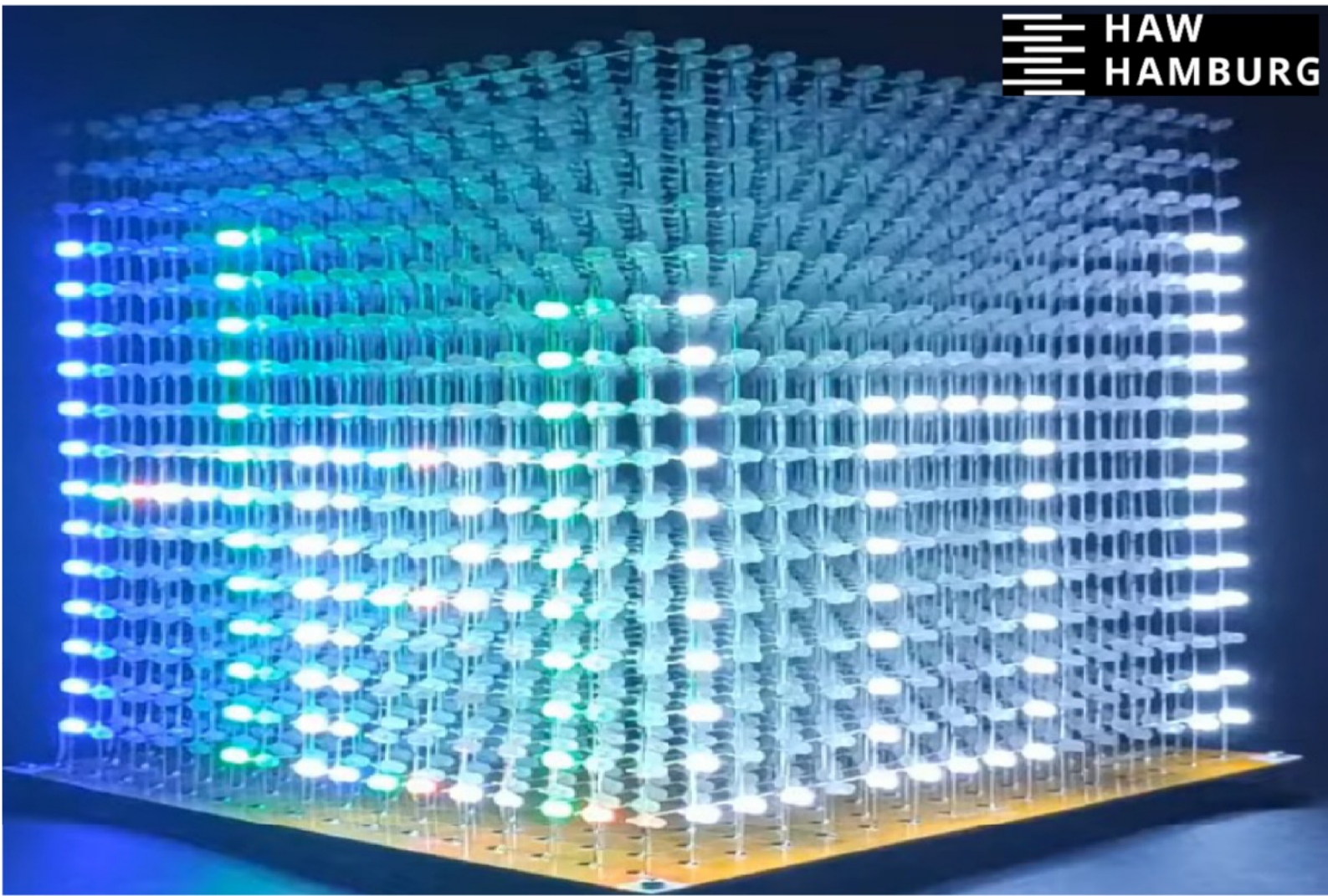




Design und Weiterentwicklung von volumetrischen Bildschirmen auf Grundlage von LED Cubes

vorgelegt von:
Sören Klante

Matrikel-Nr. [REDACTED]
Abgabedatum: 13.04.2026

Erstprüfer*in: Prof. Anke Günther
Zweitprüfer*in: Charlotte Knorr

**HOCHSCHULE FÜR ANGEWANDTE
WISSENSCHAFTEN HAMBURG**
Hamburg University of Applied Science

Fakultät Design, Campus Finkenau
Studiengang: Games Master of Arts (M.A.)

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis.....	1
Abstract.....	1
1. Einleitung.....	2
2. Forschungsfrage.....	3
3. Rahmenbedingungen der Thesis.....	3
4. Volumetrische Bildschirme.....	4
4.1. Statische Volumetrische Bildschirme.....	6
4.1.1. Ebene.....	6
4.1.2. Variante: Würfel / Quader.....	6
4.1.3. Polyeder.....	8
4.1.4. Pyramide.....	9
4.1.5. Variation: Pyramidenstumpf.....	9
4.2. Dynamisch erzeugte Volumenkörper.....	10
4.2.1. LED-Reihe.....	10
4.2.2. Variante: LED-Matrix.....	11
4.3. Sonderfälle.....	12
4.3.1. Haptische Bildschirme.....	12
4.3.1.1. Bitzee.....	12
4.3.1.2. FlexiVol.....	13
4.3.1.3. Acoustic-Trip-Display.....	13
4.3.2. Laserhologramm.....	14
4.3.2.1. Aerial Burton 3D Display.....	14
4.3.2.2. Fairy Lights.....	15
5. Hardware.....	16
5.1. LED (Light Emitting Diode).....	16
5.2. SMD (Surface-Mounted Device).....	17
5.3. Magnetische Steckverbinder.....	18
5.4. Mikrocontroller.....	18
5.5. Diffusor Würfel.....	19
6. Software.....	21
6.1. Blender.....	21
6.2. PCB Design Software (EDA).....	22
6.3. Arduino.....	22
6.4. Firmware.....	22
7. Konsolen Konzepte.....	23
7.1. Konzept I - Volumetrische Bildschirme.....	23
7.2. Konzept II - LED Hardware und Mikrocontroller Steuerung.....	25

7.3. Kombination der Konzepte.....	26
8. Testphase I – Aufbau und Evaluation der LED-Würfel.....	27
8.1. Test Nr. 1 – LED-Cube (8x8x8).....	27
8.2. Test Nr. 2 – LED-Cube (16x16x16).....	30
8.3. Test Nr. 3 – LED-Cube (5x5x5) mit Rasterplatinen.....	31
8.4. Test Nr. 4 – LED-Cube (8x8x8) Stabplatinen mit SMDs.....	35
8.5. Fazit - Testphase I.....	38
9. Pixelgrafik.....	38
9.1. Voxel.....	39
9.1. Pixel.....	40
9.2. Kathodenstrahlröhrenbildschirm (CRT).....	40
9.2.1. Scanlinien.....	41
9.2.2. Farbblutungen.....	41
9.2.3. Geringe Auflösung.....	42
9.2.4. Geringe Farbdarstellung.....	42
9.2.5. N-Bit Farben.....	43
9.3. GameBoy Bildschirm.....	44
9.4.1. Dithering.....	46
9.4.2. Anti-aliasing.....	47
10. Testphase II - Verpixeln der Darstellungen durch Diffusionseigenschaften verschiedener Materialien.....	48
10.1. Test Protocol - LED Cube (5x5x5) Silikon.....	49
10.2. Test Protocol - LED Cube (5x5x5) Bad-Silikon.....	51
10.3. Test Protocol - LED Cube (5x5x5) Epoxidharz.....	52
10.4. Test Protocol - LED Cube (8x8x8) Bad-Silikon.....	55
10.5. Test Protocol - LED Cube (8x8x8) Epoxidharz.....	57
10.6. Fazit - Testphase II.....	58
11. Modulare Würfelemente.....	59
11.1. Filament Konzept.....	59
11.2. LED/SMD-Konzept.....	60
12. Game Design.....	61
12.1. Spielideen.....	61
12.1.1. Puzzle Code:.....	61
12.1.2. Geschütz: Ein "Space Invaders" - alike.....	62
12.1.3. Cloud Control.....	63
12.2. Umsetzungskonzept.....	64
13. Ergebnisse.....	65
14. Quellenverzeichnis.....	67
14.1. Literaturverzeichnis.....	67
14.2. Zitatsquellen.....	70

14.4. Bildquellen.....	72
14.4. Videoquellen.....	79

Abstract

Diese Masterarbeit untersucht, ob auf Grundlage handelsüblicher DIY-LED-Würfel-Bausätze ein volumetrischer Bildschirm entwickelt werden kann, der als transportierbarer, interaktiver Konsolen-Prototyp mit Retro-Pixelästhetik funktioniert. Ausgehend von einer systematischen Recherche volumetrischer Anzeigetechnologien, von statischen Projektionskörpern über rotierende LED-Matrizen bis hin zu haptischen Displays und Laserhologrammen, wurden vier LED-Würfel-Bausätze unterschiedlicher Bauart in einer ersten Testphase hinsichtlich mechanischer Stabilität, Auflösung, Sicherheit und Transportfähigkeit evaluiert. In einer zweiten Testphase wurden Diffusionsmaterialien (Silikon, Bad-Silikon, Epoxidharz) eingesetzt, um die Darstellung einzelner Leuchtpunkte als klar abgegrenzte, dreidimensionale Pixel zu optimieren.

Die Ergebnisse zeigen, dass Epoxidharz die klarste Würfelform erzeugt und Standard-LEDs eine gleichmäßigere Lichtverteilung bieten als SMD-Bauformen. Auf Basis der gewonnenen Erkenntnisse werden konzeptionelle Entwürfe für modulare Würfelemente sowie drei spielspezifische Game-Design-Konzepte vorgestellt.

Die Forschungsfrage kann positiv beantwortet werden:

Volumetrische LED-Bildschirme lassen sich aus DIY-Bausätzen realisieren, sind transportierbar und grundsätzlich bespielbar. Für einen marktfähigen Prototypen sind jedoch weitere Entwicklungsschritte in den Bereichen Strukturstabilität, Steuerungssoftware und modularer Systemarchitektur erforderlich.

1. Einleitung

Im Rahmen meines Masterstudiums entwickelte ich gemeinsam mit einem Teamkollegen eine LED-Säule, die aus mehreren LED-Matrizen besteht und über einen Mikrocontroller gesteuert sowie über einen Controller bespielt werden kann. Die analoge Spielweise führte zu durchweg positivem Feedback, wodurch ich mich intensiver mit der Frage beschäftigte, welche weiterführenden LED-Projekte realisierbar sind. Das ursprüngliche Projekt hat bereits eine 360°-Sichtbarkeit, allerdings nutzen wir nur die Mantelfläche der Säule und den undurchsichtigen Kern. Als Kind der 90er Jahre stellte ich mir die Frage: "ob eine 8- oder 16-Bit-Pixelfigur innerhalb eines transparenten LED-Körpers dargestellt werden könnte, gegebenenfalls unter Einbezug von Umgebungseinflüssen, auf die sowohl die Figur als auch der Spieler reagieren müssen."

Auf Grundlage dieser Idee wurde eine Recherche durchgeführt, um technisch realisierbare Ansätze im Kontext einer Masterarbeit zu identifizieren. Bereits im Vorfeld waren mir DIY-LED-Cubes als animierte Lichtobjekte bekannt, die sich als potenzielle Grundlage für einen volumetrischen Bildschirm eignen könnten. Um jedoch eine präzisere und pixelgenaue Darstellung zu ermöglichen, sind Anpassungen am Design sowie am strukturellen Aufbau der Würfel erforderlich. Zudem muss ein Steuersystem implementiert und programmiert werden.

2. Forschungsfrage

Kann auf Grundlage eines DIY-LED-Cube ein volumetrischer Bildschirm entwickelt werden, der als Prototyp für eine transportierbare, bespielbare Konsole dient und die Spiele in geringer Auflösung wie bei Retro-Konsole in einem dreidimensionalen Raum darstellen kann?

3. Rahmenbedingungen der Thesis

Der Großteil der Thesis ist in einem wissenschaftlichen, objektiven Schreibstil verfasst. Da das Thema der Thesis allerdings stark in Abhängigkeit zu den Entscheidungen und Gedankengängen des Autors steht, wird in einigen Passagen die Ich-Form verwendet.

Die Arbeit bezieht Grundlagen aus verschiedenen technischen Gebieten ein. Um den Umfang überschaubar zu belassen, werden prägnante Beschreibungen mit wesentlichen Eigenschaften und relevanten Informationen formuliert, ohne zu tief in die Theorie der jeweiligen Themengebiete einzudringen.

4. Volumetrische Bildschirme

Volumetrische Bildschirme sind Darstellungssysteme, die räumliche Projektionen erzeugen – vergleichbar mit einem Hologramm. Im Gegensatz zu einem klassischen Science Fiction Hologrammen projizieren volumetrische Bildschirme ihre Darstellungen in der Regel auf physische Objekte, die prinzipiell berührbar sind, dies ist aus instandhaltungs- und sicherheitstechnischen Gründen nicht zu empfehlen.

Die Definition eines Hologramms ist in Bezug auf volumetrische Bildschirme immer mit Vorsicht zu betrachten, da beide Begriffe oft synonym verwendet werden.

Beispielsweise in dieser Definition:

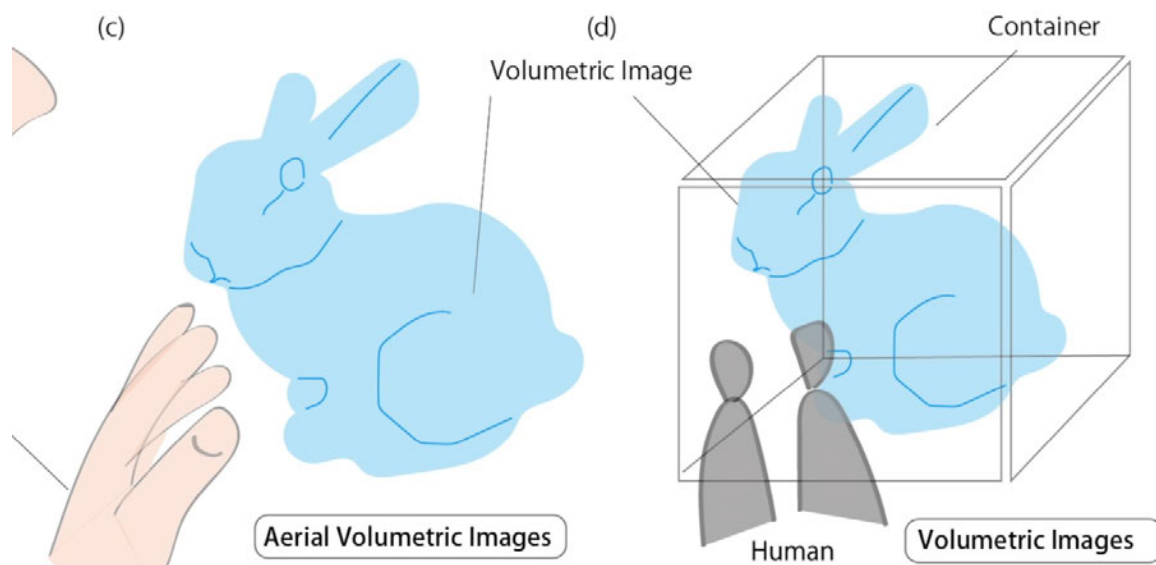


Abb. 1 Volumetrische Bilder

“Ein Hologramm ist ein mit holografischen Techniken hergestelltes dreidimensionales Bild, das eine körperliche Präsenz im realen Raum hat, bzw. eine Aufnahme, die ein dreidimensionales Abbild wiedergibt. Unter dem Begriff der Holografie fasst man Verfahren zusammen, die den Wellencharakter des Lichts ausnutzen, um eine realitätsnahe Darstellung zu erzielen. Dabei spielen Interferenz und Kohärenz eine wichtige Rolle. Umgangssprachlich werden auch bestimmte dreidimensionale Projektionen als Hologramme bezeichnet. Es gibt viele unterschiedliche Typen wie Bildebenenhologramme, Reflexionshologramme, Multiplexhologramme und computergenerierte Hologramme.”

- Prof. Dr. Oliver Bendel, wirtschaftslexikon.gabler.de,

Definition: Was ist “Hologramm”?, [Stand: 12.04.2026]

Diese Definition kann auf mehrere der folgenden Beispiele für volumetrische Bildschirme übertragen werden. Allerdings ist diese Definition für ein Hologramm, das ein dreidimensionales Bild zeigt, welches in einer Glasscheibe eingefangen wurde, mit Hilfe von Techniken der Lichtbeugung. Um den Unterschied beider Techniken und die Problematik des Begriffs "Hologramm" zu verdeutlichen, kann man eine weitere Definition betrachten:

"By shining a fine diffraction pattern, a hologram creates a light field in space and shows three-dimensional images similar to seeing those through a window. Volumetric displays, however, show points of light coming from every position within a volume to render three-dimensional images that can be directly observed.

'What we see in movies, and is called a hologram, is more accurately a volumetric display,' says computer scientist Asier Marzo."

- Madison Dapcevich, discovermagazine.com, It's Possible To Manipulate This New Interactive Hologram, Which Could Improve Medical Technology, May 26, 2025 [Stand: 12.04.2026]

Die volumetrischen Bildschirme können aus statischen Körpern bestehen oder durch erzeugte Volumenkörper realisiert werden.

In der Mathematik – genauer in der Geometrie – bestehen Körper aus Flächen, die ein Volumen umschließen und über Längen, Breiten und Höhen verfügen. Um derartige Körper für volumetrische Bildschirme einzusetzen, benötigt man:

- einen Projektor,
- eine Eintrittsfläche
- eine Projektionsfläche

Einige Systeme benötigen zusätzlich eine Reflexionsfläche , um die Projektion auf die Projektionsfläche zu lenken. Im Folgenden sind einige Beispiele für diese statischen Bildschirme aufgeführt:

4.1. Statische Volumetrische Bildschirme

4.1.1. Ebene

Eine einzelne diagonale Projektionsfläche reflektiert das Bild des Projektors, der in diesem Fall als Eintrittsfläche fungiert. Diese Projektionsart bildet die Grundlage für weitere volumetrische Bildschirme, wie beispielsweise den würfelförmigen Bildschirm.



Abb. 2 VB Ebene

4.1.2. Variante: Würfel / Quader

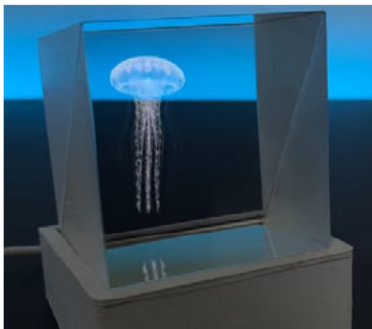


Abb. 3 NerdMagic 1

Da der Quader ohne Modifikationen die Projektion lediglich von der Grundfläche zur gegenüberliegenden Fläche lenken würde, wird hier eine diagonale Reflexionsfläche integriert, um das Bild auf zusätzlichen Seitenflächen darzustellen.

Merkmale:

- + Hochauflösende Bilder und Animationen möglich
- + Potenzial für modulare Systeme
- Die Projektionsfläche muss zur Maximierung des Effekts verborgen werden.
- Nicht alle Mantelflächen können effizient genutzt werden, wodurch Potenzial verloren geht.
- Nur auf einer Sicht-Achse sind die Darstellungen effektiv nutzbar.

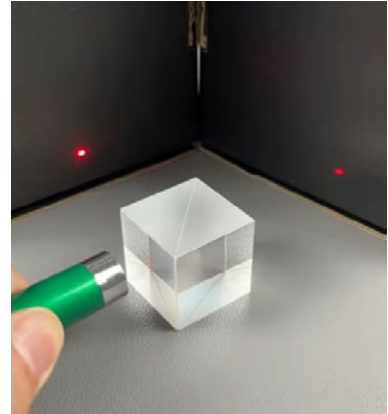


Abb. 4 NerdMagic 2

- Die gegenüberliegende Seite der Eintrittsfläche kann auch als Projektionsfläche genutzt werden, allerdings ist das Bild "platt" und wird daher in den meisten Fällen verdeckt.

4.1.3. Polyeder

Die Polyeder-Form ist eine rein optische Variation der Ebenen-Form. Der äußere Körper ist klar, durchsichtig und verursacht im Idealfall keine Verzerrungen. Die Projektionsfläche ist eine diagonale Fläche, die passgenau in den Polyeder eingefügt wurde.



Abb. 5 Polyeder

Merkmale:

- + Hochauflösende Bilder und Animationen möglich
- + diverse Formen möglich

- Je mehr Seiten der Körper besitzt, desto komplexer ist die Projektion eines erkennbaren Bildes auf den Mantelflächen.
- Sobald der Körper kugelförmiger wird, kann der Punkt erreicht werden, ab dem eine einzelne Reflektionsfläche zu einer erkennbaren Darstellung führt.
- Die Darstellung ist in diesem Zustand sehr perspektivabhängig. Andere Perspektiven wirken verzerrt.

4.1.4. Pyramide



Abb. 6 VB Pyramide

Bei dieser Konfiguration wird ein einzelnes Bild projiziert, wobei die Grundfläche der Pyramide auf dem Projektor positioniert ist. Die Mantelflächen dienen als Projektionsflächen.

4.1.5. Variation: Pyramidenstumpf

Der Pyramidenstumpf steht auf dem Kopf. Vier Bilder werden um die Grundfläche herum projiziert. Die Mantelflächen zeigen jeweils ein Bild.



Abb. 7 VB Pyramidenstumpf

Merkmale:

- + Hochauflösende Bilder und Animationen möglich
- + Darstellung auf 2 oder 3 Achsen möglich
- Eine exakte Positionierung auf dem Projektor ist erforderlich, um eine unverzerrte, vollständige Darstellung zu gewährleisten.
- Bei einer rechteckigen Eintrittsfläche und einer dreieckigen Projektionsfläche ist die nutzbare Fläche maximal die größte, in das Dreieck passende, skalierte Eintrittsfläche.

4.2. Dynamisch erzeugte Volumenkörper

Im Gegensatz zu statischen Körpern nutzen die erzeugten Volumenkörper eine Grundfläche und rotieren diese, um ein Volumen zu erschaffen. Die Grundfläche kann von einer einzelnen LED-Reihe bis hin zu einer Matrix aus mehreren LEDs reichen. Im Folgenden sind Beispiele für diese Kategorie volumetrischer Bildschirme aufgeführt:

4.2.1. LED-Reihe



Abb. 8 Hologramm Fan

Ein dreidimensionales Modell wird in zeitabhängige Steuerdaten übersetzt, die definieren, welche LEDs zu welchem Zeitpunkt in welcher Farbe aktiviert werden. Die LED-Reihe wird dabei über einen Motor in Rotation versetzt, bis sie für das menschliche Auge nicht mehr als einzelne Reihe wahrnehmbar ist. Die blinkenden LEDs erzeugen so ein 2D-Bild. Mit mehr Reihen oder weiteren Rotationsachsen steigt der Aufwand, ermöglicht aber auch die Darstellung dreidimensionaler Bilder.

4.2.2. Variante: LED-Matrix

Dieses Prinzip entspricht dem der LED-Reihe, nutzt jedoch eine größere Fläche, wodurch direkt dreidimensionale Darstellungen erzeugt werden können.

Merkmale:

- + Hochauflösende Bilder und Animationen möglich
- + 360° Ansicht
- Der angeschlossene Computer muss zum Teil in Echtzeit große Daten verarbeiten.
- Beim Ausfall einzelner LEDs treten sofort signifikante Darstellungsfehler auf.
- Die 360° Ansicht kann durch die Halterungen / Rotationsmodulen der Installation eingeschränkt werden.
- Sollte ein Ungleichgewicht einer rotierenden Projektionsfläche eintreten, kann es zur mechanischen Instabilität der gesamten Konstruktion und schweren physischen Schäden führen.

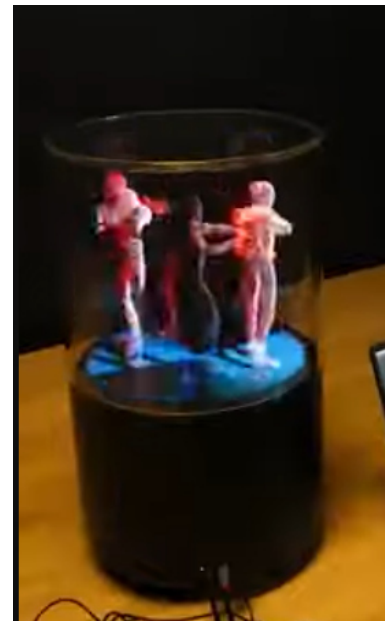


Abb. 9 VB LED-Matrix

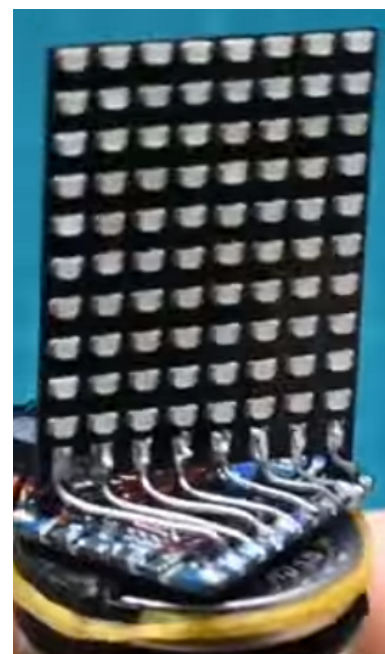


Abb. 10 VB Dot Matrix

4.3. Sonderfälle

Um die Übersicht der volumetrischen Bildschirme zu vervollständigen sollten haptische Bildschirme und Laserhologramme erwähnt werden. Für den Rahmen dieser Thesis stellen diese Systeme Sonderfälle dar, die als Inspiration für zukünftige Update Möglichkeiten, wie die Verwendung als Kleinspielzeug, sowie als Vergleich zu anderen akademischen Ansätzen zum Thema der volumetrischen Bildschirme.

4.3.1. Haptische Bildschirme

Wo das klassische Sci-Fi Hologramm immateriell ist, lässt uns der heutige Stand der Technik 3D - Projektionen, in gewissen Fällen anfassen.

4.3.1.1. Bitzee



Ein Spielzeug mit einer flexiblen Pixelmatrix, die in einem Winkel von 0–90° oszilliert und ein Hologramm erzeugt, das durch das weiche Material berührt werden kann.

Abb. 11 Blitzee

4.3.1.2. FlexiVol

FlexiVol, entwickelt von einem Team der Universidad Pública de Navarra, ist ein volumetrischer Bildschirm, bei dem das Bild auf eine aus mehreren flachen, flexiblen Bändern bestehende Projektions- oder Diffusionsfläche projiziert wird, welche sich mit hoher Geschwindigkeit vertikal auf und ab bewegt. Die Projektion kann von oben mit der Hand „berührt“ werden.



Abb. 12 FlexiVol

Limitationen:

Interaktion ist nur aus einer Richtung (Vertikal) möglich.

Der bewegliche Rahmen der Diffusorfläche stellt ein potenzielles Verletzungsrisiko dar.

4.3.1.3. Acoustic-Trap-Display



Abb. 13
Acoustic Trap Display

Das **Acoustic-Trap-Display** der Universität Sussex nutzt Schallwellen, um Partikel (2 mm Kugeln) in einem definierten Muster zu lenken und damit dreidimensionale, tast- und hörbare Hologramme zu erzeugen. Zusätzlich kann die Projektion durch einen Projektor eingefärbt werden.

4.3.2. Laserhologramm

Zur Vollständigkeit werden nachfolgend einige Beispiele laserbasierter Hologramme aufgeführt:

4.3.2.1. Aerial Burton 3D Display

Der 3D-Laserprojektor wird konzipiert, um per Einsatzfahrzeug Nachrichten in die Luft zu projizieren. Der Projektor nutzt einen Laser, um gezielt Moleküle zu treffen und zu ionisieren. Dabei geben die Photonen Energie in Form von Plasma ab, das als hell leuchtende Lichtkugeln sichtbar wird.

Das Phänomen ist auch als Plasma-Emission bekannt.

Limitationen:

Der Projektor muss in ein Fahrzeug eingebaut werden, um mobil zu bleiben.

Das Hologramm darf nicht berührt werden, es besteht eine Verbrennungsgefahr.



Abb. 14
Aerial Burton 3D display

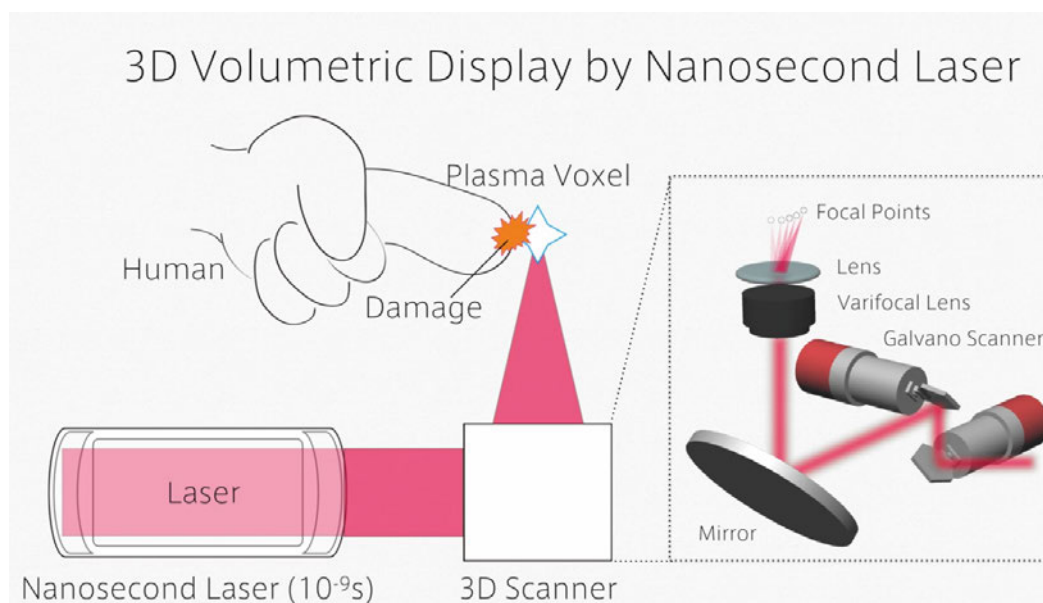


Abb. 15 Laserprojektion

4.3.2.2. Fairy Lights

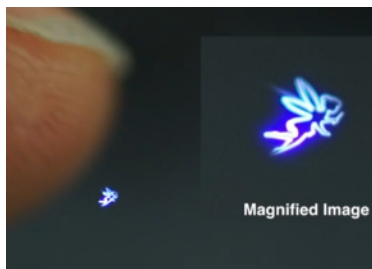


Abb. 16 Fairy Lights

Diese Projektion nutzt einen Femtosekundenlaser, um, wie beim Aerial Burton 3D Display, Lichtbilder durch Plasma-Emission zu erzeugen. Durch den Laser sowie seine Frequenz und eine zusätzliche Kamera können die Hologramme berührt und eine Interaktion mit ihnen ermöglicht werden. Diese Arbeit wurde im Hinblick auf die Nutzung in Haushaltsgeräten entwickelt.

1 Femtosekunde = 10^{-15} Sekunden

Durch die kurze Lebensdauer der Plasma-Emission kann das Hologramm berührt werden, ohne dass eine Gefahr von Verbrennungen entsteht.

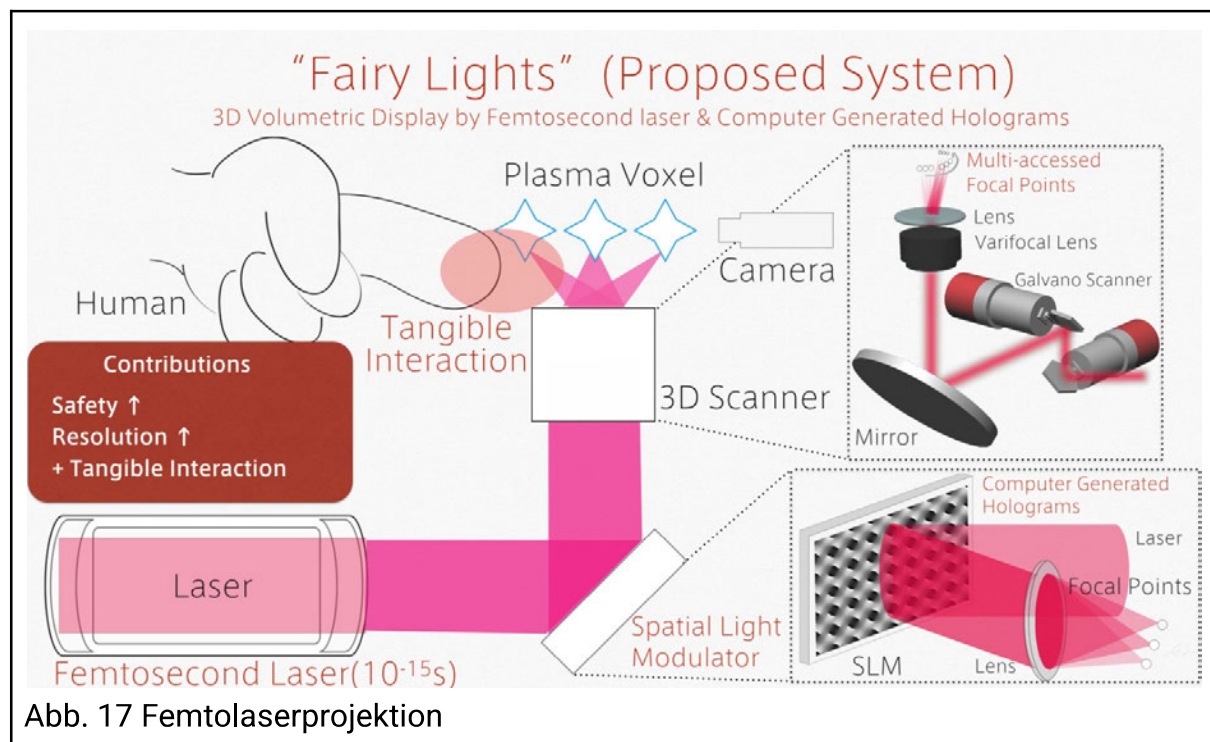


Abb. 17 Femtolaserprojektion

5. Hardware

Im Zuge dieser Arbeit benutzen wir verschiedene Materialien und Bauteile, um einen volumetrischen Bildschirm zu bauen. Im folgenden Abschnitt werden die wichtigsten Materialien und ihre Eigenschaften für das Projekt benannt.

5.1. LED (Light Emitting Diode)

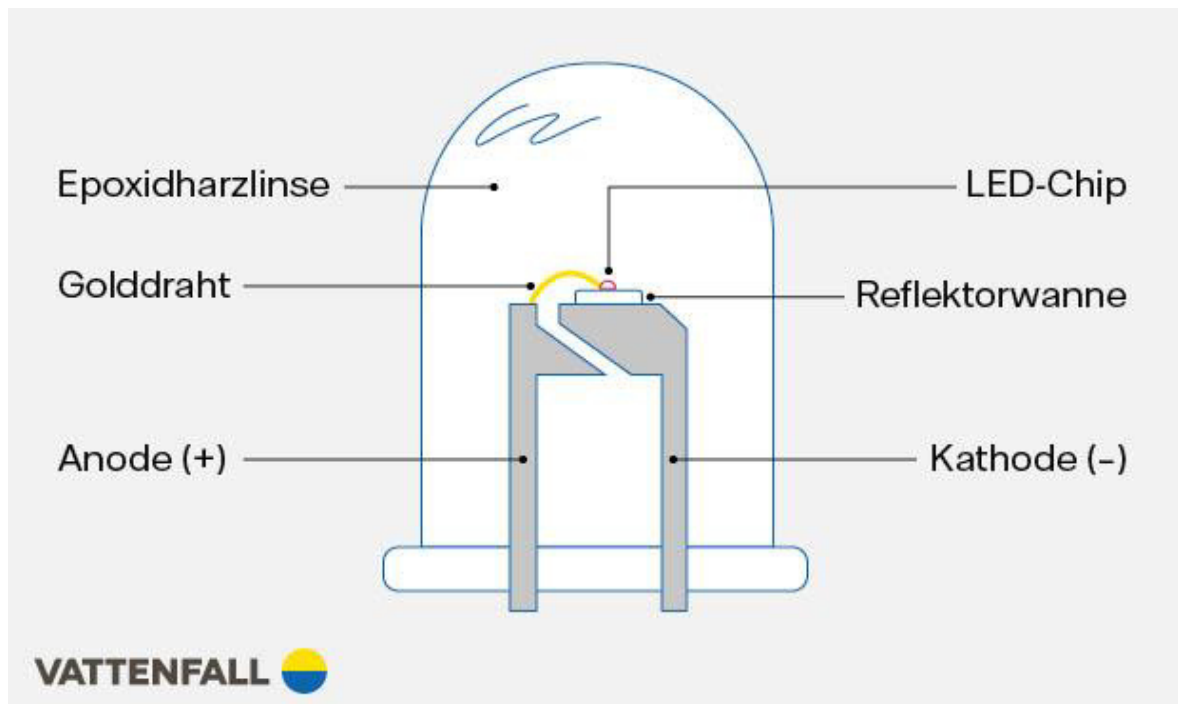


Abb. 18 LED Schemata

Eine LED (Light Emitting Diode) ist eine Halbleiter-Lichtquelle, die Licht emittiert, sobald Strom in Durchlassrichtung fließt. LEDs zeichnen sich im Vergleich zu traditionellen Leuchtmitteln durch höhere Energieeffizienz und geringere Wärmeentwicklung aus. Sie sind in verschiedenen Bauformen erhältlich und können je nach Typ einfarbig oder mehrfarbig leuchten, wobei einige Exemplare kleiner als 1 Millimeter sein können.

5.2. SMD (Surface-Mounted Device)

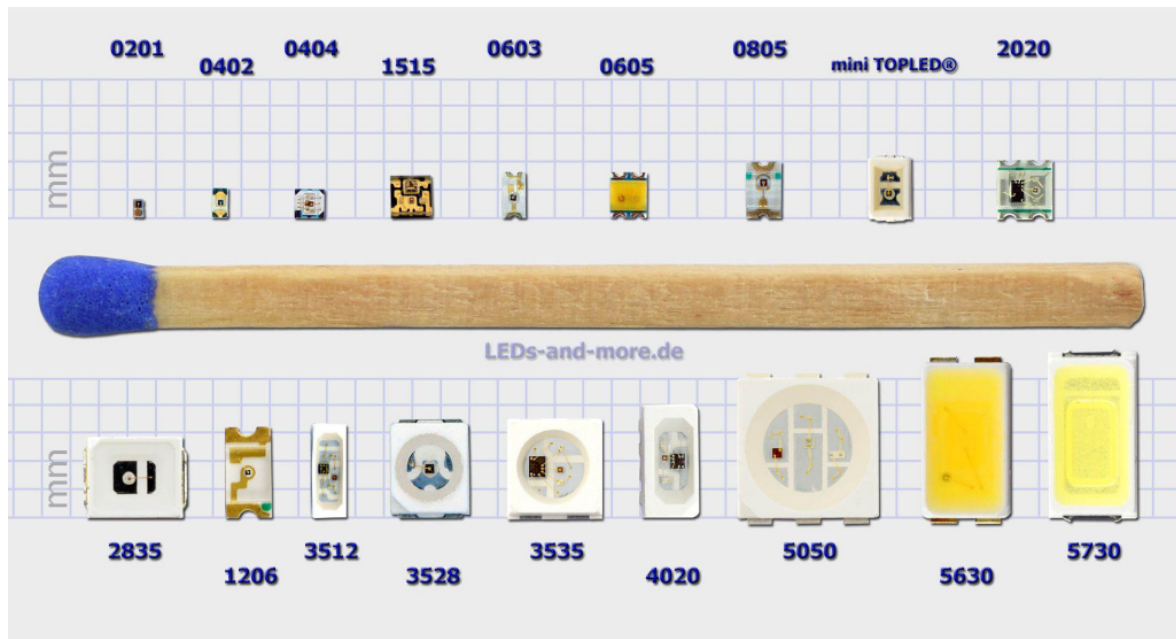


Abb. 19 SMD Größenvergleich

Im Rahmen dieser Masterarbeit werden neben klassischen LEDs auch SMD-LEDs verwendet. SMD ist die Bauart der LED, im weiteren Verlauf der Thesis wird der Begriff SMD zur vereinfachten Unterscheidung benutzt.

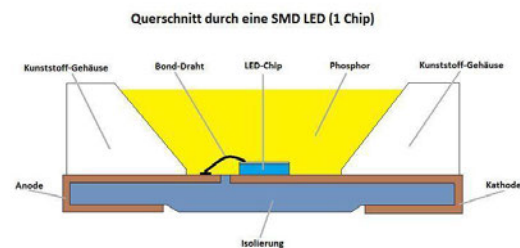


Abb. 20 SMD-Schemata

Die Standard-LED besteht im Wesentlichen aus einem Leuchtkörper, einem Anoden- und einem Kathodenanschluss. SMD-LEDs sind flach und blockförmig konstruiert, besitzen Kontaktflächen für das Auflöten auf Leiterplatten und ermöglichen somit eine kompakte, modulare Integration in Displays.

5.3. Magnetische Steckverbinder

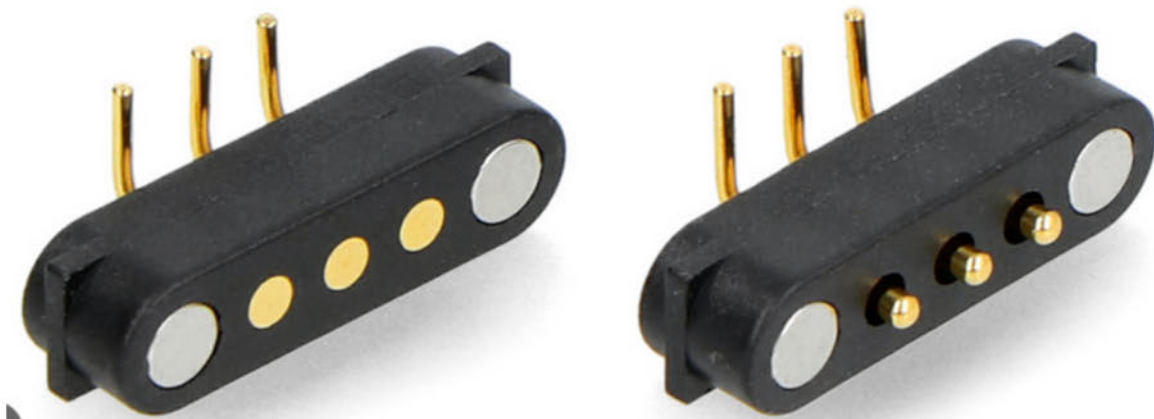


Abb. 21 Magnetische Steckverbinder

"Magnetische Steckverbinder bestehen aus Federkontaktstiften und einem magnetischen Verbindungssystem. Durch die Implementierung der Federkontaktstifte wird die Kontaktierung nicht durch Einstecken der Stifte in eine Buchse sondern bereits bei der Antastung der Kontaktstifte mit den Kontaktpunkten erzeugt"

- Simon Grüneberg, Kristin Rinortner, nh-technology.de, Elektronik Praxis, Magnetische Steckverbinder, Wenn Stecker und Buchse ... von selbst zueinander finden, 29.10.2013, [Stand: 12.04.2026]

Apple nutzt die Technologie seit Jahren, um Ladestecker für ihre Laptops und Smartwatches herzustellen. Die Kontaktpunkte verbinden sich bei Annäherung magnetisch und lassen sich ohne großen Kraftaufwand wieder lösen.

5.4. Mikrocontroller

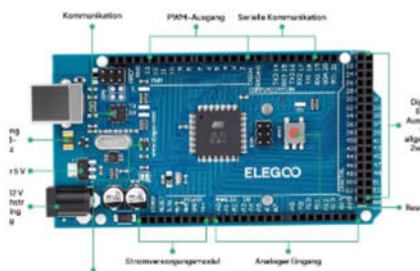


Abb. 22 Mikrocontroller

Um die einzelnen Pixel der LED-Würfel anzusteuern, wird ein Mikrocontroller mit USB-Anschluss verwendet, über den per PC Bilder und Animationen programmiert werden können. Wie viele LEDs ein Mikrocontroller ansteuern kann, hängt von der Anzahl der Pin-Anschlüsse und dem RAM ab. Die LEDs sollten über eine externe Stromquelle versorgt werden, da die Belastung für einen Mikrocontroller sonst zu groß werden kann

5.5. Diffusor Würfel

Um in der zweiten Testphase die projizierten Darstellungen der Würfel pixeliger zu gestalten, werden Diffusionsmaterialien eingesetzt. Dabei beschränken wir uns auf Materialien, die leicht in Formen gegossen werden können, durchscheinend sind und deren Attribute den Würfel positiv ergänzen, wie z. B. isolierende, wasserabweisende und wärmeleitende Eigenschaften.



Abb 23 Diffusorwürfel

In dieser Thesis werden folgende Stoffe verwendet: Silikon und Epoxidharz. Die Auswahl dieser Materialien erfolgte auf Grundlage von Erfahrungen aus vorangegangenen Arbeiten mit diesen Materialien, ihrer Verfügbarkeit und ihrer einfachen Verarbeitbarkeit.



Abb. 24 Silikon

Produkt:
Abformsilikon von NIUB
(Flüssigsilikonkautschuk)

Eigenschaften:
Selbstentlüftend
Lebensmittelecht
Abform freundlich
Niedrige Viskosität
Zäh und Reißfest
isolierend (strom, wärme, wasser)
Transparenz (diffus, Milchglasoptik)

Aushärtung in 4 - 6 Stunden

Gefahrenhinweise:
Augenkontakt, Verschlucken

Alternative:
Produkt:
Badsilikon
S17

zusätzliche Eigenschaften:
Transparent

Aushärtung in 24 Stunden



Abb. 25 Epoxy Resin

Produkt:
Epoxy Resin von Let's Resin

Eigenschaften:
Blasenfrei
kristall klar
selbst nivellierend
abform freundlich
isolierend: Strom,
Wärme

Aushärtung in 24 Stunden

Gefahrenhinweise:
Hautkontakt, Augenkontakt,
Verschlucken, Allergie



Abb. 26 Bad-Silikon

6. Software

6.1. Blender

Die 3D-Modellierungssoftware Blender wurde verwendet, um verschiedene Arbeitsschritte zu vereinfachen. Zum einen wurde sie verwendet, um ein Scharnier zu entwickeln, mit dem LED-Pins gleichmäßig und in größerer Stückzahl gebogen werden können, um schneller ein einheitliches Ergebnis für den Aufbau der LED-Würfel von Versuch 1 und 2 zu erzielen. Die Idee zu diesem Werkzeug war zudem, einen Bruch direkt am Epoxidkörper der LED zu verhindern. Allerdings sieht die offizielle Bauanleitung vor, dass die LEDs direkt am Leuchtkörper gebogen werden sollen, sodass dieses Werkzeug letztlich keine größere Verwendung fand.

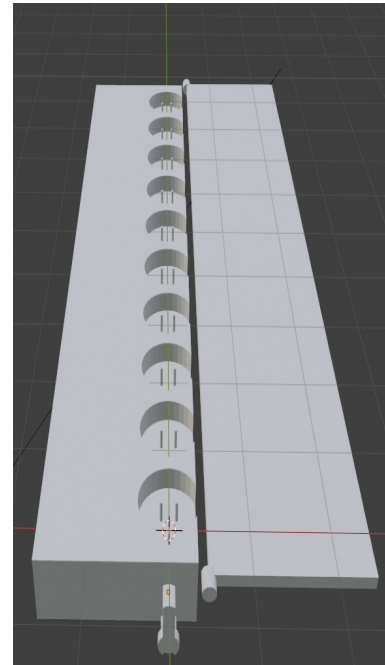


Abb. 27 LED Bieger

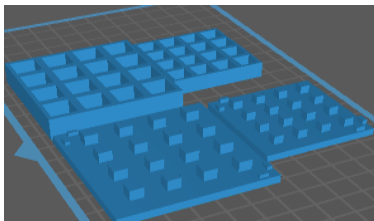


Abb. 28 Würfelgussform



Abb. 29 Invert Gussform

Für die Versuche der zweiten Testphase wurde eine Form für verschiedene Würfelgrößen modelliert. Die Würfelgröße ergibt sich aus den Abständen zwischen den Dioden der Würfellampe abzüglich eines kleinen Pufferabstands zwischen den geplanten Diffusionskörpern. Die Gussform ermöglicht vorgefertigte Aushöhlungen für die verschiedenen LED-Formen.

6.2. PCB Design Software (EDA)

Um das Design und die Positionierung der Steuerelemente, Ebenen, (Stützelemente,) und Stromleitungen zu optimieren, können nach den Tests eigene PCB's (Printed Circuit Board) mit einer PCB Design Software oder EDA wie beispielsweise KiCad erstellt werden. Das Bestücken mit Elementen wie Widerständen und LEDs/SMDs kann beim Bestellen der Platinen online zusätzlich beauftragt werden, was eine erhebliche Zeitersparnis darstellt.

6.3. Arduino

Über die Arduino IDE und entsprechende Libraries lässt sich ein Programm zur Ansteuerung multipler LEDs schreiben. Darstellungen und Animationen können manuell, Pixel für Pixel auf den Ebenen (Matrizen) erstellt werden. Input Eingaben z.B. über Buttons (Controller) können integriert werden, um den LED Würfel zu bespielen.

6.4. Firmware

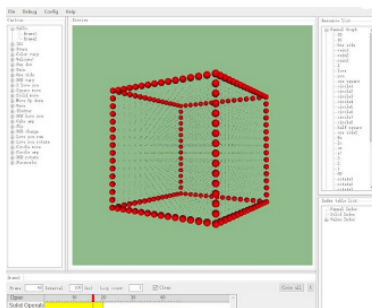


Abb. 30 FirmWare

Eine Vielzahl der DIY LED Würfel bieten eigene Firmware, um die Lichter der Würfel zu steuern oder um zwischen vordefinierten Animationen hin und her zu wechseln. Einige Programme ermöglichen eine händische Steuerung und die Erstellung von Animationskeys über eine dreidimensionale UI Grafik zu.

7. Konsolen Konzepte

Unter Berücksichtigung unserer vorangegangenen Recherche statischer und dynamischer, volumetrischer Bildschirme und der Analyse potenzieller Hard- und Softwarekomponenten werden in diesem Abschnitt Konzepte für eine 360° spielbare Konsole beschrieben.

7.1. Konzept I - Volumetrische Bildschirme

Die untersuchten volumetrischen Displays weisen unterschiedliche Eignungen für die Umsetzung einer interaktiven Spielekonsole auf. Dabei ist zwischen installativen Anwendungen (feste Kunstinstallation) und interaktiven, spielbaren, mobilen Systemen zu unterscheiden.

Ebenenbasierte Projektionen sind nicht 360°-fähig und bieten nur aus zwei Perspektiven (1 Sichtachse) optimale Sichtbarkeit.



Abb. 31 VB Konzept

Eine zusätzliche Draufsicht kann funktional integriert werden, bleibt jedoch vom Anwendungsbereich begrenzt.

Zur Bewertung wird im weiteren Verlauf ein beweglicher Charakter als Referenzobjekt herangezogen.

Eine einzelne Projektionsfläche ist funktional vergleichbar mit einem klassischen Bildschirm und bietet keinen signifikanten Mehrwert. Daher erscheint die Verwendung mehrerer würfelförmiger Module, die zu einer Wand kombiniert werden, als sinnvoller Ansatz.

Diese Module müssen synchronisiert werden, um eine kontinuierliche Bewegung über mehrere Einheiten hinweg zu gewährleisten, ohne dass sichtbare Diskontinuitäten entstehen.

Spielideen:

- Platformer wie z.B. Ice Climbers oder Doodle Jump
- 2D-Arena-Battler wie TeeWorld oder Towerfall Ascension

Ein Handheld-Würfel-Modul könnte es erlauben, Charaktere zu erstellen, die über eine Dockingstation im Rahmen in das aktuelle Spiel integriert werden können.

Die Konsole bleibt nicht 360°-nutzbar, bildet jedoch einen (beschränkt) modularen, transparenten Bildschirm ab, der in einem festen Rahmen platziert wird. Jede Würfelreihe steht auf einer mm-dicken Querstrebe, auf der die flachen, flexiblen Bildschirme (vgl. NerdMagic) und die Verkabelung verläuft. Die Auflösung der Würfel wird von der Auflösung der Projektionsfläche bestimmt. Die einzelnen Schichten werden über den Rahmen mit einem Steuerelement im Fuß des Rahmen verbunden. Die Synchronisation und Befestigung der Würfel gewährleistet Stabilität und visuelle Konsistenz.

Limitationen:

Sichthöhe und Perspektive beeinflussen die Wahrnehmung der Projektion.

Die Würfel könnten den Aufbau (frei) modular gestalten, wenngleich dies mit mehr Arbeitsaufwand verbunden wäre.

Eine horizontale Aufstellung (als Tisch) wäre hingegen nur mit einem Raster aus Polyeder-Bildschirmen, z.B. Halbkugeln, möglich, die keine große Oberseite aufweisen. Die „fehlende“ Oberseite ist wichtig, um eine „flache“ Projektion zu vermeiden, die die Illusion zerstören würde.

Die LED-Bildschirme, die Volumen erzeugen, haben andere Vor- und Nachteile. Die rotierenden LED-Streifen sind von zwei Seiten nutzbar, wobei zu beachten ist, dass die Befestigung teilweise eine Seite verdeckt. Darüber hinaus sind diese Projektionen mit Vorsicht zu behandeln: Nutzer, die die Bilder berühren möchten, könnten sich verletzen und den Bildschirm beschädigen. Die rotierende Matrix hat den Vorteil, dass sie in den meisten Fällen in einen Schutzkörper verpackt wird, um sie vor äußeren Einflüssen zu schützen. Ein Nachteil der rotierenden Bildschirme liegt in ihrer Mechanik. Die Rotation muss gleichmäßig ablaufen. Ein geringes

Ungleichgewicht kann dazu führen, dass der Bildschirm sich selbst beschädigt oder die Projektion verschwimmt, da das Timing nicht mehr mit der berechneten Vorgabe übereinstimmt. Es gibt bereits Beispiele, in denen Entwickler die LED-Matrix-Bildschirme zur Emulation von Spielen nutzen.

"The base contains a DC motor driving the platform with a 224:20 reduction ratio using a GT2 timing belt to help reduce noise. [James] reports that running at 700 RPM was the limit for the current version, giving an acceptable update frame rate. Too high, and the vibration and chassis flex was excessive. The base does little else other than house that power supply and support a 400 mm acrylic garden light dome. We wouldn't want to run this without such protection, which might not even be enough.

There are quite a few details to consider in such a build. One is the need to reduce the angle of perception of the LED display using a 3D printed slat-type collimator in front of each unit. You only want to perceive the LEDs head-on, or the POV effect is ruined. However, most of the details are in the software."

- Dave Rowntree, hackaday.com, Doom On A Volumetric Display, 09.09.2024, [Stand: 12.04.2026]

7.2. Konzept II - LED Hardware und Mikrocontroller Steuerung

Durch die Steuerung mittels Mikrocontroller lassen sich LEDs in Gruppen zusammenfassen und gezielt bespielen. In einer vorangegangenen Arbeit bespielten mein Kommilitone und ich bereits eine LED-Säule, die während der Veranstaltungen A MAZE./, PLAY und dem Reeperbahn Festival ausgestellt wurde. Während dieser Präsentationen erhielten wir viel positives und konstruktives Feedback, ebenso wie Anfragen, ob vergleichbare Projekte kommerziell umgesetzt werden könnten, z.B. für Museen. Der Markt für kleine, analoge LED-Spiele weist signifikantes Potenzial auf. Im vorherigen Projekt begrenzten die physikalischen Eigenschaften der Säule die Sichtbarkeit von einer Seite zur anderen, was als ein entscheidendes Feature genutzt wird. Die Idee, eine vollständig transparente Säule zu entwickeln, in deren Raum ein Spiel 360°-interaktiv gespielt werden kann, bildete die Grundlage dieser Arbeit.

Aufgrund der zeitlichen Beschränkungen einer Studienarbeit und der eigenen Ressourcen entschied ich mich, keine vollständige Neuentwicklung durchzuführen, sondern nach bereits verfügbaren LED-Konstruktionen zu recherchieren. Hierbei

wurden LED-Würfel-Bausätze identifiziert, die nach dem Aufbau sofort für die Darstellung von Animationen und Bildern geeignet sind.

Auf Grundlage dieser Bausätze kann ein volumetrischer LED-Bildschirm entwickelt werden, der wie eine interaktive Konsole bespielt werden kann und 360°-sichtbar sein sollte.

7.3. Kombination der Konzepte

Meine Erfahrungen aus der Arbeit mit LED-Projekten, kombiniert mit den recherchierten Erkenntnissen aus bereits realisierten Projekten der volumetrischen Bildschirmtechnik, sollen im weiteren Verlauf der Arbeit genutzt werden, um eine eigene Konsole zu entwickeln.

Wie bereits erwähnt gibt es bereits volumetrische Bildschirme, die Spiele und ihre dreidimensionalen Level emulieren. Das Ziel der Konsole ist es nicht, andere Systeme zu simulieren, sondern ein eigenes

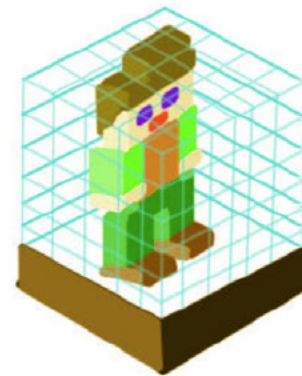


Abb. 32 VB LED Cube

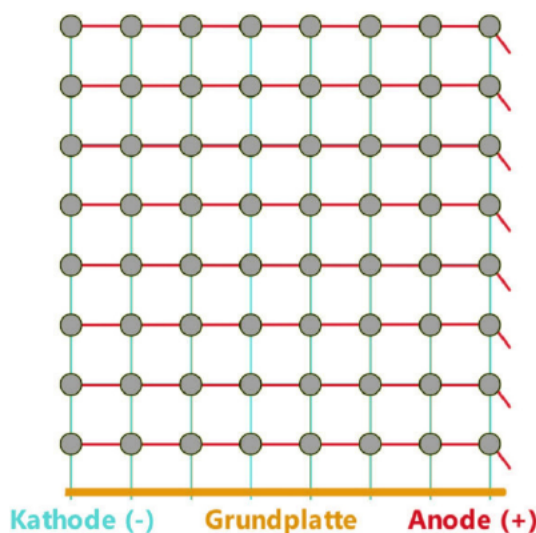
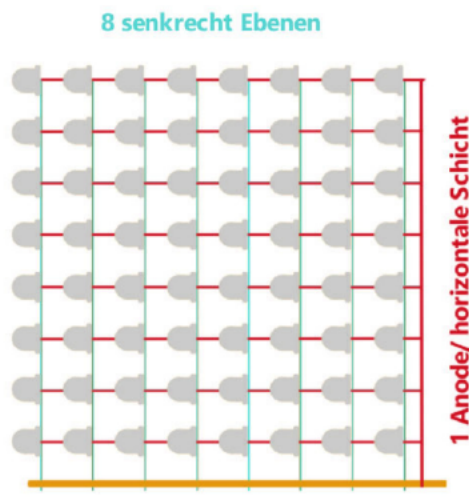
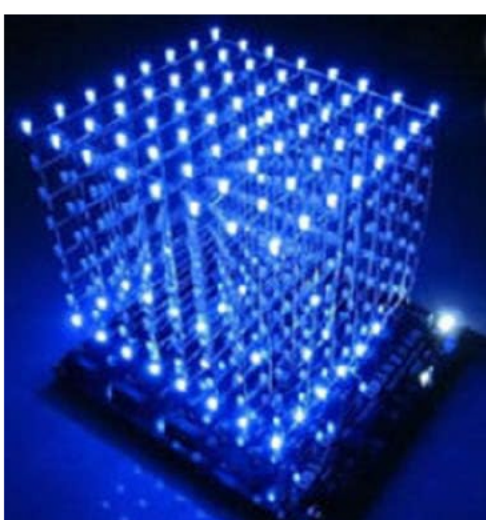
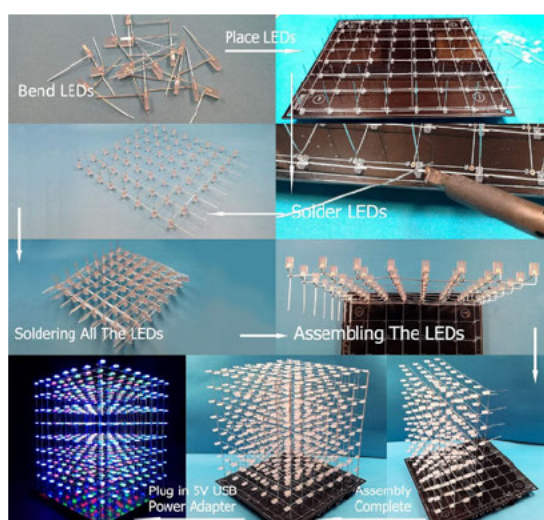
System zu erschaffen, für welches Spiele entwickelt werden können, die das Potenzial der Technik als Grundlage für ihr Design nutzen.

Wer ein GameBoy-Spiel emuliert auf einem Computer spielt, wird niemals die Empfindungen und Erfahrungen erleben, die die Entwickler angestrebt haben.

Diese Arbeit nutzt im weiteren Verlauf die LED-Cubes als Grundlage und strebt eine Modularität durch Würfelformen wie kommerzielle volumetrische Bildschirme an. Als Alleinstellungsmerkmal wird die Auflösung der Darstellungen nicht durch einen versteckten Projektionsbildschirm vorgegeben, sondern die Würfel, die die Bildschirmkonsole bilden sollen, sind die Pixel, die die Auflösung vorgeben. Aus diesem Grunde wird eine vogelartige Retro-Grafik im dreidimensionalen Raum als Ziel gesetzt, anstelle einer emulierten HD Umgebung.

8. Testphase I – Aufbau und Evaluation der LED-Würfel

8.1. Test Nr. 1 – LED-Cube (8x8x8)

Test Nr. I. 1	Testtitel LED - Cube (8x8x8)	Datum 20.12.25
Testhypothes Ein 8×8×8 LED-Würfel kann als volumetrischer Bildschirm genutzt werden.		
Beschreibung Für den Test wurde das 8×8×8 3D LED-Würfel Light Kit der Firma Fafeicy verwendet, um die Eignung für die Zielsetzung dieser Theses zu bewerten.		
Aufbau		
 Abb. 33 LED - Ebene Schemata	 Abb. 34 LED Ebenen Anordnung	
 Abb. 35 LED Würfel (8x8x8)	 Abb. 36 Vergleichbarer Aufbau	

Material

- 8×8×8 3D LED-Würfel Light Kit (Firma Fafeicy)
 - 2-Pin-LEDs (Blau)
 - Bodenplatine
 - Elektro-Kleinteile (Kabel, Chips, Widerstände, ...)

Testablauf / Durchführung

1. Zunächst wird jede LED der Ebene mithilfe eines Multimeters auf Funktionalität geprüft.
2. Anschließend wird jede LED einzeln aufgenommen und die Kathoden-Pins vorsichtig gebogen, um Beschädigungen am Epoxidharzkörper zu vermeiden.
3. Nach Einsetzen aller 64 LEDs in die Halterung werden die Reihen verlötet.
4. Die Anoden werden für einen leichten Höhenunterschied über ein Lineal gebogen und anschließend verlötet. Die letzte Anodenreihe wird nicht gebogen.
5. Der Vorgang wird für jede der acht Ebenen wiederholt.
6. Zur Stabilisierung werden vier zusätzliche Drähte zugeschnitten und an definierten Positionen an den Kathoden befestigt.
7. Alle Anodenhöhen werden mit Kabeln an die Platine gelötet.
8. Anschließend erfolgt der Anschluss der Platine an eine 5V-Stromquelle, um den Würfel zu testen.

Hinweis:

- Anoden und Kathoden dürfen nicht gekreuzt werden.
- Pins behutsam biegen – Fehlerquelle bei DIY-Kits
- Polung beachten!

Ergebnisse

Kategorie	Bewertung (ungenügend - optimal)	Kommentare / Stichworte
Tragbarkeit		Würfel wiegt ca. 0,5 kg, leicht zu transportieren
Transport		Schutz gegen Wasser, Druck und Erschütterungen notwendig, empfohlen: Acrylbox + Styropor

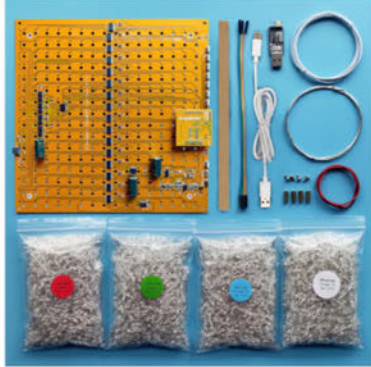
Deformation		Pins sind sehr biegsam, unvorsichtiges Verbiegen möglich Mechanisch instabil, vorsichtiger Umgang notwendig Torsion: Drehkräfte können Lötstellen und Pins beschädigen Stauchung: Druck auf LEDs deformiert den Würfel, Gefahr von Pinbruch
Aufbau		Aufbau dauert ca. 12 h, hohe Vorbereitungs- und Kontrollanforderung, Anleitung liegt nicht bei, Grundplatte hat keine bereits verlöteten Komponenten, Austausch einzelner LEDs erfordert mehrere gelöste Lötstellen oder ganze Ebenen
Auflösung		Mehr Details möglich durch mehr LEDs. Abmessungen: ~11x11x11 cm; LED Abstand ~1,5 cm
Sicherheit		LEDs entwickeln geringe Wärme. Offene Pins bieten eine Kurzschlussgefahr bei Feuchtigkeit und Berührung mehrerer Leitungen.
Fazit:		

Der 8×8×8 LED-Würfel ist empfindlich gegenüber mechanischer Belastung. Die Pins sind leicht zu biegen, wodurch Deformationen schnell auftreten. Um die Stabilität zu erhöhen, werden verstärkte Halterungen und aussteifende Elemente empfohlen. Eine schützende Hülle wie beispielsweise ein Acrylglas-Schaukasten wäre ideal, um das Konstrukt vor äußeren Einflüssen zu bewahren. Zur Stärkung der Sicherheit sollten offene Leitungen mit einer isolierenden Beschichtung versehen werden.

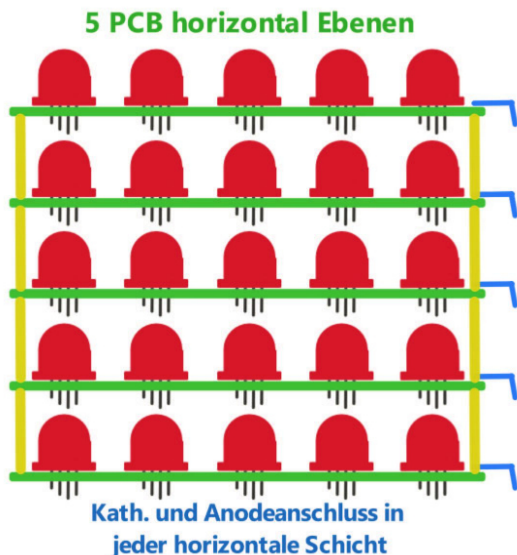
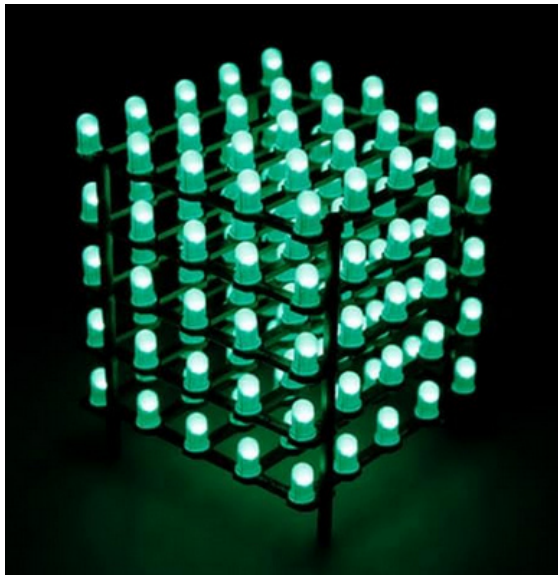
Außerdem sollte jede LED vor Einbau geprüft werden, um spätere Austauscharbeiten zu vereinfachen. Der Aufbau ist sehr zeitintensiv.

8.2. Test Nr. 2 – LED-Cube (16x16x16)

Test Nr.	Testtitel	Datum
I. 2	LED - Cube (16x16x16)	30.12.25
Testhypothese Ein größerer LED-Würfel erhöht die Auflösung für Testbilder und Animationen.		
Beschreibung Für diesen Test wurde das 3D16MINI LED-Cube Kit der Firma iCubeSmart verwendet. Ziel war die Bewertung der Darstellungsmöglichkeiten bei höherer LED-Auflösung.		
Aufbau		
Abb. 37 LED Ebene Schemata		Abb. 38 LED Cube (16x16x16)
Abb. 39 Grundplatte 16x16x16		Abb. 40 Aufbau LED Cube (16x16x16)

Material • 3D16MINI LED-Cube Light Electronics Kit (Firma iCubeSmart) ○ 2-Pin LEDs (verschiedene Farben: Weiß, Rot, Blau, Grün) ○ Bodenplatte ○ Elektro-Kleinteile (Kabel, Chips, Widerstände, ...)		 Abb. 41 DIY Kit
Testablauf Die Vorgehensweise entspricht dem 8×8×8 Aufbau, jedoch mit 256 LEDs pro Würfel. Die kritischen Schritte wie Prüfung, Biegen der Pins, Lötarbeiten und Stabilisierung wurden entsprechend der größeren Anzahl wiederholt.		
Ergebnisse Mechanische Stabilität: ähnlich empfindlich wie beim 8×8×8 Würfel Beachtenswerte Unterschiede sind wie folgt:		
Kategorie	Bewertung	Kommentar / Stichworte
Tragbarkeit		Würfel wiegt ca. 1,2 kg, leicht zu transportieren
Aufbau/Abbau /Umbau		Anleitung vorhanden, Die Bodenplatte wird genutzt um die LED perfekt in einem Raster auszurichten und zu biegen, Die Basisplatte verfügt bereits über verlötete Komponenten
Auflösung		Mehr Details möglich durch mehr LEDs. Abmessungen: 22x22x22 cm; LED Abstand ~1,3 cm
Fazit		
Größere Würfel erhöhen die Auflösung für Darstellungen, bringen aber proportional mehr Komplexität, Fehlerquellen und Anfälligkeit für Deformationen mit sich. Isolierende Maßnahmen und verstärkte Pins sind auch hier erforderlich. Vorgefertigte Bauteile, Hilfsmittel für den Aufbau und eine vorhandene, detaillierte Bauanleitung erleichtern die Konstruktionsphase.		

8.3. Test Nr. 3 – LED-Cube (5×5×5) mit Rasterplatinen

Test Nr. I. 3	Testtitel LED - Cube (5x5x5) mit Rasterplatinen	Datum 20.01.26
Testhypothese Vorgefertigte Rasterplatinen erhöhen die Stabilität und erleichtern Umbau und Wartung.		
Beschreibung Getestet wurde der 5x5x5 LED-Cube der Firma Treedix, der feste Rasterplatinen zur Stabilisierung der LEDs nutzt.		
Aufbau		
 5 PCB horizontal Ebenen Kath. und Anodeanschluss in jeder horizontale Schicht Abb. 42 LED + Platinen Schemata	 Abb. 43 LED Cube (5x5x5)	
Material • LED-Cube (5x5x5) Treedix ○ 4-Pin RGB-LEDs ○ 5 Rasterplatinen (5x5) • Mikrocontroller + Kabel		

Testablauf

1. Die einzelnen LEDs werden in die vorgefertigten Halterungen eingeführt
2. gekürzt und verlötet.
3. Die zusammengestellten Würfebenen werden mit den beigelegten Abstandshaltern verbunden.
4. Die Ebenen werden über Kabel an einen Microcontroller angeschlossen.

Hinweis:

- Die Pins der LEDs sind sehr nah beieinander was das Verlöten und NICHT Verbinden der 4 Pins für Lötanfänger sehr schwierig macht.
- Polung beachten!

Alternative:

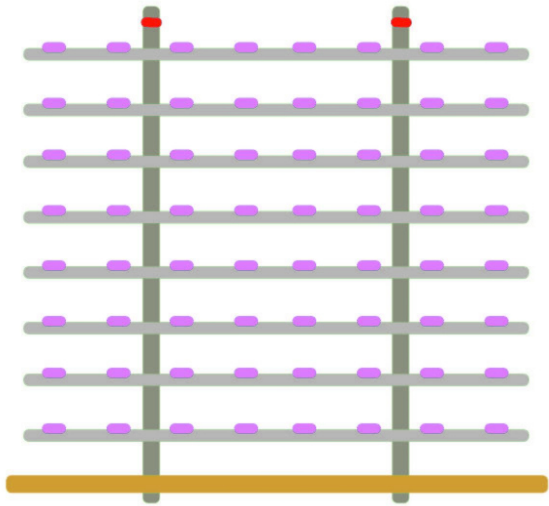
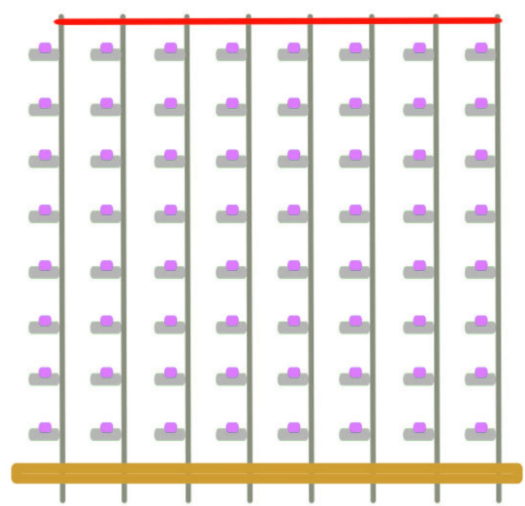
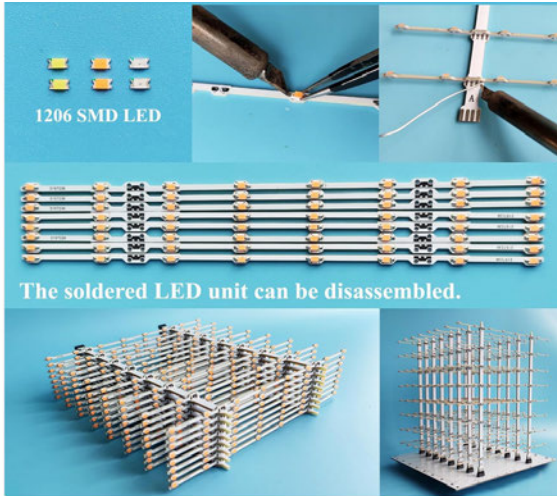
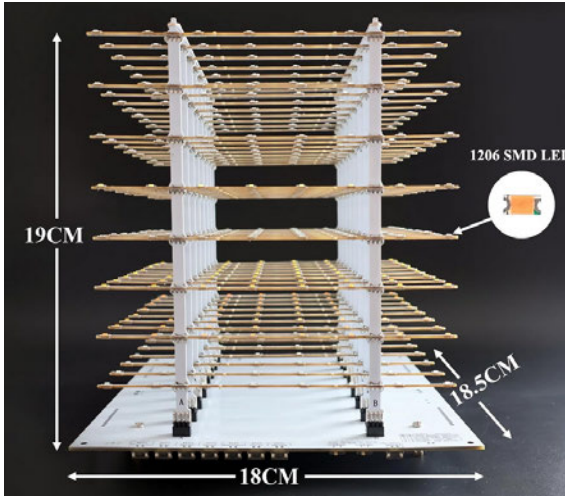
Lötpaste, die mit Hilfe einer Heißluftpistole geschmolzen wird, wäre in diesem Aufbau besser geeignet. Da die LEDs fest im Rahmen stecken, hat man im Gegensatz zu SMDs keine Gefahr, die LEDs mit dem Gebläse zu verschieben. Trotzdem ist darauf zu achten, dass die Pins keinen Kontakt zueinander haben.

Ergebnisse

Kategorie	Bewertung	Kommentar / Stichworte
Tragbarkeit		Tragbarkeit: sehr gut, ~ 0,3 kg, leicht transportierbar
Transport		Schutz gegen Wasser notwendig, empfohlen: Acrylbox + Styropor
Deformation		Mechanische Stabilität: hoch, kaum Deformation bei normalem Handling
Aufbau		Auf- und Umbau: Aufbauzeit ca. 3 Stunden einfacher durch modulare Abstandshalter, Alle Pins der LEDs liegen sehr nah beieinander
Auflösung		Wenige LEDs, Abmessungen: ~ 8x8x10 cm; LED Abstand ~1,3 cm
Sicherheit		verbessert durch Rasterplatinen empfohlen: isolierte Lötstellen

Fazit	
Rasterplatinen erhöhen die Stabilität erheblich und erleichtern den Austausch und die Wartung der LEDs. Der Würfel ist mechanisch robust und transportfähig. Es gibt zudem wenig Kontaktflächen für Kurzschlüsse. Die eng aneinanderliegenden Pins erschweren das Löten. Die Auflösung des Würfels ist mit 25 LEDs sehr gering und gibt kaum Möglichkeiten für die Darstellungen von dreidimensionalen Objekten. Zu dem schränken die Platinen auf engen Raum die Sicht in den Würfel ein.	

8.4. Test Nr. 4 – LED-Cube (8×8×8) Stabplatinen mit SMDs

Test Nr. I. 4	Testtitel LED - Cube (8x8x8) Stabplatinen mit SMDs	Datum 25.01.26
Testhypothese Vorgefertigte Stabplatinen erhöhen Stabilität und vereinfachen Austausch; SMD-LEDs sind robuster.		
Beschreibung Verwendet wurde das 3D8P-MULTI Kit der Firma iCubeSmart, das SMD-LEDs auf Stabplatinen nutzt.		
Aufbau		
 Stabplatinen SMD Aussteifung	 8 senkrechte Ebenen	Abb. 44 SMD Schemata Abb. 45 SMD Anordnung
 1206 SMD LED The soldered LED unit can be disassembled.	 1206 SMD LED 19CM 18CM 18.5CM	Abb. 46 SMD Cube Aufbau Abb.47 SMD Cube (8x8x8)

Material

- 3D8P-MULTI LED-Cube Kit
 - SMD-LEDs (verschiedene Farben)
 - Steckplatinen + Elektro-Kleinteile
- Mikrocontroller + Kabel

Testablauf

1. SMDs wurden auf Kontaktpunkte gesetzt und verlötet.
2. Ebenen wurden zusammengefügt, vertikale und horizontale Verbindungspins verlötet.
3. Die Ebenen wurde mit der Grundplatte verbunden
4. Die Ebenen wurde mit zusätzlichen Stäben ausgesteift

Hinweis:

- Stabförmige Platinen stabilisieren den Würfel, Auskragungen bleiben jedoch empfindlich
- SMDs wurden mit Hilfe einer Pinzette platziert und verlötet
- Polung Beachten!

Ergebnisse

Kategorie	Bewertung	Kommentar / Stichworte
Tragbarkeit		Würfel wiegt ca. 0,8 kg, leicht zu transportieren
Transport		Schutz gegen Wasser, Druck und Erschütterungen notwendig; empfohlen: Acrylbox + Styropor
Deformation		Die stabförmigen Platinen sind oben und unten versteift, Die Stäbe halten einen zu gewissen Grad belastbar, bis sie brechen, punktuelle Krafteinwirkungen können ein Problem darstellen, Die auskragenden Teile der Platinen sind ein Schwachpunkt
Aufbau		Auf- und Umbau: Aufbauzeit ca. 16 Stunden viele, kleine SMDs, viele, kleine Lötunkte, Arbeiten mit Pinzette

Auflösung		Mehr Details möglich durch mehr LEDs. Abmessungen: ~ 18,5x18,5x19 cm; LED Abstand ~2,3 cm
Sicherheit		stabiler Aufbau mit Ausnahme der Auskragungen, Kontaktpunkte Wasser oder Berührungen sehr klein
Fazit		
Das Gerüst aus Stabplatten verbessern teilweise die Stabilität und Hilft beim auswechseln von defekten Teilen. Die Stäbe haben mögliche Schwachpunkte an den Auskragungen. Eine verstärkte Aussteifungen und zusätzliche Isolierung sind empfohlen.		

8.5. Fazit - Testphase I

Ausgehend vom Durchschnittswert der Skala stellt sich folgende Werte heraus:

Würfel I. 3 > Würfel I. 4 && Würfel I. 2 > Würfel I. 1

Für die weitere Entwicklung der LED Würfel sind einige der Bewertungskriterien schwerer zu bewerten als andere. Die Anzahl der LEDs sind ausschlaggebend für die Darstellung von Spielobjekten und Charakteren. Vergleicht man die Würfel mit dem kleinsten *Tile* (engl. für Kachel, Grafikeinheit) eines GameBoy-Bildschirms von 8x8 Pixeln, scheint der Würfel aus dem Versuch I. 3 trotz seinem hohen Durchschnittswert, ungeeignet für weitere Betrachtung im weiteren Zuge dieser Arbeit. Da die Technik dieses Würfels potenziell in zukünftigen Systemen mit einer größeren Zahl an LEDs umgesetzt werden kann, sollte sie trotzdem Berücksichtigung finden. Die Tests zeigen zudem auf, dass LED Würfel mit Pin an Pin Verbindungen sehr anfällig für äußere Einflüsse sind und in der weiteren Entwicklung gesondert geschützt werden sollten, z.B. durch eine durchsichtige, stabile Außenhülle. Im aktuellen Zustand der Bausätze überwiegen die Vorteile relativ starrer Platinen gegenüber den biegsamen Verbindungen der Alternative. Aus diesen Gesichtspunkten ist der gewählte Favorit aus der 1. Testphase der Würfel I. 4.

Um die Darstellungen der Volumetrischen Bildschirme optisch an einen Retro-Pixel Look anzunähern, recherchieren wir im weiteren Verlauf bewährte Techniken aus den Anfangszeiten der Spielekonsolen und Bildschirmtechniken und versuchen diese Anschließend in der Testphase II für eine bessere Bildgebung zu nutzen.

9. Pixelgrafik



Abb. 48 Pixellook

Im dreidimensionalen Raum ist ein Voxel das Äquivalent eines Pixels. Da in dieser Arbeit versucht wird, ein pixeliges Bild aus Würfeln in einem Würfel zu erzeugen, werden kurz die Merkmale eines Voxels definiert und betrachtet, wie Ansätze aus der klassischen Kunst und der zugrundeliegenden Pixelgrafik genutzt werden können, um die Darstellungen zu optimieren.

9.1. Voxel

“Kunstwort, das sich aus Volume und Pixel zusammensetzt. In der Computersprache ist ein Voxel das kleinste Volumenelement bei der geometrischen Modellierung dreidimensionaler Objekte. Jedem Voxel können neben den Raumkoordinaten weitere Daten zugeordnet werden wie z. B. Farbe, Helligkeit, Transparenz, Temperatur, Windgeschwindigkeit und -richtung. Beim sog. Voxel-Man, der Computerrekonstruktion eines menschlichen Körpers, ist zu jedem Voxel (etwa 5,5 Mio. allein für den Kopfbereich) u. a. auch die Blutversorgung sowie die anatomisch- und physiologisch-funktionelle Zugehörigkeit verzeichnet.”

- wissen.de, Voxel, [Stand: 12.04.2026]

9.1. Pixel

Zu diesem Zeitpunkt werden Würfel in Größen zwischen $5 \times 5 \times 5$ und $16 \times 16 \times 16$ LEDs getestet. Die LEDs entsprechen in diesem Kontext der Auflösung des Bildschirms. Um Bilder und Animationen in sehr geringer Auflösung erkennbar darstellen zu können, lohnt es sich, Systeme zu betrachten, die vergleichbare Einschränkungen aufweisen, und zu analysieren, welche Techniken sie einsetzen, um ihr volles Potenzial auszuschöpfen. Für diese Zwecke wird die Kombination von Spielkonsolen der 80er und 90er Jahre mit damals gängigen CRT-Bildschirmen betrachtet.

9.2. Kathodenstrahlröhrenbildschirm (CRT)

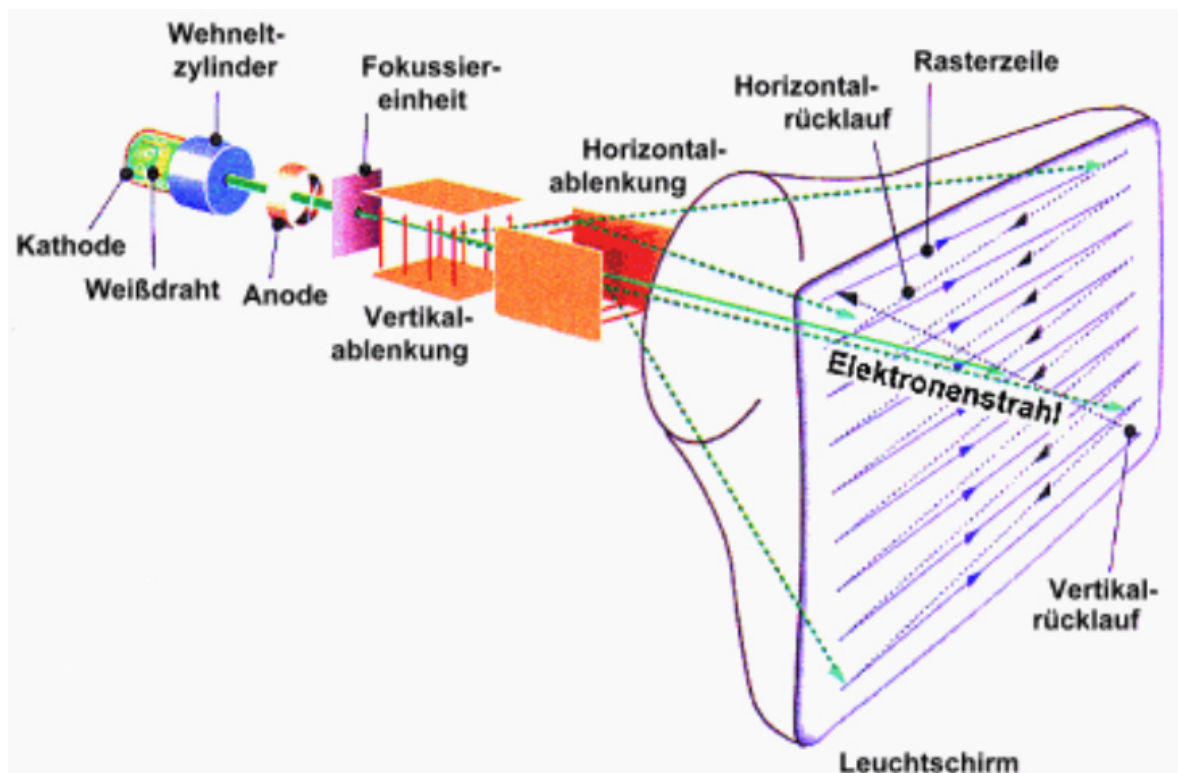


Abb. 49 Kathodenstrahlröhrenbildschirm

“Der Röhrenmonitor (dessen ausgereifte Technologie sich seit dem Beginn des Fernsehzeitalters ständig entwickelte) beruht auf dem Prinzip der Braunschen Röhre (Elektronenkanone), bei der in Richtung des phosphorbeschichteten Frontglases Elektronen geschossen werden. Die kurz aufleuchtende Phosphorschicht nimmt der Betrachter als Bildpunkt auf dem Monitor auf.”

- Erich Käser, Fachlexikon der Mechatronik ©, fachlexika.de, Monitor, 2007 [Stand: 12.04.2026]

Durch die technischen Beschränkungen seiner Zeit weist der Röhrenbildschirm Eigenschaften und Besonderheiten auf, die ihn von heutigen Bildschirmen unterscheiden. Medien wie Film, Fernsehen und Videospiele lernten, die Beschränkungen des Bildschirms zu erkunden und für Ihre Zwecke optimal zu nutzen. Im folgendem Abschnitt sind einige dieser Herausforderungen und ihre Lösungsansätze darzustellen:

9.2.1. Scanlinien



Abb. 50 Scanlinien

CRT Bildschirme erzeugen Bilder, indem sie der Reihe nach, Zeile für Zeile, von links nach rechts jeden Pixel im Bruchteil einer Sekunde durch einen RGB - Projektor beleuchten. Je nach Frequenz, Bauart und Alter des Bildschirms können mit bloßem Auge dünne, dunkle Linien zwischen den Pixeln sichtbar sein.

9.2.2. Farbblutungen

Durch die Frequenz, in der die Bilder auf dem Bildschirm erzeugt werden, kann es für das menschliche Auge aussehen, als würde die Farbe der Pixel mit der Farbe der angrenzenden Pixel verschwimmen.

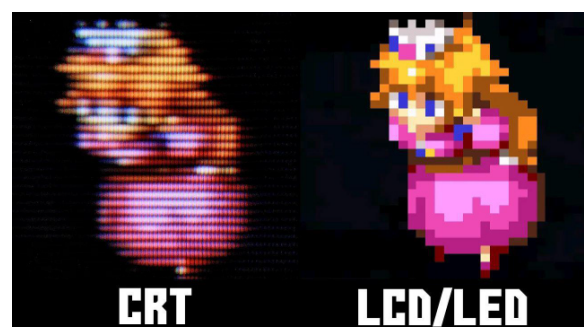


Abb. 51 Farbblutung

9.2.3. Geringe Auflösung



Abb. 52 Maniac Mansion (1987)



Abb. 53 Mayhem in Monsterland (1993)

In den 80er und 90er Jahren war die von der Konsolenhardware verarbeitbare Auflösung noch verhältnismäßig gering, weshalb ältere Spiele, selbst unter Ausnutzung einiger Tricks der CRT-Bildschirmdarstellung, immer noch sehr blockartig wirkten. Spätere Spiele erzielten hingegen bessere Ergebnisse innerhalb dieser Limitierungen durch den Einsatz von Techniken aus der klassischen Kunst.

9.2.4. Geringe Farbdarstellung

Auch wenn eine Farbtiefe von 8 Bit oder mehr dargestellt werden konnte, ließ die Systemsoftware nur eine begrenzte Anzahl unterschiedlicher Farben pro Bild zu. So waren beispielsweise auf dem C64 nur 16 Farben gleichzeitig auf dem Bildschirm sichtbar.

9.2.5. N-Bit Farben

Die Farbtiefe von alten Spielen ist häufig im Bereich von 8 oder 16 - Bit. Diese Zahlen geben die Anzahl an möglichen Farbstufen an, die auf diesem System dargestellt werden können. 8 - Bit bedeutet, dass ein Pixel 256 (0 bis 255) Farbstufen pro Farbkanal anzeigen kann. Jeder Pixel hat die Farbkanäle R(ot), G(rün) und B(lau) und bietet somit einen Farbraum von 256^3 Farben.

16 - Bit bedeutet, dass ein Pixel 2 Byte (8 - Bit) nutzt um ca. 64.000 Farb- oder Helligkeitsstufen darzustellen. Heutzutage sind 32 - Bit Standard.

8 - Bit = 1 Byte = $2^8 = 256$ Farbstufen

16 - Bit = 2 Byte = $2^8 \times 2^8 = 2^{16} = 65.536$ Farbstufen

32 - Bit = 4 Byte = $2^8 \times 2^8 \times 2^8 \times 2^8 = 2^{32} = 4.294.967.296$ Farbstufen

1 Pixel in 8 - Bit $\sim 256^3 = 16.776.961$ Farben

Difference between 8-bit and 16 bit color format in DIP



8-bit Color Representation



16-bit Color Representation

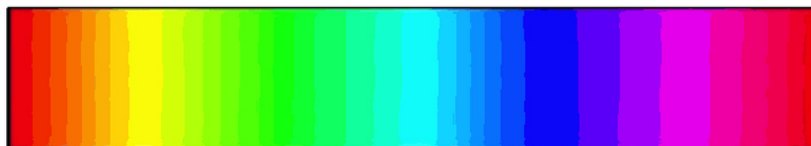


Abb. 54 Farbraum 8- und 16-Bit

9.3. GameBoy Bildschirm

Neben den CRT-Bildschirmen wurde in den 90er Jahren auch eine kleinere, mobile Bildschirmtechnologie, vor allem bei Kindern, populär. Die Rede ist vom *monochromen passiv matrix LCD Bildschirm*, der in einer der ältesten Handheld - Konsole, dem GameBoy, verbaut wurde. Aber wie funktioniert diese Darstellungsart? Der Bildschirm besteht im Grunde aus zwei Glasscheiben, dem Vordergrund und dem Hintergrund mit einer Spiegelfolie, der in späteren Versionen mit einer Hintergrundbeleuchtung versehen wurde. Die beiden Schichten fungieren als Polarisatoren und haben auf einer Seite eine Polarisator-Schicht und auf der anderen Seite eine transparente Elektroden-schicht zur Adressierung der Pixel. Zwischen den Glasscheiben befindet sich zudem eine klare Flüssigkristallschicht, die bei der Zufuhr von Strom durch die Elektroden ein festes Kristallgitter erzeugt, welches das Licht bricht. Bei Eintritt wird das Licht polarisiert und erreicht, ohne die Zufuhr des Stroms, ununterbrochen die Hintergrundschrift. Fließt Strom, wird das Licht abgelenkt, ohne die zweite Schicht zu treffen und der Pixel wird Schwarz. Diese Anzeige Art ist zudem auch als Positiv-LCD-Anzeige bekannt. Im Gegensatz dazu ist die Negativ-LCD-Anzeige ein Bildschirm dessen Hintergrundschrift beleuchtet sein muss, da er im aktiven Betrieb den Großteil der Pixel verdunkelt, sodass die aktuelle Darstellung den Lücken zwischen den Pixeln entspricht.

Abbreviations of various LCD technologies:

TN - Twisted Nematic – technology associated mainly with passive matrices, and the improvements introduced in it allow to improve the image quality (e.g. by giving it color). TN technology is also the basis for TFT matrices.

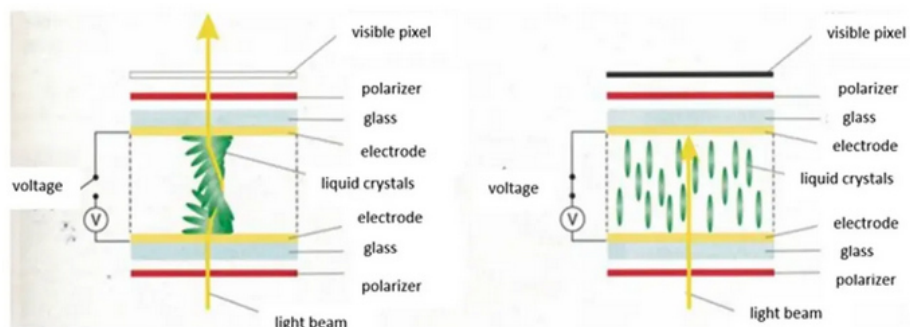


Abb. 55 Monochrome LCD

Die Beschränkungen dieses Bildschirms sind u.a. geringe Bit - Farbtiefe (Klassisch 4 Graustufen), eingeschränkter Betrachtungswinkel, geringer Kontrast (mehr Grau als Schwarz) und eine begrenzte Bildschirmgröße bzw. -auflösung. Positiv zu betrachten sind der geringe Preis, geringer Stromverbrauch und die Funktionalität in kleinen Projekten.

Folgend ein Vergleich zwischen den GameBoy (Die Unterschiede zum Gameboy Classic sind farblich markiert):

	GameBoy Classic	GameBoy Pocket	GameBoy Color
CPU	8bit (Vergleichbar mit Z80) mit 4.194304 MHz	8bit (Vergleichbar mit Z80) mit 4.194304 MHz	8bit (Vergleichbar mit Z80) mit 4.194304 / 8.388 MHz
RAM	8 KByte	8 KByte	32 KByte
Video RAM	8 KByte	8 KByte	16 KByte
Auflösung	160x144 Pixel 20x18 Zeilen	160x144 Pixel 20x18 Zeilen	160x144 Pixel 20x18 Zeilen
Farbe	4 Graustufen	4 Graustufen	256 Farben
Sound	4 Kanäle Pseudo Stereo	4 Kanäle Pseudo Stereo	4 Kanäle Pseudo Stereo
Power	DC 6.0V 0.7W	DC 3.0V 0.7W	DC 3.0V 0.6W

Abb. 56 GameBoy Vergleich

“Der Bildschirmspeicher für den Hintergrund hat eine Größe von 256x256 Pixel oder 32x32 Blöcke, von denen jeder aus 8x8 Pixel besteht. Von diesen 256x256 Pixel können jedoch nur 160x144 Pixel gleichzeitig dargestellt werden.”

- Lehrveranstaltung: RST-L, Rechnerstrukturen Labor, Hochschule Bremen, Nintendo GameBoy, 2.4.1 Der Aufbau von Hintergrundbildschirm und Fenster des GameBoy, mikrocontroller.net, [gameboy.pdf](#)

Die Auflösung der Tiles in 8x8 Pixelblöcke bietet eine vergleichbare Ausgangssituation zu den getesteten LED - Würfeln. Mit den vorhandenen LED-Würfeln bieten sich Charakter Designs für die Auflösungen 8x8x8 und 16x16x16.

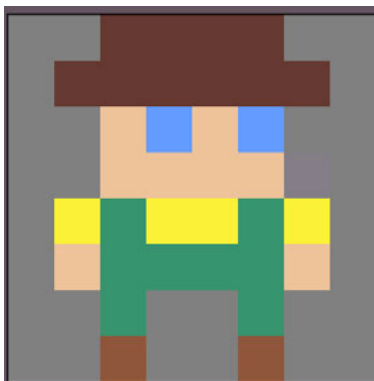


Abb. 57 8x8 Pixel Charakter

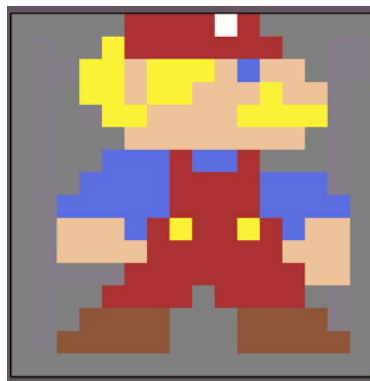


Abb. 58 16x16 Pixel Charakter

9.4. Klassische Kunsttechniken für Pixel

Diese Techniken sind für die Thesis relevant, da sie LED-Würfel-Animationen auf niedriger Auflösung verbessern, indem sie Farben und Kanten glätten und den Eindruck von höherer Detailtiefe erzeugen.

9.4.1. Dithering

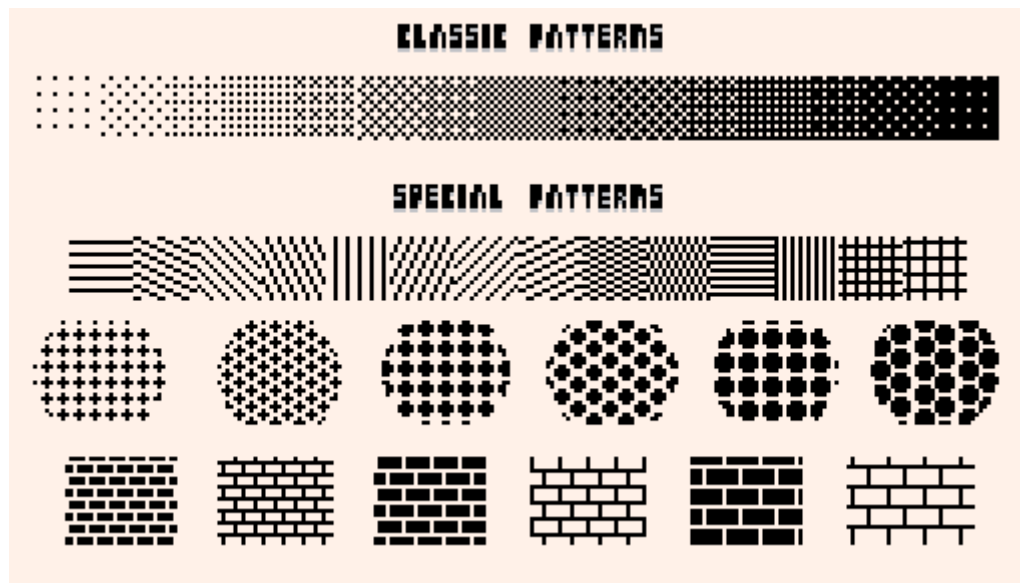


Abb. 59 Dithering

Das optische Vortäuschen von Farbverläufen durch Linien, Punkte und Rauschen, vergleichbar mit der Technik des Crosshatching aus der klassischen Kunst. Pixel können somit Sättigungen mit einem einzigen Farbton erzeugen und klar definierte Texturen darstellen.

9.4.2. Anti-aliasing

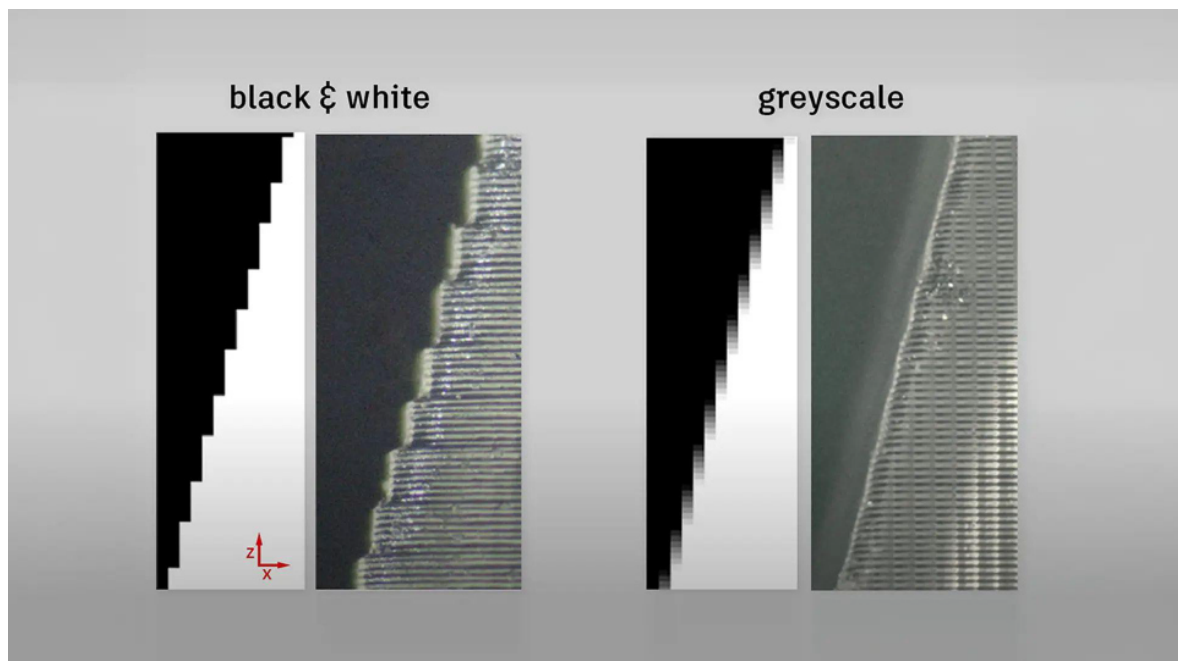


Abb. 60 Anti-Aliasing Grayscale

Das optische Vortäuschen von Tiefe durch eine teilweise Umrandung in einer abweichenden Farbe, wie man es zum Beispiel auch beim Backlighting / Rimlighting aus Kunst und Fernsehen kennt. Je nach Bedarf können Pixel genutzt werden, um Formen hervorzuheben oder sie in ihre Umgebung zu integrieren.

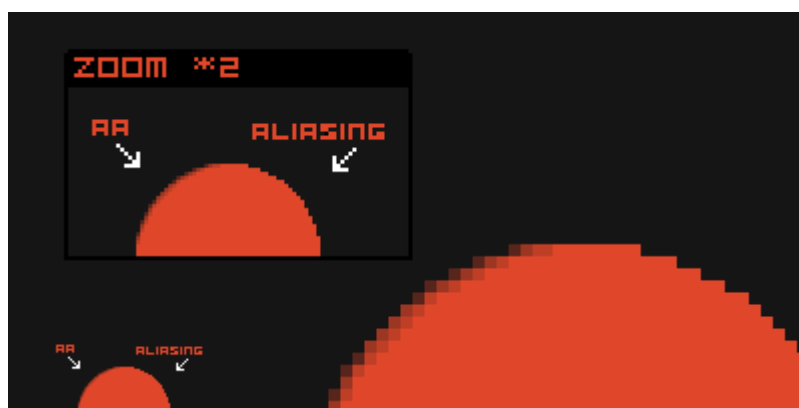


Abb. 61 Anti - Aliasing

10. Testphase II - Verpixeln der Darstellungen durch Diffusionseigenschaften verschiedener Materialien

Durch den Aufbau der Testwürfel 1 und 2 wäre es sehr aufwändig, im Nachgang einzelne Diffusionskörper für jede LED einzusetzen. Jede Ebene müsste für jede Iteration einzeln ab- und wieder angebaut werden. Die Möglichkeit einer vertikalen, zusammenhängenden Diffusionskörperreihe in einer Form, vergleichbar mit einer vierarmigen Qualle, wurde zwar in Erwägung gezogen, jedoch aufgrund der Komplexität verworfen. Die Testwürfel 3 und 4 bieten durch ihren modularen Aufbau einen idealen Ausgangspunkt für den Test mit Diffusionskörpern und sind daher die Grundlage der zweiten Testphase.



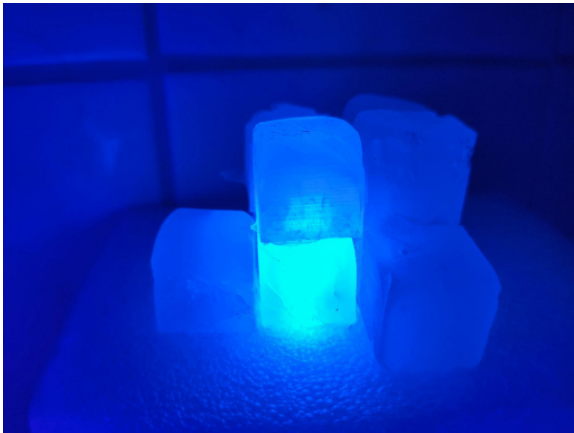
Abb. 62 Diffusor

10.1. Test Protocol - LED Cube (5x5x5) Silikon

Test Nr. II.1a	Testtitel LED in Silikon	Datum 05.02.26
Testhypothese Durch Diffusionswürfel aus Silikon über den LEDs können wir ein 3D Pixelbild erzeugen		
Beschreibung Ich benutzte LEDs aus dem LED Cube (5x5x5) der Firma Treedix um den Effekt von Diffusionswürfeln auf die Bildausgabe zu testen und für die Zwecke der Thesis zu bewerten		
Aufbau		
		
Abb. 63 Diffusionswürfel Silikon 1		Abb. 64 Diffusionswürfel Silikon 2
Material - LED Cube (5x5x5) der Firma Treedix - LED - Diffusionswürfel (Silikon)		
Testablauf 1. 1 - 2 LEDs wurden auf eine Ebene platziert 2. Die Diffussionkörper werden auf die LEDs platziert 3. weitere Diffusionskörper werden um die beleuchteten Würfel auf 2 Ebenen herum platziert 4. Die Umgebung wird abgedunkelt 5. Die LEDs werden eingeschaltet		

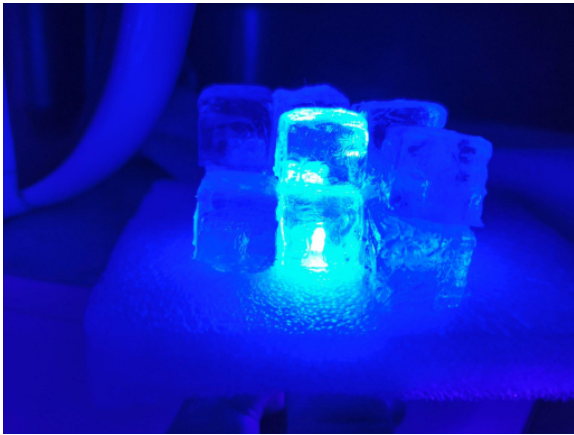
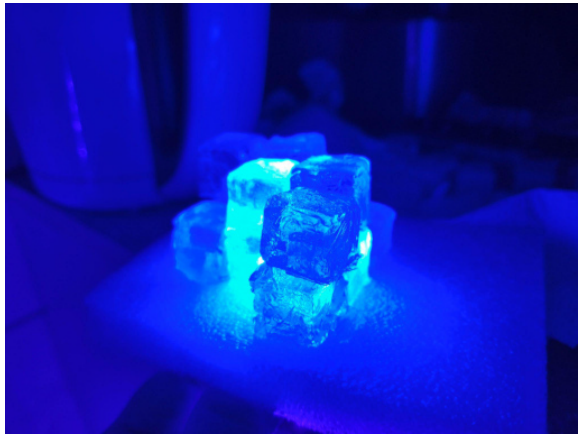
Ergebnisse		
Kategorie	Bewertung	Kommentar
Form		Würfelform nicht 100% akkurat Vergleichbar mit angeschmolzenen Eis würfeln
Farbblutungen		Das Licht wird schwach an benachbarte Würfel übertragen
Lücken		Lücken sind klein ~ 1-2 mm
Sichtbarkeit		Das gewählte Silikon ist nicht klar genug, um durch den Würfel sehen zu können
LEDs		Die LEDs füllen den Silikonwürfel aus, die Beleuchtung ist gleichmäßig
Fazit		
Das Silikon ist gießbar und schmiegt sich an die gedruckte Form an. Im Vorwege muss die Form mit einer dünnen Schicht eines Lösemittels, in diesem Fall einer Lauge (Seifenwasser), versehen werden, damit das Silikon während der Aushärtung nicht an der Form kleben bleibt. Zu viel des Lösemittels führte in diesem Versuch zu einer verlängerten Aushärtungszeit, weshalb die Würfelform aus Silikon beim Auslösen noch instabil war. Das Silikon ist transparent, aber eher milchig als klar, weshalb es zwar kleine Lichtblutungen gibt, aber auch die Sicht ins Innere der Würfelmatrix verhindert. Pixel stellen sich nur in der ersten Schicht klar heraus.		

10.2. Test Protocol - LED Cube (5x5x5) Bad-Silikon

Test Nr. II. 1b	Testtitel LED in Silikon	Datum 07.02.26
Testhypothese Durch Diffusionswürfel aus Bad-Silikon über den LEDs können wir ein 3D Pixelbild erzeugen		
Beschreibung Ich benutzte LEDs aus dem LED Cube (5x5x5) der Firma Treedix um den Effekt von Diffusionswürfeln auf die Bildausgabe zu testen und für die Zwecke der Thesis zu bewerten		
Aufbau		
		
Abb. 65 Diffusorwürfel Bad-Silikon 1		Abb. 66 Diffusorwürfel Bad-Silikon 2
Material - LED Cube (5x5x5) der Firma Treedix - LED - Diffusionswürfel (Bad.Silikon)		
Testablauf 1. 1 - 2 LEDs wurden auf eine Ebene platziert 2. Die Diffussionkörper werden auf die LEDs platziert 3. weitere Diffusionskörper werden um die beleuchteten Würfel auf 2 Ebenen herum platziert 4. Die Umgebung wird abgedunkelt 5. Die LEDs werden eingeschaltet		

Ergebnisse		
Kategorie	Bewertung	Kommentar
Form		Würfelform nicht 100% akkurat
Farbblutungen		Das Licht wird kaum an benachbarte Würfel übertragen
Lücken		Lücken sind klein ~ 1-2 mm
Sichtbarkeit		Das gewählte Silikon transparenter als Versuch II. 1, aber nicht klar genug um weitere Schichten zu sehen,
Auflösung		Die LEDs füllen den Silikonwürfel aus, die Beleuchtung ist gleichmäßig
Fazit		
Im Vergleich zum Test II. 1a ist das Bad-Silikon etwas klarer und ließ sich ohne Probleme in Form pressen. Etwas mehr vom Inneren der Würfelmatrix ist zu erahnen, aber noch nicht klar zu erkennen. Eine klare Pixelform wird nur in der ersten Schicht erreicht.		

10.3. Test Protocol - LED Cube (5x5x5) Epoxidharz

Test Nr. II. 1c	Testtitel LED in Epoxid	Datum 10.02.26
Testhypothese Durch Diffusionswürfel aus Epoxidharz über den LEDs können wir ein 3D Pixelbild erzeugen		
Beschreibung Ich benutzte LEDs aus dem LED Cube (5x5x5) der Firma Treedix um den Effekt von Diffusionswürfeln auf die Bildausgabe zu testen und für die Zwecke der Thesis zu bewerten		
Aufbau		
		
Abb. 67 Diffusionswürfel Epoxid 1		Abb. 68 Diffusionswürfel Epoxid 2
Material - LED Cube (5x5x5) der Firma Treedix - LED - Diffusionswürfel (Epoxid)		
Testablauf 1. 1 - 2 LEDs wurden auf eine Ebene platziert 2. Die Diffussionkörper werden auf die LEDs platziert 3. weitere Diffusionskörper werden um die beleuchteten Würfel auf 2 Ebenen herum platziert 4. Die Umgebung wird abgedunkelt 5. Die LEDs werden eingeschaltet		

Ergebnisse		
Kategorie	Bewertung	Kommentar
Form		Würfelform erreicht, klare Kanten
Farbblutungen		Das Licht wird kaum eingeschränkt, angrenzende Würfel werden leicht beleuchtet, solange sie nicht selbst erstrahlen
Lücken		Lücken sind klein ~ 1-2 mm
Sichtbarkeit		Bis auf kleine Einschlüsse ist das Material klar, die anderen Würfel sind zu erkennen
Auflösung		Die LEDs füllen den Silikonwürfel aus, die Beleuchtung ist gleichmäßig
Fazit		
Das Epoxid ist gießbar und schmiegt sich an die Form an. In diesem Versuch wird eine Form aus Silikon benutzt, die mit Hilfe einer gedruckten invertierten Form, der vorangegangenen Tests, entstanden ist. Durch die Beschaffenheit der Silikonform lässt sich das Epoxid leichter nach dem Aushärten herauslösen. Das Epoxid ist transparent und klar bis auf kleine Einschlüsse . Eine passable Würfelform wurde erreicht. Lichtblutungen treten an benachbarten, nicht leuchtenden Würfel nur minimal auf. Pixelformen stellen sich bisher am klarsten heraus.		

10.4. Test Protocol - LED Cube (8x8x8) Bad-Silikon

Test Nr. II. 2a	Testtitel SMD in Bad-Silikon	Datum 07.02.26
Testhypothese Durch Diffusionswürfel aus Bad-Silikon über den SMDs kann ein 3D-Pixelbild erzeugt werden		
Beschreibung SMDs des LED Cube (8x8x8) der Firma iCubeSmart werden verwendet um den Effekt von Diffusionswürfeln auf die Bildausgabe zu testen und für die Zwecke der Thesis zu bewerten.		
Aufbau		
		
Abb. 69 Diffusionswürfel SMD Bad-Silikon		
Material - LED Cube (8x8x8) der Firma iCubeSmart - SMD - Diffusionswürfel (Bad-Silikon)		
Testablauf 1. 1 - 2 LEDs wurden auf eine Ebene platziert 2. Die Diffussionkörper werden auf die LEDs platziert 3. weitere Diffusionskörper werden um die beleuchteten Würfel auf 2 Ebenen herum platziert 4. Die Umgebung wird abgedunkelt 5. Die LEDs werden eingeschaltet		

Ergebnisse

Die Ergebnisse sind vergleichbar mit dem vorangegangenen Test der zweiten Phase, II. 1b. Für die Bewertung ändert sich in diesem Fall nur die Kategorie Auflösung.

Kategorie	Bewertung	Kommentar
Auflösung		Die SMDs sind klein und befinden sich am unteren Rand der Würfels, der Würfel wird erleuchtet, aber das Licht wird nicht gleichmäßig stark verteilt,
Fazit		

Auch bei dieser LED-Form bleibt die Sicht auf Würfel im Hintergrund stark eingeschränkt. Die SMD sorgen für einen Farbverlauf im Würfel. Die Leuchtkraft könnte effizienter genutzt werden, wenn die SMD zentriert im Diffusionskörper liegen würde. Eine Pixelform ist maximal schwach zu erahnen.

10.5. Test Protocol - LED Cube (8x8x8) Epoxidharz

Test Nr. II. 2b	Testtitel SMD in Epoxid	Datum 10.02.26
Testhypothese Durch Diffusionswürfel aus Epoxidharz über den SMDs kann ein 3D-Pixelbild erzeugt werden		
Beschreibung SMDs des LED Cube (8x8x8) der Firma iCubeSmart wird verwendet um den Effekt von Diffusionswürfeln auf die Bildausgabe zu testen und für die Zwecke der Thesis zu bewerten.		
Aufbau		
		
Abb. 70 Diffusionswürfel SMD Epoxid 1		Abb. 71 Diffusionswürfel SMD Epoxid 2
Material - LED Cube (8x8x8) der Firma iCubeSmart - SMDs - Diffusionswürfel (Epoxidharz)		
Testablauf 1. 1 - 2 LEDs wurden auf eine Ebene platziert 2. Die Diffussionkörper werden auf die LEDs platziert 3. Weitere Diffusionskörper werden um die beleuchteten Würfel auf 2 Ebenen herum platziert 4. Die Umgebung wird abgedunkelt 5. Die LEDs werden eingeschaltet		

Ergebnisse Die Ergebnisse sind vergleichbar mit dem vorangegangenen Test der zweiten Phase, II. 1c. Für die Bewertung ändert sich in diesem Fall nur die Kategorie Auflösung.		
Kategorie	Bewertung	Kommentar
Auflösung		Die SMDs sind klein und befinden sich am unteren Rand der Würfels, der Würfel wird erleuchtet, aber das Licht wird nicht gleichmäßig stark verteilt,
Fazit		
Die bisher klarste Würfelform wurde erreicht. Lichtblutungen treten an benachbarten, nicht leuchtenden Würfel auf. Pixelformen stellen sich nicht heraus. die SMD müsste zentraler liegen. Wenn es gelingt die Kanten noch glatter zu bekommen, sollte man durch die Diffusoren ins Innere schauen können.		

10.6. Fazit - Testphase II

Durch die Analyse der zweiten Testphase stellt sich heraus, dass sich Epoxidharz für eine klare, scharfe Würfelform am besten eignet. Bei der Verarbeitung des Silikon treten ein paar Schwierigkeiten auf, die sich potenziell, bei vermehrter Arbeit mit diesem Material und für diesen Einsatzzweck, beheben lassen. Desweiteren bieten die LEDs der Standard-Bauform die gleichmäßigere Lichtverteilung, wobei der Unterschied zur SMD-Bauform nicht ausschlaggebend ist. Um Lichtblutungen komplett zu verhindern, könnten zukünftig Einwegspiegelfolien verwendet werden.

Auf Grundlage der aufgewendeten Zeit für den praktischen Teil dieser Arbeit, sind die folgenden Abschnitte konzeptioneller Natur und zum Zeitpunkt der Abgabe noch nicht vollständig umgesetzt.

11. Modulare Würfelemente

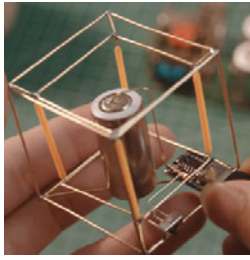


Abb. 72 LED-Lampe

Bei dem Aufbau in Würfelform, die wiederum aus Würfeln besteht, liegt der Gedanke an modulare Elemente nahe. Aber wie sollten diese Elemente gestaltet werden und welche Sicherheitsvorkehrungen sollten dabei berücksichtigt werden?

Ein modularer Würfel benötigt eine Lichtquelle, die idealerweise nicht nur an- und ausschaltbar sein sollte, sondern auch Farbe und Intensität verändern kann. Die Würfel müssen mit einem Steuerungszentrum wie einem Mikrocontroller verbunden werden. Darüber hinaus sollten sie Kontaktpunkte zu benachbarten Würfeln aufweisen und sich, wie in ein responsive Design aus dem 2D Bereich, in den dreidimensionalen Raum des volumetrischen Bildschirms integrieren.

Hinsichtlich der Sicherheit sollten offene Kontakte weder für Fingern noch für Spritzwasser erreichbar sein. Die Integrität der Module sollte durch eine stabile Hülle gewährleistet werden. Die Module sollten unter geeigneten Bedingungen geöffnet werden können, im regulären Betrieb jedoch geschlossen bleiben. Im Idealfall sollte die Position jedes Würfels im Aufbau vom Steuerelement erkannt werden können.

11.1. Filament Konzept

- Die Hülle besteht aus nicht leitfähigem, belastbarem Acryl.
- Die Innenwand wird mit einer leicht spiegelnden Folie versehen, um Lichtblutung zu verhindern.
- Der Leuchtstoff ist entweder ein Knäuel oder mehrere Eckstreifen aus Glühfilamentfäden.
- Für jede Grundfarbe ist mindestens ein Faden vorhanden.
- An dem zentralen Punkt jeder Fläche befindet sich ein magnetischer Steckverbinder mit Anschlüssen für Daten und Strom für RGB-LEDs.

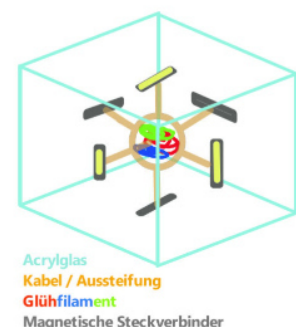


Abb. 73 Modul Filament

11.2. LED/SMD-Konzept

- Die Hülle besteht aus nicht leitfähigem, belastbarem Acryl.
- Die Innenwand wird mit einer leicht spiegelnden Folie versehen, um Lichtblutung zu verhindern.
- In der Mitte des Würfels befindet sich ein Gebilde aus Doppelseitenplatten, welches Kontakt mit den zentralen Punkten jeder Mantelfläche des Würfels aufweist und an den in regelmäßigen Abständen beidseitig LEDs oder SMDs verlötet wurden.
- An den Kontaktpunkten zur Hülle werden magnetische Steckverbinder eingesetzt, um Strom und Daten zu übertragen.

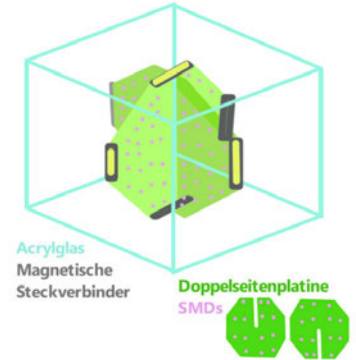


Abb. 74 Modul SMD

12. Game Design

Die Würfel erreichen mit der gewählten Verpixelungstechnik Auflösungen von 5x5x5 und 8x8x8. Diese Auflösungen sind verhältnismäßig gering. Wenn wir die beiden verbleibenden Würfel einbeziehen, können Auflösungen von bis zu 16x16x16 getestet werden. Beschränkt durch die Auflösung brechen wir das Game Design auf kleine Pixel-Objekte und Charaktere hinunter und passen die Spielwelt an den physischen Bildschirm, der den virtuellen Raum beschränkt. Das Potenzial der 360° Sichtbarkeit des Bildschirms, für Spieler und Beobachter, soll genutzt werden.

12.1. Spielideen

12.1.1. Puzzle Code:

Durch Drücken von Tasten werden farbige dreidimensionale Formen im Würfel gedreht und gewendet, bis alle in der richtigen Position angeordnet sind. Objekte, die ihre korrekte Ausrichtung und Einfärbung erreicht haben, blinken auf und werden anschließend in ihrem Zustand eingefroren, bis die Lösung kombiniert wird. Ein Timer zeigt an, wie schnell die Spieler den Code geknackt haben.

Mindest Anforderungen:

3 Funktionstasten = Objektauswahl, Farbe wechseln, Objekt drehen

Auflösung = 5x5x5 und größer

3x3x3 wäre möglich, bietet aber wenig Spielraum für Formen, da klar definierte Formen erst ab 4 Pixeln möglich sind.

LCD-Anzeige = Timer

12.1.2. Geschütz: Ein "Space Invaders" - alike

Ein Geschütz bewegt sich auf den unteren Ebenen des Würfels und schießt auf Knopfdruck in die Luft. Der Spieler versucht, Ufos abzuschießen, bevor diese den Boden des Würfels erreichen.

Mindest Anforderungen:

1 Controller = Bewegung des Geschützes / Zielen, Schießen

Das Geschütz kann fest platziert sein oder sich auf

2 Achsen bewegen.

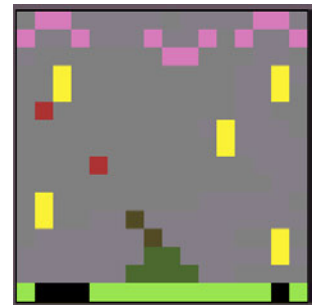


Abb. 75

Geschütz

Auflösung = 16x16x16 oder mehr

Das Geschütz (ca. 2 Pixel) und sein Zielrohr (ca. 2 Pixel) müssen erkennbar sein. Die Raumschiffe (ca. 3 Pixel) sowie die Geschosse (min. 1 Pixel) von beiden Seiten müssen dargestellt und animiert werden. Für eine angemessene Spieldauer, in dem sich das Raumschiff Pixel für Pixel herunter bewegt, und die Geschosse sichtbar durch den Raum fliegen, sollte eine entsprechend große Würfelmatrix ausgewählt werden. Wenn die Flugbahn eines Geschosses aus einem einzigen, aufblitzenden, festen Pixel besteht, geht die Illusion eines Angriffs verloren.

LCD-Anzeige = Timer / Highscore

12.1.3. Cloud Control

Der Spieler steuert eine Wolke in den oberen Würfelschichten. Wenn die Wolke genügend andere Wolken absorbiert hat, fällt sie als Regen auf die unteren Ebenen herab. Trifft der Regen auf eine unbewachsene Stelle am Boden des Würfels, erblühen Pflanzen. Das Spiel endet, sobald der Spieler die gesamte Bodenfläche begrünt hat.

Mindest Anforderungen:

1 Controller = Bewegung auf zwei Achsen

Die Wolke fliegt in den oberen Schichten des Würfels.

Auflösung = 8x8x8 oder mehr

Die Wolke sollte 2 Pixel hoch sein.

Der Boden (1 Pixel) kann klar sein oder braun beleuchtet werden.

Die Vegetation kann den Boden ersetzen und ggf. um weitere Pixel wachsen.

Je mehr Vertikalen Raum der volumetrische Bildschirm bietet, desto mehr kommt die Ästhetik des Regens zum Einsatz und mehr Hinderniss können integriert werden.

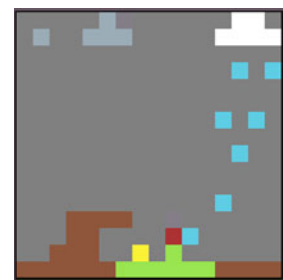
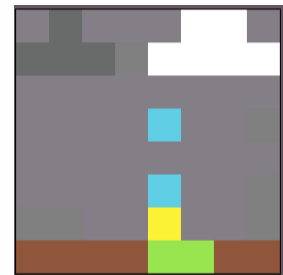


Abb. 76
8x8 Konzept,
16x16 Konzept

LCD-Anzeige = Timer / Highscore

12.2. Umsetzungskonzept

Ein volumetrischer Bildschirm in Würfelform wird unter Einbezug der bisherigen Testergebnisse aufgebaut und verkabelt. Der Prototyp wird von einer Schutzhülle, z.B. aus Acryl, umgeben.

Der Würfel wird in Schichten gegliedert, die jeweils als Matrizen mit LED-Adressen für X- und Y-Positionen genutzt werden. Die einzelnen Matrizen werden an einen Mikrocontroller angeschlossen und programmiert. Bei jedem Update oder nach vordefinierten Eingaben, beispielsweise dem Drücken einer Taste, wird jede Schicht sequenziell aktualisiert.

Das Ergebnis der Eingaben wird weiterverarbeitet und gegebenenfalls als Wertung auf dem LCD-Bildschirm ausgegeben.

13. Ergebnisse

Durch meine Recherchen und Testläufe im Rahmen dieser Thesis konnte ich mir Wissen zum Bauen und Programmieren von volumetrischen Bildschirmen aneignen. Gewonnene Erkenntnisse durch Test wurden entweder gleich verwendet und erprobt, oder für eine mögliche Weiterentwicklung, nach der Thesis, erstmal ad acta gelegt.

Aber konnte die Forschungsfrage beantwortet werden?

Konnte ich auf Grundlage eines DIY-LED-Cube einen volumetrischen Bildschirm entwickeln?

Ja, es konnten volumetrische Bildschirme auf Grundlage von DIY-LED-Cube Bausätzen erstellt werden. Die Auflösung ist abhängig von der Anzahl und Anordnung der angeschlossenen LEDs. Jedoch steigt der Arbeitsaufwand mit jedem steigenden Maß von Länge, Höhe und Tiefe im würfelförmigen Aufbau enorm an. Das Potenzial von eigens erstellten Platinen, die die volumetrische Bildschirmform, in modularer oder statischer Form unterstützen und ergänzen, sowie die Auslagerung zeitintensiven Arbeitsschritte durch monetäre Ressourcen sollten in zukünftigen Entwicklungsschritten dieser Projektidee Verwendung finden.

Konnte ein transportierbarer Prototyp entwickelt werden?

Ja, die Prototypen sind mit minimalem Aufwand mobil und benötigen keine Transportmittel und -wege.

Ist der Prototyp beispielbar?

Ja, schon in ihrer Grundform bieten die LED-Würfel Möglichkeiten, Animationen und dreidimensionale Bilder darzustellen. Mit Hilfe eines MikroControllers, wie z.B. einem Arduino Mega oder einem leistungstärkeren Raspberry Pi, lassen sich die einzelnen LEDs gezielt ansteuern. Mit RGB-LEDs lässt sich jeder Pixel im Volumen des Bildschirms gezielt einfärben. Die LED-Ebenen können in Sekundenbruchteilen nach und nach aufblinken um ein vollständiges Bild für menschliche Augen zu erzeugen. Mit genügend Ressourcen könnten sogar alle LEDs ihren Ein-, Aus- und Farbzustand halten, bis ihr Pixel durch eine Interaktion geupdatet werden muss. Dies würde sich

positiv auf Medien wie Video- und Bildaufnahmen auswirken, da das für die Kameras sichtbare "flackern" verhindert werden würde.

Und kann der Bildschirm Spiele in geringer Auflösung wie bei Retro-Konsolen in einem dreidimensionalen Raum darstellen?

Und ja, durch Hüllmaterialien wie Epoxidharz oder besser noch einen modularen Würfelaufbau, lassen sich dreidimensionale Objekte und Charaktere in Pixeloptik erzeugen, die an alte Spielsysteme wie dem GameBoy erinnern.

Das Ziel einer 360° Sichtbarkeit ist auch erzielt worden.

In der zukünftigen Entwicklung können neue Techniken und Materialien genutzt und zeitaufwändige Arbeitsschritte geoutsourced werden. Potential sehe ich beispielsweise in den LED-Display Produkten von *YonWayTech*, die LED-Matrizen in durchsichtigen, flexible, mm dicken Matten entwickeln. Sie könnten für eine kleine, hochauflösende Handheld-Version der Konsole dienen, ohne dass Diffusormaterial verwendet oder jede LED einzeln verlötet werden müsste. Die Strapazierfähigkeit des Produkts muss allerdings noch eingehend getestet werden.

Kommunikationsmöglichkeiten zwischen ganzen Konsolen oder einzelnen modularen Würfeln (Pixel, Bauteile der Konsole) können erforscht und optimiert werden, um kreative Game Designs und anforderungsspezifische Bildschirmformen zu ermutigen. Während der Umsetzung von Spielideen auf der Konsole könnte das Schreiben einer eigenen Engine oder Library sinnvoll sein, um Prototypen effektiver erstellen zu können und den Endbenutzern die Möglichkeit zur Erstellung von Mods zu bieten.

Bis zu einem marktfähigen Prototypen ist es noch ein weiter Weg.

14.Quellenverzeichnis

14.1. Literaturverzeichnis

1. Die Funktionsweise einer LED, vattenfall.de,
<https://www.vattenfall.de/infowelt-energie/energie-sparen/funktionsweise-einer-led-vorteile>
2. LEDs und LED Strips, LEDs, stuckleistenstyropor.de,
<https://stuckleistenstyropor.de/blog/leds-und-led-strips/>
3. Prof. Dr. Oliver Bendel, Definition: Was ist "Hologramm"?, Gabler Wirtschaftslexikon,
<https://wirtschaftslexikon.gabler.de/definition/hologramm-99480>
4. Madison Dapcevich, Es ist möglich, dieses neue interaktive Hologramm zu manipulieren, was die Medizintechnik verbessern könnte.,
discovermagazine.com,
https://www-discovermagazine-com.translate.goog/its-possible-to-manipulate-this-new-interactive-hologram-which-could-improve-47615?_x_tr_sl=en&_x_tr_tl=de&_x_tr_hl=de&_x_tr_pto=rq&_x_tr_hist=true
5. Martin, Das Volumendisplay FlexiVol, wihel.de,
<https://www.wihel.de/das-volumendisplay-flexivol/>
6. From sci-fi to science lab: Holograms you can 'feel', 14.11.2019,
<https://phys.org/news/2019-11-sci-fi-science-lab-holograms.html>
7. Yoichi Ochiai, Fairy Lights in Femtoseconds: Tangible Holographic Plasma (SIGGRAPH), 22.06.2015,
<https://www.youtube.com/watch?v=AoWi10YVmfE>

8. Silikon, Chemie.de,
<https://www.chemie.de/lexikon/Silikone.html>
9. Dave Rowntree, Doom on a volumetric display, hackaday.com,
<https://hackaday.com/2024/09/09/doom-on-a-volumetric-display/>
10. datagubbe, The Effect of CRTs on Pixel Art, datagubbe.de
<https://datagubbe.se/crt/>
11. Jay McDonald, NES, SNES, Atari: CRT vs LCD/LED - Which is better?,
retrogameart.com,
<https://retrogameart.com/answers/nes-snes-atari-crt-vs-lcd-led-which-better>
12. Lehrveranstaltung: RST-L, Rechnerstrukturen Labor, Hochschule Bremen,
Nintendo GameBoy, 2.4.1 Der Aufbau von Hintergrundbildschirm und Fenster
des GameBoy, mikrocontroller.net,
https://www.mikrocontroller.net/attachment/59939/1_gameboy.pdf
13. Anti-Aliasing: An Overview, monocure3d.com,
<https://monocure3d.com.au/antialiasing-explained-3d-printing/?srsltid=AfmBOop4W7ZVgoE-Z5fWu5vP0ns60Ar0vJKgr5HE00JvPFASRKafXu-n>
14. Monochrome LCD-Displays - wie sie funktionieren und wo man sie einsetzt,
riverdi.com,
https://riverdi.com/de/blog/monochrome-lcd-displays-wie-sie-arbeiten-und-wo-sie-zu-verwenden?srsltid=AfmBOooQ77AtWuw1iPr64SRQrzVz_8z6xqnQFdl5My8LIH39MQpAL4X2
15. Passive vs. Active Matrix - Ein Leitfaden, newhavendisplay.com, 05.12.2026,
<https://newhavendisplay.com/de/blog/a-beginners-guide-to-active-matrix-and-passive-matrix/>

16. Simon Grüneberg, Kristin Rinortner, Wenn Stecker und Buchse ... von selbst zueinander finden, Elektronik Praxis, 29.10.2013,
https://www.nh-technology.de/download/elektronik-praxis_wenn-stecker-und-buchsevon-selbst-zueinander-finden_423021.pdf
17. Jay McDonald, NES, SNES, Atari: CRT vs LCD/LED - which is better?
retrogamestart.com,
<https://retrogamestart.com/answers/nes-snes-atari-crt-vs-lcd-led-which-better>
18. Thobias Marr, Was ist Farbtiefe, heise online, heise.de,
<https://www.heise.de/tipps-tricks/Was-ist-Farbtiefe-6147767.html>
19. Difference between 8-bit and 16-bit Color Format in DIP, geeksforgeeks.com,
23.07.2025,
<https://www.geeksforgeeks.org/electronics-engineering/difference-between-8-bit-and-16-bit-color-format-in-dip/>

14.2. Zitatsquellen

1. "Ein Hologramm ist ein [...] Hologramme."
Prof. Dr. Oliver Bendel, wirtschaftslexikon.gabler.de,
Definition: Was ist "Hologramm"?,
<https://wirtschaftslexikon.gabler.de/definition/hologramm-99480>
[Stand: 12.04.2026]
2. "By shining a [...] Asier Marzo."
Madison Dapceвич, discovermagazine.com,
It's Possible to Manipulate This New Interactive Hologram, Which Could
Improve Medical Technology, May 26, 2025
https://www-discovermagazine-com.translate.goog/its-possible-to-manipulate-this-new-interactive-hologram-which-could-improve-47615?_x_tr_sl=en&_x_tr_tl=de&_x_tr_hl=de&_x_tr_pto=rq&_x_tr_hist=true
[Stand: 12.04.2026]
3. "Magnetische Steckverbinder [...] erzeugt"
Simon Grüneberg, Kristin Rinortner, nh-technology.de,
Elektronik Praxis, Magnetische Steckverbinder, Wenn Stecker und Buchse ...
von selbst zueinander finden, 29.10.2013,
https://www.nh-technology.de/download/elektronik-praxis_wenn-stecker-und-buchse-von-selbst-zueinander-finden_423021.pdf
[Stand: 12.04.2026]
4. "Der Bildschirmspeicher [...] dargestellt werden."
Lehrveranstaltung: RST-L, Rechnerstrukturen Labor, Hochschule Bremen,
Nintendo GameBoy, 2.4.1 Der Aufbau von Hintergrundbildschirm und Fenster
des GameBoy, mikrocontroller.net,
https://www.mikrocontroller.net/attachment/59939/1_gameboy.pdf
5. "The base [...] details are in the software."
Dave Rowntree, hackaday.com, Doom On A Volumetric Display, 09.09.2024,
<https://hackaday.com/2024/09/09/doom-on-a-volumetric-display/>

[Stand: 12.04.2026]

6. "Kunstwort, das [...] Zugehörigkeit verzeichnet."

wissen.de, Voxel,

<https://www.wissen.de/lexikon/voxel>

[Stand: 12.04.2026]

7. "Der Röhrenmonitor [...] auf dem Monitor auf."

Erich Käser, Fachlexikon der Mechatronik ©, fachlexika.de, Monitor, 2007

<http://www.fachlexika.de/technik/mechatronik/monitor.html>

[Stand: 12.04.2026]

14.4. Bildquellen

Abb. 1 Volumetrische Bilder

Yoichi Ochiai, Fairy Lights in Femtoseconds: Tangible Holographic Plasma (SIGGRAPH), 22.06.2015,

<https://www.youtube.com/watch?v=AoWi10YVmfE>, 1:36

Abb. 2 VB Ebene

Creative fest, More simple Way to make 3d hologram box screen, 30.09.2022,

<https://www.youtube.com/watch?v=wd2X-38IAnc>, 7:06

Abb. 3 NerdMagic 1

fiberpunk6328, Cool Hologram Desk toys, 07.03.2023

<https://www.youtube.com/shorts/WfkDhARP-pY>, 0:06

Abb. 4 NerdMagic 2

fiberpunk6328, Cool Holographic Transparent 3D Screen, 09.02.2023,

<https://www.youtube.com/shorts/JqX2BzFliFg>, 0:07

Abb. 5 Polyeder

rainbowrace, Creating a 3D hologram using simple materials is a great way to explore optics and visual effects, 11.08.2024,

<https://www.youtube.com/shorts/D25Eu4tKEMU>, 0:01

Abb. 6 VB Pyramide

<https://www.amazon.de/Tonysa-Hologramm-Projektor-Smartphone-Holographic-Zylinder/dp/B07YD2RMWD>

Abb. 7 VB Pyramidenstumpf

<https://bagswonderfull.com/product/3d-hologram/?srsltid=AfmBOoqdqiEMZv1Bc20NCb1nWFYaXQv1st30XNwEBvp8q5WR5fP5zR5p>

Abb. 8 Hologramm Fan

<https://www.amazon.de/3D-Hologramm-Fan-Missy-Hologramm-Fan-Holographischer-Einkaufszentren/dp/B09Y4LXPP3>

Abb. 9 VB LED-Matrix

Best_Buy_Express, 3D Hologram Display - Futuristic Gadget in Action, 31.03.2025,

https://www.youtube.com/shorts/DETga_D08UA, 0:06

Abb. 10 VB Dot Matrix

Megatronicspk, 3D display volumetric display using dot matrix led screen,
09.12.2023,
<https://www.youtube.com/shorts/VGPAWsQ2oaM>

Abb. 11 Blitzee

<https://saltiregames.com/products/blitzee-cdu>

Abb. 12 FlexiVol

<https://www.wihel.de/das-volumendisplay-flexivol/>

Abb. 13 Accoustic Trap Display

<https://phys.org/news/2019-11-sci-fi-science-lab-holograms.html>

Abb.14 Burton Aerial 3D Display

Ikinamo, Aerial Burton 3D display projects images into mid-air, 29.10.2014,
<https://www.youtube.com/watch?v=GNoOiXkXmYQ>, 1:46

Abb. 15 Laserprojektion

Yoichi Ochiai, Fairy Lights in Femtoseconds: Tangible Holographic Plasma
(SIGGRAPH), 22.06.2015,
<https://www.youtube.com/watch?v=AoWi10YVmfE>, 1:04

Abb. 16 Fairy Lights

Yoichi Ochiai, Fairy Lights in Femtoseconds: Tangible Holographic Plasma
(SIGGRAPH), 22.06.2015,
<https://www.youtube.com/watch?v=AoWi10YVmfE>, 0:34

Abb. 17 Femtolaserprojektion

Yoichi Ochiai, Fairy Lights in Femtoseconds: Tangible Holographic Plasma
(SIGGRAPH), 22.06.2015,
<https://www.youtube.com/watch?v=AoWi10YVmfE>, 1:29

Abb.18 LED-Schemata

<https://www.vattenfall.de/infowelt-energie/energie-sparen/funktionsweise-einer-led-vorteile>

Abb. 19 SMD Größenvergleich

<https://leds-and-more.de/mediafiles/Bilder/SMD-LED-Vergleich-Draufsicht.jpg>

Abb. 20 SMD-Schemata

<https://stuckleistenstyropor.de/blog/leds-und-led-strips/>

Abb. 21 Magnetischer Steckverbinder

<https://botland.de/steckverbinder-254-mm-raster/21437-magnetischer-steckverbinder-zum-selbermachen-3-poliger-rechtwinkliger-magnetischer-steckverbinder-adafruit-5360.html>

Abb.22 Mikrocontroller

<https://www.amazon.de/ELEGOO-Mega2560-Deutschem-Mikrocontroller-Elektronik/dp/B01II76PDM>

Abb. 23 Diffusorwürfel

Sören Klante, Foto

Abb. 24 Silikon

Sören Klante, Foto

Abb. 25 Epoxy Resin

Sören Klante, Foto

Abb. 26 Bad-Silikon

Sören Klante, Foto

Abb. 27 LED Bieger

Sören Klante, Screenshot

Abb. 28 Würfelgussform

Sören Klante, Screenshot

Abb. 29 Invert Gussform
Sören Klante, Screenshot

Abb. 30 Firmware
https://www.amazon.de/dp/B09LZ1D63Z?ref_=ppx_hzsearch_conn_dt_b_fed_asin_title_6&th=1

Abb. 31 VB Konzept
Sören Klante, Skizze

Abb. 32 VB LED Cube
Sören Klante, Skizze

Abb. 33 LED - Ebene Schemata
Sören Klante, Skizze

Abb. 34 LED Ebenen Anordnung
Sören Klante, Skizze

Abb. 35 LED Würfel (8x8x8)
https://www.amazon.de/dp/B08CN997Z8?ref_=ppx_hzsearch_conn_dt_b_fed_asin_title_5&th=1

Abb. 36 Vergleichbarer Aufbau
<https://manuals.plus/asin/b07grffngm>

Abb. 37 LED Ebene Schemata
Sören Klante, Skizze

Abb. 38 LED Cube (16x16x16)
<https://manuals.plus/asin/b09lz1d63z>

Abb. 39 Grundplatte 16x16x16
<https://manuals.plus/asin/b09lz1d63z>

Abb. 40 Aufbau LED Cube (16x16x16)
<https://manuals.plus/asin/b09lz1d63z>

Abb. 41 DIY Kit
<https://manuals.plus/asin/b09lz1d63z>

Abb. 42 LED + Platinen Schemata
Sören Klante, Skizze

Abb. 43 LED Cube (5x5x5)
<https://manuals.plus/asin/b0cl5y1jxk?nonce=367314>

Abb. 44 SMD Schemata
Sören Klante, Skizze

Abb. 45 SMD Anordnung
Sören Klante, Skizze

Abb. 46 SMD Cube Aufbau
<https://manuals.plus/asin/b09bm6fnrw>

Abb. 47 SMD Cube (8x8x8)
<https://manuals.plus/asin/b09bm6fnrw>

Abb. 48 Pixellook
<https://datagubbe.se/crt/slug.jpg>

Abb. 49 Kathodenstrahlröhrenbildschirm
<http://www.fachlexika.de/technik/mechatronik/monitor.html>

Abb. 50 Scanlinien
<https://retrogamestart.com/answers/nes-snes-atari-crt-vs-lcd-led-which-better>

Abb. 51 Farblutung
<https://datagubbe.se/crt/>

Abb. 52 Maniac Mansion (1987)
<https://datagubbe.se/crt/>

Abb. 53 Mayhem in Monsterland (1993)
<https://commodoreformatarchive.com/1-mayhem-in-monsterland-100-issue-38/>

Abb. 54 Farbraum 8- und 16-Bit

<https://www.geeksforgeeks.org/electronics-engineering/difference-between-8-bit-and-16-bit-color-format-in-dip/>

Abb. 55 Monochrome LCD

Monochrome LCD-Displays - wie sie funktionieren und wo man sie einsetzt,
riverdi.com,

https://riverdi.com/de/blog/monochrome-lcd-displays-wie-sie-arbeiten-und-wo-sie-zu-verwenden?srsId=AfmBOooQ77AtWuw1iPr64SRQrzVz_8z6xqnQFdl5My8LIH39MQpAL4X2

Abb. 56 GameBoy Vergleich

https://www.mikrocontroller.net/attachment/59939/1_gameboy.pdf

Abb. 57 8x8 Pixel Charakter

Sören Klante, Skizze

Abb. 58 16x16 Pixel Charakter

Sören Klante, Skizze

Abb. 59 Dithering

<https://resprite.fengeon.com/res/doc-imgs/dither-patterns.png>

Abb. 60 Anti-Aliasing Grayscale

<https://monocure3d.com.au/antialiasing-explained-3d-printing/?srsId=AfmBOop4W7ZVgoE-Z5fWu5vP0ns60Ar0vJKgr5HEO0JvPFASRKafXu-n>

Abb. 61 Anti-Aliasing

<https://opengameart.org/content/chapter-6-anti-aliasing>

Abb. 62 Diffusior

Sören Klante, Foto

Abb. 63 Diffusionswürfel Silikon 1

Sören Klante, Foto

Abb. 64 Diffusionswürfel Silikon 2

Sören Klante, Foto

Abb. 65 Diffusionswürfel Silikon 1

Sören Klante, Foto

Abb. 66 Diffusionswürfel Silikon 2
Sören Klante, Foto

Abb. 66 Diffusionswürfel Epoxid 1
Sören Klante, Foto

Abb. 67 Diffusionswürfel Epoxid 2
Sören Klante, Foto

Abb. 68 Diffusionswürfel SMD Bad-Silikon
Sören Klante, Foto

Abb. 69 Diffusionswürfel SMD Epoxid
Sören Klante, Foto

Abb. 70 Diffusionswürfel SMD Epoxid 1
Sören Klante, Foto

Abb. 71 Diffusionswürfel SMD Epoxid 2
Sören Klante, Foto

Abb. 72 Würfelmodul

Huy Victor, DIY Minimalistische Dekorlampe | Kupferdraht-Würfellampe, 26.08.2025,
<https://www.youtube.com/watch?v=zocqV4TZ4qI>, 0:05

Abb. 73 Modul Filament
Sören Klante, Skizze

Abb. 74 Modul SMD
Sören Klante, Skizze

Abb. 75 Geschütz
Sören Klante, Skizze

Abb. 76 8x8 Konzept, 16x16 Konzept
Sören Klante, Skizze

14.4. Videoquellen

1. Creative fest, More simple Way to make 3d hologram box screen, 30.09.2022,
<https://www.youtube.com/watch?v=wd2X-38IAnc>
2. rainbowrace, Creating a 3D hologram using simple materials is a great way to explore optics and visual effects, 11.08.2024,
<https://www.youtube.com/shorts/D25Eu4tKEMU>
3. Best_Buy_Express, 3D Hologram Display - Futuristic Gadget in Action, 31.03.2025,
https://www.youtube.com/shorts/DETga_D08UA
4. Megatronicspk, 3D display volumetric display using dot matrix led screen, 09.12.2023,
<https://www.youtube.com/shorts/VGPAWsQ2oaM>
5. Huy Victor, DIY Minimalistische Dekorlampe | Kupferdraht-Würfellampe, 26.08.2025,
<https://www.youtube.com/watch?v=zocqV4TZ4ql>
6. fiberpunk6328, Cool Hologram Desk toys, 07.03.2023
<https://www.youtube.com/shorts/WfkDhARP-pY>
7. fiberpunk6328, Cool Holographic Transparent 3D Screen, 09.02.2023,
<https://www.youtube.com/shorts/JqX2BzFliFg>
8. Ikinamo, Aerial Burton 3D display projects images into mid-air, 29.10.2014,
<https://www.youtube.com/watch?v=GNoOiXkXmYQ>
9. Yoichi Ochiai, Fairy Lights in Femtoseconds: Tangible Holographic Plasma (SIGGRAPH), 22.06.2015,
<https://www.youtube.com/watch?v=AoWi10YVmfE>

ERKLÄRUNG

Hiermit erkläre ich, dass ich die vorliegende Arbeit selbständig und ohne Verwendung anderer als der angegebenen Hilfsmittel angefertigt habe. Wörtlich oder dem Sinn nach aus anderen Werken entnommene Gedanken habe ich unter Angabe der Quelle kenntlich gemacht.

Dies gilt auch für bildliche Darstellungen sowie für Quellen aus dem Internet.

Mit einer Einsichtnahme und Ausleihe in der Bibliothek der HAW Hamburg, Department Design, bin ich einverstanden.

.....
Ort, Datum, Unterschrift