-flower-3color-with-slight-glow>, 2016. Zuletzt aufgerufen am 23.06.2025.
- [ProB25] ProBlind e. V. ProBlind. <https://www.problind.org/de/erstellen/>, 2025. Zuletzt aufgerufen am 01.06.2025.
- [Pusc17] A. Pusch. Interaktive Lernmaterialien mit dem tiptoi-Stift. In *Didaktik der Physik*, Dresden, 2017.
- [PWCS⁺22] M. Phutane, J. Wright, B. V. Castro, L. Shi, S. R. Stern, H. M. Lawson und S. Azenkot. Tactile Materials in Practice: Understanding the Experiences of Teachers of the Visually Impaired. *ACM Transactions on Accessible Computing* 15(3), September 2022, S. 1–34.
- [Rala11] P. K. Ralabate. Universal Design for Learning: Meeting the Needs of All Students. *The ASHA Leader* 16(10), August 2011, S. 14–17.
- [Ramô22] G. Ramôa. Classification of 2d Refreshable Tactile User Interfaces. *ICCHP-AAATE 2022 Open Access Compendium Assistive Technology* Band Accessibility and, 2022, S. 8 pages. Artwork Size: 8 pages Medium: PDF Publisher: Association ICCHP.
- [Rave25] Ravensburger AG. tiptoi® - Das spielerische Lernsystem von Ravensburger. <https://www.ravensburger.de/de-DE/entdecken/tiptoi>, 2025. Zuletzt aufgerufen am 01.06.2025.

- [RMSM⁺23] G. Ramôa, O. Moured, T. Schwarz, K. Müller und R. Stiefelhagen. Enabling People with Blindness to Distinguish Lines of Mathematical Charts with Audio-Tactile Graphic Readers. In *Proceedings of the 16th International Conference on Pervasive Technologies Related to Assistive Environments*, Corfu Greece, Juli 2023. ACM, S. 384–391.
- [Schw16] M. Schwager. Zum Umgang mit Migration und Armut unter dem Gesichtspunkt einer Orientierung an Inklusion. In *Soziale Ungleichheiten als Herausforderung für inklusive Bildung*, S. 173–188. Springer Fachmedien Wiesbaden, Wiesbaden, 2016.
- [Sek24] Sonderpädagogische Förderung in Förderschulen 2023/2024. https://www.kmk.org/fileadmin/Dateien/pdf/Statistik/Dokumentationen/Aus_Sopae_2023.pdf, Oktober 2024. Zuletzt aufgerufen am 23.06.2025.
- [uni18] Universal design for learning guidelines version 2.2. https://udlguidelines.cast.org/binaries/content/assets/udlguidelines/udlg-v2-2/udlg_graphicorganizer_v2-2_german_corrected.pdf, 2018. Zuletzt aufgerufen am 23.06.2025.
- [Vere14] Vereinigte Nationen (Hrsg.). *Die UN-Behindertenrechtskonvention*. Berlin. Oktober 2014.
- [Walt22] R. Walthes. *Einführung in die Pädagogik bei Blindheit und Sehbeeinträchtigung*. Nr. 2399 der utb-studi-e-book. UTB, München. 4. aktualisierte Auflage, revidierte Ausgabe. Auflage, 2022.
- [WFKPR⁺23] J. Warmdt, H. Frisch, K. Kindermann, S. Pohlmann-Rother und C. Ratz. Professionalisierung von Lehrkräften für Digitalität und Inklusion: Professionalization of teachers for digitality and inclusion. *QfI - Qualifizierung für Inklusion. Online-Zeitschrift zur Forschung über Aus-, Fort- und Weiterbildung pädagogischer Fachkräfte* 5(2), Mai 2023.
- [Wilh09] M. Wilhelm. *Integration in der Sek. I und II: wie die Umsetzung im Fachunterricht gelingt*. Beltz-Pädagogik. Beltz, Weinheim Basel. 2009.
- [Will04] G. B. Willis. Cognitive Interviewing in Practice: Think-Aloud, Verbal Probing, and Other Techniques. In *Cognitive Interviewing: A Tool for Improving Questionnaire Design*, S. 42–62. SAGE Publications, Incorporated, Thousand Oaks, 1st ed. Auflage, 2004.
- [ZiBW18] E. Zinnatova, C. Bergmann und M. Wacker. Kunstgefühl - Von der Grafik zum interaktiven Tastmodell. 2018. Publisher: Gesellschaft für Informatik e.V.
- [ZychoD] Zychem. Swell Touch Paper (formerly ZyTex Paper). <https://zychemltd.com/swell-touch-paper-for-tactile-graphics/>, o.D. Zuletzt aufgerufen am 23.06.2025.

A. Anhang

A.1 Online-Fragebogen – Anforderungsanalyse



Studie "Anwendung zur Erstellung von Unterrichtsmaterialien für den Tiptoi-Stift"

Im Rahmen der Abschlussarbeit "Von der Idee zur Interaktion: Ein Tool für inklusive Unterrichtsmaterialien mit dem Tiptoi-Stift" wird diese Evaluationsstudie durchgeführt. Sie untersucht die Benutzerfreundlichkeit und den pädagogischen Mehrwert einer Anwendung, mit der Lehrkräfte selbstständig Unterrichtsmaterialien für den Tiptoi-Stift erstellen können. Durch praktische Tests und Befragungen von Lehrkräften und pädagogischen Mitarbeitern soll das entwickelte Tool evaluiert werden.

Diese Umfrage wird durchgeführt am Zentrum für digitale Barrierefreiheit und Assistive Technologien (ACCESS@KIT). Bei Fragen oder Anregungen wenden Sie sich jederzeit an die Studienleitung, Thorsten Schwarz (E-Mail: thorsten.schwarz@kit.edu) oder an info@access.kit.edu.

Voraussetzung für die Teilnahme

Voraussetzung für die Teilnahme an der Studie "Anwendung zur Erstellung von Unterrichtsmaterialien für den Tiptoi-Stift" ist die Arbeit als Lehrkraft oder Mitarbeitende/r an einer Schule, die in dem Prozess der Erstellung und/oder Nutzung von Unterrichtsmaterialien oder Lernmaterialien involviert sind.

Datenschutzrechtliche Hinweise zur Teilnahme an der Studie "Anwendung zur Erstellung von Unterrichtsmaterialien für den Tiptoi-Stift"

Die Datenschutzerklärung kann [hier](#) als pdf-Dokument abgerufen werden. Zudem finden Sie in der [Teilnehmendeninformation](#) weiterführende Informationen dazu, wie Ihre personenbezogenen Daten verarbeitet werden.

- Ich habe die [allgemeinen Informationen](#) zum Forschungsprojekt „Anwendung zur Erstellung von Unterrichtsmaterialien für den Tiptoi-Stift“ gelesen und willige in die Teilnahme am Forschungsprojekt und die damit verbundene Datenverarbeitung ein. Mir ist bewusst, dass Einwilligungen freiwillig sind und ohne Nachteile (auch einzeln) verweigert oder jederzeit auch ohne Angaben von Gründen widerrufen werden können. Ich weiß, dass im
- ☐ Falle eines Widerrufs die Rechtmäßigkeit der aufgrund der Einwilligung bis zum Widerruf erfolgten Verarbeitung nicht berührt wird. Ich habe verstanden, dass ich mich für einen Widerruf einfach an die in den Informationen genannte Kontaktperson wenden kann und dass aus der Verweigerung der Einwilligung oder ihrem Widerruf keine Nachteile entstehen. Mir wurden die [Informationen zur Erhebung personenbezogener Daten](#) im Forschungsprojekt „Anwendung zur Erstellung von Unterrichtsmaterialien für den Tiptoi-Stift“ mitgeteilt und zur Verfügung gestellt.

IN09 Einwilligung_Teilnahme

2 = Ich habe die allgemeinen Informationen zum Forschungsprojekt „Anwendung zur Erstellung von Unterrichtsmaterialien für den Tiptoi-Stift“ gelesen und willige in die Teilnahme am Forschungsprojekt und die damit verbundene Datenverarbeitung ein. Mir ist bewusst, dass Einwilligungen freiwillig sind und ohne Nachteile (auch einzeln) verweigert oder jederzeit auch ohne Angaben von Gründen widerrufen werden können. Ich weiß, dass im Falle eines Widerrufs die Rechtmäßigkeit der aufgrund der Einwilligung bis zum Widerruf erfolgten Verarbeitung nicht berührt wird. Ich habe verstanden, dass ich mich für einen Widerruf einfach an die in den Informationen genannte Kontaktperson wenden kann und dass aus der Verweigerung der Einwilligung oder ihrem Widerruf keine Nachteile entstehen. Mir wurden die Informationen zur Erhebung personenbezogener Daten im Forschungsprojekt „Anwendung zur Erstellung von Unterrichtsmaterialien für den Tiptoi-Stift“ mitgeteilt und zur Verfügung gestellt.

-9 = nicht beantwortet

Ihr zufällig generierter Teilnahme-Code lautet:

677

Dieser erleichtert die anonyme Zuordnung von Fragebogen zu dem später folgendem Interview. Daher merken Sie sich die Zahl bis zum Interview.

UT07_CP Code: Vollständige Leerungen der Urne bisher

Ganze Zahl

UT07 Code: Gezogener Code

1 = 1

2 = 2

3 = 3

4 = 4

5 = 5

6 = 6

7 = 7

8 = 8

9 = 9

10 = 10

11 = 11

12 = 12

13 = 13

14 = 14

15 = 15

16 = 16

17 = 17

18 = 18

19 = 19

20 = 20

21 = 21

22 = 22

23 = 23

24 = 24

25 = 25

26 = 26

27 = 27

28 = 28

29 = 29

30 = 30

31 = 31

32 = 32

33 = 33

34 = 34

35 = 35

36 = 36

37 = 37

38 = 38

39 = 39

40 = 40

41 = 41

42 = 42

43 = 43

44 = 44

45 = 45

46 = 46

47 = 47

48 = 48

49 = 49

50 = 50

51 = 51

52 = 52

53 = 53

54 = 54

55 = 55

56 = 56

57 = 57

58 = 58

59 = 59

60 = 60

61 = 61

62 = 62

63 = 63

64 = 64

65 = 65

66 = 66

67 = 67

68 = 68

69 = 69

70 = 70

71 = 71

72 = 72

73 = 73

74 = 74

75 = 75

76 = 76

77 = 77

78 = 78

79 = 79

80 = 80

81 = 81

82 = 82

83 = 83

84 = 84
85 = 85
86 = 86
87 = 87
88 = 88
89 = 89
90 = 90
91 = 91
92 = 92
93 = 93
94 = 94
95 = 95
96 = 96
97 = 97
98 = 98
99 = 99
100 = 100
[...]

1. Bitte geben Sie den angezeigten Teilnahme-Code ein und notieren Sie ihn für sich.

Falls die Zahl ein- oder zweistellig sein sollte, ergänzen Sie führende Nullen, sodass ein dreistelliger Code entsteht.

UT06_01 [01]

Offene Texteingabe

Personenbezogene Daten

2. Wie alt sind Sie?

[Bitte auswählen] ▼

PD01 DD_Alter

- 1 = 18 - 25
- 2 = 26 - 35
- 3 = 36 - 45
- 4 = 46 - 55
- 5 = 56+
- 9 = nicht beantwortet

3. Welchen Beruf üben Sie an einer Schule aus?

Wählen Sie die Bezeichnung aus, die am besten zu Ihrer Tätigkeit passt.

[Bitte auswählen] ▼

PD21 DD_Beruf

- 1 = Lehrkraft
- 2 = Mitarbeiter/in an einer Schule
- 9 = nicht beantwortet

4. An welcher Schule sind Sie tätig?

Wählen Sie die Bezeichnung aus, die am besten zu Ihrer Schule passt.

[Bitte auswählen] ▼

PD04 DD_Schulart

- 1 = Grundschule
- 2 = Real-/ Werkrealschule
- 3 = Gymnasium
- 4 = Gesamtschule
- 5 = Berufliche Schule
- 6 = Sonderpädagogisches Beratungszentrum (SBBZ)
- 9 = nicht beantwortet

5. Welche Stufe/n werden an Ihrer Schule unterrichtet?

Wählen Sie ALLE Stufen aus, die an ihrer Schule unterrichtet werden.

- ☐ Primarstufe (Klasse 1 – 4)
- ☐ Sekundarstufe 1 (Klasse 5 – 10)
- ☐ Sekundarstufe 2 (Klasse 11 – 12 oder 13)

PD05	DD_Stufen: Ausweichoption (negativ) oder Anzahl ausgewählter Optionen
	Ganze Zahl
PD05_01	Primarstufe (Klasse 1 - 4)
PD05_02	Sekundarstufe 1 (Klasse 5 - 10)
PD05_03	Sekundarstufe 2 (Klasse 11 - 12 oder 13)
	1 = nicht gewählt
	2 = ausgewählt

Was ist der Tiptoi-Stift und wie funktioniert er?

Der Tiptoi-Stift ist ein innovatives digitales Lernspielzeug von Ravensburger, entwickelt für Kinder ab 3 Jahren. Das Besondere: An der Spitze ist eine kleine Kamera eingebaut. Wenn man mit dieser Spitze auf bestimmte Stellen in speziellen Büchern oder Spielen tippt, spricht der Stift oder macht Geräusche.

Stellen Sie sich zum Beispiel ein Bilderbuch mit Tieren vor: Tippt das Kind auf den Elefanten, macht der Stift ein Tröten und erklärt, dass Elefanten in Afrika und Asien leben. Bei der Giraffe erfährt das Kind, wie groß sie werden kann.

Der Stift erkennt dabei Codes auf dem Papier – ähnlich wie ein Scanner im Supermarkt den Strichcode liest. Diese Codes sagen dem Stift, welchen Ton oder Text er abspielen soll. Über einen USB-Anschluss kann man neue Hörinhalte auf den Stift laden.

Das Besondere: Der Stift kann auch Aufgaben stellen und prüfen, ob sie richtig gelöst wurden. Zum Beispiel:

"Tippe nacheinander auf alle Tiere, die im Winter Winterschlaf halten"

"Finde alle Instrumente, die zur Familie der Holzblasinstrumente gehören"

"Tippe auf drei Dinge, die mit dem Buchstaben B beginnen"

Der Stift merkt sich dabei die Reihenfolge der Berührungen und sagt, ob die Aufgabe richtig gelöst wurde.

Diese Funktion macht ihn zu einem wertvollen Werkzeug für Lernaufgaben und den Einsatz im schulischen Umfeld. Für die effektive Nutzung im Unterricht wird allerdings ein spezielles Tool benötigt – eine Webanwendung – mit der Lehrkräfte eigene Unterrichtsmaterialien erstellen können.



Erfahrungen und Rahmenbedingungen

6. Haben Sie schon Erfahrungen mit dem Tiptoi-Stift?

Wählen Sie aus.

[Bitte auswählen] ▼

ER42 Erfahrung

1 = Ja
3 = Nein
-9 = nicht beantwortet

7. Welche Art von Unterrichtsmaterialien würden Sie gerne mit dem Tiptoi-Stift verwenden?

Mehrfachauswahl ist möglich.

- ☐ 3D-Objekt
- ☐ Tiefdruckgrafiken
- ☐ Schwellpapier
- ☐ Normales Papier
- ☐ Sonstige

ER01 Unterrichtsmaterialien: Ausweichoption (negativ) oder Anzahl ausgewählter Optionen

Ganze Zahl

ER01_01 3D-Objekt

ER01_02 Tiefdruckgrafiken

ER01_03 Schwellpapier

ER01_04 Normales Papier

ER01_05 Sonstige

1 = nicht gewählt

2 = ausgewählt

ER01_05a Sonstige (offene Eingabe)

Offene Texteingabe

8. Welche Dateiformate verwenden Sie hauptsächlich für Ihre Grafiken/Unterrichtsmaterialien?

Mehrfachauswahl ist möglich.

- ☐ PDF
- ☐ DOCX
- ☐ PNG
- ☐ JPEG
- ☐ SVG
- ☐ Sonstige

ER39 Dateiformate: Ausweichoption (negativ) oder Anzahl ausgewählter Optionen Ganze Zahl ER39_01 PDF ER39_02 DOCX ER39_03 PNG ER39_04 JPEG ER39_05 SVG ER39_06 Sonstige 1 = nicht gewählt 2 = ausgewählt ER39_06a Sonstige (offene Eingabe) Offene Texteingabe

9. Wie viel Zeit können/möchten Sie in die Erstellung solcher Materialien investieren?

Wählen Sie eine Zeitangabe aus, die am besten passt.

[Bitte auswählen] ▼

ER02 Zeitangabe 1 = 1-2h 2 = 3-4h 3 = 5-6h 4 = 7-8h 5 = mehr als 8h -9 = nicht beantwortet

Um was geht es genau bei dem Tool?

Ziel ist eine Webanwendung, mit der Sie als Lehrkraft eigene audio-taktile Unterrichtsmaterialien für den Tiptoi-Stift erstellen können. Die Materialien sollen dann sowohl taktile Markierungen wie Blindenschrift, als auch die hinterlegten Codes für die Audioausgabe des Stiftes enthalten. So können Sie den Stift passgenau für Ihren Unterricht einsetzen. Im Folgenden habe ich verschiedene mögliche Funktionen für dieses Tool zusammengestellt. Da nicht alle Funktionen auf einmal umgesetzt werden können, möchte ich von Ihnen wissen, welche davon für Sie besonders wichtig wären.

Bitte ordnen Sie die folgenden Funktionen nach ihrer Wichtigkeit für das Tool. Setzen Sie die für Sie wichtigste Funktion auf Platz 1 ganz oben.

Alle weiteren Ideen oder Anmerkungen finden in dem folgenden Interview Platz.

10. Als Lehrkraft oder Mitarbeiter/in einer Schule möchte ich...

Priorisieren Sie die Aussagen.

...Dateien hochladen können, damit ich existierende Materialien verwenden kann.	...OIDs auf meine Grafiken platzieren können, damit ich interaktive Bereiche definieren kann.	1
...die Codes separat speichern und drucken können, damit ich sie flexibel verwenden kann.	...fertige Materialien direkt ausdrucken können, damit ich schneller mit ihnen arbeiten kann.	2
...eine richtige Reihenfolge festlegen können, um eine Aufgabe stellen zu können.	...eine Audiodatei auf ein OID hinterlegen, damit mehr Text in einem Punkt vermittelt werden kann.	3
...eine Audiodatei mit Text generieren können, damit ich nicht alle selbst aufnehmen muss.	...meine erstellten Materialien speichern können, damit ich sie wieder verwenden kann.	4
...eine Gruppe von OIDs festlegen können, um eine Multiple-Choice-Aufgabe stellen zu können.	...einen OID-Code mit einem Spielmodi hinterlegen können, damit zwischen Spiel und Information gewechselt werden kann.	5
...taktile Bereiche hinterlegen können, damit diese nicht vorher festgelegt werden müssen.	...bei der Hinterlegung von OIDs automatisch eine taktile Umrandung erzeugen, damit klar ist, wo der Code zu finden ist.	6
		7
		8
		9
		10
		11
		12

US02_01	...Dateien hochladen können, damit ich existierende Materialien verwenden kann.
US02_02	...OIDs auf meine Grafiken platzieren können, damit ich interaktive Bereiche definieren kann.
US02_03	...die Codes separat speichern und drucken können, damit ich sie flexibel verwenden kann.
US02_04	...fertige Materialien direkt ausdrucken können, damit ich schneller mit ihnen arbeiten kann.
US02_05	...eine richtige Reihenfolge festlegen können, um eine Aufgabe stellen zu können.
US02_06	...eine Audiodatei auf ein OID hinterlegen, damit mehr Text in einem Punkt vermittelt werden kann.
US02_07	...eine Audiodatei mit Text generieren können, damit ich nicht alle selbst aufnehmen muss.
US02_08	...meine erstellten Materialien speichern können, damit ich sie wieder verwenden kann.
US02_09	...eine Gruppe von OIDs festlegen können, um eine Multiple-Choice-Aufgabe stellen zu können.
US02_10	...einen OID-Code mit einem Spielmodi hinterlegen können, damit zwischen Spiel und Information gewechselt werden kann.
US02_11	...taktile Bereiche hinterlegen können, damit diese nicht vorher festgelegt werden müssen.
US02_12	...bei der Hinterlegung von OIDs automatisch eine taktile Umrandung erzeugen, damit klar ist, wo der Code zu finden ist.
	1 = Rangplatz 1
	2 = Rangplatz 2
	3 = Rangplatz 3
	4 = Rangplatz 4
	5 = Rangplatz 5
	6 = Rangplatz 6
	7 = Rangplatz 7
	8 = Rangplatz 8
	9 = Rangplatz 9
	10 = Rangplatz 10
	11 = Rangplatz 11
	12 = Rangplatz 12
	-9 = nicht eingeordnet

Kontaktierung durch das ACCESS@KIT

Vielen Dank für Ihr Interesse an den Studien, die am Zentrum für digitale Barrierefreiheit und Assistive Technologien (ACCESS@KIT) und durch die Forschungsgruppe cv:hci im Bereich der Assistiven Technologien für Menschen mit Seheinschränkungen durchgeführt werden. Bitte lesen Sie die nachfolgenden Informationen zur Einwilligung für unsere Kontaktaufnahme.

Wenden Sie sich bitte bei Fragen jederzeit an info@access.kit.edu

Erklärung zur Einwilligung der Kontaktaufnahme

Ich willige ein, dass das Zentrum für digitale Barrierefreiheit und Assistive Technologien (ACCESS@KIT), Adenauerring 10, 76131 Karlsruhe, und die Forschungsgruppe cv:hci meine E-Mail-Adresse automatisiert verarbeiten und dass ich zur Erfüllung meines Begehrens, Informationen zu aktuellen oder geplanten Studien im Bereich der Assistiven Technologien zu erhalten, per E-Mail kontaktiert werde.

Mir ist bekannt, dass ich jederzeit Auskunft über die zu meiner Person verarbeiteten Daten sowie die möglichen Empfänger dieser Daten, an die diese übermittelt wurden, verlangen kann und mir eine Antwort mit der Frist von einem Monat nach Eingang des Auskunftersuchens zusteht. Mir ist ebenfalls bekannt, dass ich mich jederzeit an die Datenschutzbeauftragte des KIT und an die zuständige Aufsichtsbehörde für den Datenschutz wenden kann.

Hiermit bestätige ich, dass ich diese Erklärung gelesen und verstanden habe und dass ich meine Einwilligung freiwillig abgebe. Ich weiß, dass ich diese Einwilligung jederzeit ganz oder in Teilen mit Wirkung für die Zukunft an info@access.kit.edu widerrufen kann. Der Widerruf kann auch postalisch erfolgen. In diesem Fall werden meine Daten gelöscht.

Durch den Widerruf der Einwilligung wird die Rechtmäßigkeit, der aufgrund der Einwilligung bis zum Widerruf erfolgten Verarbeitung nicht berührt.

- ☐ Hiermit bestätige ich, dass ich die Erklärung zur Einwilligung der Kontaktaufnahme gelesen und verstanden habe und dass ich meine Einwilligung freiwillig abgebe.

Geschafft!

Sie haben alle Fragen beantwortet. Wenn Sie auf "Weiter" klicken, werden Ihre Antworten gespeichert und übermittelt.

Was möchten Sie uns noch mitteilen?

Hier finden Sie Platz für Anregungen, Wünsche, Kommentare oder Kritik.

UT02_01 [01]
Offene Texteingabe

Letzte Seite

Vielen Dank für Ihre Teilnahme!

Wir möchten uns ganz herzlich für Ihre Mithilfe bedanken.

Ihre Antworten wurden gespeichert, Sie können das Browser-Fenster nun schließen.

[Sonja Kuklok](#), Karlsruher Institut für Technologie – 2025

A.2 Interviewleitfaden – Anforderungsanalyse

Begrüßung und Einleitung (1–2 Min.)

- Kurze Begrüßung und Dank für Teilnahme
- Aufzeichnungserlaubnis einholen
- Abfrage des Teilnahme-Codes (zur anonymisierten Zuordnung zum Fragebogen)

Erfahrung & Technik (10 Min.)

- Wie erstellen Sie aktuell Ihre Unterrichtsmaterialien?
- Wie vertraut sind Sie mit digitalen Tools zur Unterrichtsvorbereitung?
- Welche technische Ausstattung steht Ihnen zur Verfügung?

Präsentation der konkreten Idee (5 Min.)

Ich möchte Ihnen kurz das geplante Tool vorstellen. Es handelt sich um eine Webanwendung – also ein Programm, das Sie über den Internetbrowser aufrufen können, ähnlich wie andere Webseiten. Die Anwendung wird auf Servern des KIT gehostet, sodass keine Installation auf Ihrem Computer notwendig ist.

Mit diesem Tool können Sie Ihre vorhandenen Unterrichtsmaterialien, zum Beispiel Arbeitsblätter oder Grafiken, hochladen. Anschließend markieren Sie die Bereiche, die später mit dem Tiptoi-Stift aktiviert werden sollen. *(Kurze Pause)* Sind Ihnen die OID-Codes des Tiptoi-Stifts (noch) bekannt?

(Antwort abwarten und ggf. kurz erklären: Der Stift erkennt diese Codes auf Papier – ähnlich wie ein Scanner im Supermarkt den Strichcode liest. Diese Codes sagen dem Stift, welchen Ton oder Text er abspielen soll. Über einen USB-Anschluss kann man neue Hörinhalte auf den Stift laden.)

Eine Besonderheit ist, dass um die markierten Bereiche automatisch eine fühlbare Prägung erzeugt werden kann, damit auch sehgeschädigte und blinde Schüler erkennen können, wo sie mit dem Stift tippen müssen.

Für jeden markierten Bereich können Sie dann festlegen, was passieren soll, wenn der Stift darauf tippt – zum Beispiel beim ersten oder zweiten Antippen. Auch einfache Aufgabentypen wie Multiple-Choice lassen sich erstellen, indem Sie eine Gruppe von Codes als richtige Antwort markieren.

Am Ende können Sie das fertige Material mit den integrierten Codes ausdrucken. Die Codes können auch separat gedruckt werden, falls Sie diese lieber aufkleben möchten. Das Tool erstellt automatisch die notwendige Datei für den Tiptoi-Stift, die Sie nur noch übertragen müssen.

Haben Sie dazu erste Fragen?

Feedback-Runde (30 Min.)

- Was finden Sie an der Idee gut?
- Was fehlt Ihrer Meinung nach?
- Wo sehen Sie mögliche Probleme?
- Welche Anpassungen wären nötig?
- In welchen Fächern/Situationen sehen Sie den größten Bedarf für solche Unterrichtsmaterialien?
- Ist es wichtig, die Arbeitsblätter farbig ausdrucken zu können?
- Möchten Sie noch etwas loswerden?

A.3 Interviewleitfaden – Hauptstudie (15min)

- Würden Sie die Materialien im Unterricht nutzen, wenn Sie diese nicht erstellen müssten?
- Würden Sie die Materialien selbst erstellen, um sie zu nutzen?
- Warum würden Sie die Unterrichtsmaterialien nutzen? Warum nicht?
- Welchen konkreten Mehrwert sehen Sie im Vergleich zu herkömmlichen Unterrichtsmaterialien ohne Tiptoi-Funktion?
- Kennen Sie andere audio-taktile Unterrichtsmaterialien? Welchen konkreten Mehrwert sehen Sie im Vergleich zu anderen audio-taktilen Unterrichtsmaterialien?
- Welche weiteren Funktionen würden Sie sich für das Tool wünschen, um den Mehrwert der erstellten Materialien zu erhöhen?
- Würden Sie das Tool Kolleginnen und Kollegen empfehlen? Warum oder warum nicht?

A.4 Interviewleitfaden – Felderprobung

Begrüßung und Einleitung (1–2 Min.)

- Kurze Begrüßung und Dank für Teilnahme
- Aufzeichnungserlaubnis einholen

Nutzung in den letzten zwei Wochen (5 Min.)

- Haben Sie das Tool verwendet? Wenn ja, in welchem Umfang?
- Welche Materialien haben Sie erstellt? (Kurzes Beispiel)

Unterrichtseinsatz (8 Min.)

- Haben Sie die Materialien im Unterricht eingesetzt? In welchen Situationen? Spielmodus?
- Wie reagierten die Schülerinnen und Schüler darauf (sowohl sehende als auch blinde)?
- Gab es besonders positive oder negative Erfahrungen?

Bedienbarkeit der Materialien (8 Min.)

- Wie war der Umgang mit dem Stift und den Materialien, gab es hier Herausforderungen?

Pädagogischer Mehrwert (6 Min.)

- Welchen Mehrwert sehen Sie für den inklusiven Unterricht?
- Hat das Material die Zusammenarbeit zwischen sehenden und blinden SchülerInnen gefördert?

Tool – Weiterentwicklung und Zukunft (10 Min.)

- Wie bewerten Sie die Bedienbarkeit nach längerer Nutzung?
- Welche Herausforderungen sind aufgetreten?
- Welche wichtigste Funktion würden Sie sich wünschen?
- War der Aufwand angemessen?
- Werden Sie das Tool weiterhin nutzen?
- Würden Sie es immer noch empfehlen?

Abschluss (1 Min.)

- Gibt es noch etwas Wichtiges, das Sie erwähnen möchten?