

# Bachelorthesis

## Untersuchung der technischen Umsetzbarkeit einer Verhaltensprojektion von fahrerlosen Transportsystemen

**Vorgelegt am:** 31.08.2022

**Von:** **Steve Sittig**  
Gartenstraße 12  
09471 Bärenstein

**Studiengang:** Digital Engineering

**Studienrichtung:** Technik

**Seminargruppe:** 4DE19-1

**Matrikelnummer:** 4003799

**Praxispartner:** FusionSystems GmbH  
Annaberger Str. 240  
09125 Chemnitz

**Gutachter:** Dipl.-Ing. (FH) Kai-Uwe Kaden (FusionSystems GmbH)  
Dipl.-Ing.-Ökon. Simone Hübsch (Staatl. Studienakademie  
Glauchau)

## **Themenblatt Bachelorthesis**

Studiengang Digital Engineering

Student: **Steve Sittig**  
Matrikelnummer: **4003799**  
Seminargruppe: **4DE19-1**

### **Thema der Bachelorthesis**

**Untersuchung der technischen Umsetzungsmöglichkeiten einer Verhaltensprojektion von fahrerlosen Transportsystemen**

Gutachter/ Betreuer: Dipl.-Ing. (FH) Kai-Uwe Kaden  
Gutachter (Studienakademie): Dipl.-Ing. Ökonom Simone Hübsch

Ausgabe des Themas: **25.05.2022**  
Abgabe der Arbeit an den SG am: **17.08.2022, bis 14:00:00**



Prof. Ingolf Tiator  
Vorsitzender des Prüfungsausschusses  
Technik

---

# Inhaltsverzeichnis

<b>1. Einleitung</b> .....	<b>1</b>
<b>2. Technische Grundlagen</b> .....	<b>5</b>
2.1 Fahrerlose Transportfahrzeuge.....	5
2.2 Lichtprojektoren.....	6
2.2.1 Lichtquellen.....	8
2.2.1.1 Helligkeitsangaben.....	9
2.2.1.2 Leuchtmittel.....	12
2.2.2 Projektionstechnologien.....	16
2.2.2.1 Digital Light Processing.....	17
2.2.2.2 Liquid Crystal Display.....	19
2.2.2.3 Liquid Cristal on Silicon.....	21
2.2.3 Zusammenfassung.....	22
2.3 Bilddatenverarbeitung.....	24
2.3.1 RGB Bilderdaten.....	24
2.3.2 Algorithmen der Bildverarbeitung.....	25
2.3.2.1 Verringerung der Bildauflösung.....	25
2.3.2.2 Grauwert-Konvertierung.....	26
2.3.2.3 Weichzeichnen / Rauschunterdrückung.....	26
2.3.3 Werteermittlung zur Bewertung der Erkennbarkeit.....	27
2.3.4 Software zur Verarbeitung der Datensätze.....	28
<b>3. Versuchsaufbau</b> .....	<b>34</b>
3.1 Geräteauswahl.....	34
3.2 Konstruktion des Versuchstandes.....	37
3.3 Montage des Versuchsaufbaus.....	39
3.4 Methodik der Datenerhebung.....	43
<b>4. Ergebnisdarstellung</b> .....	<b>47</b>
4.1 Beschreibung Messdatensatz.....	47
4.2 Darstellung der Ergebnisse.....	49
4.3 Auswertung im Bezug auf die Erkennbarkeit.....	52
<b>5. Fazit</b> .....	<b>53</b>

---

## Abbildungsverzeichnis

Darstellung eines Service-Roboters.....	1
Darstellung verschiedener Projektortypen.....	7
Darstellung der Unterschiede verschiedener Helligkeitsangaben.....	10
Darstellung des Messfeldes zur Ermittlung der Helligkeitwerte in ANSI-Lumen.....	11
Darstellung des Lichtspektrums des Tageslichtes.....	13
Darstellung des Lichtspektrums einer Halogen-Lampe.....	14
Darstellung des Lichtspektrums einer LED-Lampe.....	15
Darstellung des Lichtspektrums eines Laser-Arrays mit Systembeispiel.....	16
Darstellung zweier Farbräder.....	17
Darstellung mehrerer Microspiegel und deren Micromechanik.....	18
Darstellung des Funktionsprinzips der DLP-Technologie.....	18
Darstellung des Funktionsprinzips einer LCD-Zelle.....	20
Darstellung des Funktionsprinzips eines LCD-Projektors.....	21
Darstellung des Funktionsprinzips einer LCOS-Zelle.....	22
Darstellung des RGB-Farbraumes.....	25
Darstellung des Einflussfaktors verschiedener k-Werte auf Signalglättung.....	27
Darstellung eines RGB-Bildes mit zugehörigem Grauwert-Bild und Quelltext des Einlesevorgangs innerhalb der Software.....	30
Darstellung des Rauschverhaltens zweier verschiedene Verarbeitungsalgorithmen.....	31
Darstellung der Farbphasen eines RGB-Bildes mit Quelltext der Werteextraktion innerhalb der Software.....	32
Darstellung des Quelltextes für die Werteermittlung der Intensitätsdifferenzen.....	33
Darstellung des Gestells für den Versuchsaufbau.....	38
Darstellung der Schnittliste für die Aluminiumprofile.....	38
Darstellung der Stückliste für den Versuchsaufbau.....	39
Darstellung der Befestigung der Kamera im Versuchsaufbau.....	40
Darstellung der untersuchten Teppichmuster als Projektionsuntergrund.....	40
Darstellung der genutzten Strahler im Versuchsaufbau.....	41
Darstellung der genutzten Projektionsobjekte für die Messdatenaufnahme.....	42
Darstellung einiger Projektionsobjekte für den realen Anwendungsfall.....	43
Darstellung des Ablaufdiagrammes für die Datenaufnahme.....	46
Darstellung der Ordnerstruktur eines Messdatensatzes.....	47
Darstellung der Ergebnisse eines Messdatensatzes der RGB-Phasenbilder.....	50
Darstellung der Messergebnisse eines Grauwertbildes.....	51

---

## Tabellenverzeichnis

Projektionstechnologien.....	24
Bereichsgrenzen.....	33
Projektordaten.....	34
Geräteauswahl.....	36
Kameradaten.....	37
Projektionsabstände.....	39
Konfigurationsdaten.....	44
Namenskonvention.....	48
Abkürzungsübersicht.....	48

---

## Abkürzungsverzeichnis

FTF	Fahrerloses Transportfahrzeug
HMI	Human-Machine-Interface (dt. Mensch-Maschine-Schnittstellen)
DLP	Digital Light Processing (dt. digitale Lichtverarbeitung)
LCD	Liquid Crystal Display (dt. Flüssigkristall Bildschirm)
LCOS	Liquid Crystal On Silicon (dt. Flüssigkristall auf Silizium)
LED	Light Emitting Diod (dt. Leuchtdioden)

# 1. Einleitung

Autonome fahrerlose Transportfahrzeuge (FTF) sind in der heutigen Industrie nicht mehr wegzudenken. Sie übernehmen Transportaufgaben in der Logistik und unterstützen den Materialtransport in der Fertigung. Ein Bereich, der noch weitgehend unerschlossen ist, ist der öffentliche Raum. Erste Versuche FTF in diesem Bereich zu integrieren findet in Form von Service-Robotern statt, siehe Abbildung 1.1. Diese unterstützen Besucher bei der Wegfindung, stellen Informationen bereit oder führen Unterstützungstätigkeiten, wie das Reinigen von Bodenflächen, aus.



Abbildung 1.1: Darstellung eines Service-Roboters in einem Elektronik-Fachmarkt. Dem Kunden wird ermöglicht Informationen über Produkte erhalten und zu einem gesuchten Produkt geführt zu werden. [1]

Der öffentliche Raum unterscheidet sich auf den ersten Blick nicht wesentlich vom Produktionsraum, es gibt vorgegebene Fahrbahnen, zusätzliche Verkehrsteilnehmer in Form von Personen und ein Aufgabenspektrum, welches das FTF erfüllen soll. Der Hauptunterschied liegt im öffentlichen Raum jedoch bei der Art von Personen, welche mit

dem FTF in Kontakt treten. Diese sind im Produktionsbereich speziell darin geschult, wie man mit dem FTF in Interaktion treten kann und welche Voraussetzungen für die Aufgabenbearbeitungen des FTF geschaffen werden müssen, damit ein regulärer Betrieb stattfinden kann. Dies ist für den Betrieb im öffentlichen Bereich nicht realisierbar, da Kunden vor ihrem Besuch nicht ausgewogen geschult werden können. Somit müssen Voraussetzungen geschaffen werden, damit zwischen den Kunden und FTF eine möglichst sichere Interaktion stattfinden kann. Dabei sollte sowohl die Interaktion vom Mensch zur Maschine wie auch die Interaktion von der Maschine zum Menschen so intuitiv wie möglich gestaltet werden.

FTF-Hersteller beschäftigen sich in diesem Kontext aktuell damit die Interaktion vom Menschen zur Maschine zu verbessern. Dabei werden verschiedene Schnittstellen, wie Nutzereingabe mittels Bedienpaneel, Gesten-Steuerungen mittels Kamerasystemen, in Verbindung mit Objekterkennungsalgorithmen und Sprachsteuerungen implementiert, untersucht und verbessert. Dies soll zu einer einfachen und intuitiven Bedienung der Fahrzeuge führen und somit die Akzeptanz für die Nutzung steigern. Dies ist ein wichtiger Punkt, welcher besonders im Produktionsbereich anklang findet, da auch dort eine intuitive Bedienung der Fahrzeuge einen Mehrwert für die Bediener bereitet. Dies spiegelt sich in Form von kürzeren Einarbeitungszeiten, geringere Anzahl an Schulungstagen, sowie einer verminderten Anzahl an Bedienfehlern wieder. Zusätzlich ist die Bereitschaft zur Integration von FTF in den Produktionsalltag erhöht, was eine der großen Hürden für den digitale Fabrikbetrieb darstellt.

In dieser Arbeit soll im Kontrast zu den aktuellen Forschungsgebieten erörtert werden, welche technischen Möglichkeiten für die Interaktionssituation von der Maschine zum Menschen verfügbar und auch technisch sinnvoll umzusetzen sind. Dies soll in Form einer Verhaltensprojektion mittels Licht-Bildprojektoren, ugs. Beamer genannt, stattfinden. Für die Projektion sollen Fahrzeuginformationen, wie aktuelle Fahrtrichtung, Geschwindigkeit und zukünftige Abbiegevorgänge, sowie Sicherheitsinformationen, in Form der aktuellen Sicherheits- und Warnbereiche der Sicherheitslaser, abgebildet werden. Aus Gründen der Komplexität werden in dieser Arbeit auf die Projektion von Pfeil-Symbole beschränkt, da diese in einer späteren Anwendung sowohl Richtungs- als auch Geschwindigkeitsinformationen darstellen können und aus den erhobenen Daten Rückschlüsse auf weitere Projektionsobjekte getroffen werden können.

Hintergrund der Untersuchung ist ein bevorstehendes Forschungsprojekt. Dabei soll ein FTF mit Projektoren ausgestattet werden. Anschließend soll im realen Anwendungsfall untersucht werden, ob die Art der Informationsübertragung von Testpersonen als

zweckmäßig wahrgenommen wird und welches Maß an Akzeptanz diese Art der Informationsübertragung besitzt. Dazu soll im Vorfeld geklärt werden, welches spezifische Gerät als Projektor am Fahrzeug verbaut werden soll.

Das Hauptkriterium für die Geräteauswahl soll die Erkennbarkeit des projizierten Objektes auf verschiedenen Untergründen liegen. Da dies für eine geeignete Anwendung grundlegend vorausgesetzt sein muss. Sollte ein Mensch die Informationen nicht in genügender Weise erkennen ist eine Implementation der HMI nicht sinnvoll. Darum spielt die Frage, ab wann ein projiziertes Objekt vom Menschen ausreichend erkennbar ist, eine große Rolle. Zur Klärung dieser Frage wurde ein Versuchsstand aufgebaut, welcher messbare Eigenschaften eines projizierten Bildes aufnimmt. Diese werden anschließend den subjektiver Einschätzungen eines Probanden gegenübergestellt um Zusammenhänge zwischen Erkennbarkeit und Messdaten aufzuzeigen. Die Ergebnisse dieser Datenerhebung dienen anschließend als Grundlage für eine geeignete Geräteauswahl innerhalb des bevorstehenden Forschungsprojektes.

Zuerst muss sich jedoch damit beschäftigt werden, welche technischen Möglichkeiten für die Projektion eines Objektes zur Verfügung stehen. Dazu wurden eine Marktrecherche durchgeführt, um einen Überblick der auf dem Markt erhältlichen Geräte zu erhalten und deren technische Daten auf den beschriebenen Anwendungsfall bezogen zu kategorisiert. Anschließend wurden drei verschiedene Geräte innerhalb eines künstlichen Versuchsaufbaus getestet und sowohl objektive als auch subjektive Daten aufgenommen. Durch die Gegenüberstellung dieser Daten wurde Rückschluss auf die Aussagekraft der objektiven Daten im Hinblick auf die Erkennbarkeit der Projektionsobjekte geschlossen, welche wiederum Rückschlüsse auf die Tauglichkeit der genutzten Geräte und ferner auf die vorher kategorisierten technischen Gerätedaten liefern. Somit können Aussagen über die Relevanz spezifischer Geräteigenschaften im Hinblick auf die Erkennbarkeit und somit auch auf das hier betrachtete Hauptkriterium getroffen werden.

In den nachfolgenden Kapiteln werden die Grundlagen dargelegt. Dies dient dem allgemeinen Verständnis für die Funktionsweise eines FTF. Einblick in die technischen Grundlagen von Lichtprojektoren wird anhand der verschiedenen Varianten von Komponenten gegeben und deren Relevanz für die nachfolgende Untersuchung beschrieben. Um die Auswertung der Messdaten aus dem Versuchsaufbau nachvollziehbar zu gestalten, werden grundlegende Verfahren für die Bilddatenverarbeitung beschrieben. Diese werden beispielhaft anhand der Messdaten vorgeführt und deren Zweck näher beschrieben.

Im darauffolgenden Kapitel wird der Versuchsaufbau und der Vorgang der

Datenaufnahme beschrieben. Dazu wird auf die Konstruktion des Messstandes und auf die Auswahl der genutzten Geräte mit deren technischen Daten eingegangen. Weiterhin werden die Umgebungsbedingungen der Datenaufnahme und die untersuchten Projektionsoberflächen beschrieben und diese im Kontext eines realen Anwendungsfalls gebracht. Für die wissenschaftliche Überprüfbarkeit ist die Methodik der Datenaufnahme dargelegt. Die genutzten Verarbeitungsalgorithmen sind, auf dem der Arbeit beiliegenden digitalen Datenträger, in Form eines Python-Programms innerhalb der Datensätze beigelegt.

Im Ergebnisteil werden die subjektiven und objektiven Daten, aus der Datenaufnahme in Zusammenhang gesetzt und Schlussfolgerungen zur Klärung der Frage, welche technischen Eigenschaften ein Projektor besitzen sollte um für die Verhaltensprojektion geeignet zu sein.

## 2. Technische Grundlagen

### 2.1 Fahrerlose Transportfahrzeuge

FTF bestehen grundlegend aus folgenden Komponenten, Fahrzeuggehäuse, Antriebssystem, Sicherheitseinrichtungen, Sensorik zur Spurführung, Energiespeicher, Recheneinheit, interne Kommunikationsschnittstellen und externe HMI zur Bedienung. Klassische Aufgabenbereiche des Fahrerlosen Transportfahrzeuges sind allgemeine Transportaufgaben. Der aktuelle Trends gehen jedoch immer mehr in Richtung „Service-Robotik“. Dabei wird der Aufgabenbereich „Transport und Logistik“ ersetzt oder um zusätzliche Aufgabenbereiche wie Kundenmanagement, Informationsbereitstellung, Wegweisung und Unterstützungsprozessen, wie Reinigung der Geschäftsräume, Lasthandling für Mitarbeiter oder Überwachungsfunktionen erweitert. Für diesen neuen Aufgabenbereich ist es nötig Lösungen für die neuen technischen Anforderungen zu finden. Einer der Hauptaspekte ist hierbei der Umgang mit Personen ohne vorherige Schulung am FTF, welche im öffentlichen Raum direkt mit dem Fahrzeug interagieren können bzw. sollen. Dabei muss der Betrieb des FTF sichergestellt und eine Gefährdung aller beteiligten verhindert werden.

Für die Sicherstellung des Betriebes benötigt das FTF ein Wegenetz, welches vom Fahrzeug befahrbar ist. Diese Fahrwege können z.B. über Vorort verlegte Fahrspuren oder virtuelle Fahrspuren innerhalb der Fahrzeugsteuerung vorgegeben werden. Damit ein Fahrzeug diese befahren kann, müssen sie von Hindernissen frei sein. In der Logistik sind dies vor allem abgestellte Gegenstände oder Betriebsmittel, wie Gabelstapler oder Hubwägen. Innerhalb des öffentlichen Bereiches kommt hinzu, dass Personen während des Einkaufes die Fahrstrecken blockieren können. Ein Lösungsansatz für dieses Problem ist die automatische Erkennung von versperrten Wegen, z.B. über Kamerasysteme, mit anschließender Auswertung in der Fahrzeugsteuerung und gezielter Umfahrung dieser Strecken. Da es sich bei den Hindernissen jedoch um bewegliche Menschen handelt ist dieser Ansatz fehlerbehaftet und kann zu Problemen führen. Beispielhaft kann angenommen werden, dass ein FTF durch einen Gang fährt, welcher plötzlich durch einen Kunden blockiert wird. Das Fahrzeug möchte das Hindernis vermeiden und fährt rückwärts. Ein weiterer Kunde blockiert nun das andere Ende des Ganges, wodurch dem Fahrzeug keine Möglichkeit zur Weiterfahrt gegeben ist. Das Fahrzeug würde in dieser Situation solange verharren bis einer der Wege frei befahrbar ist. Um den Betrieb in solch einer Situation weiter zu gewährleisten müsste das Fahrzeug

mit einer Person interagieren und um die Freigabe der Strecke bitten. Um solch eine Funktion zu implementieren müsste eine HMI vorhanden sein, welche die Interaktion zwischen Mensch und Maschine zulässt. Bereits in FTF implementierte HMI's für diesen Zweck sind z.B. Sprachausgaben oder Signaltöne, welche den Kunden auf akustische Weise über das Vorhaben des Fahrzeuges informieren können. Diese Form der Informationsübertragung funktioniert jedoch nur, solange es Menschen möglich ist diese auch zu verarbeiten. Gehörbeeinträchtigte Menschen oder Menschen, welche die genutzte Form der Sprachausgabe nicht deuten können, könnte es schwer fallen die Intentionen des FTF zu deuten. Somit wäre eine Erweiterung des Funktionsumfangs mittels einer visuellen Verdeutlichung der Fahrzeugintentionen, mit allgemeingültigen Symbolen wie Pfeilen und Blinken, wünschenswert.

Der Sicherheitsaspekt wird über am Fahrzeug angebrachte Sicherheitseinrichtungen realisiert. Dazu gehören Notaus-Taster und Sicherheitslaserscanner. Die Notaus-Taster müssen so angebracht sein, dass sie stets erreichbar sind.<sup>1</sup> Sie ermöglichen einer Person das Fahrzeug zu jedem Zeitpunkt zum Anhalten zu bringen, auch wenn die Fahrzeugsteuerung nicht ordnungsgemäß funktioniert. Die Sicherheitslaserscanner verhindern, dass ein Fahrzeug während eines Fahrbefehls, mit umliegenden Objekten kollidiert. Dazu werten die Sicherheitslaserscanner die Abstände zu umliegenden Objekten aus und senden einen Nothalt-Signal an die Fahrzeugsteuerung sobald ein Objekt den minimalen Sicherheitsabstand unterschreitet. Damit ist der Sicherheitsaspekt einer Verletzungsvermeidung abgedeckt. Nicht abgedeckt werden jedoch psychologische Belastungen. Beispielfhaft kann man sich eine Situation vorstellen wo eine Person in einer Regalreihe steht, welche nur über eine Seite betreten und verlassen werden kann. Sollte ein FTF während des Aufenthalts einer Person in diesen Weg einfahren, könnte es zur Bedrängnis der Person kommen. Es ist angeraten solche Situationen auszuschließen oder ein Umgehen des FTF sicherzustellen.<sup>1</sup>

## 2.2 Lichtprojektoren

Mit dem aktuellen Stand der Technik gibt es verschiedene Möglichkeiten, mittels Licht, ein Bild auf eine Oberfläche zu projizieren. Die genutzten Geräte dafür werden umgangssprachlich als „Beamer“ bezeichnet und sind technisch den Lichtprojektoren zuzuordnen. Der Hauptanwendungsbereich dieser Geräte ist die Informationsbereitstellung in Form von Projektionsmaterial. Bekannte Anwendungsfälle

---

<sup>1</sup> vgl. unveröffentlicht: FORUM-FTS, Safety-Seminar, 2021 [2]

aus dem Alltag sind die Nutzung in schulischer Ausbildung oder bei Präsentationen im Marketing-Bereich. Ein weiterer Anwendungsbereich für Lichtprojektoren ist die Unterhaltungsindustrie. Dabei wird der Projektor als Unterhaltungsmedium in Form von Kinoprojektoren, für Live-Übertragungen von Sportveranstaltungen oder in Form von Heim-Kino-Systemen als Bildschirmersatz genutzt.



Abbildung 2.1: Beispiele verschiedener Lichtprojektoren. Links oben – Panasonic RQ50K Großraumbeamer, rechts oben – Panasonic RZ990 Beamer zur festen Installation in Besprechungsräumen, links unten – Epson EF11 mobiler Beamer, rechts unten – Texas Instruments DLPDLCR2000EVM DLP-Projektor Entwicklermodul. [3] [4] [5]

Die aktuellen Systeme können grundsätzlich in professionelle und konsumorientierte Geräte eingeteilt werden, wobei die professionellen Geräte vor allem für den Gebrauch bei Massenveranstaltungen genutzt werden und eine weitaus höhere Leistungsklasse und Preisintensität als konsumorientierte Geräte besitzen. Für den Anwendungszweck als Integrationsgerät an fahrerlosen Transportfahrzeugen gibt es Projektor-Module von bekannten Herstellern wie *Texas Instruments*. Diese Module sind besonders interessant für den realen Anwendungsfall da sie sowohl eine große Flexibilität, als auch eine geringere Preisklasse als die professionellen und konsumorientierten Geräte besitzen. Nachteilig ist, dass sie nicht über die gängigen Schnittstellen wie HDMI oder Display-Port verfügen. Beispiele aller Geräteklassen sind in Abbildung 2.1 gezeigt.

Für die Projektion eines Bildes sind grundlegend drei Komponenten nötig. Eine Lichtquelle, die Projektionsmechanik für die Generierung einzelner Bildpunkte, im weiteren Text Projektionstechnologie genannt, und das Linsensystem zur Einstellung des Brennpunktes für ein scharfes Bild. Besonders die Lichtquelle und die verwendete Projektionstechnologie nehmen starken Einfluss auf die Farbe und Helligkeit des projizierten Bildes, den Preis der Geräte und deren mechanische Belastbarkeit. Dies sind die wichtigen Faktoren für eine spätere Geräteauswahl, darum wird im Folgenden näher darauf eingegangen.

### 2.2.1 Lichtquellen

Die Lichtquelle eines Beamers wird benötigt um die Farbinformationen eines darzustellenden Bildes auf eine Projektionsoberfläche zu übertragen. Dazu werden verschiedene Technologien genutzt um den ausgesendeten Lichtstrahl der Quelle zu beeinflussen, diese werden im nächsten Unterkapitel näher beschrieben. Die Art der Lichtquelle beeinflusst maßgeblich die Helligkeit und das Kontrastverhältnis eines Lichtprojektors, welche das Hauptkriterium für die Anwendung in gut beleuchteten Umgebungen ist.<sup>2</sup> Zusätzlich beeinflusst die Art der Lichtquelle weitere technische Spezifikationen eines Projektors. Dazu zählen beispielsweise die Geräteabmaße, Energieverbrauch, Nutzungsdauer, Häufigkeit von Wartungsintervallen und mechanische Belastbarkeit. In den derzeit auf dem Markt erhältlichen Geräten werden typischerweise Metalldampflampen, LED-Lampen, LASER und Kombinationen der drei Typen in Form von hybriden Systemen genutzt.

Die Helligkeit einer Lichtquelle beschreibt wie viele Photonen pro Zeiteinheit in eine bestimmte Richtung ausgesendet werden. Das Farbspektrum einer Lichtquelle beschreibt aus welchen einzelnen Anteilen an verschiedenen Frequenzen das ausgesendete Licht besteht und somit auch welche Farbe bei der Reflexion dieses Lichtes entstehen kann. Für das menschliche Sehen ist dies von besonderer Wichtigkeit, da wir die verschiedenen Lichtfrequenzen unterschiedlich stark wahrnehmen können. Dies liegt vor allem an der unterschiedlichen Anzahl an Rezeptoren innerhalb des menschlichen Auges welche durch das einfallende Licht, aufgrund biochemischer Prozesse, einen Strom erzeugen, welcher in unserem Gehirn zu einem Bild umgewandelt wird. Einige Lichtfrequenzen können vom menschlichen Auge nicht wahrgenommen werden, dabei liegt das infrarote Frequenzband unterhalb und das ultraviolette Frequenzband oberhalb des sichtbaren Spektrums.

---

2 online: BENQ, 2020, [6]

Weiterhin nehmen wir Lichtquellen anhand ihres ausgesendeten Lichtes als angenehm oder störend wahr. Dies liegt vor allem daran, dass wir aufgrund der Evolutionsgeschichte an das Licht der Sonne gewohnt sind. Das Licht, welches von der Sonne ausgestrahlt wird, besitzt ein charakteristisches Farbspektrum, welches vom menschlichen Auge als angenehm empfunden wird. Weiterhin empfinden wir auch Licht, welches der Frequenzcharakteristik von brennenden Kerzen entspricht als beruhigend und angenehm zu betrachten. Aufgrund dieser menschlichen Charakteristika werden Lichtquellen so gebaut, dass sie für das menschliche Auge als angenehm empfunden werden..

Die verschiedenen Lichtquellen, welche in Lichtprojektoren genutzt werden unterscheiden sich jedoch nicht nur in ihrem Frequenzspektrum und der Helligkeit, sondern auch in ihrer Langlebigkeit. Vor allem Metalldampflampen sind, im Vergleich zu LED und Laser, eher kurzlebig und benötigen einen höheren Wartungsaufwand und somit auch höhere langfristige Kosten.<sup>3</sup>

Im Nachfolgenden sollen die Eigenschaften der am häufigsten genutzten Lichtquellen, aktueller Geräte, kurz erläutert und deren Vor- und Nachteile aufgezeigt werden. Vorher wird kurz das Thema Helligkeitsangaben behandelt, da es herstellerspezifische Abweichungen bei der Angabe dieser Gerätespezifikation gibt. Die Hintergründe für die aktuellen Unterschiede bei Lichtstärke-Angaben und deren Auswirkungen auf die Bildhelligkeit eines projizierten Objektes zu kennen ist für eine kompetente Geräteauswahl von essentieller Bedeutung.

### **2.2.1.1 Helligkeitsangaben**

Um den Begriff Helligkeit im Kontext der Lichtprojektion zu definieren, wurde folgendes Zitat vom Beamer-Hersteller *BenQ* gewählt:

*„Der Begriff „Helligkeit“ ist subjektiv und wird daher in der Optik nicht als Ausgabe-Messwert eingesetzt. [...] Um bestimmte Zusammenhänge einfach abzubilden und nicht zu verwirren, verwenden wir in diesem Beitrag den Begriff Helligkeit als Sammelbegriff für die verschiedenen Messgrößen.“<sup>4</sup>*

Dabei lässt sich heraus lesen dass für die Angabe von Helligkeit bei Beamern aus technischer Sicht verschiedene Maßeinheiten gewählt werden, welche sich auch die Helligkeit eines Gerätes unter bestimmten Betrachtungsweisen beziehen. Grundlegend

---

3 Anhand Datenblatt: OSRAM, 2022 [7]

4 online: BENQ, 2020 [8]

wird die Helligkeit eines Gerätes in Lumen angegeben. Lumen ist die SI-Einheit für den Lichtstrom und gibt an welche Lichtmenge pro Zeiteinheit von einer Lichtquelle ausgesendet wird. Im Vergleich dazu gibt die Beleuchtungsstärke, welche mit der SI-Einheit Lux beschrieben wird, an wie viel Licht pro Zeiteinheit auf eine bestimmte Fläche auftritt. Beide Einheiten beschreiben die Helligkeit, einmal auf die Lichtquelle und einmal auf eine beleuchtete Fläche bezogen.

Innerhalb der Datenblätter von Beamern verschiedener Hersteller findet sich jedoch nicht nur die Helligkeitsangabe Lumen sondern verschiedene Variationen mit unterschiedlicher Bedeutung und vereinzelt auch nicht klar definiert, auf welche Angabe sich bezogen wird. Hier kommen vor allem die Begriffe Standard- oder Lichtquellen-Lumen, ANSI-Lumen und LED-Lumen vor. Welchen Unterschied die verschiedenen Angaben auf die Helligkeit eines projizierten Bildes haben ist in Abbildung 2.2 verdeutlicht.

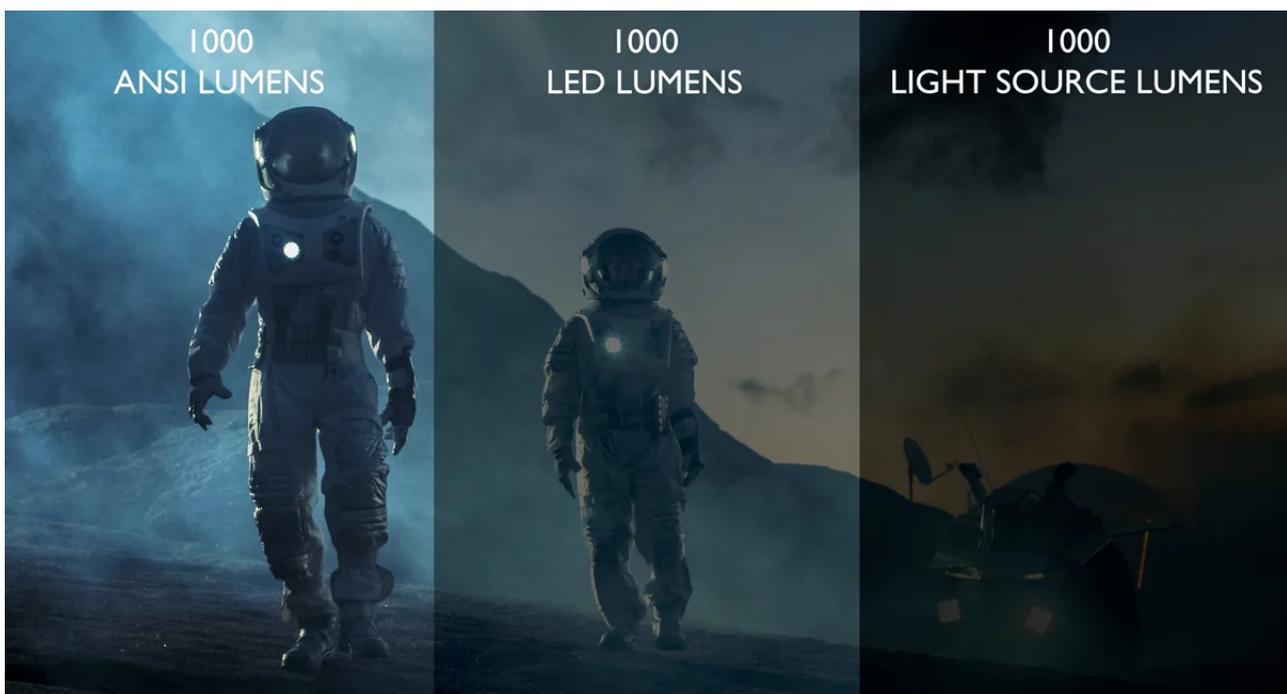


Abbildung 2.2: Helligkeitsunterschiede der gebräuchlichen Helligkeitsangaben im Vergleich: Verdeutlicht anhand eines projizierten Bildes. [6]

Bei Betrachtung der Abbildung ist gut ersichtlich, dass eine unklare Angabe des genutzten Helligkeitsbegriffs, im Datenblatt eines Produktes, zu falschen Einschätzungen bei der Produktauswahl führen kann. Der Grund für diese drastischen Unterschiede liegt wiederum darin, dass sich die Helligkeitsangaben auf unterschiedliche Aspekte der Helligkeit beziehen.

Aus der Vorherigen Definition des Lichtstromes in Lumen und der Angabe Lichtquellen-Lumen kann man direkt ableiten, dass diese Angaben übereinstimmen. Dabei wird sich auf die genutzte Lichtquelle innerhalb des Beamers berufen und beschrieben welche Lichtmenge pro Zeiteinheit von ihr ausgeht. Das ausgestrahlte Licht wird innerhalb des Beamers jedoch weiter beeinflusst. Durch die verschiedenen Verarbeitungsschritte werden je nach genutzter Technologie bis zu 70% des ausgestrahlten Lichtstroms absorbiert.<sup>5</sup>

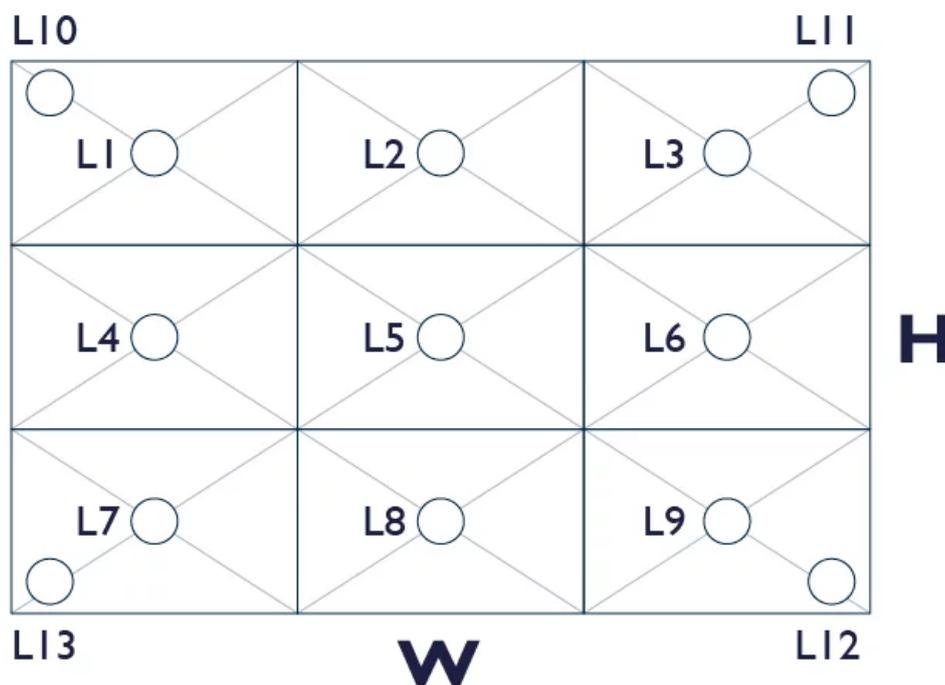


Abbildung 2.3: Messfeld für die Ermittlung des Helligkeitswertes in ANSI-Lumen nach ANSI IT7.228-1997. L10, L11, L12, L13 sind in einem Abstand von 10% zu L5 angeordnet. [6]

Im Gegensatz dazu steht der sogenannte Goldstandard ANSI-Lumen. Die Bestimmung des Wertes für die Helligkeit in ANSI-Lumen ist von der amerikanischen Institut für Standardisierung vorgeschrieben und bezieht sich auf die Helligkeit eines projizierten Bildes auf einer weißen Projektionsfläche. Dabei wird die Projektionsfläche in neun definierte Zonen aufgeteilt und mehrere Messungen der Beleuchtungsstärke durchgeführt. Die Messwerte werden anschließend gemittelt um den Helligkeitswert in ANSI-Lumen zu bestimmen. Das Messfeld für die ANSI-Messung ist in Abbildung 2.3 dargestellt.

Da beim ANSI-Messverfahren die Beleuchtungsstärke genutzt wird, können

<sup>5</sup> online: BENQ, 2022, [8]

technologiebedingte Absorptionseffekte vernachlässigt werden. Diese haben keine Auswirkungen auf die Vergleichbarkeit verschiedener Geräte, da sie im Messverfahren mit berücksichtigt werden.

Die letzte Helligkeitsangabe LED-Lumen wird speziell bei Beamern genutzt welche LED-Lampen als Lichtquelle nutzen. Die Ermittlung der LED-Lumen findet äquivalent zur Ermittlung der ANSI-Lumen statt. Jedoch wird nach der Ermittlung des ANSI-Wertes dieser mit einem Faktor von 1,3 bis 2,4 multipliziert. Hierbei wird sich auf den Helmholtz-Kohlrausch-Effekt berufen. LED-Lichtquellen haben im Vergleich zu anderen Lichtquellen einen besonders hohe Farbleistung. Der Helmholtz-Kohlrausch-Effekt besagt, dass das menschliche Auge stark gesättigte Farbe als subjektiv heller wahrnimmt, als weniger gesättigte Farben. Diese subjektiv höhere Helligkeit wird bei der Angabe in LED-Lumen auf die ANSI-Helligkeit zusätzlich angerechnet.

Es sei erwähnt, dass es eine weitere Möglichkeit der Helligkeitsangabe gibt. Dabei wird die Lichtmenge, welche von einer Projektionsfläche auf den Betrachter zurückgestrahlt wird, angegeben und wird als Nit-Wert bezeichnet. Der Vorteil dabei ist, dass nicht nur die technischen Eigenschaften des Projektors betrachtet, sondern auch die Einflüsse des Projektionsmaterials im Messwert berücksichtigt werden.

Zusammenfassend kann man über die verschiedenen Helligkeitsangaben folgende Aussage treffen. Helligkeitsangaben ohne Spezifizierung können zu starken Missverständnissen bei der Auswahl eines passenden Gerätes für einen speziellen Anwendungsfall führen. Hersteller sollten bei Angabe der Helligkeitswerte vor allem den Helligkeits-Wert in ANSI-Lumen nutzen, da es ein standardisiertes Messverfahren für die Wertermittlung ist. Sollte die Helligkeit nicht in ANSI-Lumen angegeben werden, dann muss nachvollziehbar sein, auf welche Art von Helligkeit sich der Messwert bezieht.

### **2.2.1.2 Leuchtmittel**

Die am meisten genutzte Lichtquelle für die Darstellung von farbigen Bildern ist das natürliche Licht der Sonne. Die Bilder werden hierbei im menschlichen Auge gebildet und entstehen durch die Reflexion an der Oberfläche von Objekten. Innerhalb von Projektoren wird diese Art von Lichtquelle nicht genutzt. Dennoch sind die Eigenschaften dieses Lichtes wichtig, da das menschliche Auge sich anhand dieses Lichtspektrums entwickelt hat. Lichtquellen, welche eine hohe Ähnlichkeit mit dem Lichtspektrum des natürlichen Lichtes aufweisen werden als besonders angenehm und Farbeindrücke als sehr natürlich

empfunden.<sup>6</sup> In Abbildung 2.4 ist das Lichtspektrum des Tageslichts beispielhaft dargestellt.

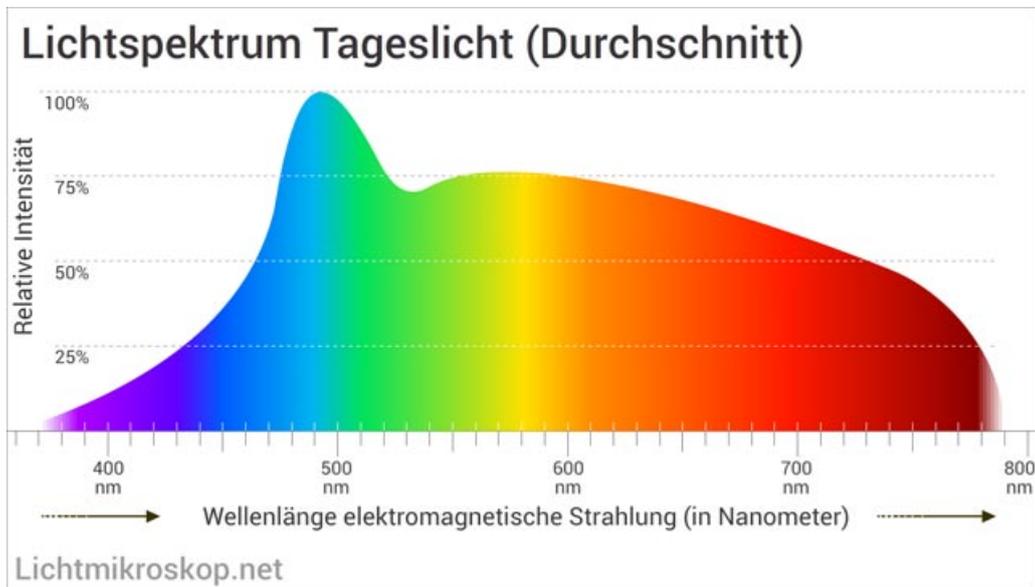


Abbildung 2.4: Lichtspektrum des Tageslichtes. [10]

Metalldampflampen sind Glasbehälter, welche mit Edelgas und einem zu verdampfenden Metall gefüllt sind. Durch das Anlegen eines anfänglich hohen elektrischen Stromes wird das Metall im inneren des Behälters verdampft und anschließend durch einen niedrigeren Strom Licht erzeugt. Durch den angelegten Strom bewegen sich Elektronen innerhalb des Edelgases zwischen Anode und Kathode. Die Elektronen kollidieren dabei mit den Molekülen des verdampften Metalls und geben die kinetische Energie des Aufpralls an dessen Außenelektronen ab. Beim zurückspringen vom höheren Energieniveau wird die überschüssige Energie in Form von Licht wieder abgegeben. Die Art des Lichtspektrums und die Intensität des Lichtes hängt dabei von dem genutzten Metall und Edelgas ab. Als Lichtquelle werden in Projektoren vorzugsweise Halogen-Licht-Lampen genutzt. Diese strahlen ein warm-weißes Licht ab. Ein Beispiel des Lichtspektrums ist in Abbildung 2.5 dargestellt. Im Vergleich zum natürlichen Licht ist das Lichtspektrum linear verteilt. Die höhere Anzahl an Rot-Tönen lässt das Licht wärmer wirken. Der Vorgang der Lichterzeugung in Metalldampflampen ist mit einer starken Wärmeentwicklung verknüpft, wodurch schon nach kurzer Beleuchtungszeit die Lampen nicht mehr handhabbar sind. Darum wird innerhalb von Projektoren ein Kühlsystem benötigt um einen dauerhaften Einsatz des Leuchtmittels zu gewährleisten.

<sup>6</sup> Nach: FÖRDERGEMEINSCHAFT GUTES LICHT, licht.wissen 21 - Leitfaden Human Centric Lighting (HCL), 2021, [9]

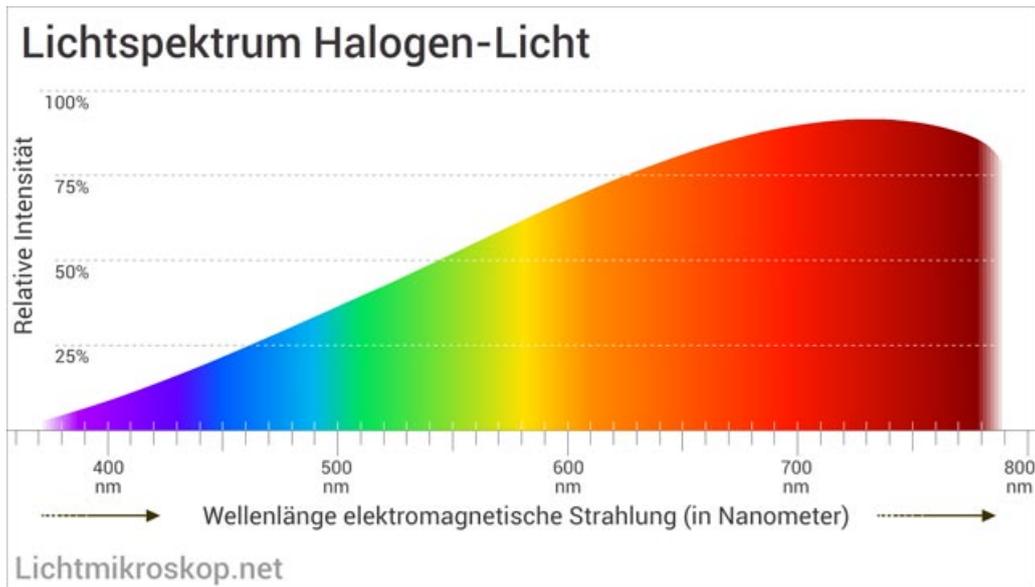


Abbildung 2.5: Lichtspektrum einer Metalldampfampe. Relative Intensität auf das Maximum des natürlichen Lichtes bezogen. Siehe Abbildung 2.4. [10]

Leuchtdioden, engl. light emitting diodes (LED), sind Halbleiterdioden, welche zur Lichterzeugung genutzt werden. Für den Vorgang der Lichterzeugung muss eine Spannung in Durchlassrichtung der Diode angelegt werden. Durch das Anlegen der Spannung werden die Elektronen innerhalb des Halbleiters in ein höheres Energieniveau versetzt. Beim Rückgang in ein niedrigeres Energieniveau wird die überschüssige Energie wiederum in Licht umgesetzt. Die Farbe des entstehenden Lichtes wird über das genutzte Diodenmaterial bestimmt. Vorteilhaft an dieser Technik ist, dass mittels der Nebeneinanderreihung mehrerer verschiedenfarbiger LED's ein gemischtes Lichtspektrum erzeugt werden kann. Dies gibt die Möglichkeit einer gezielten Farbauswahl des Lichtspektrums für ein LED-Array. Auf diese Weise können LED-Lampen so konfiguriert werden, dass sie dem natürlichen Lichtspektrum ähneln und die Farbwahrnehmung bestrahlter Objekte, der Wahrnehmung unter natürlichen Lichtbedingungen gleicht. Beispielhaft für ein nahezu natürliches Lichtspektrum ist in Abbildung 2.6 das Lichtspektrum einer LED-Beleuchtung mit warm-weißen Licht dargestellt.

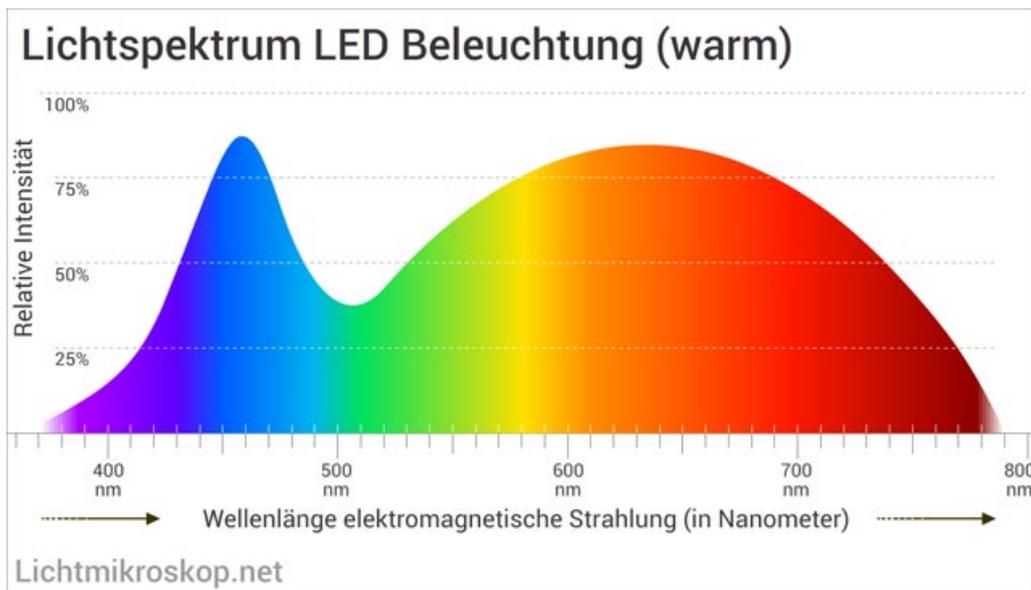


Abbildung 2.6: Lichtspektrum einer LED-Beleuchtung mit warmen Licht. Relative Intensität auf das Maximum des natürlichen Lichtes bezogen. Siehe Abbildung 2.4. [10]

Light amplification by stimulated emission of radiation, besser bekannt als LASER, ist eine besondere Form von Licht. Der Vorgang der Entstehung von Laserlicht soll hier nicht weiter erklärt werden. Wichtig ist das Laserlicht ein besonders schmalbandiges Spektrum besitzt und nicht wie die vorher beschriebenen Leuchtmittel ein breites Lichtspektrum. Diese Eigenschaft ermöglicht mit LASER-Licht besonders reine Lichtfarben zu erzeugen und ist für ein hohes Kontrastverhältnis zwischen Farben nützlich. Das Licht eines einzelnen Lasers ist dafür jedoch nicht ausreichend. Innerhalb von Projektoren werden darum Laser-Arrays genutzt um ein schmales Spektrum einer bestimmten Lichtfarbe zu erzeugen. Anschließend wird das Laserlicht mit anderen Lichtquellen kombiniert. In der folgenden Abbildung ist das Lichtspektrum des DLA-NZ7 Laser-Arrays der Firma JVC, einem Array aus blauen Lasern in Verbindung mit einem Farbrad aus gelben Phosphor gezeigt. Der Blauanteil vom Laser ist besonders stark im Spektrum ausgeprägt und wird durch das blaue Licht der Laserdioden erzeugt. Die breiteren grünen und roten Lichtspektren entstehen durch die Bestrahlung des Farbrades. Das gelbe Licht, welches dabei entsteht, wird anschließend in seine grünen und roten Bestandteile aufgespalten.<sup>7</sup>

<sup>7</sup> online: RAPHAEL VOIGT, Artikel: Test: JVC DLA-NZ7 mit echter 8K-Auflösung, Laser und 120Hz, 2022, [11]

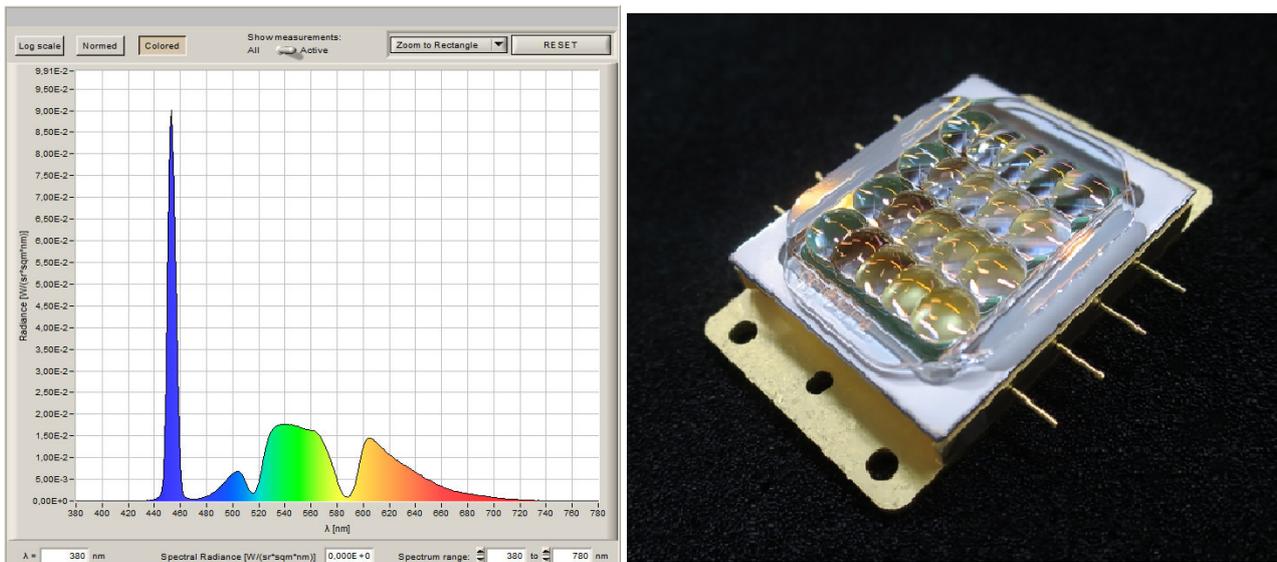


Abbildung 2.7: Lichtspektrum und Leuchtmittelträger eines Laser-Array der Firma JVC. [11]

Zusammenfassend kann man sagen, dass Hybride Systeme besonders attraktiv sind, da sie sowohl die Vorteile der genutzten Lichtquellen vereinen als auch ihre Nachteile kompensieren können. Der Aufwand, um mehrere Lichtquellen in einem hybriden System zu vereinen, ist dabei jedoch sehr hoch und Geräte, welche diese Technik nutzen sind besonders teuer. Eine gute Alternative bieten hingegen LED-Lampen. Vorteilhaft sind das annähernd natürliche Lichtspektrum, die hohe Lebensdauer und die geringen Kosten der LED-Technik. Zusätzlich besitzen LED's einen hohen Wirkungsgrad wodurch sie weniger Wärme entwickeln als LASER und Halogen-Lampen. Halogen-Lampen sind für die projektspezifischen Anforderungen ungeeignet. Das Leuchtmittel ist zu groß und benötigt eine Kühlung, wodurch die Geräteabmaße negativ beeinflusst werden. Zusätzlich wäre es nötig die Lampen nach geringer Anzahl an Betriebsstunden zu tauschen, was zu einer hohen Anzahl an Wartungs-Intervallen führen würde.

## 2.2.2 Projektionstechnologien

Für die Projektion von Lichtpunkten als Farbe eines Bildes muss das Licht der Lichtquelle verändert und ausgerichtet werden. Dazu stehen verschiedene Technologien zur Verfügung. Eine der bekanntesten Technologien ist dabei die digitale Lichtverarbeitung (DLP), engl. „digital light processing“. Weiterhin werden zwei verschiedene Arten der Flüssigkristall-Projektion genutzt, die „liquid crystal display“ (LCD) und die „liquid crystal on silicon“ (LCOS) Technologien. Die einzelnen Funktionsweisen, sowie die Vor- und Nachteile der verschiedenen Technologien werden in den nächsten Unterkapiteln näher

erläutert.

### 2.2.2.1 Digital Light Processing

DLP gilt als eine der zuverlässigsten Projektionsmethoden, aufgrund der hohen Erfahrungswerte beim Nutzen dieser Technologie. Für die Lichtverarbeitung wird das Licht der Lichtquelle durch einen Farbfilter geleitet, wodurch die Farbe des Bildpunktes generiert wird. Für die Darstellung eines großen Farbspektrums ist vorausgesetzt dass eine Weißlichtquelle genutzt wird, da in dem ausgestrahlten Lichtstrahl die nötigen Lichtphasen für blaues, grünes und rotes Licht enthalten sind. Der Farbfilter besteht aus verschiedenen Filterbereichen, welche nahtlos ineinander übergehen. Die Filterbereiche sind auf einer kreisförmigen Scheibe angebracht, welche über einem Motor rotiert werden kann. In der Technik wird diese Scheibe auch als Farbrad bezeichnet, siehe nachfolgende Abbildung.

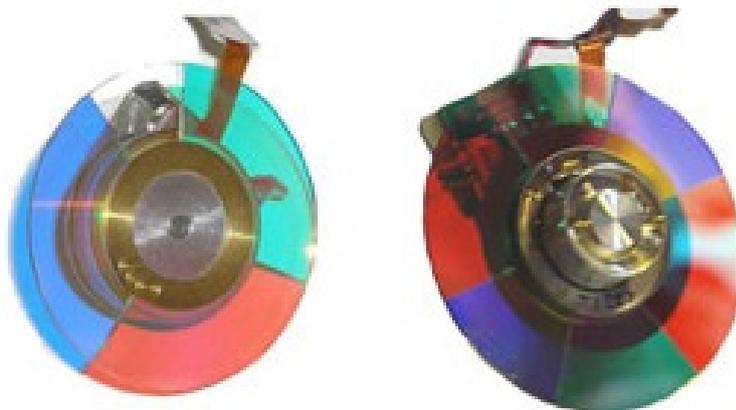


Abbildung 2.8: Zwei verschiedene Farbräder, links GRBW-Farbrad (Grün, Rot, Blau, Weiß), rechts RGBRGB-Farbrad (doppelt bestücktes RGB-Farbrad). Überarbeitet: [12a]

Der Lichtstrahl wird durchgehend durch einen Teilbereich des Farbrades geleitet. Durch das Rotieren des Farbrades wird das Licht so gefiltert, dass eine gewünschte Lichtfarbe entsteht. Das gefilterte Licht wird anschließend auf einer quadratischen Trägerfläche mit beweglichen Microspiegeln geleitet, siehe Abbildung 2.9. Diese sind standardmäßig so ausgerichtet, dass jeder Spiegel einen einzelnen Bildpunkt des Bildes aussendet. Durch Ansteuerung eines Spiegels wird dieser so ausgerichtet, dass der reflektierte Lichtstrahl nicht mehr auf die Projektionsfläche gelenkt wird. Um nun ein Bild auf eine Oberfläche zu

projizieren werden die reflektierten Lichtstrahlen der Microspiegel durch die Projektionsoptik vergrößert. Der Gesamtaufbau eines DLP-Systems kann der Abbildung 2.10 entnommen werden.

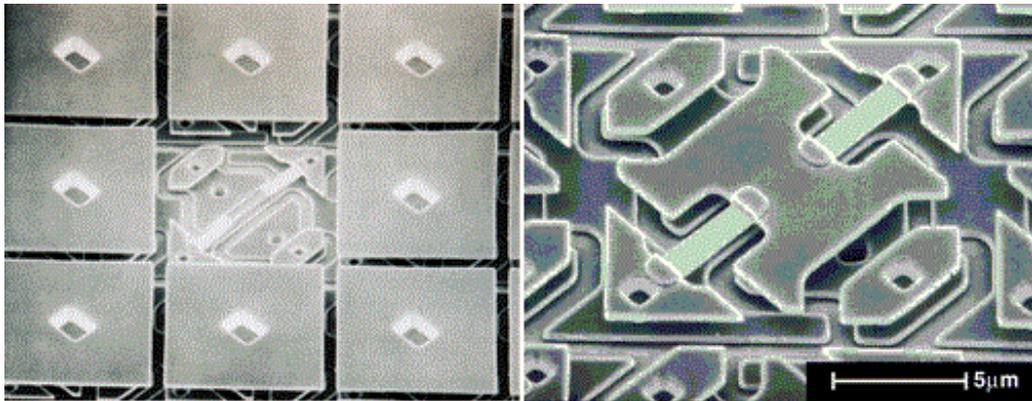


Abbildung 2.9: Träger mit Microspiegeln (Links) und Micromechanik zur Ausrichtung (Rechts) [12a]

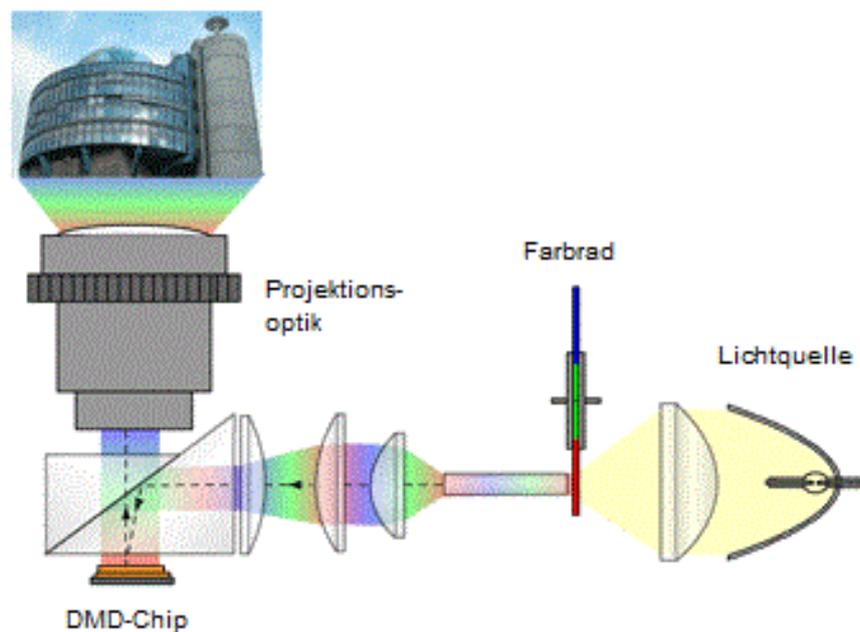


Abbildung 2.10: Prinzip der Bildprojektion mittels DLP-Technologie.  
Überarbeitet: [12a]

### 2.2.2.2 Liquid Crystal Display

Bei der LCD-Technologie werden Flüssigkristalle genutzt um zu steuern welche Farbanteile ein Bildpunkt besitzt. Flüssigkristalle sind besondere Materialien, welche die Eigenschaften von festen und flüssigen Materialien besitzen. Sie sind dazu noch nahezu transparent, was ein durchstrahlen des Lichtes ermöglicht. Der Flüssigkristall besteht aus kleinen Kristallen, welche lamellenartig im flüssigen Substrat liegen. Durch das anbringen einer elektrischen Spannung ist es möglich diese lamellenartigen Kristalle gezielt auszurichten. Dies wird ermöglicht, da die Kristalle sich wie Dipole verhalten und innerhalb eines magnetischen Feldes entlang der Feldlinien ausrichten. Die Grundausrichtung der Kristalle wird mittels zweier Orientierungsschichten bestimmt. Diese Orientierungsschichten bestehen aus gerillten Glasplatten, welche einen Versatz von  $90^\circ$  zwischen den Rillen aufweisen. Durch den Versatz der Orientierungsschichten werden die Kristalle im Substrat Helixartig angeordnet. Beim durchstrahlen eines Flüssigkristalls wird das Licht so polarisiert wie die internen Kristalle im Flüssigkristall angeordnet sind. Bevor das Licht durch die Flüssigkristalle geleitet wird, werden Polarisationsfilter genutzt um das Licht so zu polarisiert, dass nur Licht in den Flüssigkristall eintritt, welches der Grundausrichtung des Flüssigkristalls entspricht. Um nun zu steuern ob Licht ausgestrahlt werden soll oder nicht gibt es einen zweiten Polarisationsfilter am anderen Ende des Flüssigkristalls. In der Grundausrichtung der Kristalle kann das durchstrahlende Licht diesen Filter passieren, sobald ein magnetisches Feld die Kristalle in ihrer Ausrichtung beeinflusst, werden einzelne Lichtbestandteile herausgefiltert. Bei der Nutzung einer maximalen Kristallausrichtung wird der gesamte Lichtstrahl absorbiert. Die Flüssigkristalle sind, ähnlich der Mircospiegel bei der DLP-Technologie, auf einer Trägerplatte angeordnet. Dadurch kann jeder Flüssigkristall einem Bildpunkt des Projektors zugeordnet und dessen Helligkeit separat beeinflusst werden.<sup>8</sup>

Als nutzbare Lichtquellen gibt es verschiedene Möglichkeiten um die Farbgebung des Lichtes zu beeinflussen. Bei einer Weißlichtquelle werden die einzelnen Farbphasen des Lichtes in die Grundfarben von rotem, grünen und blauen Licht geteilt und anschließend durch einen zugehörigen LCD-Chip geleitet. Über die Ausrichtung der Kristalllamellen im Flüssigkristall wird die Helligkeit des Farbanteils eines jeden Farbpixels regelt. Anschließend werden die drei Lichtstrahlen gebündelt und mittels der Projektionsoptik auf die Projektionsfläche geleitet. Um den Aufwand der Phasentrennung zu verringern und gleichzeitig Bauraum und Kosten zu sparen ist es möglich drei farbige LED's zu nutzen, welche direkt das gewünschte Licht ausstrahlen. Eine weitere Entwicklung, zur

---

8 online: INFOTIP SERVICE GMBH, 2022, [12b]

Minimierung der Kosten und des nötigen Bauraums, nutzt diese drei Lichtquellen als eine einzige Lichtquelle. Dabei wird nur noch ein LCD-Chip benötigt, wobei die drei LED's in sehr kurzen Pulsen nacheinander angesteuert werden. Das Mischen der gepulsten einzelnen Farbanteile des Lichtes entsteht dabei durch die Trägheit des menschlichen Sehapparates.

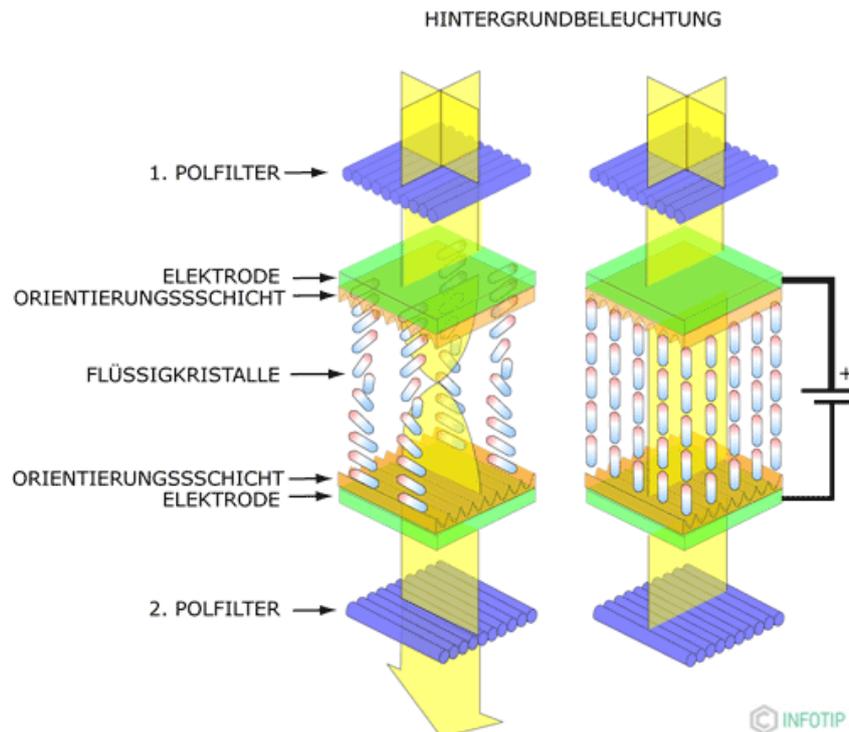


Abbildung 2.11: Aufbau einer LCD-Zelle für die Lichtfilterung, links in Grundausrichtung (Durchlass), rechts maximale Ausrichtung (Absorption) der Kristalle, durch angelegte Spannung an den Elektroden. [12b]

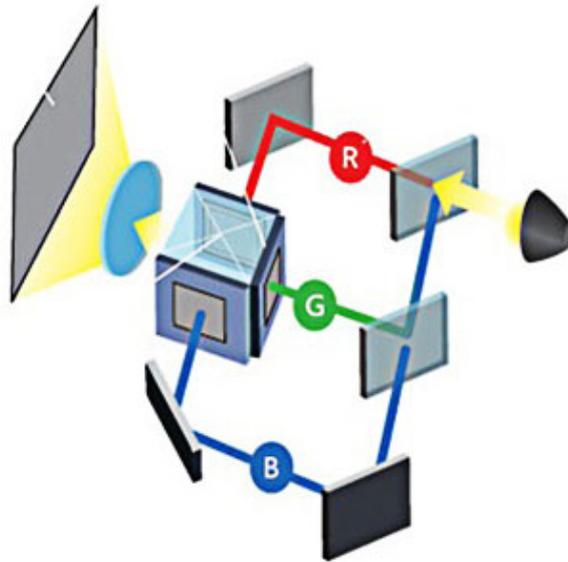


Abbildung 2.12: Schematischer Aufbau eines LCD-Projektors mit Weißlichtquelle. [13]

### 2.2.2.3 Liquid Cristal on Silicon

Es sei angemerkt das der Begriff LCOS ein geschützter Markenname ist. Dadurch finden sich verschiedene herstellerepezifische Bezeichnungen, welche gleichbedeutend sind. Alternative Bezeichnungen sind z.B. R-LCD, D-ILA und SCRD.<sup>9</sup>

Die LCOS-Technologie unterscheidet sich nur geringfügig von der LCD-Technologie, jedoch besitzt sie entscheidende Vorteile, weshalb sie hier separat aufgeführt wird.

Die Polarisierung eines einfallenden Lichtstrahls durch den Flüssigkristall entspricht der Funktionsweise der im vorherigen Unterkapitel beschriebenen LCD-Technologie. Der Unterschied zwischen den beiden Technologien liegt in der Absorption des Lichtes und somit der Einstellung der Helligkeit eines Bildpunktes. Bei der LCOS-Technologie wird das Licht vor dem Eintreffen auf den Flüssigkristall vor polarisiert und anschließend über ein polarisiertes Prisma geleitet. Dieses Prisma spiegelt den Lichtstrahl anschließend auf eine LCOS-Zelle. Innerhalb der Zelle wird das Licht anhand der Kristallausrichtung um polarisiert und durch den Flüssigkristall zurück reflektiert. Der austretende Lichtstrahl der LCOS-Zelle trifft nun wiederum auf das polarisierte Prisma. Beim erneuten Auftreffen auf das Prisma werden nun die gleichgerichteten Lichtbestandteile zurück in die Lichtquelle geleitet und entgegen gerichtete Lichtbestandteile können das Prisma passieren. Hierbei findet fast keine Absorption statt, da das Licht innerhalb der Lichtquelle wieder

<sup>9</sup> Nach online: PROJECTOR AG, Artikel "Beamer Kaufberatung 2022", 2022, [13]

zurückgeworfen wird, siehe Abbildung 2.13.

Als Lichtquellen können, wie bei der LCD-Technologie, Weißlichtlampen oder drei LED-Lampen genutzt werden. Für die Nutzung der LED-Lampen gibt es wiederum die Nutzung von drei separaten LCOS-Chips oder die Nutzung eines einzelnen LCOS-Chips mit nacheinander gepulsten unterschiedlichen Lichtfarben.

Der Hauptvorteil dieser Technologie besteht darin, dass weniger Wärme durch absorbiertes Licht entsteht. Dadurch können LCOS-Geräte passiv gekühlt werden und zusätzlicher Baumraum gespart werden.

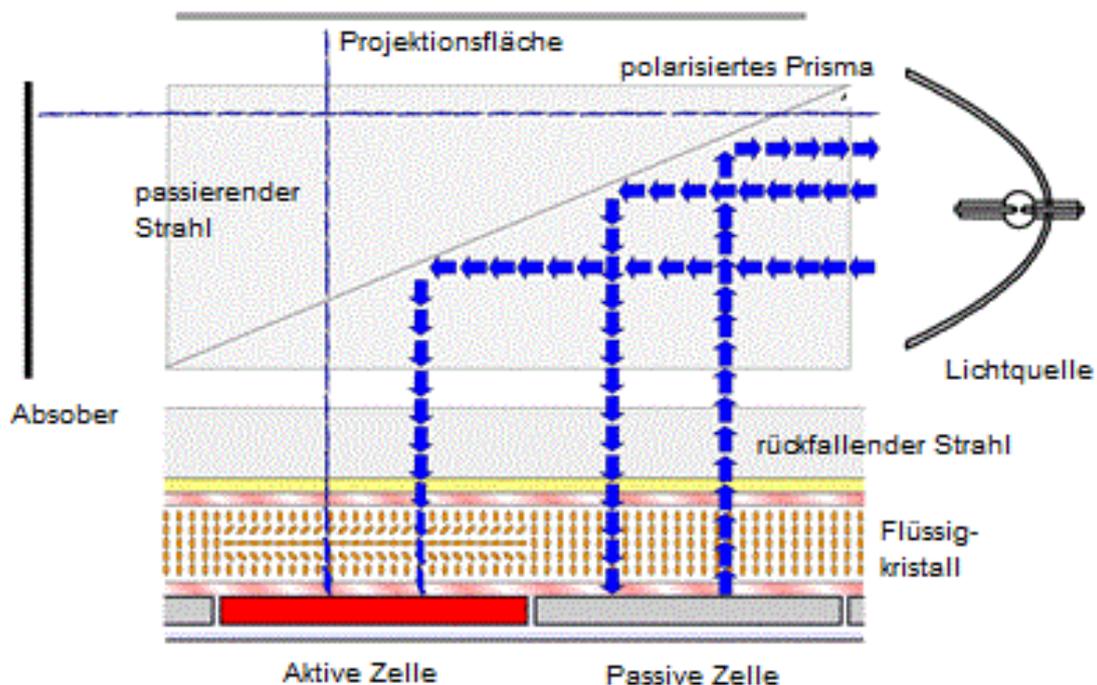


Abbildung 2.13: Funktionsweise LCOS-Zelle. [12c]

### 2.2.3 Zusammenfassung

Eine Übersicht der Vor- und Nachteile der Projektionstechnologien ist in Tabelle 1 dargestellt. Unter Berücksichtigung dieser, wurden für die Geräteauswahl folgende Kriterien gesetzt.

Ein Projektor sollte ...

- LED als Leuchtmittel besitzen.
- LCD als Projektionstechnologie nutzende.
- eine Helligkeit von 400 ANSI-Lumen nicht unterschreiten.
- eine Spannungsversorgung zwischen 12 VDC und 24 VDC unterstützen.

Weitere Kriterien, welche für eine Geräteauswahl als nicht maßgeblich aber dennoch vorteilhaft zu betrachten sind:

- hohes Kontrastverhältnis
- hohe Auflösung
- geringes Gewicht
- kleine Geräteabmaße

	DLP	LCD	LCOS
Vorteile:	hohe Auflösung	hohe Auflösung	hohe Auflösung
	hohes Kontrastverhältnis	hohes Kontrastverhältnis	hohes Kontrastverhältnis
	hohe Langlebigkeit	gute mechanische Belastbarkeit	gute mechanische Belastbarkeit
		geringe Geräteabmaße	geringe Geräteabmaße
			passive Kühlung möglich
Nachteile:	geringe Farbtreue günstiger Geräte	hohe Helligkeitsverluste der Lichtquelle	hohe Helligkeitsverluste der Lichtquelle
	schlechte Schwarzwerte günstiger Geräte (keine vollständige Absorption)	geringere Langlebigkeit	geringere Langlebigkeit
	geringe mechanische Belastbarkeit	Intensive Kühlung nötig	hohe Anschaffungskosten
	Visuelle Störeffekte - "Regenbogeneffekt"		
	Intensive Kühlung nötig		

Tabelle 1: Vor- und Nachteile der Projektionstechnologien im Überblick.

## 2.3 Bilddatenverarbeitung

### 2.3.1 RGB Bilderdaten

Für die Bewertung der Erkennbarkeit wurden Bilddaten innerhalb eines Versuchsstandes aufgenommen. Damit die aufgenommenen Bilddaten ausgewertet werden können, müssen diese vorerst einer Vorverarbeitung unterzogen werden.

Die Bilddaten wurden im RGB-Farbraum aufgenommen. Innerhalb dieses Farbraums liegen sie in Form einer dreidimensionalen Matrix mit den Dimensionen X, Y und Z vor. Die Z-Dimension besteht aus drei Einträgen, welche die Informationen über die Farbintensität innerhalb der Farbräume für die Rot, Grün und Blau enthalten. Im

nachfolgenden als Matrizen  $Z_r$ ,  $Z_g$  und  $Z_b$  bezeichnet. Jede der drei Matrizen hat die Dimensionen  $X$  und  $Y$ , wobei  $X$  die Anzahl der horizontalen Pixel und  $Y$  die Anzahl der vertikalen Pixel des aufgenommenen Bildes angibt. Die Intensitätswerte innerhalb der Matrizen  $Z_r$ ,  $Z_g$  und  $Z_b$  können einen Wert im Bereich von 0 bis 255 annehmen.

Für die Darstellung eines Bildes auf einem Ausgabemedium, z.B. Bildschirm, Fernsehgeräte oder mittels Projektor, werden die drei Intensitätswerte für Rot, Grün und Blau zu einer Grundfarbe im RGB-Farbraum vereint und anschließend dargestellt. Dies kann auf mittels verschiedener Techniken durchgeführt werden, welche hier nicht näher erläutert werden sollen. Erwähnt sei, dass eine der bekanntesten Techniken die Nutzung von Bayer-Filtern ist. Eine Darstellung der drei RGB-Farbräume und der Kombination zu einem RGB-Farbbild ist in Abbildung 2.14 zu sehen.

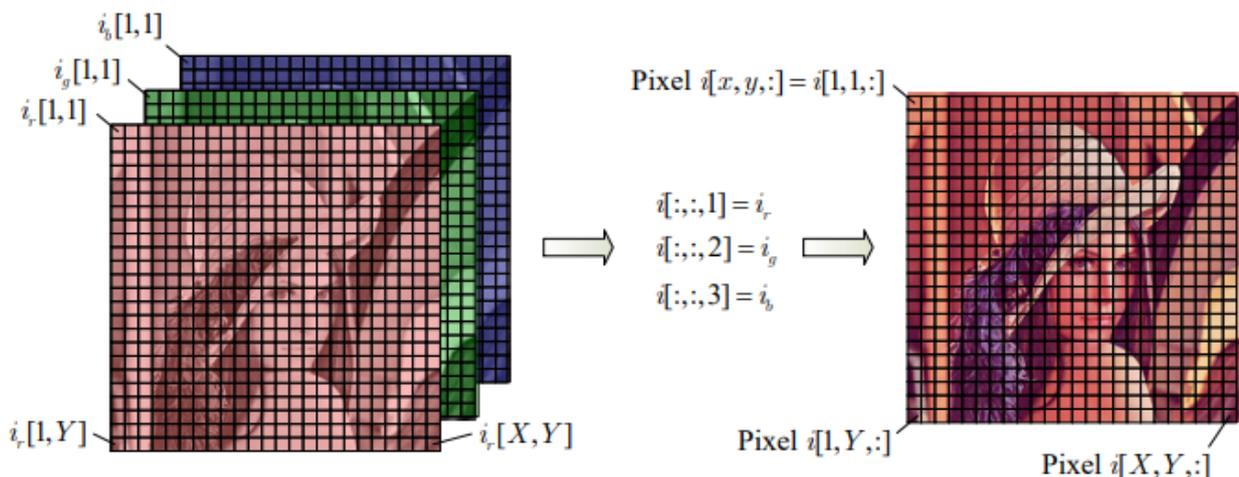


Abbildung 2.14: Beschreibung der Farbräume eines RGB-Bildes. [14]

## 2.3.2 Algorithmen der Bildverarbeitung

Um den Informationsgehalt von Bilddaten zu untersuchen und zu verändern gibt eine Vielzahl von Bildverarbeitungsalgorithmen. Im nachfolgenden sind die Algorithmen beschrieben, welche innerhalb dieser Arbeit genutzt wurden.

### 2.3.2.1 Verringerung der Bildauflösung

Das Verringern der Bildauflösung wird dazu genutzt um die Anzahl der Bildpunkte zu

vermindern. In der Bildverarbeitung ist das Hauptanwendungsgebiet dieser Technik die Minimierung von Rechenzeiten für nachfolgende Verarbeitungsschritte. Zu erwähnen ist dabei, dass es bei diesem Vorgang zu Informationsverlusten kommt. Die Informationsverluste entstehen dadurch, dass für die Erstellung eines Bildes mit geringerer Auflösung die Werte von benachbarten Pixeln zusammengefasst werden. Dies geschieht durch eine allgemeine Mittelwertbildung wenn die neue Auflösung in einem ganzzahligen Verhältnis zur ursprünglichen Auflösung steht. Beispielhaft wäre hierfür eine Verringerung der Auflösung eines Bildes mit 1280 mal 1024 Pixel um den Faktor zwei. Für die Mittelwertbildung werden die Pixelwerte von vier benachbarten Pixeln zu einem neuen Pixel zusammengefasst und es entsteht ein Bild mit der Auflösung 640 mal 512 Pixel. Sollte kein ganzzahliges Verhältnis zwischen den Auflösungen bestehen gibt es verschiedene Methoden, wie die Wertbildung der neuen Pixel durchgeführt wird.

### 2.3.2.2 Grauwert-Konvertierung

Für die Analyse von Farbbildern bezüglich der Helligkeit von einzelnen Bildpunkten wird die Grauwert-Konvertierung genutzt. Für die Grauwert-Konvertierung eines Farbbildes werden die einzelnen Farbphasen eines Bildpunktes wertmäßig zusammengefasst. Dies erfolgt wiederum mittels der Bildung eines Mittelwertes. In der Fachliteratur finden sich hierzu verschiedene Wichtungen für die Werte der Rot, Grün und Blau-Phase eines RGB-Bildes. Die unterschiedlichen Wichtungen orientieren dabei anhand verschiedener Auffassungen einer exakten Widerspiegelung des Menschlichen Helligkeitsempfindens. Die gebräuchlichste Wichtung ist hierbei 0,299 für den Rotanteil, 0,587 für den Grünanteil und 0,114 für den Blauanteil. Begründet wird diese anhand der Verteilung und Intensität von Farbreizen des menschlichen Auges.<sup>10</sup>

Die Formel für den Entstehenden Grauwert ist dabei wie folgt:

$$\text{Grauwert} = 0,299 \times \text{Rotanteil} + 0,587 \times \text{Grünanteil} + 0,114 \times \text{Blauanteil}$$

### 2.3.2.3 Weichzeichnen / Rauschunterdrückung

Beim Weichzeichnen von Bildern sollen unerwünschte Kanten oder Farbkontraste benachbarter Pixel ausgeglichen werden. Die allgemeinste Form des Weichzeichnens ist der k-Means-Algorithmus. Dieser Berechnet für jeden Pixel einen neuen Wert anhand

---

<sup>10</sup> online: HANNES EICHNER, Farbwahrnehmung, [15]

aller  $k$  benachbarter Pixel. Beispielhaft kann man sich für  $k = 3$  vorstellen, dass man um jeden Pixel einen Kreis mit einem Radius von 3 Pixeln zieht und aus allen Pixel-Werten einen Mittelwert bildet und dem betrachteten Pixel zuweist. Ein weiterer Vorteil dieses Algorithmus ist die Verringerung des Bildrauschens, welche während der Aufnahme eines Bildes entsteht. Die Auswirkungen verschiedener  $k$ -Faktoren für die Glättung eines verrauschten Bildausschnittes sind in Abbildung 2.15 dargestellt.

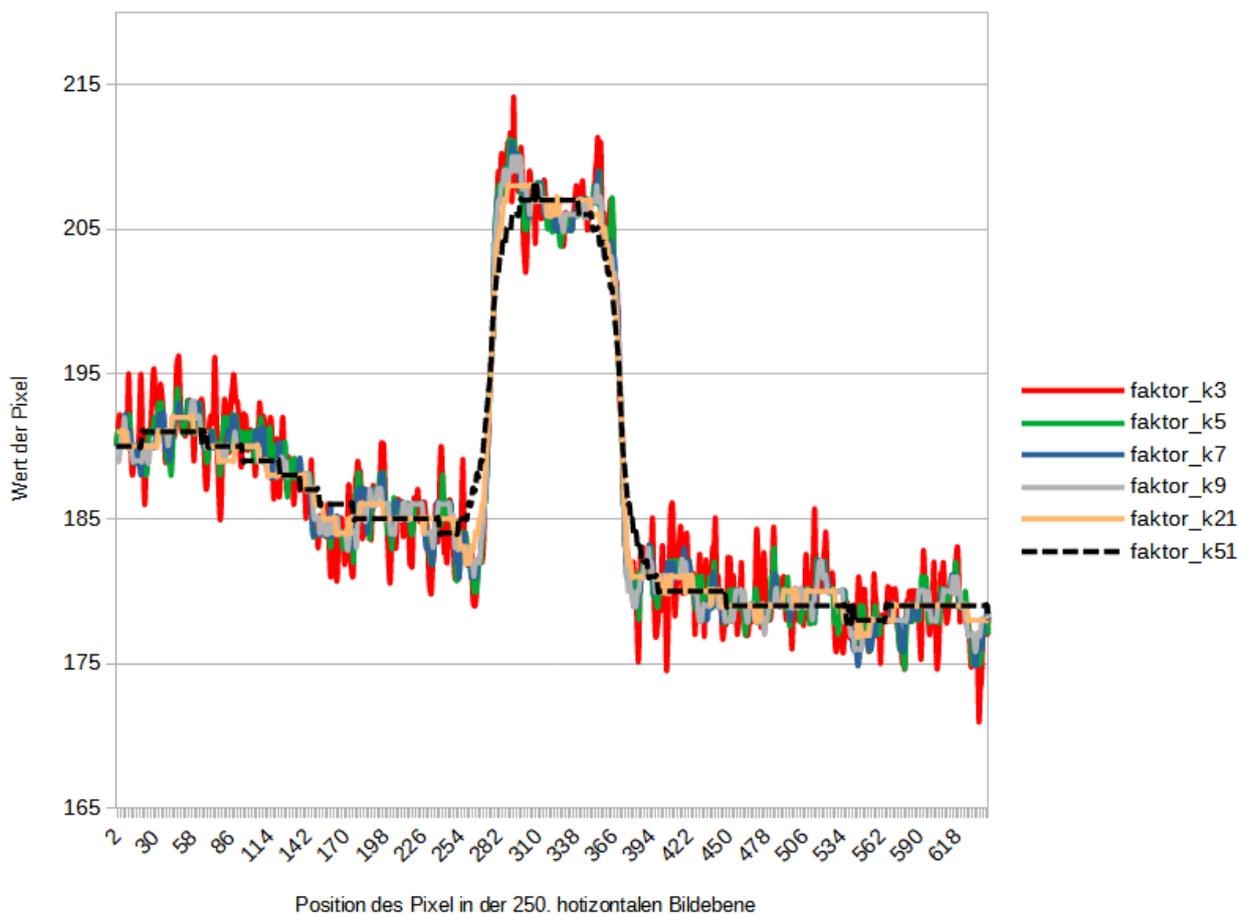


Abbildung 2.15: Auswirkungen verschiedener  $k$ -Faktoren auf die Glättung mittels  $k$ -Means-Algorithmus am Beispiel eines verrauschten Bildausschnittes. Genutzte  $k$ -Faktoren: 3, 5, 7, 9, 21 und 51.

### 2.3.3 Wertermittlung zur Bewertung der Erkennbarkeit

Zur Einschätzung der Erkennbarkeit eines Projektionsobjektes wurden die Differenz der Pixelwerte, an den Bildübergängen zwischen der Grundfarbe des Teppichmusters und der Pfeilumrandung sowie zwischen der Pfeilumrandung und der Grundfarbe des Pfeils,

gewählt. Die Untersuchung wurde sowohl für die drei Farbphasen des RGB-Bildes als auch des Graustufenbild jeder Aufnahme vorgenommen. Die Differenz der benachbarten Bildbereiche soll es ermöglichen, eine wertmäßige Einschätzung der Erkennbarkeit des Projektionsobjektes zu erhalten. Grundlage dafür ist die Funktionsweise des menschlichen Sehapparates, welcher Bildinformationen mittels Farbe und Helligkeit aufnimmt. Die Farbinformation wurde mittels der Differenz innerhalb der drei Farbphasen und die Helligkeit mittels der Differenz innerhalb des Grauwert-Bildes untersucht.

Die Grenzen der Farbübergänge wurden für jeden Projektor manuell ermittelt. Dazu wurden drei Aufnahmen, welche einen klar erkennbaren Übergängen aufweisen, ausgewählt und die Grenzen auf Erfahrungsbasis bestimmt. Um Einflüsse von Rauschen auf die Messergebnisse zu minimieren, wurden die Grenzen der Bildübergänge auf Wertebereiche erweitert. Durch eine anschließende Mittelwertbildung über die Wertebereiche wurden die beiden Rechenwerte für die Differenzbildung ermittelt. Bei der Bildung der Differenz dieser Werte entsteht, je nach Verhältnis der Wertepaar ein positiver oder negativer Wert. Für die anschließende Untersuchung wurde beschlossen, dass allein die Höhe des Werteunterschiedes zur Einschätzung der Erkennbarkeit ausschlaggebend ist. Dazu wurden Abschließend der Betrag der Differenzwerte gebildet, damit diese anschließend nicht mehr vorzeichenbehaftet sind.

Für die weitere Verwendung der berechneten Messwerte wurde diese im CSV-Datenformat<sup>11</sup> übertragen und innerhalb von Textdaten abgespeichert. Anschließend wurden die CSV-Daten innerhalb eines Tabellenkalkulationsprogramms eingelesen und den bereits dokumentierten subjektiven Einschätzungen der Erkennbarkeit gegenübergestellt. Näheres dazu findet sich im Kapitel 4 - Ergebnisdarstellung.

### 2.3.4 Software zur Verarbeitung der Datensätze

Die hier beschriebenen Bildverarbeitungsalgorithmen mussten auf den gesamten Datensatz des Versuchsaufbaus angewandt werden. Um den Aufwand dafür zu minimieren, wurde die Bildverarbeitungsbibliothek *OpenCV* in der Programmiersprache *Python* genutzt. Durch *OpenCV* werden die Verarbeitungsoperationen nach aktuellen Standards der Bildverarbeitung bereitgestellt und mussten somit nicht selbst entwickelt werden. Zusätzlich konnte ein Python-Programm entwickelt werden, welches die Bildverarbeitungsschritte auf den gesamten Datensatz anwendet. Der Quelltext des

---

<sup>11</sup> CSV steht dabei für comma-separated-values und beschreibt eine Speicherung von Daten, welche ein definiertes Trennzeichen - meist Komma - nutzen.

entwickelten Programms ist im Anhang beigefügt. Es gibt für die Ausführung des Programms verschiedene Startwerte welche gesetzt werden können. Diese wurden für Tests des Programmablaufes eingeführt und Steuern, ob bestimmte Funktionsabläufe abgearbeitet werden sollen oder nicht. Diese sind innerhalb des Quelltextes beschrieben und werden im weiteren nicht behandelt.

Als erster Schritt wurde die OpenCV-Bibliothek mit der Zeile *'import cv2 as cv'* importiert, der Anhang *'as cv'* wird zur Minimierung des Schreibaufwandes für die Nutzung von Bibliotheks-Funktionen durchgeführt, da anstelle des Kürzels *'cv2'*, für einen Funktionsaufruf, nachfolgend *'cv'* verwendbar ist. Zusätzlich werden weitere Bibliotheken für mathematische Funktionen und Datenzugriffe eingebunden.

Im ersten Schritt werden alle Bilddaten aus den Unterordnern des Datensatzes eingelesen. Hierzu werden die Bilder anhand ihrer Namen mit der Funktion *'cv.imread()'* eingelesen, diese Funktion nimmt als Parameter den Dateipfad einer Bild-Datei entgegen und besitzt weitere Parameter für optionale Einleseoptionen. Beim Einlesen entsteht ein Bildobjekt, welches aus der vorher beschriebenen dreidimensionalen Matrix, besteht. Die Z-Dimension der Matrix wird, anstelle der RGB-Konvention, innerhalb des Bildobjektes mit BGR-Konvention durchgeführt, somit bestehen die Einträge der jeweiligen Z-Ebene aus Blau für  $Z = 0$ , Grün für  $Z = 1$  und Rot für  $Z = 2$ . Nach dem Einlesen der Bilddaten findet eine Anpassung der Bildauflösung statt. Dazu wird die Auflösung halbiert. Im Quellcode ist dies mittels des Konfigurationsparameters *'scale\_percent = 50'* definiert. Dazu wird die Funktion *'cv.resize()'* verwendet. Die selbe Routine zum Einlesen der Bilddaten wird genutzt um die Grauwert-Bilder zu erstellen. Dazu wird der Funktion *'cv.imread()'* der Zusatzparameter *'cv.IMREAD\_GRAYSCALE'* beigefügt, siehe Abbildung 2.16.

Für den Programmaufruf gibt es die Option *'RESIZE\_BEFORE\_BLUR = 1'*. Diese steuert in welcher Abfolge die Anpassung der Bildauflösung und das Weichzeichnen zur Rauschunterdrückung stattfindet. Der Grund für diese Option ist, dass die Reihenfolge der Operationen eine Auswirkung auf das resultierende Ergebnisse hat. Aus Versuchen mit mehreren Bilddaten konnte ermittelt werden, dass eine Verminderung der Bildauflösung mit anschließendem Weichzeichnen zu besseren Resultaten der Rauschunterdrückung führt. Dies ist anhand eines Beispiels in Abbildung 2.17 aufgezeigt. Aufgrund dieser Ergebnisse wurde sich anschließend dafür entschieden die Funktion des Weichzeichnens stets nach der Änderung der Bildauflösung durchzuführen, um ein höheres Maß an Rauschunterdrückung zu erhalten.

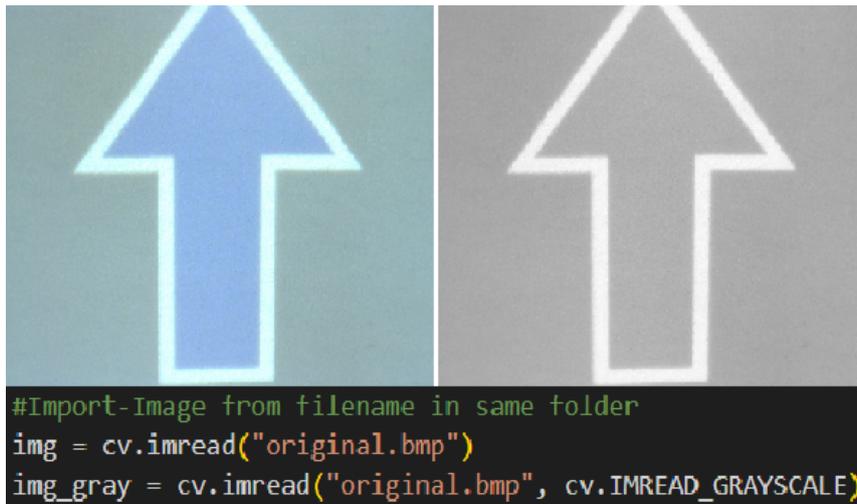


Abbildung 2.16: Einlesen einer Bilddatei mittels 'cv.imread()' als BGR-Bild (links) und Graustufenbild (rechts).

Für das Weichzeichnen des Bildes wurde die Funktion 'cv.medianBlur()' genutzt. Diese nutzt den k-Means-Algorithmus, welcher im vorherigen Unterkapitel bereits beschrieben wurde. Es wurde sich nach ausführlichen Tests für einen k-Wert von 21 entschieden, da dieser zu einer ausreichenden Rauschunterdrückung führt.

Auf die Werte der drei Farbphasen des BGR-Bildes kann für die weitere Datenverarbeitung direkt über das Bildobjekt des Originalbildes zugegriffen werden. Um die Farbphasen des BGR-Bildes für einen menschlichen Betrachter sichtbar zu machen müssen neue Bildobjekte erstellt werden. Dazu werden im Quellcode drei neue Bildobjekte, mit den gleichen Bildabmaßen wie das skalierte Originalbild angelegt und mit dessen Farbwerten der Einträge aus der jeweiligen Z-Dimension befüllt. Die übrigen Matrizen werden mit dem Wert 0 befüllt. Anschließend können die Bildobjekte als Bild-Datei abgespeichert werden. In Abbildung 2.18 sind Beispielbilder der Farbräume eines Ursprungsbildes, mit dem genutzten Quell-Code für ihre Erstellung zu sehen.

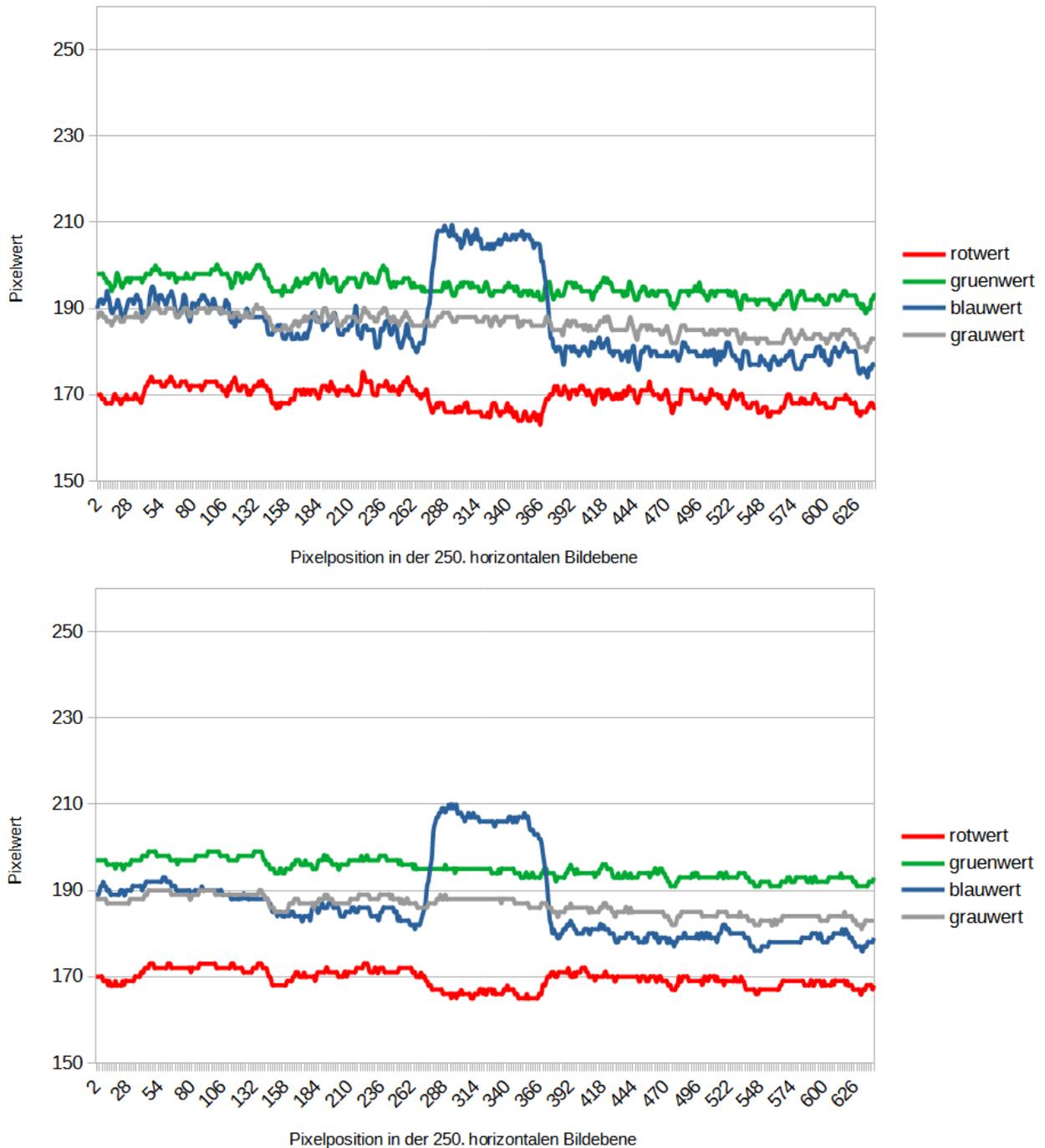


Abbildung 2.17: Auswirkungen der Reihenfolge von Weichzeichnen und ändern der Bildauflösung auf die Rauschunterdrückung. Obere Darstellung zeigt die Pixelwerte mit vorherigem Weichzeichnen und anschließender Änderung der Bildauflösung. Untere Darstellung zeigt die Pixelwerte mit vorheriger Änderung der Bildauflösung und anschließendem Weichzeichnen.

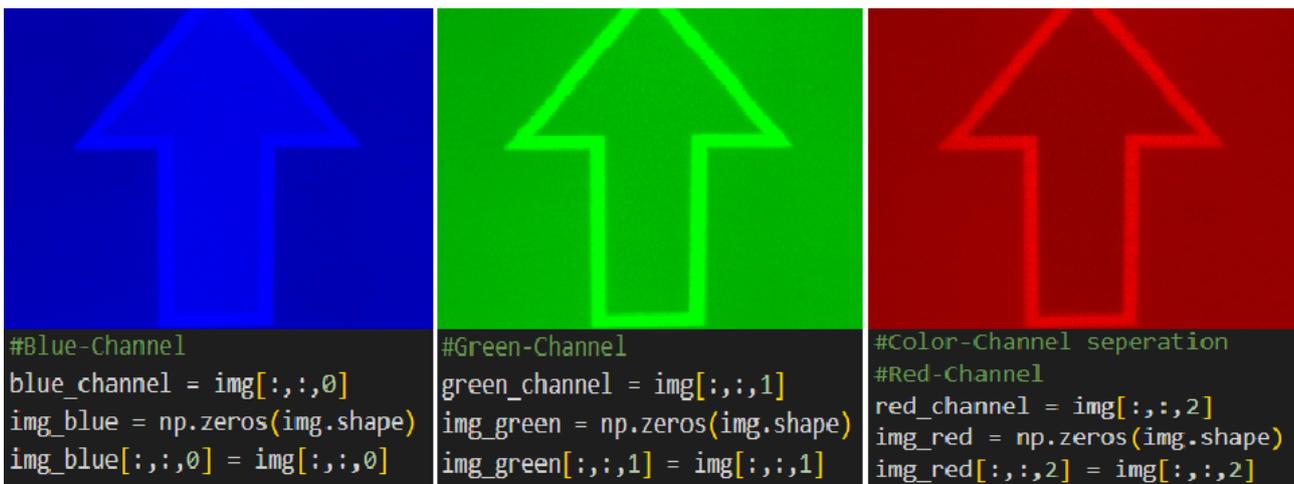


Abbildung 2.18: Quelltext der Extraktion der Farbphasen eines Originalbildes und deren Darstellung.

Für die Ermittlung der Differenzen der Bildübergänge zwischen der Grundfarbe des Projektionsuntergrundes und der Pfeilumrandung, sowie zwischen der Pfeilumrandung und der Grundfarbe des Pfeils, wurden Bereiche für eine Mittelwertbildung ermittelt. Diese beziehen sich jeweils auf die verschiedenen Datensätze der Projektoren. Die gewählten Bereiche, beziehen sich hierbei auf eine definierte horizontale Bildebene innerhalb der Aufnahme und spiegeln die Position des Bildpunktes in dieser Ebene wieder. Die horizontale Bildebene wurde so gewählt, dass die senkrechte Linien des Pfeilrahmens durchlaufen wird. In der nachfolgenden Tabelle sind die genutzten Werte für die Berechnung vermerkt. Die Bereichsgrenzen der Projektoren sind unterschiedlich, da die Pfeilposition vom Projektorabstand zur Projektionsfläche und der Bildgröße der Projektion abhängt. Innerhalb eines Bilddatensatzes wurde die Position der Pfeile während der Datenaufnahme gleich gehalten. Somit konnten die Bereiche innerhalb des Quell-Codes fest definiert werden.

Nach der Ermittlung der Mittelwerte für jeden Bereich wurde der Betrag der Differenz zwischen den benachbarten Übergängen gebildet. Dabei wurden die Werte auf ganze Zahlen gerundet damit diese wieder den Pixelwerten eines Bildes entsprechen. In Abbildung 2.19 ist der Funktionsaufruf innerhalb des Quelltextes gezeigt. Die ermittelten Werte wurden jeder Bilddatei zugeordnet und innerhalb einer Liste abgelegt. Am Ende des Programmablaufs wird die Liste als CSV-Datei abgespeichert.

	Optoma - EH320USTi	DB Power - T20	DB Power - RD-802
Horizontale Bildebene	300	250	200
Bereich des Projektionsuntergrundes	Pixel 180 bis 220	Pixel 200 bis 250	Pixel 275 bis 290
Bereich des linken Pfeilrahmen	Pixel 230 bis 250	Pixel 260 bis 270	Pixel 298 bis 303
Bereich der Pfeilfarbe	Pixel 260 bis 300	Pixel 290 bis 340	Pixel 310 bis 325

Tabelle 2: Bereichsgrenzen für die Mittelwertbildung der Bildbereich.

```
# acquire difference between border and sign
dif_ground_border = round(math.sqrt((mean_ground - mean_border) ** 2))
dif_border_sign = round(math.sqrt((mean_border - mean_sign) ** 2))
```

Abbildung 2.19: Quelltext der Berechnung des Betrages der Differenz zwischen den Bereichsübergängen. Gerundet auf ganze Zahlen.

### 3. Versuchsaufbau

#### 3.1 Geräteauswahl

Für die Datenerhebung wurde der firmeneigene Gerätebestand an Lichtprojektoren gesichtet und folgende Lichtprojektoren für den Versuchsaufbau gewählt:

- Ultra-Kurzstanzbeamer - Optoma EH320USTi
- Kurzstanzbeamer – DB Power T20
- Kurzstanzbeamer – DB Power RD-802

Die Auswahl wurde aufgrund der unterschiedlichen Projektionstechnologien und Helligkeitswerte der Geräte gewählt. Weitere technische Anforderungen wie Geräteabmaße und Spannungsversorgung wurden außer acht gelassen, da diese für die Untersuchung der Erkennbarkeit von projizierten Symbolen als nicht ausschlaggebend entschieden wurde. Weiterhin sei angemerkt das der Projektor EH320USTi der Firma *Optoma* eine besonders hohe Helligkeit besitzt. Diese ist selbst im Vergleich mit hochpreisigen mobilen Geräten, welche für eine Implementierung am Fahrzeug in fragen kommen würden, zu hoch. Da jedoch keine Projektoren mit adäquater Helligkeit zur Verfügung standen, wurde dieser gewählt um als Gütekriterium einer guten Erkennbarkeit zu dienen.

Aus den Datenblättern der Projektoren konnten folgende, für die Versuchsdurchführung wichtigen, technische Daten ermittelt werden:

	Optoma – EH320USTi	DB Power – T20	DB Power – RD-802
Helligkeit	4.000 ANSI-Lumen	60 ANSI-Lumen	60 ANSI-Lumen
Projektionsabstand	0,45 - 0,59 m	1,0 - 5,0 m	1,2 - 3,6 m
Auflösung	1.920 x 1.080 px	800 x 480 px	480 x 320 px
Projektionstechnologie	1-Chip DLP	LCD	LCD
Lichtquelle	Metalldampflampe	LED	LED

*Tabelle 3: Technische Daten der verwendeten Lichtprojektoren im Überblick.*

Aus den technischen Daten ist zu erkennen, dass die genutzten mobilen Geräte eine vergleichsweise geringe Helligkeit besitzen. Dies liegt vor allem an der veralteten Technik der beiden Geräte T20 und RD-802 von *DB Power*, welche sich auch in deren Preisklasse widerspiegelt. Die Helligkeitswerte mobiler Geräte im mittleren Preissegment und nach dem aktuellen Stand der Technik liegen durchschnittlich im Bereich von 400 bis 800 ANSI-Lumen.<sup>12</sup>

Das zu bestückende FTF besitzt einen Hauptspannungskreis mit 24 VDC und einen weiteren Spannungskreis mit 12 VDC. Aktuelle Lichtprojektoren, die für den Betrieb in stark beleuchteten Umgebungen ausgelegt sind, benötigen eine Stromversorgung mittels Netzspannung von 240 VAC. Diese Systeme sind aufgrund des hohen Aufwands, für die Implementierung einer geeigneten Stromversorgung im FTF, ungeeignet. Mobile Projektoren werden meist über Netzteile versorgt. Aus der Produktrecherche ergibt sich, dass die Netzteile für eine Spannungsversorgung der Geräte zwischen 12 und 32 VDC ausgelegt sind. Dies liegt im vertretbaren Bereich für zusätzliche Aufwendungen in der Implementierung der Geräte und wird bei einer später Geräteauswahl empfohlen. Nachteilig an diesen Geräten sind jedoch die geringeren Helligkeitswerte im Niedrigpreissegment und die hohen Kosten für leistungsstarke Geräte. Das Bestücken eines FTF mit leistungsstarken, mobilen Projektoren würden den Gesamtpreis pro Fahrzeug um bis zu 10%, im Vergleich zu einem Fahrzeug ohne Projektoren, erhöhen. Aus Herstellersicht ist dieser Kosteneinfluss für ein Teilsystem ohne systemkritische Funktionalität zu hoch. Eine Alternative bieten Projektor-Module, welche von Herstellern wie z.B. *Texas Instruments* erworben werden können. Diese sind an die speziellen Umgebungsbedingungen und Fahrzeuganforderungen anpassbar und bieten somit ein höchstmögliches Maß an Flexibilität. Für erste Feldversuche sollte von diesen Modulen jedoch abgesehen werden, da sie einen erhöhten Entwicklungsaufwand benötigen. Für eine spätere Integration als Fahrzeugmodul sind diese Module aufgrund ihrer geringeren Anschaffungskosten und hohen Flexibilität zu bevorzugen.

Da die gewählten Beamer alle mit einer Netzspannung von 240 V betrieben werden müssen, sind sie für die Integration am Fahrzeug grundlegend nicht geeignet. Die ermittelten Ergebnisse aus dem Versuchsaufbau dienen hierbei alleinig dem Rückschluss für eine geeignete Geräteauswahl.

Weiterhin sollten Projektoren, welche als Projektionstechnologie DLP nutzen aufgrund ihrer geringen mechanischen Belastbarkeit nicht verwendet werden. Im Bewegungsfall werden vom Fahrzeug Vibrationen verursacht, diese könnten die Produktlebensdauer

---

<sup>12</sup> Anhand der Daten aus der Produktrecherche.

maßgeblich beeinträchtigen und somit für kürzere Wartungsintervalle sorgen. Direkte Untersuchungen eines Zusammenhangs zwischen Vibrationen und Lebensdauer der Geräte liegen nicht vor. Der Zusammenhang wurde aufgrund allgemeingültiger Zusammenhänge zwischen Lebensdauer beweglicher Systeme im dynamisch wechselnden Belastungsfall getroffen. Weitere Untersuchungen in diesem Zusammenhang sind zu empfehlen.

Als Leuchtmittel sind Geräte zu bevorzugen, welche LED-Technik nutzen. Grundlage hierfür ist wiederum die Langlebigkeit des Leuchtmittels und damit verbundene Wartungskosten im Betrieb. Bei dieser Aussage wird sich auf die Herstellerangaben zu Lebensdauern von Leuchtmitteln berufen.

Als Überblick wird der aktuelle Trend technischer Umsetzungen der Hersteller den Anforderungen für die Implementierung in FTF, der Entwicklersicht, gegenüber gestellt. Dabei werden die Anforderungen der Entwicklersicht und die Anforderungen für die Erkennbarkeit separat betrachtet.

Als Aufnahmesystem für die Bilddaten wurde das Kamera-Model ace - acA1300-60gc der Firma *Basler* gewählt. Bei der Auswahl wurde sich grundlegend auf die Fähigkeit von Farbbildaufnahmen und einer möglichst hohen Auflösung der Bilddaten beschränkt. Die technischen Daten der Kamera sind in folgender Tabelle dokumentiert.

	Aktueller Trend	Entwicklersicht	Erkennbarkeit
Auflösungsverhältnis	Höhere Auflösungen	Mittel - Höhere Auflösungen verursachen mehr Kosten	Gering – Hoher Detailgrad verbessert Erkennbarkeit nicht maßgeblich
Helligkeit	Höhere Helligkeit	Hoch - Hauptkriterium für die Geräteauswahl	Hoch - Helligkeit beeinflusst Erkennbarkeit
Abmaße	Geringere Abmaße	Hoch - Bauraumbegrenzungen im FTF	Gering - Keine Auswirkung auf Erkennbarkeit
Technologie	LCD-Technologie	Hoch - beeinflusst maßgeblich Kosten, Helligkeit, Abmaße und mechanische Belastbarkeit	Hoch - hat maßgeblichen Einfluss auf Erkennbarkeit

Lichtquelle	LED-Leuchtmittel	Mittel - LED-Leuchtmittel sind Kostengünstiger	Mittel - Bessere Erkennbarkeit durch natürliches Lichtspektrum
-------------	------------------	--	--

Tabelle 4: Übersicht der Gerätespezifikationen im Vergleich

Eigenschaft	Basler ace - acA1300-60gc
Sensorformat	1/1.8"
Sensortyp	CMOS
Sensorgöße	6,8 mm x 5,4 mm
Auflösung	1280 px x 1024 px
Pixelgröße	5,3 $\mu\text{m}$ x 5,3 $\mu\text{m}$
maximale Bildrate	60 fps
Farbe	Farbbild

Tabelle 5: Technische Daten der genutzten Kamera, Basler ace - acA1300-60gc.

## 3.2 Konstruktion des Versuchsstandes

Für die Konstruktion des Versuchsstandes wurde zuvor der Lagerbestand an Konstruktionsmaterialien in Form von Aluminiumprofilen und Befestigungswinkeln gesichtet. Ausgehend von der Begutachtung des Lagerbestandes wurde sich für Aluminiumprofile 40x40 mm mit Nutgröße 8 entschieden, da diese in ausreichender Menge vorhanden waren. Das Gestell für den Versuchsaufbau wurde innerhalb der Konstruktionssoftware *Onshape* entworfen. Das entstandene 3D-Modell ist in Abbildung 3.1 ersichtlich. Die für die Konstruktion genutzten Profillängen wurden so gewählt, dass Zuschnitte der vorhandenen Profile möglichst vermieden werden. Eine Liste der Profillängen wurde als Schnittliste innerhalb der Software erstellt und zur Vorbereitung der Montage ausgedruckt, siehe Abbildung 3.2.

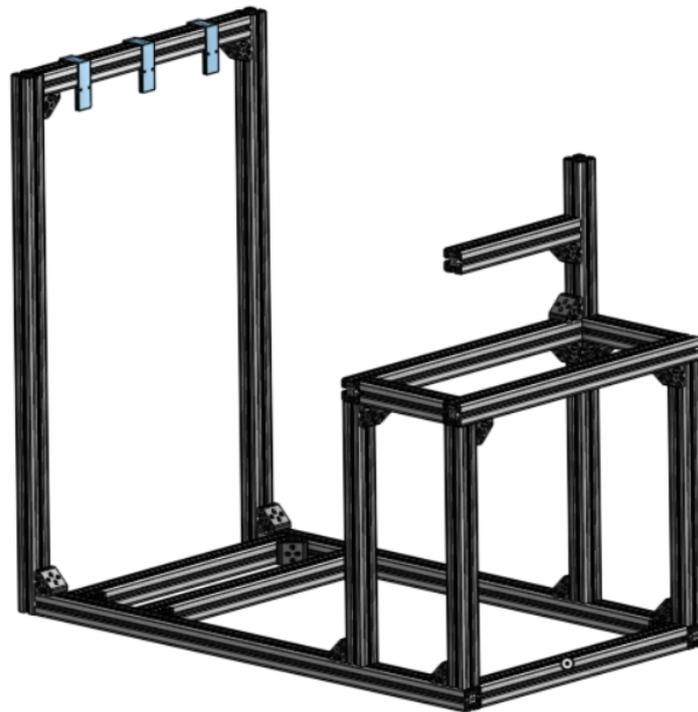


Abbildung 3.1: Gestell des Versuchsaufbau innerhalb der Konstruktionssoftware.

▼ Schnittliste 1				
Objekt	Menge	Standard	Beschreibung	Länge
1	4	Item	40x40	520 mm
2	2	Item	40x40	960 mm
3	2	Item	40x40	1015 mm
4	2	Item	40x40	200 mm
5	2	Item	40x40	600 mm
6	4	Item	40x40	470 mm
7	1	Item	40x40	280 mm
8	1	Item	40x40	300 mm

Abbildung 3.2: Schnittliste Aluminiumprofile des Gestells.

Für die Montage des Gestells wurden weiterhin 22 Profilwinkel und für die Anbringung der Teppichmuster mehrere Klemmelemente benötigt. Die Klemmelemente sind eigens entwickelt und für die Anbringung an den genutzten Aluminiumprofilen ausgelegt. Im Nachgang der Entwicklung wurden die Klemmelemente mittels des additiven Fertigungsverfahrens 3D-Druck selbst hergestellt. Die Bestandteile des Montageplanes sind nachfolgender Stückliste zu entnehmen.

Objekt-Nr.	Menge	Bauteilnummer	Beschreibung
1	1	1	Gestell
2	22	2	Winkel 90°
3	3	3	Halteelement Teppichmuster

Abbildung 3.3: Stückliste für Montage des Versuchsaufbaus.

### 3.3 Montage des Versuchsaufbaus

Anhand des Montageplans und der Stücklisten wurde das Gestell aus Aluminium-Profilen aufgebaut. Dieses Gestell dient als Befestigungspunkt der Projektions- und Messtechnik, in Form der genutzten Lichtprojektoren und Kamera. Weiterhin können die zu untersuchenden Oberflächen, in Form verschiedenfarbiger Teppichmuster, mit Hilfe der Klemmelemente befestigt werden. Die Projektoren sind an definierten Befestigungspunkten innerhalb des Gestells platziert. Die Positionierung wurde so gewählt, dass eine Projektion innerhalb der technischen Projektionsabstände gewährleistet ist. Der Abstand zwischen Projektionsfläche und Beamer wurde dabei so gewählt, dass ein scharfes Bild projiziert wird. Die horizontalen Abstände zwischen der Projektionsfläche und den genutzten Projektoren ist in folgender Tabelle dokumentiert.

Optoma - EH320USTi	DP Power – T20	DB Power – RD-802
0,41 m	1 m	0,52 m <sup>13</sup>

Tabelle 6: Horizontale Projektionsabstände der Lichtprojektoren zur Projektionsfläche

13 Der Projektionsabstand stimmt nicht mit den Herstellerangaben überein. Bei diesem Abstand konnten jedoch die besten Projektionsergebnisse erzielt werden.

Die Kamera ist mittels einer Aluminiumplatte an einer leicht angewinkelten Aluminiumstrebe angebracht. Somit konnte die Kamera während des gesamten Messzeitraums fixiert und der Aufnahmewinkel konstant gehalten.



*Abbildung 3.4: Befestigung der Kamera am Gestell des Versuchsaufbaus.*

Als Projektionsflächen wurden sechs Teppichmuster in den Farben Orange, Türkis, Grün, Beige, Schwarz und Grau genutzt. Die Teppichmuster der Farben Orange, Türkis, Grün und Beige sind Kurzhaarteppiche, welche nach Rücksprache mit Fachpersonal standardmäßig in öffentlichen Verkaufsräumen verlegt werden. Das schwarze Teppichmuster ist einem Berberteppich ähnlich und besitzt größere Unebenheiten zwischen Teppichgrund und -oberfläche. Das graue Teppichmuster ist ein Nadelvlies-Teppich mit verschiedenen, unregelmäßig verteilten, Grautönen. Abbildung 3.5 zeigt die verwendeten Muster für die Datenaufnahme.



*Abbildung 3.5: Übersicht der genutzten Teppichmuster als Projektionsuntergrund. Farben der Muster von links nach rechts Orange, Türkis, Grün, Beige, Schwarz und Grau.*

Zur Simulation verschieden starker Umgebungsbeleuchtungen wurden zwei Scheinwerfer genutzt. Ein Halogenstrahler der Firma *Schwabe* Model H05RN<sup>14</sup> mit 400 W und 8600 Lumen und gelblichem Licht, sowie ein LED-Strahler der Firma *Brennenstuhl* Model ML2705<sup>15</sup> mit 17 W, 1080 Lumen mittels 27 LED's und weißem Licht. Diese wurde so befestigt, dass sie eine gleichmäßige Bestrahlung der Projektionsoberfläche gewährleisten, ohne unerwünschte Schatten zu werfen. Die Positionierung der Strahler wird beispielhaft in Abbildung 3.6 gezeigt. Bei den Versuchen wurden vier verschiedene Beleuchtungssituationen untersucht. Diese sind, natürliche Beleuchtung über das Tageslicht, zusätzliche Beleuchtung mittels des Weißlichtstrahlers, zusätzliche Beleuchtung mittels des Gelblichtstrahlers und zusätzliche Beleuchtung mittels des Weißlicht- und Gelblichtstrahlers. Die simulierten Beleuchtungssituationen sollen dabei Auskunft über die Beeinflussung der Erkennbarkeit durch verschiedene Umgebungseinflüsse liefern, wodurch eine Einschätzung der benötigten Projektorhelligkeit getroffen werden konnte.



*Abbildung 3.6: Platzierung und Ausrichtung der Strahler, zur Simulation verschiedener Beleuchtungsbedingungen, im Versuchsaufbau. Links Halogenstrahler H05RN und Rechts LED-Strahler ML2705.*

---

14 online: Produktdaten H05RN [16]

15 online: Produktdaten ML2705 [17]

Als Projektionsobjekte wurden Bilder eines umrahmten Pfeiles in verschiedenen Farbgebungen genutzt. Das Pfeilsymbol wurde wegen seines Bezuges für den späteren Anwendungsfall im realen Umfeld gewählt. Um die Auswirkungen der Farbgebung des Projektionsobjektes im Zusammenhang mit der Farbe des Projektionsuntergrundes zu untersuchen wurden acht verschiedene Farbvarianten des Projektionsobjektes erstellt. Dabei wurden die drei Grundfarben Rot, Grün und Blau, jeweils mit schwarzer und weißer Pfeilumrandung, sowie ein schwarzer Pfeil mit weißem Rahmen und ein weißer Pfeil mit schwarzem Rahmen gewählt, dargestellt in der Abbildung 3.7.

Das genutzte Projektionsobjekt wurde alleinig für die Untersuchungszwecke erstellt. Für den konkreten Anwendungsfall wird empfohlen, dieses Symbole gegen adäquate Symbole für den Informationsaustausch von Fahrzeuggeschwindigkeit, Fahrtrichtung und bevorstehender Abbiegevorgänge zu ersetzen. Eine Auswahl an Symbolen, welche dafür in Frage kommen könnten, ist in Abbildung 3.8 vorgestellt.

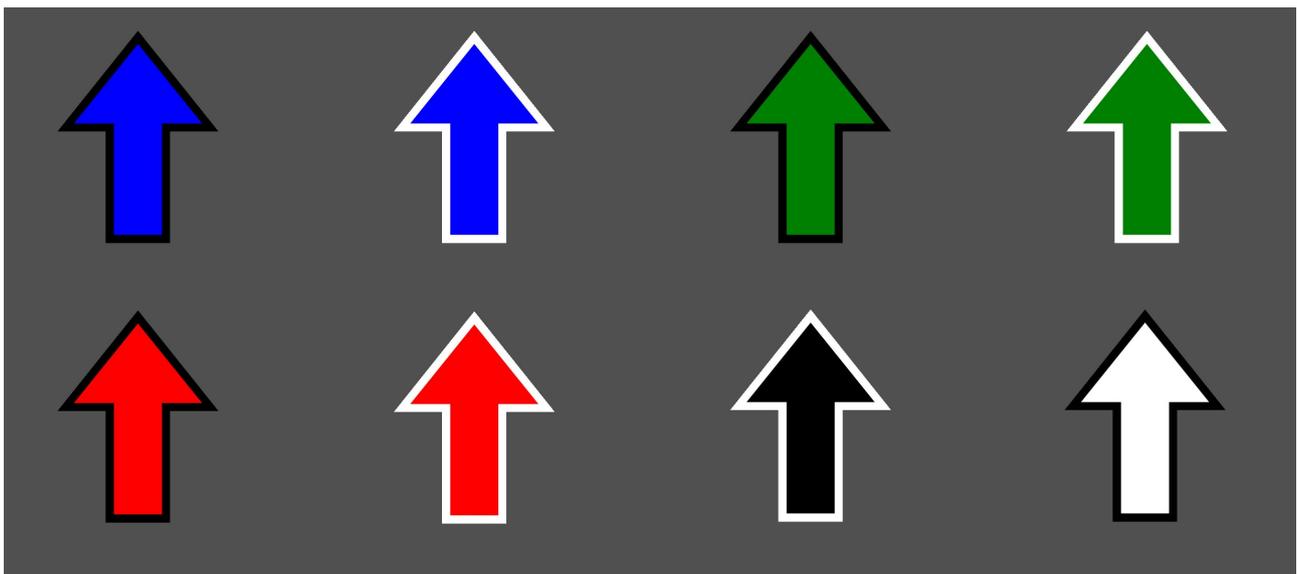


Abbildung 3.7: Genutzter Satz an Projektionsobjekten für die Untersuchung.

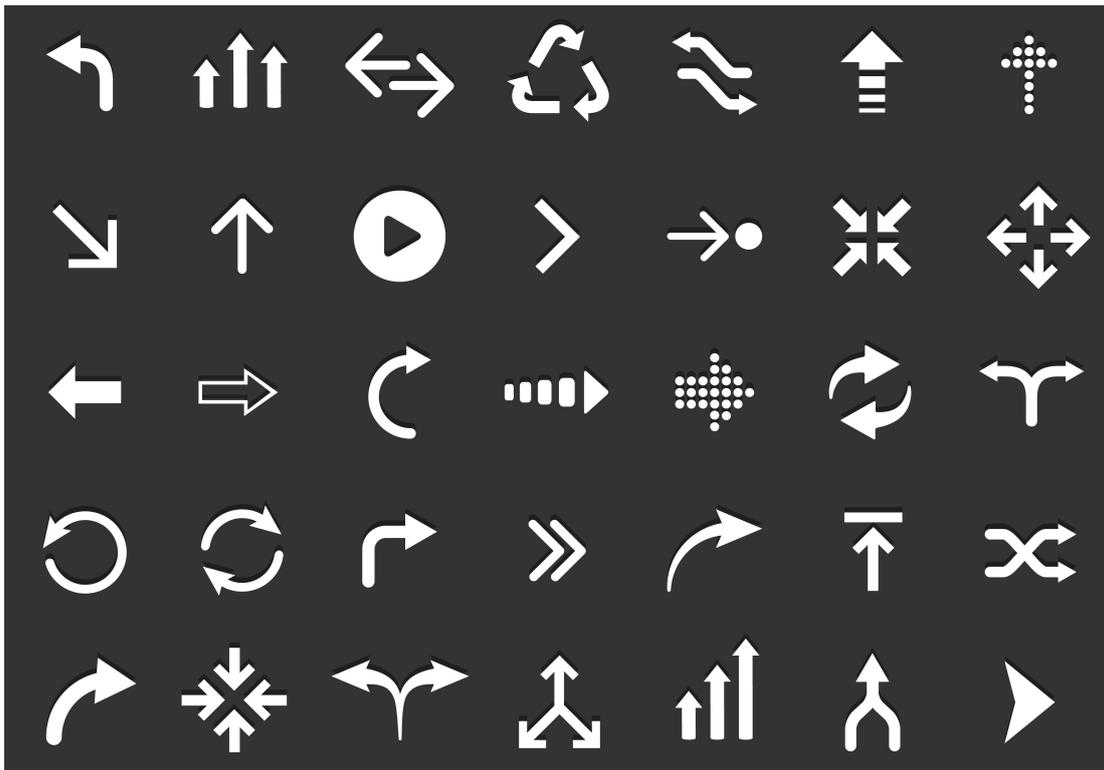


Abbildung 3.8: Auswahl an Symbolen die für einen realen Anwendungsfall, auf ihre Tauglichkeit der Informationsübertragung des Fahrzeugverhaltens, untersucht werden können.

### 3.4 Methodik der Datenerhebung

Der Versuchsaufbau wurde in einem Raum mit breiter Fensterseite durchgeführt, um eine gute natürliche Beleuchtung zu gewährleisten. Die Aufnahmen wurden stets in der Zeit zwischen 10:00 und 15:00 Uhr und bei klarem Himmel durchgeführt, um externe Einflüsse auf die Messdaten zu minimieren. Der Zeitraum wurde so gewählt, dass die Sonne möglichst hoch steht und eine direkte Einstrahlung auf den Versuchsaufbau ausgeschlossen werden konnte. Für die durchgeführten Messungen wurde nachfolgende Methodik beschlossen und die Messungen für die drei genutzten Projektoren nacheinander durchgeführt.

Vor der Durchführung jeder Messreihe wurden die Ausrichtung der Projektionsobjekte festgelegt und für den Messzeitraum konstant gehalten. Dieser Schritt war für die Durchführung der Auswerterroutine von besonderer Bedeutung, da die genutzten Bereichsgrenzen für die Differenzbildung manuell ermittelt wurden und Abweichungen in der Positionierung zu Fehlern in der Verarbeitung geführt hätten. Weiterhin wurden die Kameraeinstellungen für jeden Projektor konfiguriert. Dies war besonders wichtig für den

Optoma - EH320USTi, da dieser mit der 1-Chip DLP-Technologie arbeitet. Bei dieser Technologie werden die drei Farbphasen, Rot, Grün und Blau, nacheinander projiziert und führen bei falscher Einstellung der Aufnahmezeit und Belichtungszeit der Kamera zu Farbverfälschungen in den Aufnahmen.<sup>16</sup> Ähnliche Effekte konnten bei der Bestrahlung mittels der beiden zusätzlichen Beleuchtungen beobachtet werden. Diese Störungen konnte damit behoben werden, indem die Belichtungszeit innerhalb der Kamera-Einstellungen auf automatisch gestellt wurde. Für die verschiedenen Beleuchtungssituationen konnten aus der automatischen Konfigurationen folgende Belichtungszeiten ermittelt werden:

- Tageslicht: ~11.000  $\mu$ s
- Weißlichtstrahler: ~5.000  $\mu$ s
- Gelblichtstrahler: ~3.000  $\mu$ s
- Kombination aus Weiß- und Gelblichtstrahler: ~1.500  $\mu$ s

Für die Aufnahmen wurden folgende Kamera-Einstellungen den Projektoren zugeordnet:

	Optoma - EH320USTi	DB Power - T20	DB Power - RD-802
Aufnahmerate	30 Hz	60 Hz	60 Hz
Belichtungszeit	automatisch	automatisch	automatisch
Shutter-Mode	global shutter	global shutter	global shutter
Farbraum	RGB	RGB	RGB
Umgebungslicht	natürliche Beleuchtung	natürliche Beleuchtung	natürliche Beleuchtung

*Tabelle 7: Kamerakonfigurationen der drei Projektoren für die Datenaufnahme.*

Nach Abschluss der Vorbereitung wurde mit der Datenaufnahme begonnen. Dazu wurden nacheinander alle Teppichmuster mittels zweier Aufnahmeschleifen abgearbeitet. Die erste Aufnahmeschleife bezieht sich auf die genutzten Projektionsobjekte in Form der acht verschiedenen Farbkombinationen von Pfeilen. Für jede dieser Kombinationen wird zweite Aufnahmeschleife durchlaufen. Dazu wurde ein Pfeil-Symbol auf das

<sup>16</sup> Für eine besseres Verständnis ist eine Bildreihe der Farbverfälschung dem Anhang beigefügt.

Teppichmuster projiziert, anschließend wurde für jede der vier Beleuchtungssituationen eine Aufnahme mit der Kamera durchgeführt. Nebenläufig wurde die subjektive Einschätzung der Erkennbarkeit dokumentiert. Sobald alle Beleuchtungssituationen dokumentiert waren, wurde das nächste Pfeil-Symbol gewählt. Dieser Vorgang wurde für alle Beleuchtungssituationen, Pfeil-Symbole und Teppichmuster durchgeführt. Anschließend wurden die Daten gesichert und die Datenaufnahme für den nächsten Projektor vorbereitet. Ein Ablaufdiagramm, welches die Methodik für die Datenaufnahme eines Projektors beschreibt, ist auf der folgenden Seite dargestellt.



Abbildung 3.9: Ablaufdiagramm der Methodik für die Datenaufnahme. Methodik wurde für jeden der drei Projektoren separat durchgeführt.

## 4. Ergebnisdarstellung

### 4.1 Beschreibung Messdatensatz

Der Datensatz für die Untersuchungen wurde innerhalb des beiliegenden Datenträgers im Ordner 'Lichtprojektor - Datensätze' beigelegt. Innerhalb dieses Ordners sind die spezifischen Messreihen der untersuchten Projektoren anhand der Herstellerbezeichnung geordnet. Zusätzlich sind die Tabellen für die Untersuchung der Auswirkungen verschiedener k-Faktoren für das Weichzeichnen und der Auswirkungen der Verarbeitungsreihenfolge des Weichzeichnens und der Verringerung der Bildauflösung enthalten.

Innerhalb der Messreihen befinden sich die genutzten Python-Programme für die Datenverarbeitung, die Messdaten im CSV-Datenformat innerhalb einer Textdatei, die Tabellen für die Auswertung der Messdaten anhand der Erkennbarkeit und die Bilddaten der Projektionsobjekte. Die Bilddaten sind dabei den genutzten Teppichmustern zugeordnet. Innerhalb der Unterordner für die Teppichmuster sind die dokumentierten subjektiven Einschätzungen der Erkennbarkeit in Tabellendateien abgelegt. Die Dateien sind einheitlich mit 'Einschätzung.ods' bezeichnet.

Zusätzlich sind die Bilddaten anhand der genutzten Projektionsobjekte unterteilt. Dabei wurde sich auf die Grundfarbe der Pfeile beschränkt. Siehe Abbildung 4.1 für die beschriebene Ordnerstruktur innerhalb eines Teppichmusters.

The screenshot shows a file explorer window with the following path: Lichtprojektor - Datensätze > Messreihe - DBPower RD-802 > Teppich-Beige. The main content area displays a table of files and folders:

Name	Änderungsdatum	Typ	Größe
Blau	10.08.2022 16:37	Dateiordner	
Gruen	10.08.2022 16:44	Dateiordner	
Rot	10.08.2022 16:44	Dateiordner	
Schwarz	10.08.2022 16:44	Dateiordner	
Weiss	10.08.2022 16:44	Dateiordner	
Einschätzung.ods	15.08.2022 15:59	OpenDocument Ta...	10 KB

Abbildung 4.1: Ordnerstruktur des Datensatzes für den Projektor DP Power RD-802. Aufbau des Unterordners für die Bilddaten der Projektionsobjekte.

Innerhalb der Unterordner für die Pfeil-Grundfarben sind die Bilddaten der Messreihen abgelegt. Die Bilddaten mittels einer speziellen Namenskonvention abgelegt. Ein Beispiel für die Namenskonvention ist in folgender Tabelle dargestellt.

	Pfeilfarbe	Rahmenfarbe	Beleuchtung	Aufnahme- Nummer	Dateiendung
Bsp.	Blau	SB	N	1	.bmp

Tabelle 8: Beispiel der Namenskonvention für eine Bilddatei.

Für die Pfeilfarbe gibt es fünf verschiedene Bezeichnungen. Diese sind 'Blau', 'Grün', 'Rot', 'Schwarz' und 'Weiss'. Die Rahmenfarbe ist in zwei verschiedene Bezeichner unterteilt. Diese sind 'SB' für eine schwarze Farbe des Pfeilrahmens und 'WB' für eine weiße Farbe des Pfeilrahmens. Für die Beleuchtungssituationen gibt es vier Bezeichner. Diese sind 'N' für die natürliche Beleuchtung, 'W' für die zusätzliche Beleuchtung mittels des LED-Strahlers, 'G' für die zusätzliche Beleuchtung mittels des Halogen-Strahlers und 'B' für die zusätzliche Beleuchtung mittels beider Strahler. Eine Übersicht der Bezeichner und deren Bedeutung kann Tabelle 9 entnommen werden, dabei wurden die Pfeilgrundfarben nicht mit aufgenommen, da diese als selbsterklärend angesehen werden. Die Aufnahme-Nummer aller Bilddaten ist stets '1'. Im Vorfeld der Versuchsdurchführung wurde darüber nachgedacht mehrere Aufnahmen pro Projektionsobjekt durchzuführen, dies wurde aus Zeitgründen jedoch verworfen.

Bezeichner	Bedeutung
SB	Kürzel für einen schwarzen Pfeilrahmen
WB	Kürzel für einen weißen Pfeilrahmen
N	Kürzel für eine natürliche Beleuchtung
W	Kürzel für eine zusätzliche Beleuchtung mittels des LED-Strahlers
G	Kürzel für eine zusätzliche Beleuchtung mittels des Halogen-Strahlers
B	Kürzel für die zusätzliche Beleuchtung mit beiden Strahlern

Tabelle 9: Übersicht der Bezeichner für die Namenskonvention der Bilddaten.

## 4.2 Darstellung der Ergebnisse

Aufgrund der umfassenden Datenmenge werden in diesem Abschnitt nur Auszüge der Messdaten beschrieben. Die hier nicht dargestellten Daten können dem digitalen Speichermedium entnommen werden, welches dieser Arbeit beiliegt. Die nachfolgenden Beschreibungen beziehen sich auf die Auswertungstabellen des *Optoma* – EH320USTi mit dem grünen Teppichmuster.

Dargestellt werden die Daten anhand der exportierten CSV-Dateien der Bildverarbeitungssoftware. Die Daten wurden dazu in ein Tabellenkalkulationsprogramm geladen und anschließend grafisch dargestellt. Innerhalb der nachfolgenden Abbildung sind die Intensitätsdifferenzen der Pixelwerte an den Bildübergängen der BGR-Farbphasen dargestellt. Diese sind den jeweiligen Projektionsobjekten und Beleuchtungssituationen anhand der bereits beschriebenen Namenskonvention zugeordnet. Unterhalb des Diagramms sind die subjektiven Einschätzungen in Tabellenform dargestellt. Die Anordnung wurde so gewählt, dass eine Zuordnung der Projektionsobjekte und Beleuchtungssituationen vorgenommen werden kann.

In gleicher Weise werden die Intensitätsdifferenzen der Grauwert-Bilder dargestellt. Dabei sind die subjektiven Einschätzungen der Erkennbarkeit wiederum unter der Tabelle angeordnet. Siehe Abbildung 4.3.



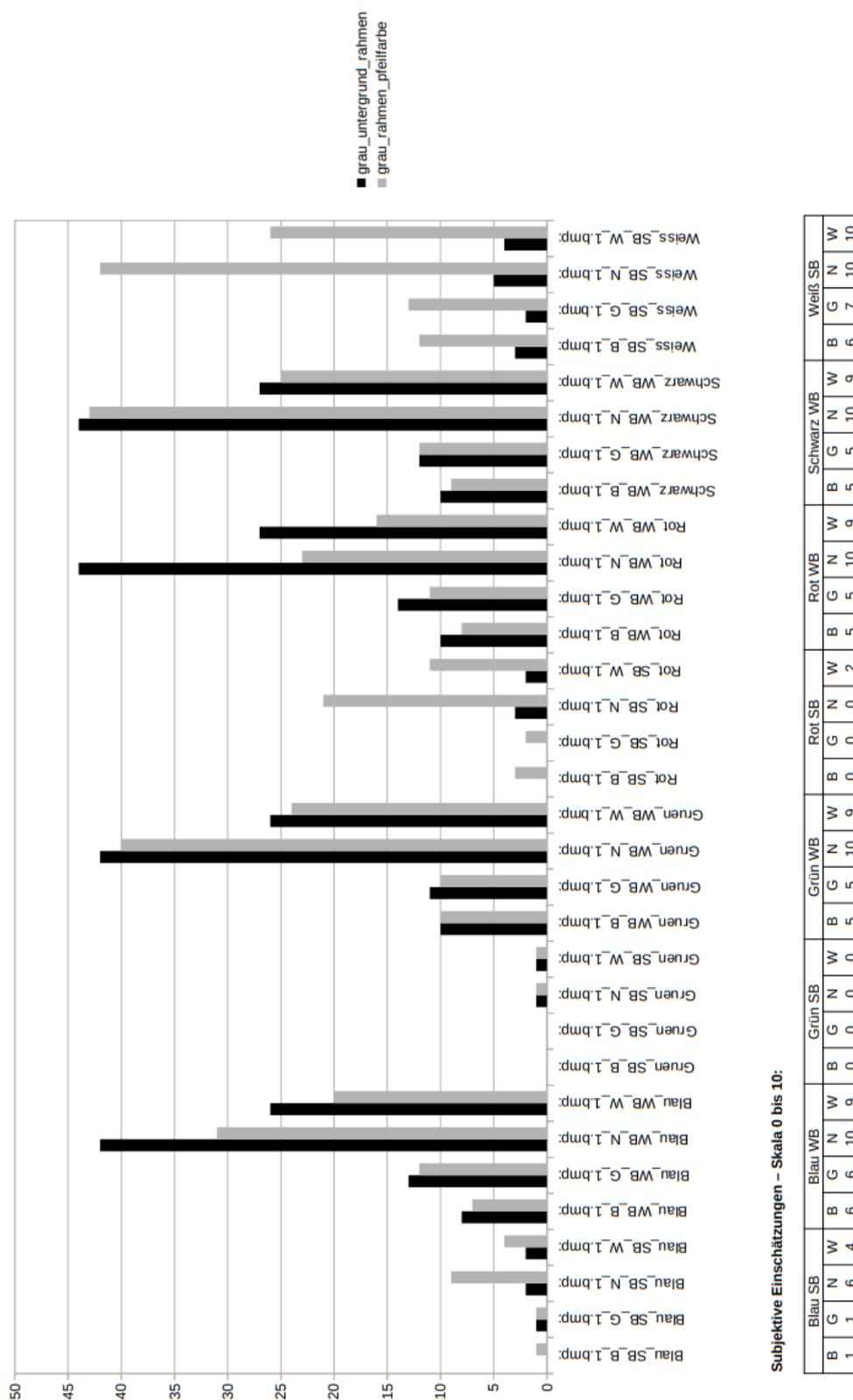


Abbildung 4.3: Darstellung der Intensitätsdifferenzen innerhalb der Grauwertbilder. Geordnet nach Projektionsobjekt und Beleuchtungssituation. Unterhalb sind die subjektiven Einschätzungen der Erkennbarkeit in Tabellenform beigelegt.

### 4.3 Auswertung im Bezug auf die Erkennbarkeit

Für die Auswertung des Datensatzes wurden alle Tabellen mit den subjektiven Einschätzungen verglichen. Dabei konnten folgende Schlussfolgerungen gezogen werden.

Die Helligkeit des projizierten Objektes, welche über die Höhe der Grauwert-Differenz abgebildet ist, steht im direkten Zusammenhang mit einer guten subjektiven Erkennbarkeit des Objektes. Einige Messwerte, besonders innerhalb der Pfeile mit roter Grundfarbe, weichen von dieser Aussage ab. Ein Grund dafür wird in der Farbsehschwäche im Rot-Grünen Bereich gesehen.

Farbunterschiede zwischen dem Projektionsuntergrund und der Farbgestaltung des Pfeiles wurden innerhalb der RGB-Differenzen untersucht. Dabei konnte festgestellt werden, dass ein hoher Anteil an Farbdifferenzen in der Blau- und Gelb-Phase, sowie der Blau und Rot-Phase, im direkten Zusammenhang zu einer besseren Erkennbarkeit stehen. Dabei sei angemerkt dass die Höhe der RGB-Differenz bei hellen Teppich-Farben geringere Auswirkungen auf die Erkennbarkeit, als bei dunkleren Teppichfarben hat.

Bei der Untersuchung der Beleuchtungssituationen ist festzustellen, dass sowohl im RGB-Farbraum, als auch in den Grauwert-Bildern, eine höhere Lichtintensität der Umgebungsbeleuchtung, die Erkennbarkeit maßgeblich verschlechtert. Dies ist anhand geringerer Wertedifferenzen innerhalb der Auswertungsdiagramme ersichtlich.

Anzumerken ist, dass die Erwartungen der Versuchsdurchführung durch die Ergebnisse bestätigt werden. Zusätzlich entsprechen die Ergebnisse dem Stand der aktuellen Forschung.<sup>17</sup>

---

<sup>17</sup> HANNES EICHNER: Farbwahrnehmung, [15]

## 5. Fazit

Aus der Betrachtung der Messergebnisse lässt sich grundlegend feststellen, dass der Gebrauch von Projektionstechnik zur Verhaltensprojektion eines FTF möglich und unter Beachtung technischer Voraussetzungen wie Spannungsvorsorgung, Helligkeit und Projektionstechnologie eines gewählten Gerätes, sowie einer geeigneten Auswahl der Farbgestaltung von Projektionsuntergrund und Projektionsobjekt, sinnvoll ist.

Dabei ist zu beachten, dass der Projektionsuntergrund möglichst einheitlich gefärbt und eine flache Oberflächenstruktur besitzt. Für eine optimale Wahrnehmung von Farbunterschieden sind helle Farben des Untergrundes zu bevorzugen. Für dunklere Untergründe erhöhen sich die technischen Anforderungen an die zu nutzende Technik erheblich.

Des Weiteren ist zu beobachten, dass eine Erhöhung der Beleuchtungsintensität die Erkennbarkeit stark beeinflusst. Ein Einfluss der Lichtfarbe konnte dabei nicht festgestellt werden.

Aus den Untersuchungen der Projektionstechnik und der Leuchtmittel, welche aktuell in Projektoren genutzt werden, konnten folgende Rückschlüsse gezogen werden. Die Projektionstechniken LCD und LCOS sind für den mobilen Einsatz an FTF zu bevorzugen, da mechanische Schwingungen während der Fahrt nur geringfügige Auswirkungen auf die Lebensdauer der Geräte haben. Als Lichtquelle sollten RGB-LED's genutzt werden, da diese höhere mechanische Belastbarkeit besitzen und eine längere Lebensdauer als alternative Lichtquellen. Damit wird eine Reduzierung möglicher Wartungsaufwendungen erzielt.

Als Versuchsgeräte für das bevorstehende Forschungsprojekt sind mobile Projektoren aus dem mittleren Preissegment, welche über ein Netzteil mit 12 V bis 32 V Gleichspannung betrieben werden, zu bevorzugen. Für die Implementierung als eigenständiges Fahrzeugmodul eignen sich Entwicklermodule. Die Vorzüge dieser Module sind ihre hohe Flexibilität und geringeren Kosten als vergleichbare Endprodukte. Nachteilig ist jedoch der erhöhte Entwicklungsaufwand für die Integration am Fahrzeug, wodurch sie für das bevorstehende Forschungsprojekt weniger geeignet sind.

Bei der Auswahl eines Projektors sollte eine minimale Helligkeit von 500 ANSI-Lumen gewählt werden. Geräte mit höherer Helligkeit sind zu bevorzugen um eine bessere Erkennbarkeit, besonders bei erhöhten Lichtintensitäten durch Umgebungsbeleuchtung,

sicherzustellen.

Für eine geeignete Beurteilung der realen Anforderungen sollten weitere Untersuchungen durchgeführt werden. Hierbei sollte sich vor allem auf die subjektiven Einschätzungen der Erkennbarkeit, durch einer geeignete Anzahl an Probanden und unter realen Umgebungsbedingungen, beschränkt werden. Weiterhin sollte die Auswahl der zu nutzenden Symbole, für eine allgemein gültige Informationsübertragung von Fahrzeuggeschwindigkeit, Fahrtrichtung und bevorstehender Abbiegevorgänge, untersucht werden.

Es ist zu erwähnen, dass neben der Verhaltensprojektion mittels Licht-Projektoren auch andere Möglichkeiten in Betracht gezogen werden sollten, welche auch auf der visuellen Wahrnehmung basieren. Möglichkeiten hierfür wäre die Anbringung von Displays am Fahrzeug, welche sowohl geringere Entwicklungsaufwände als auch Beschaffungskosten aufweisen. Zusätzlich würden für diese Technologie, mögliche Anforderungen an die Bodenbeschaffenheit für die Erkennbarkeit entfallen.

Eine Einschätzung der mechanischen Belastbarkeit von Leuchtmitteln und der Projektionstechnologien konnte nur auf Grundlage der gesichteten Literatur und Herstellerangaben getroffen werden. Für das bevorstehende Forschungsprojekt wird empfohlen, die getroffenen Schlussfolgerungen näher zu untersuchen.

## Quellenverzeichnis

- [1]: Günter Ullrich, Thomas Albrecht, Fahrerlose Transportsysteme, 2019
- [2]: Günther Ullrich, Frank Bauder, Safety-Seminar Fahrerlose Transportsysteme,
- [3]: Panasonic, Produkte: Panasonic RQ50K und Panasonic RZ990, 2022, In: <https://business.panasonic.de/>
- [4]: Epson, Produkt: Epson EF11, 2022, In: <https://www.epson.de/>
- [5]: Texas Instruments, Produkt: DLPDLCR2000EVM, 2022, In: <https://www.ti.com/>
- [6]: BENQ, Die verschiedenen Maßeinheiten für die Helligkeit eines Beamers., 2020, In: <https://www.benq.eu/de-de/knowledge-center/knowledge/the-different-units-of-brightness-for-projectors-lumens-lux-foot-lamberts-nits-and-ansi-lumens.html>
- [7]: OSRAM, Datenblatt: 4ArXS HSD | Langlebige Kurzbogen-Metallhalogenidlampen, 2022
- [8]: BENQ, ANSI, Lichtquellen oder LED Lumen – auf welches Helligkeitsmaß du dich verlassen kannst, 2022, In: <https://www.benq.eu/de-de/knowledge-center/knowledge/ansi-light-source-and-led-lumens-how-led-projectors-with-3000-lumens-are-a-marketing-ploy.html>
- [9]: Fördergemeinschaft Gutes Licht, licht.wissen 21 - Leitfaden Human Centric Lighting (HCL), 2021
- [10]: Martin Mißfeldt, Lichtspektrum - Spektralfarben, 2022, In: <https://www.lichtmikroskop.net/optik/lichtspektrum.php>
- [11]: Raphael Voigt, Test: JVC DLA-NZ7 mit echter 8K-Auflösung, Laser und 120Hz, 2022
- [12a]: INFOTIP Service GmbH, DLP - Digital Light Processing, 2022
- [12b]: INFOTIP Service GmbH, LCOS - Liquid Crystal on Silicon, 2022
- [13]: Projektor AG, Beamer Kaufberater 2022, 2022, In: <https://www.beamer-discount.de/beamer-c-4.html>
- [12c]: INFOTIP Service GmbH, LCOS - Liquid Crystal on Silicon, 2022
- [14]: Alexander Lampe, Vorlesung - digital image and video analysis, 2022
- [15]: Hannes Eichner, Farbwahrnehmung, , In: [http://ias.uni-klu.ac.at/projects/greybox/m01/203\\_PC\\_1.html](http://ias.uni-klu.ac.at/projects/greybox/m01/203_PC_1.html)
- [16]: AS-Schwabe, Handwerker mobillicht 400 W H05RN-F 3G1,0, , In: <https://www.mahler.de/AS-Schwabe-Handwerker-mobillicht-400-W-H05RN-F-3G10/p/825179>
- [17]: Brennenstuhl, Mobile Power-LED-Leuchte ML2705 IP44 27xLED 2m, , In: <https://www.contorion.de/p/brennenstuhl-mobile-power-led-leuchte-ml2705-ip44-27xled-2m-2711377>

## Ehrenwörtliche Erklärung

"Ich erkläre hiermit ehrenwörtlich",

1. dass ich meine ..... *Bachelorthesis* ..... mit dem Thema

..... *Untersuchung der technischen Umsetzbarkeit einer*  
..... *Verhaltensprojektion von fahrerlosen Transportsystemen* .....

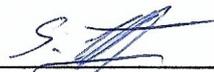
ohne fremde Hilfe angefertigt habe,

2. dass ich die Übernahme wörtlicher Zitate aus der Literatur sowie die Verwendung der Gedanken anderer Autoren an den entsprechenden Stellen innerhalb der Arbeit gekennzeichnet habe und
3. dass ich meine ..... *Bachelorthesis* ..... bei keiner anderen Prüfung vorgelegt habe.

Ich bin mir bewusst, dass eine falsche Erklärung rechtliche Folgen haben wird.

*Bärenstein, 29.08.2022*

Ort, Datum



Unterschrift