

Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg



Fakultät Life Sciences

Verfahrenstechnik

Entwicklung einer automatisierten optischen Trenneinheit mit pneumatischer Ausschleusung von Glasstücken.

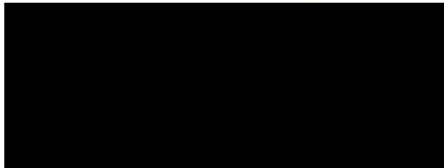
im Studiengang Verfahrenstechnik

Verfasser:	Mielad Ghafari
Matrikelnummer:	██████████
Erstgutachter:	Prof. Dr. Kai Freudenthal
Zweitgutachter:	Dipl.-Ing. Robert Güttler
Ort der Abgabe:	HAW Hamburg
Erstellt am:	30.07.2026
Abgabedatum:	31.07.2026

Eigenständigkeitserklärung

Ich erkläre hiermit, dass ich die vorliegende wissenschaftliche Arbeit selbstständig und ausschließlich unter Benutzung der angegebenen Hilfsmittel angefertigt habe. Alle Quellen, die wörtlich oder sinngemäß aus veröffentlichten und nicht veröffentlichten Quellen entnommen wurden, sowie sämtliche mit Hilfe generativer künstlicher Intelligenz erzeugte Passagen sind als solche kenntlich gemacht. Mir ist bekannt, dass fehlende oder fehlerhafte Angaben als Täuschungsversuch gewertet werden können.

Hamburg, den 30.07.2026



.....
Unterschrift

Angaben zur Verwendung KI-basierter Hilfsmittel

Im Anhang meiner Arbeit habe ich sämtliche KI-basierte Hilfsmittel angegeben. Diese sind mit Produktnamen in einem KI-Verzeichnis ausgewiesen. Ich bin mir bewusst, dass die Verwendung von Texten oder anderen Inhalten und Produkten, die durch KI-basierte Tools generiert wurden, keine Garantie für deren Qualität darstellt. Ich verantworte die Übernahme jeglicher von mir verwendeter maschinell generierter Passagen vollumfänglich selbst und trage die Verantwortung für eventuell durch die KI generierte fehlerhafte oder verzerrte Inhalte, fehlerhafte Referenzen, Verstöße gegen das Datenschutz- und Urheberrecht oder Plagiate. Ich versichere zudem, dass in der vorliegenden Arbeit mein gestalterischer Einfluss überwiegt.

Zusammenfassung

Im Rahmen dieser Bachelorarbeit wird eine bestehende Versuchsanlage zur automatisierten Trennung von Glasstücken untersucht und weiterentwickelt. Ziel der Arbeit ist es, eine automatische Verbindung zwischen der Sensorerkennung und der pneumatischen Ausschleusung aufzubauen. Erkennt ein Sensor ein Glasstück, soll dieses ohne Eingriff des Bedieners durch einen Luftstoß automatisch ausgeschleust werden. Gleichzeitig wird untersucht, welche technischen Voraussetzungen für eine zuverlässige Automatisierung erforderlich sind und welche Grenzen der bestehende Anlagenaufbau aufweist.

Zu Beginn wird der vorhandene Aufbau analysiert und hinsichtlich seines Automatisierungsgrades bewertet. Anschließend werden die noch bestehenden Schwachstellen identifiziert. Im Mittelpunkt stehen dabei die fehlende automatische Verknüpfung zwischen Sensor und Aktor, die zeitlichen Abläufe des Ausschleusprozesses sowie die Eignung der eingesetzten Sensorik.

Im praktischen Teil der Arbeit wird zunächst der vorhandene Farbsensor untersucht und durch Anpassungen der Software sowie der Sensorparameter optimiert. Dazu gehören unter anderem die Auswertung der Messwerte, die Festlegung geeigneter Schwellenwerte und die Verbesserung der Erkennungslogik. Zusätzlich wird eine Lichtschranke in die Versuchsanlage integriert. Diese dient als alternative Triggerquelle und ermöglicht eine automatische Ausschleusung unabhängig von der Glasfarbe. Beide Sensoren werden in Home Assistant eingebunden und über MQTT mit der Anlagensteuerung verbunden. Anschließend wird die automatische Ansteuerung des Magnetventils umgesetzt, sodass erkannte Sensorsignale selbstständig einen Luftstoß auslösen. Darüber hinaus werden die erforderlichen Verzögerungszeiten und Luftstoßdauern experimentell bestimmt und verschiedene mechanische Anpassungen an der Düse und den Auffangbehältern vorgenommen.

Die Ergebnisse zeigen, dass der optimierte Farbsensor grüne Glasstücke mit einer Erkennungsrate von etwa 80 % erkennt. Die Lichtschranke erreicht bei der Erkennung aller Glasstücke eine Erkennungsrate von rund 95 %. Die automatische Kommunikation zwischen Sensor und Aktor funktioniert zuverlässig. Die Versuche zeigen jedoch auch, dass die Trennqualität nicht allein von der Sensorerkennung abhängt. Entscheidend ist insbesondere die verfügbare Zeit zwischen der Erkennung eines Glasstücks und dem Erreichen der Ausschleusdüse. Während diese Zeit beim Farbsensor mit etwa 400 bis 500 ms kürzer ist als die gemessene Systemverzögerung von rund 800 ms, steht bei der Lichtschranke mit etwa 1100 ms ausreichend Zeit für eine erfolgreiche Ausschleusung zur Verfügung. Entsprechend erzielt die lichtschrankenbasierte Ausschleusung deutlich bessere Ergebnisse als die farbsensorbasierte Variante.

Insgesamt zeigt die Arbeit, dass die automatische Kommunikation zwischen Sensor und Aktor erfolgreich umgesetzt werden kann und das entwickelte Automatisierungskonzept grundsätzlich funktioniert. Gleichzeitig werden die wesentlichen Einflussgrößen auf die Trennqualität identifiziert und bewertet. Die gewonnenen Erkenntnisse bilden eine Grundlage für die weitere Entwicklung der Versuchsanlage und zeigen auf, welche technischen und konstruktiven Maßnahmen erforderlich sind, um die automatisierte Glastrennung künftig weiter zu verbessern.

Inhaltsverzeichnis

1. Einleitung.....	1
1.1 Motivation und Problemstellung	1
1.2 Aufgabenstellung	1
2. Grundlagen.....	3
2.1 Glasrecycling und Bedeutung der Glastrennung	3
2.2 Grundlagen der Sortiertechnik	4
2.3 Sensorik zur Farberkennung.....	5
2.4 Lichtschranken zur Objekterkennung und Prozessüberwachung	6
2.5 Steuerungs- und Softwarearchitektur.....	7
3. Beschreibung und Aufbau der bestehenden Versuchsanlage	11
3.1 Gesamtaufbau und Prozessablauf.....	11
3.2 Eingesetzte Sensorik	12
3.3 Pneumatische Ausschleuseinheit	14
4. Konzeption und Implementierung der Automatisierung	16
4.1 Optimierung der Farbsensorik	16
4.2 Implementierung der Lichtschranke	21
4.3 Automatisierung der pneumatischen Ausschleusung	24
5. Versuche und Ergebnisse.....	28
5.1 Überprüfung der gewählten Schwellenwerte	28
5.2 Erkennungsleistung des Farbsensors.....	35
5.3 Erkennungsleistung der Lichtschranke	37
5.4 Zeitverhalten des Systems.....	38
5.5 Bestimmung der Luftstoßdauer.....	41
5.6 Auswahl der Ausschleusdüse	42
5.7 Optimierung der Düsen- und Behälterposition	44
5.8 Trennversuche mit dem Farbsensor	47
5.9 Trennversuche mit der Lichtschranke	49
6. Diskussion	51
6.1 Einordnung der Ergebnisse	51
6.2 Grenzen und Schwachstellen der Versuchsanlage.....	52
6.3 Verbesserungspotenziale	54
7. Zusammenfassung und Ausblick.....	56
Literaturverzeichnis	58
Abbildungsverzeichnis.....	60
Anhang	61
Montage der Lichtschranke.....	61
KI- Verzeichnis.....	62

1. Einleitung

1.1 Motivation und Problemstellung

Im Rahmen dieser Bachelorarbeit wird ein automatisiertes System zur Trennung von Glasstücken aufgebaut und untersucht. Besonders interessant an diesem Projekt ist der praktische Charakter. Im Gegensatz zu vielen rein theoretischen Themen kann hier direkt beobachtet werden, wie sich einzelne Änderungen am Aufbau oder am Programm auf das Verhalten der Anlage auswirken. Man arbeitet nicht nur mit Formeln oder Berechnungen, sondern sieht unmittelbar, ob das System wie vorgesehen funktioniert. Gerade dieses praktische Arbeiten, Ausprobieren und schrittweise Verbessern macht das Projekt besonders interessant.

Gleichzeitig verbindet das Projekt mehrere Inhalte aus dem Studium miteinander. Die Trennung von Stoffen ist ein wichtiger Bestandteil der mechanischen Verfahrenstechnik und wird hier direkt praktisch angewendet. Die Trennung von Glas nach Farben ist dabei nicht nur ein bekanntes Beispiel aus der Theorie, sondern auch ein wichtiger Prozess beim Glasrecycling. Durch die getrennte Sammlung von Weiß-, Braun- und Grünglas kann Altglas hochwertig wiederverwendet und der Verbrauch neuer Rohstoffe reduziert werden [1].

Zusätzlich spielt das Thema Automatisierung eine zentrale Rolle. Automatisierte Prozesse gewinnen in technischen Anwendungen immer mehr an Bedeutung, da sie Abläufe schneller, zuverlässiger und effizienter gestalten [2]. Dadurch bietet das Projekt die Möglichkeit, praktische Erfahrungen mit Sensorik, Steuerungstechnik und automatisierten Prozessen zu sammeln.

Die Problemstellung der Arbeit besteht darin, Glasstücke zuverlässig automatisch zu erkennen und zum richtigen Zeitpunkt auszuschleusen. Dafür müssen verschiedene Komponenten wie Sensoren, Steuerung und pneumatische Ausschleusung aufeinander abgestimmt werden. Eine Herausforderung besteht darin, stabile Messergebnisse zu erhalten, obwohl sich beispielsweise Größe, Position oder Farbintensität der Glasstücke unterscheiden können. Zusätzlich muss das System schnell genug reagieren, damit die Glasstücke im richtigen Moment erkannt und ausgeschleust werden.

1.2 Aufgabenstellung

Im Rahmen eines studentischen Projekts wurde eine modulare Versuchsanlage aufgebaut, mit der Glasstücke über ein Förderband transportiert und mithilfe eines pneumatischen Auswerfers ausgeschleust werden können. Die Anlage besteht aus einem Förderband, mechanischen Führungselementen, optischen Sensoren sowie einer Düse, die Glasstücke mit Druckluft ausstößt. Die einzelnen Teile wurden von verschiedenen Gruppen entwickelt und dokumentiert.

Aktuell ist es möglich, Glasstücke auszuschleusen. Der Luftstoß wird jedoch manuell über die Benutzeroberfläche in Home Assistant ausgelöst. Eine automatische Verbindung zwischen Sensorerkennung und Luftstoß funktioniert bisher nicht zuverlässig.

Ziel dieser Bachelorarbeit ist es, die Anlage so weiterzuentwickeln, dass Glasstücke automatisch und systematisch ausgeschleust werden können. Dabei soll es dem Benutzer möglich sein, zwischen unterschiedlichen optischen Sensoren zu wählen.

Je nach verwendetem Sensor ergeben sich unterschiedliche Möglichkeiten:

Farbsensor

- Trennung der Glasstücke nach ihrer Farbe
- automatische Farberkennung

Lichtschranke

- keine Farberkennung
- Ausschleusung nach festgelegten Regeln
- beispielsweise jedes zweite Glasstück oder nach einem bestimmten Zeitintervall

Im Rahmen der Arbeit werden:

- der aktuelle Zustand der Anlage untersucht,
- die vorhandenen Sensoren getestet und eingestellt,
- eine Steuerungslogik entwickelt, die Sensor und Auswerfer miteinander verbindet,
- die automatische Ausschleusung praktisch umgesetzt,
- und die Anlage anschließend im Betrieb getestet, um zu prüfen, ob die Ausschleusung zuverlässig funktioniert.

Ziel ist es, die bisher manuell bediente Anlage zu einem automatisch arbeitenden System weiterzuentwickeln, bei dem Glasstücke je nach gewähltem Sensor gezielt ausgeschleust werden können.

2. Grundlagen

2.1 Glasrecycling und Bedeutung der Glastrennung

Glas zählt zu den beliebtesten Verpackungswerkstoffen in der Lebensmittel- und Getränkeindustrie [3]. Ein wesentlicher Vorteil von Glas besteht darin, dass es nahezu unbegrenzt recycelt werden kann, ohne seine Materialeigenschaften wesentlich zu verlieren. Dadurch besitzt Glas eine hohe Bedeutung für eine ressourcenschonende und nachhaltige Kreislaufwirtschaft. Durch den Einsatz von Altglas können Primärrohstoffe wie Quarzsand, Kalk und Soda eingespart sowie der Energieverbrauch bei der Glasherstellung reduziert werden. Zudem führt die Wiederverwertung von Glas zu einer Verringerung der CO₂-Emissionen und trägt damit zum Umweltschutz bei. Die industrielle Wiederaufbereitung von Altglas stellt daher einen wichtigen Bestandteil moderner Recyclingprozesse dar [1].

Neben seiner hohen Recyclingfähigkeit besitzt Glas weitere Vorteile als Verpackungsmaterial. Es ist gas- und flüssigkeitsdicht, geschmacks- und geruchsneutral sowie chemisch weitgehend inert. Dadurch werden Lebensmittel und Getränke vor äußeren Einflüssen geschützt, ohne dass Stoffe aus der Verpackung auf das Füllgut übergehen [3].

Der Glasrecyclingprozess besteht aus mehreren Verfahrensschritten. Zunächst wird das Altglas gesammelt und zu Recyclinganlagen transportiert. Anschließend erfolgt die Aufbereitung des Materials. Dabei werden zunächst Fremdstoffe wie Metalle, Kunststoffe, Keramik oder Papier entfernt, da sie die Qualität des späteren Recyclingglases beeinträchtigen können. Anschließend wird das Material nach verschiedenen Farbkategorien sortiert. Üblicherweise erfolgt dabei eine Trennung in Weiß-, Braun- und Grünglas. Nach der Farbsortierung wird das Glas zu sogenannten Glasscherben (Cullet) zerkleinert. Diese bilden den Ausgangsstoff für die weitere Verarbeitung. Abschließend werden die Glasscherben eingeschmolzen und zur Herstellung neuer Glasprodukte verwendet [4].

Eine zuverlässige Farbtrennung besitzt im Glasrecycling eine besondere Bedeutung, da die Farbreinheit der Glasscherben entscheidend für die Qualität des späteren Endprodukts ist. Insbesondere bei der Herstellung von Weißglas dürfen nur sehr geringe Anteile andersfarbiger Glasscherben enthalten sein, da gefärbtes Glas nicht zur Herstellung von Weißglas verwendet werden kann. Nach Angaben des Umweltbundesamts ist bei einer Altglasscherbenzugabe von 50 % eine Farbreinheit von 99,7 % erforderlich. Der Fehlfarbenanteil darf bei Braunglas 8 % und bei Grünglas 15 % nicht überschreiten. Zusätzlich gelten Grenzwerte für Verunreinigungen wie Keramik, Steine, Porzellan, Metalle und organische Bestandteile. Um diese Anforderungen zu erfüllen, werden Altglasscherben bereits bei der Sammlung sowie während der weiteren Aufbereitung nach Farben sortiert und von Fremdstoffen getrennt. Dadurch können die Glasscherben erneut im Schmelzprozess zur Herstellung neuer Glasverpackungen eingesetzt werden [1].

Neben den technischen Qualitätsanforderungen spielt die Farbtrennung auch aus wirtschaftlicher Sicht eine wichtige Rolle. Glasscherben werden nach ihrer Farbe getrennt vermarktet, da sie für die Herstellung neuer Glasbehälter überwiegend farbgleich eingesetzt werden. Nach Angaben der EPA unterscheiden sich Nachfrage und Marktpreise je nach Glasfarbe. Die Nachfrage nach Weißglas ist im Allgemeinen höher als nach Grün- oder Braunglas, weshalb Weißglasscherben in der Regel einen höheren Marktwert besitzen. Eine sorgfältige Farbtrennung ist daher wichtig, um die Qualitätsanforderungen der Glasindustrie zu erfüllen und die Glasscherben entsprechend ihrer Glasfarbe weiterzuverarbeiten [5].

2.2 Grundlagen der Sortiertechnik

Materialförderung

In automatisierten Sortieranlagen müssen die zu sortierenden Materialien zunächst sicher und gleichmäßig durch die Anlage transportiert werden. Dazu werden verschiedene Fördersysteme eingesetzt, die das Material von einem Prozessschritt zum nächsten bewegen. Je nach Anwendung werden beispielsweise Förderbänder oder Vibrationsförderer eingesetzt. Ziel ist es, einen kontinuierlichen Materialfluss zu erreichen und das Material gleichmäßig den nachfolgenden Prozessschritten zuzuführen [6].

Ein wichtiger Bestandteil vieler Sortieranlagen ist die Vereinzelung des Materials. Dabei werden die einzelnen Werkstücke möglichst getrennt auf den Förderweg übergeben. Dadurch können sie von den Sensoren einzeln erfasst und später gezielt weiterverarbeitet oder aussortiert werden. Eine gute Vereinzelung bildet daher eine wichtige Voraussetzung für eine zuverlässige automatische Sortierung [6].

Während des Transports durchläuft das Material nacheinander die einzelnen Arbeitsbereiche der Anlage. Damit Sensoren und Ausschleuseeinrichtungen zuverlässig zusammenarbeiten können, müssen die einzelnen Prozessschritte zeitlich aufeinander abgestimmt sein. Ein gleichmäßiger Materialfluss bildet dabei die Grundlage dafür, dass die einzelnen Prozessschritte zuverlässig zusammenarbeiten können [6].

Sensorbasierte Sortierung

Nach der Materialförderung erfolgt die Erfassung der Werkstücke durch geeignete Sensorsysteme. Je nach Anwendungsbereich kommen unterschiedliche Sensortechnologien zum Einsatz. Dazu gehören unter anderem RGB-Kameras, Infrarotkameras, Hyperspektralkameras sowie weitere optische Sensoren. Die Sensoren erfassen verschiedene Eigenschaften der vorbeifahrenden Materialien und stellen diese Informationen für die weitere Verarbeitung bereit [7].

Die aufgenommenen Sensordaten werden anschließend ausgewertet. Auf Grundlage dieser Informationen entscheidet das System, wie das jeweilige Material weiterbehandelt werden soll. Dadurch können unterschiedliche Materialien oder Materialeigenschaften automatisch erkannt und voneinander getrennt werden, ohne dass ein Eingreifen des Bedieners erforderlich ist [6].

Das Grundprinzip sensorbasierter Sortieranlagen ist dabei weitgehend identisch. Zunächst wird das Material während des Transports erfasst. Anschließend werden die Sensordaten verarbeitet und bewertet. Auf Grundlage dieser Auswertung wird anschließend die entsprechende Ausschleuseeinrichtung angesteuert [6].

Pneumatische Ausschleusung

Für die eigentliche Trennung des Materials werden in vielen sensorbasierten Sortieranlagen pneumatische Ausschleuseeinrichtungen eingesetzt. Dabei erzeugen Druckluftdüsen kurze Luftstöße, mit denen einzelne Werkstücke gezielt aus dem Materialstrom ausgelenkt werden können. Werkstücke, die nicht ausgeschleust werden sollen, folgen ihrem ursprünglichen Förderweg [6].

Damit die Ausschleusung zuverlässig funktioniert, müssen die Erkennung des Materials, die Verarbeitung der Sensordaten und die Ausschleusung aufeinander abgestimmt sein. Nur

wenn alle Prozessschritte zusammenarbeiten, kann das erkannte Material an der vorgesehenen Stelle vom übrigen Materialstrom getrennt werden [6].

Bedeutung der Materialführung

Neben Sensorik und Steuerung spielt auch die Materialführung eine wichtige Rolle. Eine gleichmäßige Zuführung des Materials erleichtert die Erfassung durch die Sensoren und unterstützt einen zuverlässigen Sortierprozess [6].

Erst das Zusammenspiel von Materialförderung, Vereinzelung, Sensorerfassung, Datenverarbeitung und Ausschleusung ermöglicht eine zuverlässige automatische Sortierung. Dieses Grundprinzip wird auch in modernen sensorbasierten Sortieranlagen angewendet und bildet ebenfalls die Grundlage der in dieser Arbeit verwendeten Anlage [6].

2.3 Sensorik zur Farberkennung

Farbsensoren gehören zu den photoelektrischen Sensoren. Sie senden Licht auf ein Objekt und erfassen anschließend das von der Oberfläche reflektierte Licht. Dabei werden die empfangenen Lichtintensitäten der Farben Rot, Grün und Blau ausgewertet. Anhand dieser Werte kann die Farbe des Messobjekts bestimmt werden [8].

Das Funktionsprinzip eines Farbsensors basiert auf der Reflexion von Licht. Trifft Licht mit roten, grünen und blauen Wellenlängen auf ein Objekt, werden die einzelnen Farbanteile je nach Farbe des Objekts unterschiedlich stark reflektiert. Ein rotes Objekt reflektiert überwiegend rotes Licht, ein weißes Objekt reflektiert alle drei Farbanteile. Der Farbsensor bestimmt die Farbe, indem er das Verhältnis der reflektierten roten, grünen und blauen Lichtanteile berechnet. Nach demselben Prinzip funktioniert auch das menschliche Auge, das Farben ebenfalls anhand des reflektierten Lichts wahrnimmt. Ohne einfallendes Licht kann deshalb keine Farberkennung erfolgen [9]

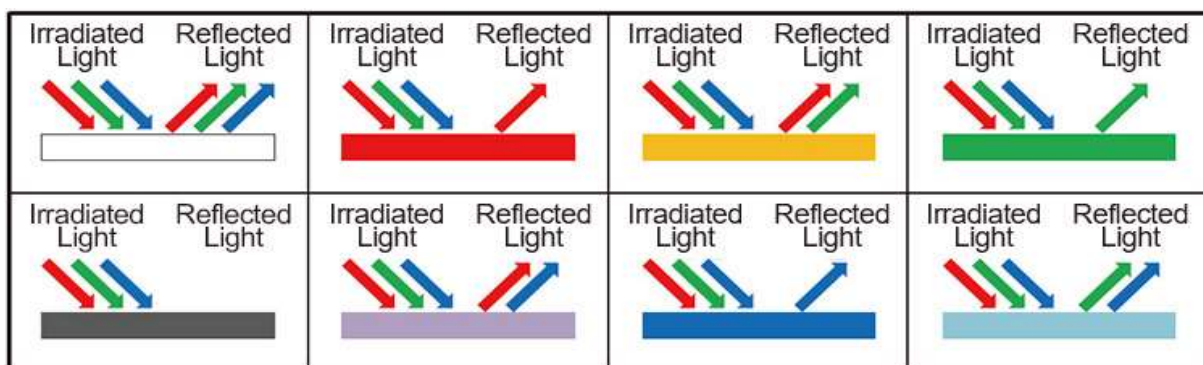


Abbildung 1: Reflexion des Lichts an unterschiedlich farbigen Oberflächen [9]

Es gibt verschiedene Verfahren zur Farberkennung. Bei einem Verfahren wird das Objekt mit Licht eines breiten Wellenlängenbereichs beleuchtet und die reflektierten roten, grünen und blauen Lichtanteile werden getrennt ausgewertet. Bei einem zweiten Verfahren wird das Objekt nacheinander mit rotem, grünem und blauem Licht beleuchtet. In beiden Fällen werden die Intensitäten der drei Farbanteile gemessen und anschließend ihr Verhältnis berechnet. Dadurch können Unterschiede in Farbe und Aussehen eines Objekts erkannt werden [8].

Je nach Sortieraufgabe werden unterschiedliche Sensortechnologien eingesetzt. Dazu gehören unter anderem RGB-Kameras, Zeilenkameras sowie Multi- und Hyperspektralkameras. RGB-Kameras erfassen die Farbe eines Objekts anhand der roten, grünen und blauen Farbanteile. Multi- und Hyperspektralkameras erfassen zusätzlich Licht in weiteren Wellenlängenbereichen. Dadurch stehen mehr Informationen über das Material zur Verfügung als bei einer normalen RGB-Kamera. So können Materialien besser unterschieden und anschließend automatisch sortiert werden, beispielsweise zur Qualitätskontrolle, zur Farberkennung oder zur Sortierung von Produkten und Materialien. Welche Sensortechnologie eingesetzt wird, hängt von den Anforderungen der jeweiligen Anwendung ab [6].

In industriellen Glassortieranlagen kommen daher überwiegend bildgebende Sensorsysteme wie Zeilenkameras sowie Multi- und Hyperspektralsensoren zum Einsatz. Moderne Anlagen kombinieren Beleuchtung, Sensorik, Bildverarbeitung und eine pneumatische Ausschleusung, um Glasstücke automatisch zu erkennen und gezielt zu trennen [6].

Für die vorliegende Versuchsanlage wurde der Farbsensor TCS3200 ausgewählt. Der Sensor eignet sich für einfache Farberkennungsaufgaben und lässt sich direkt mit einem Mikrocontroller verbinden. Im Vergleich zu industriellen Kamerasystemen ist der technische Aufwand deutlich geringer. Da in der Versuchsanlage lediglich zwischen grünem und weißem Glas unterschieden werden muss, stellt der TCS3200 eine kostengünstige und für den Laboreinsatz geeignete Lösung dar.

2.4 Lichtschranken zur Objekterkennung und Prozessüberwachung

Photoelektrische Sensoren werden in der Automatisierungstechnik zur berührungslosen Objekterkennung eingesetzt. Dabei erkennen sie Objekte mithilfe eines Lichtstrahls. Je nach Anwendungsfall stehen unterschiedliche Sensortypen zur Verfügung. Zu den wichtigsten Bauarten gehören Einweglichtschranken (Through-beam Photoelectric Sensors), Reflexlichtschranken (Retro-reflective Photoelectric Sensors) und Lichttaster (Proximity Sensors) [10].

Die verschiedenen Bauarten unterscheiden sich in ihrer Funktionsweise. Bei der Einweglichtschranke verläuft der Lichtstrahl direkt vom Sender zum Empfänger. Bei der Reflexlichtschranke wird der Lichtstrahl über einen Reflektor zurück zum Empfänger geleitet. Beim Lichttaster wird das vom Objekt reflektierte Licht ausgewertet. Dadurch eignet sich jede Bauart für unterschiedliche Anwendungsbereiche [10].

Eine Einweglichtschranke besteht aus einem Sender und einem Empfänger, die sich in zwei getrennten Gehäusen befinden. Der Sender sendet einen Lichtstrahl aus, der direkt auf den Empfänger trifft. Befindet sich ein Objekt zwischen Sender und Empfänger, wird der Lichtstrahl unterbrochen. Diese Unterbrechung wird vom Empfänger erkannt und als Schaltsignal ausgegeben [10].

Einweglichtschranken eignen sich besonders für Anwendungen mit großen Erfassungsabständen und bieten eine zuverlässige Objekterkennung. Im Vergleich zu anderen Bauarten ist jedoch ein höherer Installationsaufwand erforderlich, da Sender und Empfänger getrennt angeordnet werden müssen [10].

Welche Bauart eingesetzt wird, hängt von den Anforderungen der jeweiligen Anwendung sowie von den Eigenschaften des zu erkennenden Objekts ab. Daher sollte der geeignete Sensortyp entsprechend der Erfassungsaufgabe ausgewählt werden [10].

Für die vorliegende Versuchsanlage wurde eine Infrarot-Einweglichtschranke (IR Breakbeam Sensor) ausgewählt. Da lediglich erkannt werden muss, ob ein Glasstück den Erfassungsbereich passiert hat, ist diese Bauart für die Anwendung ausreichend. Sie lässt sich einfach mit einem Mikrocontroller verbinden und stellt eine kostengünstige Lösung für den Laboreinsatz dar.

2.5 Steuerungs- und Softwarearchitektur

Die folgenden Kapitel beschreiben den Stand der Technik der Mikrocontroller-Ebene, die zentrale Steuerung mit Home Assistant sowie die verwendete Datenkommunikation.

Die spezifische Konfiguration und Einbindung der Steuerungskomponenten im Rahmen der in dieser Arbeit entwickelten Versuchsanlage wird in Kapitel 5 detailliert beschrieben. Die folgenden Abschnitte stellen die allgemeinen technischen Grundlagen der verwendeten Hard- und Softwarekomponenten dar.

Mikrocontroller-Ebene (Arduino / ESP)

Mikrocontroller sind kompakte, programmierbare Computersysteme, bei denen Prozessor, Speicher sowie Ein- und Ausgänge auf einem einzigen Chip integriert sind. Sie werden für fest definierte Steuerungsaufgaben entwickelt und kommen häufig als Bestandteil sogenannter eingebetteter Systeme (Embedded Systems) zum Einsatz. Darunter versteht man technische Geräte oder Systeme, in denen der Mikrocontroller direkt integriert ist und dort eine bestimmte Aufgabe übernimmt. Im Gegensatz zu einem herkömmlichen Computer, der für viele unterschiedliche Anwendungen genutzt werden kann, übernimmt ein Mikrocontroller in der Regel nur eine oder wenige genau festgelegte Aufgaben. Aufgrund dieser auf eine bestimmte Aufgabe ausgelegten Arbeitsweise werden Mikrocontroller heute in zahlreichen technischen Anwendungen eingesetzt [11].

Eine weit verbreitete Mikrocontroller-Plattform ist der Arduino UNO R4 WiFi. Das Board basiert auf einem Mikrocontroller und stellt digitale sowie analoge Ein- und Ausgänge zur Verfügung. Über diese Anschlüsse können unterschiedliche Sensoren und Aktoren direkt verbunden werden. Zusätzlich verfügt der Arduino UNO R4 WiFi über integrierte WLAN-Funktionen, wodurch Daten und Steuerbefehle drahtlos mit anderen Geräten oder einer übergeordneten Steuerung ausgetauscht werden können [12].

Die Hauptaufgabe eines Mikrocontrollers besteht darin, Eingangssignale zu verarbeiten und auf Grundlage eines Programms entsprechende Ausgangssignale zu erzeugen. Sensoren erfassen bestimmte Informationen und senden diese als Eingangssignale an den Mikrocontroller. Dort werden die im Programm hinterlegten Anweisungen ausgeführt und die erforderlichen Signale verarbeitet. Anschließend erzeugt der Mikrocontroller ein Ausgangssignal, mit dem beispielsweise ein Aktor angesteuert und eine definierte Aktion ausgelöst werden kann [13].

Ein einfaches Beispiel ist die Auswertung eines Farbsensors. Der Sensor misst die Intensität verschiedener Lichtanteile und gibt diese als elektrische Signale an den Mikrocontroller weiter. Erst dort werden die Messwerte ausgewertet und mit zuvor festgelegten Grenzwerten vergli-

chen. Auf dieser Grundlage kann beispielsweise entschieden werden, ob ein Objekt einer bestimmten Farbe zugeordnet wird. Die eigentliche Entscheidung trifft somit nicht der Sensor selbst, sondern das Programm des Mikrocontrollers [14].

Wird eine zuvor festgelegte Bedingung erfüllt, erzeugt der Mikrocontroller ein entsprechendes Ausgangssignal. Dieses Signal wird an einen Aktor weitergegeben, der die vorgesehene Aktion ausführt. Auf diese Weise werden die zuvor erfassten Informationen in eine physische Aktion umgesetzt [13].

Der grundsätzliche Ablauf einer mikrocontrollerbasierten Steuerung lässt sich wie folgt zusammenfassen:

1. Ein Sensor erfasst einen Zustand oder ein Objekt.
2. Der Mikrocontroller empfängt und verarbeitet das Sensorsignal.
3. Das Programm vergleicht die Messwerte mit den festgelegten Bedingungen.
4. Sind die Bedingungen erfüllt, wird ein Ausgangssignal erzeugt.
5. Ein Aktor führt die gewünschte Aktion aus.

Neben der eigentlichen Signalverarbeitung übernehmen moderne Mikrocontroller häufig auch Kommunikationsaufgaben. Hierfür stehen verschiedene Schnittstellen wie WLAN, Bluetooth, UART, SPI oder I²C zur Verfügung. Über diese Schnittstellen können Daten und Steuerbefehle mit anderen Geräten ausgetauscht werden. Dadurch lassen sich Mikrocontroller in vernetzte Systeme integrieren und Informationen zwischen verschiedenen Komponenten übertragen [12].

Zusammenfassend bilden Mikrocontroller die zentrale Verarbeitungseinheit vieler automatisierter Systeme. Sie verbinden Sensoren und Aktoren, verarbeiten Messwerte, treffen Entscheidungen anhand eines Programms und steuern anschließend die erforderlichen Komponenten an. Dadurch bilden sie die Grundlage zahlreicher Steuerungs- und Automatisierungsaufgaben.

Zentrale Steuerung mit Raspberry Pi und Home Assistant

Neben Mikrocontrollern kommen in technischen Anwendungen häufig auch sogenannte Einplatinencomputer zum Einsatz. Eine weit verbreitete Plattform ist der Raspberry Pi. Er ist ein kompakter Einplatinencomputer (Single-Board-Computer), bei dem sich die wichtigsten Bestandteile eines Computers, wie Prozessor und Arbeitsspeicher, auf einer einzigen Leiterplatte befinden. Trotz seiner geringen Größe handelt es sich um einen vollwertigen Computer. Auf dem Raspberry Pi kann ein vollständiges Betriebssystem installiert und ausgeführt werden. Dadurch können verschiedene Programme installiert und ausgeführt sowie Daten verarbeitet werden [15].

Der Raspberry Pi verfügt über verschiedene Anschlüsse und Kommunikationsschnittstellen, über die weitere Geräte verbunden werden können. Dazu gehören unter anderem USB-, Netzwerk- und HDMI-Anschlüsse sowie integriertes WLAN und Bluetooth. Zusätzlich besitzt der Raspberry Pi sogenannte GPIO-Anschlüsse (General Purpose Input/Output). Dabei handelt es sich um frei programmierbare Ein- und Ausgänge, über die externe elektronische Kompo-

nenten mit dem Raspberry Pi verbunden werden können. So lassen sich beispielsweise Sensoren, Taster oder LEDs anschließen und einlesen beziehungsweise ansteuern. Darüber hinaus stehen weitere Kommunikationsschnittstellen wie UART, SPI und I²C zur Verfügung, über die Daten mit anderen elektronischen Geräten ausgetauscht werden können [15].

Auf dem Raspberry Pi kann unter anderem die Software Home Assistant installiert werden.

Home Assistant ist eine Open-Source-Software zur zentralen Steuerung und Verwaltung verschiedener Geräte und Systeme. Die Software ermöglicht es, verschiedene Geräte in einer gemeinsamen Benutzeroberfläche zusammenzuführen und zentral zu verwalten. Home Assistant wird auf der eigenen Hardware installiert und kann anschließend über einen Webbrowser oder eine App bedient werden [16].

Die Benutzeroberfläche von Home Assistant wird als Dashboard bezeichnet. Dort können beispielsweise Sensorwerte, Schaltzustände oder Statusmeldungen dargestellt werden. Außerdem lassen sich Bedienelemente wie Schalter, Taster oder Eingabefelder hinzufügen, sodass Geräte direkt über die Benutzeroberfläche gesteuert werden können. Die Dashboards können individuell an die Anforderungen eines Projekts angepasst werden [16].

Neben der Visualisierung bietet Home Assistant umfangreiche Möglichkeiten zur Automatisierung. Hierfür können Automationen erstellt werden, die bestimmte Aktionen selbstständig ausführen. Eine Automation besteht aus einem Trigger, optionalen Conditions und einer oder mehreren Actions. Dadurch können beispielsweise Geräte nach einem Sensorsignal geschaltet oder zeitgesteuerte Abläufe automatisch ausgeführt werden [16].

Damit Home Assistant Informationen verarbeiten kann, müssen Geräte zunächst über sogenannte Integrationen eingebunden werden. Eine Integration stellt die Verbindung zwischen Home Assistant und einem unterstützten Gerät oder Dienst her. Dadurch kann Home Assistant Informationen, beispielsweise Messwerte eines Sensors oder den Schaltzustand eines Geräts, empfangen und verarbeiten. Über Integrationen können außerdem Befehle von Home Assistant an die eingebundenen Geräte übertragen werden. Die empfangenen Informationen können anschließend im Dashboard dargestellt oder für Automationen verwendet werden [16].

Durch diese Aufteilung ergeben sich unterschiedliche Aufgaben innerhalb des Gesamtsystems. Die Mikrocontroller übernehmen die hardwarenahe Verarbeitung der Sensorsignale sowie die direkte Ansteuerung der Aktoren. Der Raspberry Pi mit Home Assistant bildet dagegen die übergeordnete Steuerungs- und Bedienebene. Dort werden Informationen zusammengeführt, übersichtlich dargestellt und für Automatisierungen genutzt.

Zusammenfassend ermöglichen Raspberry Pi und Home Assistant eine zentrale Verwaltung und Überwachung automatisierter Systeme. Sie verbinden einzelne Komponenten zu einem Gesamtsystem, erleichtern die Bedienung und schaffen die Grundlage für flexible Automatisierungsabläufe.

Datenkommunikation mit MQTT

Damit verschiedene Geräte Informationen miteinander austauschen können, wird ein Kommunikationsprotokoll benötigt.

Ein häufig verwendetes Protokoll ist MQTT. MQTT steht für Message Queuing Telemetry Transport und ist ein leichtgewichtiges und offenes Nachrichtenprotokoll. Es wurde für den Datenaustausch zwischen vernetzten Geräten entwickelt und eignet sich besonders für Geräte mit geringer Rechenleistung oder Netzwerke mit begrenzter Bandbreite [17].

MQTT arbeitet nach dem sogenannten Publish-/Subscribe-Prinzip. Dabei werden Nachrichten nicht direkt von einem Gerät an ein anderes gesendet. Stattdessen erfolgt die Kommunikation über eine zentrale Vermittlungsstelle, den sogenannten Broker. Dadurch müssen die einzelnen Geräte nicht direkt miteinander verbunden sein und trotzdem unabhängig voneinander arbeiten und Informationen austauschen [17].

Das MQTT-System basiert auf dem sogenannten Publisher-Subscriber-Prinzip. Dabei übernimmt ein sogenannter Broker die Rolle der zentralen Vermittlungsstelle. Geräte, die Informationen senden, werden als Publisher bezeichnet. Geräte, die Informationen empfangen möchten, heißen Subscriber. Der Publisher sendet seine Nachricht an den Broker. Der Broker leitet diese anschließend an alle Subscriber weiter, die diese Informationen abonniert haben. Dadurch übernimmt der Broker die Verteilung der Nachrichten zwischen den einzelnen Geräten [17].

Die Nachrichten werden über sogenannte Topics übertragen. Ein Topic ist ein eindeutiger Name, unter dem Nachrichten veröffentlicht werden. Publisher senden ihre Informationen an ein bestimmtes Topic. Subscriber können genau diese Topics abonnieren und erhalten anschließend automatisch die passenden Nachrichten. So können Informationen gezielt zwischen verschiedenen Geräten ausgetauscht werden [17].

Ein typischer Ablauf funktioniert folgendermaßen: Ein Sensor erkennt ein Ereignis und sendet diese Information an ein bestimmtes MQTT-Topic. Der Broker empfängt die Nachricht und leitet sie automatisch an alle Geräte weiter, die dieses Topic abonniert haben. Auf diese Weise können Sensoren, Steuerungen und Benutzeroberflächen miteinander kommunizieren, ohne direkt miteinander verbunden zu sein [17].

Der große Vorteil von MQTT besteht darin, dass Sender und Empfänger unabhängig voneinander arbeiten können. Beide kommunizieren ausschließlich mit dem Broker. Dadurch lassen sich neue Geräte einfach in ein bestehendes System einbinden oder vorhandene Geräte austauschen, ohne die Kommunikation der übrigen Komponenten zu verändern [17].

Zusammenfassend stellt MQTT ein einfaches und leistungsfähiges Kommunikationsprotokoll für Automatisierungssysteme dar. Durch das Publisher-Subscriber-Prinzip sowie die Verwendung eines zentralen Brokers können Informationen und Steuerbefehle zuverlässig zwischen Sensoren, Mikrocontrollern und übergeordneten Steuerungen ausgetauscht werden. Dadurch bildet MQTT eine wichtige Grundlage für die Vernetzung moderner Automatisierungssysteme.

3. Beschreibung und Aufbau der bestehenden Versuchsanlage

Die bestehende Versuchsanlage dient der optischen Trennung von Altglas im Labormaßstab. Ziel der Anlage ist es, grüne Glasstücke aus einem gemischten Glasstrom zu erkennen und gezielt von transparenten Glasstücken zu trennen. Hierzu werden mechanische Fördertechnik, optische Sensorik, pneumatische Aktorik sowie eine digitale Steuerungs- und Kommunikationsstruktur miteinander kombiniert. Der grundsätzliche Aufbau orientiert sich an industriellen optischen Sortieranlagen, wurde jedoch für den Einsatz als kompakte Laboranlage angepasst.

3.1 Gesamtaufbau und Prozessablauf

Während des Betriebs durchlaufen die Glasstücke mehrere aufeinander abgestimmte Prozessschritte. Nach der Materialaufgabe werden sie vereinzelt, über ein Förderband transportiert, optisch erfasst und anschließend in den Ausschleusbereich geleitet. Dort können sie durch einen Druckluftstoß aus ihrer ursprünglichen Bewegungsrichtung abgelenkt oder ohne Ausschleusung in den entsprechenden Sammelbehälter geleitet werden.



Abbildung 2: Versuchsaufbau der Gesamtanlage

Zu Beginn des Prozesses werden die gemischten Glasstücke in einen Hopper eingefüllt. Dieser dient als Vorratsbehälter und sorgt für eine kontinuierliche Materialzufuhr. Unterhalb des Hoppers befindet sich ein Vibrationsförderer, der die Glasstücke vereinzelt und gleichmäßig auf das Förderband übergibt. Dadurch werden Überlagerungen der Glasstücke möglichst vermieden und eine gleichmäßige Zuführung zum Förderband erreicht.

Für den automatisierten Betrieb der Versuchsanlage ist eine abgestimmte Steuerungs- und Softwarearchitektur erforderlich. Die einzelnen Komponenten der Anlage, wie Sensorik, Fördertechnik und pneumatische Ausschleusung, müssen miteinander kommunizieren und zeitlich koordiniert arbeiten. Hierfür wurde eine Kombination aus Mikrocontrollern, zentraler Steuerungsebene und drahtloser Datenkommunikation verwendet.

Die direkte Ansteuerung der Sensoren und Aktoren erfolgt über Mikrocontroller wie Arduino- und ESP-Systeme. Diese übernehmen unter anderem das Auslesen der Sensorwerte, die Verarbeitung von Signalen sowie die Ansteuerung einzelner Komponenten der Anlage wie z.B. die Ansteuerung des Magnetventils.

Als zentrale Steuerungsebene wurde ein Raspberry Pi mit Home Assistant eingesetzt. Über diese Plattform können Sensorwerte visualisiert, Komponenten überwacht sowie manuelle und automatische Steuerungsfunktionen umgesetzt werden.

Die Kommunikation zwischen den einzelnen Geräten erfolgt hauptsächlich über das MQTT-Protokoll. Dadurch können Daten und Steuerbefehle drahtlos zwischen Mikrocontrollern und der zentralen Steuerung ausgetauscht werden. Das Förderband übernimmt den kontinuierlichen Transport der Glasstücke durch die Versuchsanlage. Es wird von einem Gleichstrommotor angetrieben. Zur Erfassung der Bandgeschwindigkeit ist ein Drehgeber installiert. Die Fördergeschwindigkeit wird über einen PI-Regler auf einem Arduino UNO R4 WiFi geregelt und während des Betriebs möglichst konstant gehalten.

3.2 Eingesetzte Sensorik

Im Sensorbereich befindet sich ein TCS3200-Farbsensor zur Erkennung der Glasfarbe. Der Sensor ist oberhalb der Förderstrecke angebracht und mit einem Arduino UNO R4 WiFi verbunden. Die Verarbeitung der Messwerte erfolgt direkt auf dem Mikrocontroller. Zur Erkennung der Glasfarbe wird in der Versuchsanlage ein optischer Farbsensor vom Typ TCS3200 eingesetzt. Der Sensor dient dazu, die Intensität des reflektierten roten, grünen und blauen Lichts eines Objekts zu erfassen und daraus dessen Farbe zu bestimmen. Die Messung erfolgt berührungslos und eignet sich daher für Anwendungen, bei denen sich Objekte während der Erfassung bewegen [14].

Der TCS3200 verfügt über eine 8×8 Photodiodenmatrix mit insgesamt 64 Photodioden. Diese besteht aus jeweils 16 Photodioden mit Rot-, Grün- und Blaufilter sowie 16 Photodioden ohne Farbfilter (Clear). Über die Steuereingänge S2 und S3 kann ausgewählt werden, welche Photodiodengruppe für die Messung verwendet wird. Dadurch lassen sich die einzelnen Farbanteile nacheinander erfassen und miteinander vergleichen [14].

Das Funktionsprinzip des Sensors basiert auf der Messung des von einem Objekt reflektierten Lichts. Je nach Farbe der Oberfläche werden die roten, grünen und blauen Lichtanteile unterschiedlich stark reflektiert und von den entsprechenden Photodioden erfasst. Durch den Vergleich der gemessenen Farbanteile kann anschließend auf die Farbe des Objekts geschlossen werden [14].

Der TCS3200 gibt die gemessenen Lichtintensitäten nicht als analoge Spannungswerte aus, sondern als Rechtecksignal, dessen Frequenz proportional zur gemessenen Lichtintensität ist. Über die Steuereingänge S0 und S1 kann die Ausgangsfrequenz skaliert werden. Das Fre-

quenzsignal wird von einem Mikrocontroller erfasst und ausgewertet. Welche Farbwerte letztendlich zur Unterscheidung verschiedener Objekte verwendet werden, hängt von der jeweiligen Anwendung sowie den Umgebungsbedingungen ab und muss in der Praxis entsprechend angepasst werden [14].

In der Versuchsanlage soll der Farbsensor zwischen Grün- und Weißglas unterscheiden. Dafür werden anhand der gemessenen Farbwerte Schwellenwerte für Grünlas festgelegt. Liegen die Messwerte innerhalb dieses Bereichs, wird das Glasstück als Grünlas erkannt. Andernfalls wird es als Weißlas bewertet. Da die Messwerte unter anderem vom Abstand des Sensors, der Beleuchtung und der Einbausituation abhängen, werden die Schwellenwerte während der Inbetriebnahme experimentell bestimmt und bei Bedarf angepasst.

Zusätzlich befindet sich oberhalb der Rutsche, kurz vor dem Ausschleusbereich, ein zweiter TCS3200-Farbsensor. Durch seine Position können die Glasstücke unmittelbar vor der Ausschleusung erneut erfasst werden. Der Sensor verfügt über ein LCD-Display, auf dem die Anzahl der erkannten Grünlasstücke angezeigt wird. Eine LED signalisiert die Erkennung eines grünen Glasstücks durch kurzes Blinken. Zusätzlich ist ein Reset-Taster vorhanden, mit dem der Zähler jederzeit wieder auf null zurückgesetzt werden kann. Dadurch kann die Funktion des Sensors während des Betriebs einfach überprüft werden.

Neben dem Farbsensor wird in der Versuchsanlage eine Infrarot-Einweglichtschranke (IR Breakbeam Sensor) eingesetzt. Sie besteht aus zwei getrennten Bauteilen, einem Infrarot-Sender und einem Infrarot-Empfänger. Beide Bauteile werden sich gegenüber montiert, so dass der vom Sender ausgesendete Infrarotstrahl den Empfänger kontinuierlich erreicht. Der Sender verfügt über zwei Anschlussleitungen für die Spannungsversorgung, während der Empfänger über drei Anschlussleitungen für die Spannungsversorgung, Masse und das Ausgangssignal verfügt [18].

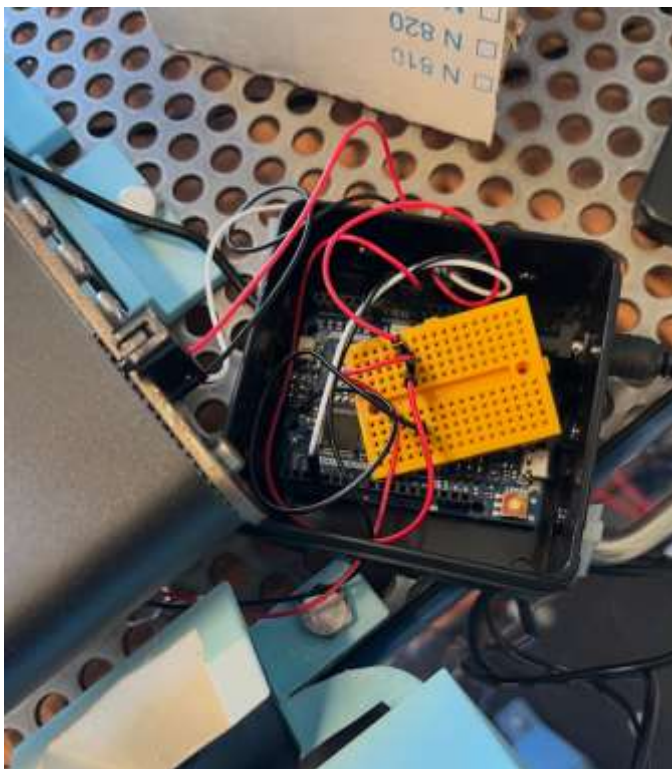


Abbildung 3: Anschluss der Lichtschranke

Das Funktionsprinzip der Lichtschranke ist einfach aufgebaut. Der Sender erzeugt kontinuierlich einen Infrarot-Lichtstrahl, der vom Empfänger überwacht wird. Solange der Lichtstrahl den Empfänger erreicht, bleibt dessen Ausgangssignal unverändert. Wird der Lichtstrahl durch ein Objekt unterbrochen, erkennt der Empfänger diese Änderung und ändert sein Ausgangssignal. Dadurch kann zuverlässig festgestellt werden, ob sich ein Objekt zwischen Sender und Empfänger befindet [18].

Der Empfänger besitzt einen Open-Collector-Ausgang. Für den Betrieb wird deshalb ein Pull-up-Widerstand benötigt. Bei vielen Mikrocontrollern kann dafür der bereits vorhandene interne Pull-up-Widerstand verwendet werden, sodass keine zusätzliche externe Beschaltung erforderlich ist. Dadurch lässt sich die Lichtschranke einfach an einen Mikrocontroller anschließen und das Ausgangssignal direkt auswerten [18].

Für eine zuverlässige Funktion müssen Sender und Empfänger möglichst genau aufeinander ausgerichtet werden, damit der Infrarotstrahl den Empfänger sicher erreicht. Außerdem sollte direkte Sonneneinstrahlung möglichst vermieden werden, da Sonnenlicht ebenfalls Infrarotanteile enthält und die Funktion der Lichtschranke beeinflussen kann [18].

In der vorliegenden Versuchsanlage wird die Lichtschranke eingesetzt, um vorbeifahrende Glasstücke zu erkennen und zu zählen. Da lediglich festgestellt werden muss, ob ein Glasstück den Erfassungsbereich passiert hat, ist keine zusätzliche Auswertung von Farbe oder Material erforderlich. Das digitale Ausgangssignal der Lichtschranke kann anschließend direkt vom Mikrocontroller verarbeitet und für die Zählung der Glasstücke sowie zur Auslösung weiterer Prozessschritte genutzt werden.

3.3 Pneumatische Ausschleuseinheit

Nach der Sensorerfassung gelangen die Glasstücke in den Ausschleusbereich der Anlage. Die pneumatische Einheit besteht aus einer Druckluftversorgung, einem Druckminderer, einem Magnetventil, einer Düse sowie den erforderlichen Verbindungsschläuchen. Die Druckluft wird über eine externe Druckluftquelle bereitgestellt und anschließend über den Druckminderer auf den gewünschten Arbeitsdruck eingestellt.

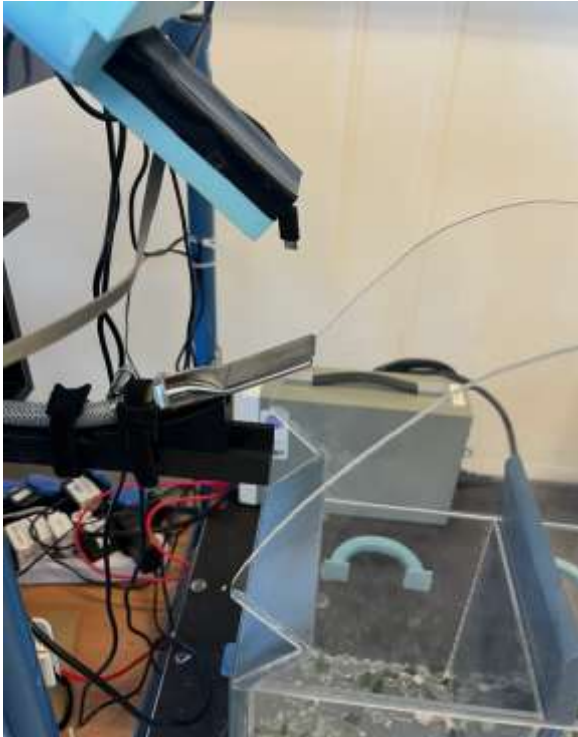


Abbildung 4: Düse zur pneumatischen Ausschleusung

Wird das Magnetventil geöffnet, strömt Druckluft durch die Düse und erzeugt einen kurzen Luftstoß. Dadurch wird das entsprechende Glasstück seitlich aus seiner ursprünglichen Bahn abgelenkt und in einen separaten Sammelbehälter geleitet. Glasstücke, die nicht ausgeschleust werden, folgen ihrer ursprünglichen Bewegungsrichtung und gelangen in den ersten Sammelbehälter.

Zum Zeitpunkt des Beginns dieser Bachelorarbeit erfolgt die Auslösung des Magnetventils noch manuell durch den Bediener über die Benutzeroberfläche von Home Assistant. Erkennt der Bediener ein auszuschleusendes Glasstück, kann der Luftstoß per Knopfdruck ausgelöst werden. Eine automatische Verbindung zwischen der Sensorerkennung und der pneumatischen Ausschleusung besteht zu diesem Zeitpunkt noch nicht.

4. Konzeption und Implementierung der Automatisierung

In diesem Kapitel wird die schrittweise Automatisierung der bestehenden Versuchsanlage beschrieben. Ausgehend vom vorgefundenen Anlagenzustand wird zunächst die Farbsensorik optimiert, anschließend eine Lichtschranke als alternative Triggerquelle implementiert und abschließend die pneumatische Ausschleusung automatisiert. Jeder dieser Entwicklungsschritte wird nach einem einheitlichen Schema dargestellt. Die Aufgabenstellung begründet, warum der jeweilige Schritt notwendig ist. Die Methode beschreibt das konkrete Vorgehen so, dass es nachvollziehbar und reproduzierbar ist. Unter Ergebnisse werden die gemessenen Werte und das beobachtete Verhalten dokumentiert. Die Diskussion ordnet diese Ergebnisse ein und bewertet ihren Nutzen für die Automatisierung.

Der Schwerpunkt des nächsten Kapitels (4.1) liegt auf den im Arduino-Programm vorgenommenen Änderungen und Optimierungen. Es wird erläutert, welche Anpassungen am Programmcode durchgeführt wurden, warum diese erforderlich waren und wie sich dadurch das Verhalten der Sensoren und der Steuerung verändert hat. Ziel ist es, die Funktionsweise der entwickelten Steuerungslogik verständlich darzustellen und die Grundlage für die anschließenden Versuche zu schaffen. Versuchsergebnisse werden in diesem Kapitel bewusst nicht dargestellt. Diese werden erst im nachfolgenden Versuchskapitel (Kapitel 5) anhand konkreter Messungen ausgewertet und diskutiert.

4.1 Optimierung der Farbsensorik

Aufgabenstellung

Der Farbsensor bildet das zentrale Element der farbbasierten Sortierung. Bevor eine automatische Ausschleusung umgesetzt werden kann, muss zuverlässig sichergestellt sein, dass der Sensor zwischen weißem und grünem Glas unterscheidet und nicht durch Störeinflüsse fehlerhaft auslöst. Erste Funktionsprüfungen zeigen jedoch, dass der Sensor im vorgefundenen Zustand kein verwertbares Erkennungssignal liefert. Im Leerlauf blinkt die grüne Status-LED regelmäßig, obwohl sich kein Glasstück im Erfassungsbereich befindet. Gleichzeitig erhöht sich der Zähler fortlaufend, da etwa alle ein bis zwei Sekunden fälschlicherweise eine Grünglaserkennung ausgelöst wird. Diese Fehlauslösungen überlagern die eigentlichen Sensorsignale, sodass beim Vorbeiführen von weißem oder grünem Glas nicht eindeutig erkennbar ist, ob die Erkennung tatsächlich durch ein Glasstück oder durch eine erneute Fehlauslösung verursacht wurde. Eine zuverlässige Unterscheidung zwischen Weiß- und Grünglas ist unter diesen Bedingungen nicht möglich. Ziel dieses Arbeitsschritts ist es daher, den Ausgangszustand der Farberkennung zu verstehen, die Ursachen der Fehlfunktion zu bestimmen und die Erkennungslogik so weit zu verbessern, dass sie als verlässlicher Auslöser für die spätere Automatisierung genutzt werden kann. Ohne diese Grundlage wäre eine automatische Sortierung nicht sinnvoll umsetzbar, da jede Fehlerkennung unmittelbar zu einer falschen Ausschleusung führen würde.

Methode

Zur Untersuchung der Farberkennung wird der Arduino UNO R4 WiFi zunächst über die USB-C-Schnittstelle mit einem Laptop verbunden. Der vorhandene Programmcode wird mit der Arduino IDE geöffnet und bildet die Ausgangsbasis für alle nachfolgenden Änderungen. Während des Betriebs werden die Messwerte der einzelnen Farbkanäle über die serielle Schnittstelle kontinuierlich ausgegeben. Dadurch können die Sensorsignale während jeder Messung in Echtzeit verfolgt und unmittelbar dem Verhalten des Sensors zugeordnet werden. Die Messungen erfolgen zunächst im Leerlauf ohne Glasstück und anschließend mit weißen und grünen Glasstücken. Für alle Vergleichsmessungen werden dieselben Glasstücke verwendet, damit Unterschiede in Form oder Farbintensität die Messwerte möglichst nicht beeinflussen.

Im ersten Schritt werden die Schwellenwerte der Farberkennung überarbeitet. Hierzu wird der Sensor zunächst über einen längeren Zeitraum im Leerlauf betrieben und die ausgegebenen Messwerte werden aufgezeichnet. Anschließend werden dieselben Messungen mit weißen und grünen Glasstücken durchgeführt. Die Werte der einzelnen Farbkanäle werden anschließend miteinander verglichen, um die jeweiligen Wertebereiche der drei Zustände zu bestimmen. Auf Grundlage dieser Messreihen werden die im Programm hinterlegten Grenzwerte angepasst. Dabei wird jeder Schwellenwert zwischen den gemessenen Wertebereichen positioniert und anschließend schrittweise verändert. Nach jeder Änderung wird der Programmcode neu auf den Arduino übertragen und die Messungen unter denselben Bedingungen wiederholt. Dieser Ablauf wird so lange fortgesetzt, bis die Auswirkungen jeder einzelnen Anpassung eindeutig nachvollzogen werden können.

Neben den Schwellenwerten wird auch die Erkennungslogik des Programmcodes überarbeitet. Im ursprünglichen Programm erfolgt die Auswertung unmittelbar nach jeder einzelnen Messung. Deshalb wird der Programmablauf so geändert, dass zunächst ausschließlich erkannt wird, ob sich ein Glasstück im Erfassungsbereich befindet. Während das Glasstück den Sensor passiert, werden die Messwerte fortlaufend aufgenommen und im Programm gespeichert. Erst nachdem die Messwerte wieder in den Bereich des Leerlaufs zurückkehren und das Glasstück den Messbereich vollständig verlassen hat, erfolgt die eigentliche Auswertung. Dadurch wird jedes Glasstück als ein vollständiger Durchlauf behandelt.

Während eines Durchlaufs werden die relevanten Messwerte fortlaufend miteinander verglichen. Bei jeder neuen Messung prüft das Programm, ob sich ein für die Auswertung wichtiger Messwert ergibt als der bisher gespeicherte. Ist dies der Fall, wird der gespeicherte Wert ersetzt. Auf diese Weise stehen nach dem Verlassen des Messbereichs die charakteristischen Messwerte des gesamten Durchlaufs für die anschließende Bewertung zur Verfügung. Diese Werte werden anschließend mit den zuvor festgelegten Schwellenwerten verglichen.

Darüber hinaus wird untersucht, welche Kombination der einzelnen Farbkanäle für die Erkennung verwendet werden soll. Hierzu werden die Messwerte aller Farbkanäle parallel aufgezeichnet und miteinander verglichen. Anschließend werden im Programmcode unterschiedliche Abfragen erstellt, bei denen einzelne Farbkanäle oder mehrere Farbkanäle miteinander verknüpft werden. Nach jeder Änderung wird der Programmcode erneut übertragen und die Messreihen unter identischen Bedingungen wiederholt.

Anschließend wird die Verarbeitung der Messwerte angepasst. Anstatt jede einzelne Messung unmittelbar als Entscheidungsgrundlage zu verwenden, werden mehrere aufeinanderfolgende Messungen gemeinsam ausgewertet. Hierzu wird im Programm für jede Messung geprüft, ob

die festgelegten Bedingungen erfüllt sind. Erst wenn mehrere aufeinanderfolgende Messungen diese Bedingungen bestätigen, wird eine Erkennung zugelassen. Die Anzahl der berücksichtigten Messungen wird im Programm schrittweise angepasst und nach jeder Änderung erneut überprüft.

Ergänzend wird nach jeder erfolgreichen Erkennung eine Sperrzeit in den Programmcode integriert. Nach Abschluss einer Erkennung wird zunächst die aktuelle Zeit gespeichert. Bei jeder weiteren Messung prüft das Programm, ob die festgelegte Sperrzeit bereits abgelaufen ist. Erst danach wird eine neue Erkennung wieder freigegeben. Die Dauer dieser Sperrzeit wird im Programm mehrfach angepasst und anschließend mit wiederholten Durchläufen überprüft.

Zusätzlich wird der Programmablauf hinsichtlich seiner Ausführungsgeschwindigkeit untersucht. Dazu werden alle Wartezeiten innerhalb des Programmcodes analysiert und nicht benötigte Verzögerungen schrittweise entfernt oder verkürzt. Nach jeder Änderung wird der aktualisierte Programmcode erneut auf den Arduino übertragen und geprüft, ob der Sensor während des Vorbeifahrens eines Glasstücks mehr Messwerte erfassen kann. Parallel dazu wird auch die Ansteuerung der Status-LED angepasst. Hierzu wird die Leuchtdauer direkt im Programmcode verändert und nach jeder Anpassung erneut getestet.

Neben dem Programmcode wird abschließend auch das Umfeld des Farbsensors untersucht. Hierfür werden im Messbereich nacheinander ein weißer und ein schwarzer Untergrund eingesetzt. Während der Untersuchungen bleiben die Position des Sensors, der Abstand zwischen Sensor und Glasstück sowie die Beleuchtung und Abschirmung unverändert. Für jeden Untergrund werden zunächst Messungen im Leerlauf und anschließend mit denselben weißen und grünen Glasstücken durchgeführt. Die Messwerte aller Farbkanäle werden über die serielle Schnittstelle ausgegeben und dokumentiert. Anschließend werden die Messreihen beider Untergründe miteinander verglichen. Zeigen sich Unterschiede in den Leerlauf- oder Messwerten, werden die Schwellenwerte entsprechend angepasst.

Alle Änderungen werden schrittweise in den vorhandenen Arduino-Programmcode übernommen. Nach jeder Anpassung wird der Programmcode kompiliert, auf den Arduino übertragen und unter identischen Bedingungen erneut geprüft. Erst nachdem eine Änderung vollständig nachvollzogen ist, wird der nächste Entwicklungsschritt umgesetzt. Der vollständige Arduino-Programmcode des Farbsensors wird aufgrund seines Umfangs als ergänzendes Handout gemeinsam mit der Bachelorarbeit bereitgestellt.

Ergebnisse

Die Auswertung der über die serielle Schnittstelle aufgezeichneten Messwerte zeigt, dass der Blaukanal und der Grünkanal die deutlichsten Unterschiede zwischen Leerlauf, Weißglas und Grünglas aufweisen. Während sich die Messwerte des Weißglases nur geringfügig vom Leerlauf unterscheiden, zeigen grüne Glasstücke bei beiden Farbkanälen einen deutlichen Abfall. Dabei fällt der Blauwert stärker ab als der Grünwert und reagiert gleichzeitig bereits beim Einfahren eines Glasstücks in den Messbereich. Der Blaukanal wird deshalb als Auslösekriterium für die Objekterkennung verwendet, während der Grünkanal zur Bestätigung eines grünen Glasstücks dient.

Die Leerlaufmessungen zeigen für den Blaukanal einen weitgehend konstanten Wertebereich zwischen 142 und 143. Die Schwankung beträgt damit lediglich etwa eine Einheit und bildet

eine stabile Grundlage für die Festlegung der Auslöseschwelle. Weißglas verändert den Blauwert nicht und bleibt auf dem Leerlaufwert. Grünglas führt dagegen je nach Größe, Dicke und Farbintensität zu einer deutlichen Absenkung auf Werte zwischen etwa 90 und 111. Auf Grundlage dieser Messungen wird die Einschaltsschwelle für die Objekterkennung auf 139 festgelegt. Wird dieser Wert unterschritten, erkennt das Programm das Einfahren eines Glasstücks in den Messbereich.

Für das Ende eines Ereignisses wird eine zweite Schwelle verwendet. Erst wenn der Blauwert wieder auf 140 oder höher ansteigt, gilt das Glasstück als aus dem Messbereich ausgetreten. Dadurch entsteht eine Hysterese mit getrennten Ein- und Ausschaltsschwellen. Kleine Schwankungen des Sensorsignals im Bereich der Auslöseschwelle führen dadurch nicht zu einem mehrfachen Wechsel zwischen den Zuständen „Objekt vorhanden“ und „kein Objekt vorhanden“.

Der Grünkanal bewegt sich im Leerlauf bei etwa 125. Weißglas bleibt ebenfalls in diesem Wertebereich, während Grünglas den Messwert typischerweise auf etwa 100 bis 103 und bei schwächer gefärbten Glasstücken bis auf etwa 111 absenkt. Als Bestätigungsschwelle wird deshalb ein Grenzwert von 115 festgelegt. Dieser liegt oberhalb der kleinsten zuverlässig gemessenen Werte schwach gefärbter grüner Glasstücke und gleichzeitig außerhalb des Messbereichs von Weißglas.

Die endgültigen Schwellenwerte im Programmcode lauten:

```
float BLUE_ON = 139;
```

```
float BLUE_OFF = 140;
```

```
float GREEN_GRUEN_MAX = 115;
```

Neben den Schwellenwerten wird auch die Erkennungslogik grundlegend geändert. Im endgültigen Programm erfolgt die Auswertung nicht mehr nach jeder einzelnen Messung. Stattdessen beginnt ein Ereignis mit dem Unterschreiten der Einschaltsschwelle des Blaukanals. Während sich das Glasstück im Messbereich befindet, werden kontinuierlich Messwerte aufgenommen. Erst nachdem der Blauwert wieder die Ausschaltsschwelle erreicht hat und das Glasstück den Messbereich vollständig verlassen hat, erfolgt die eigentliche Auswertung. Dadurch wird jedes Glasstück nur noch als ein zusammenhängender Messvorgang behandelt.

Während eines Ereignisses werden die Messwerte des Grünkanals fortlaufend überwacht. Das Programm speichert dabei nicht den zuletzt gemessenen Wert, sondern den kleinsten während des gesamten Durchlaufs auftretenden Grünwert (eventMinGreen). Dadurch geht der Zeitpunkt der größten Farbänderung in die Entscheidung ein. Zusätzlich wird gezählt, wie oft der festgelegte Schwellenwert von 115 während eines Durchlaufs erreicht oder unterschritten wird (greenLowCount). Im endgültigen Programm reicht bereits eine Messung unterhalb dieses Grenzwerts aus, damit die Grünbedingung erfüllt ist.

Die endgültige Entscheidung über ein grünes Glasstück erfolgt somit erst nach Abschluss des gesamten Durchlaufs. Ein Glasstück wird nur dann als Grünglas erkannt, wenn der kleinste gemessene Grünwert den Grenzwert von 115 erreicht oder unterschreitet und gleichzeitig mindestens eine entsprechende Messung während des Ereignisses vorliegt.

Zur Vermeidung von Mehrfacherkennungen wird nach jeder erfolgreichen Grünglaserkennung zusätzlich eine Sperrzeit von 80 ms (hitCooldownMs) aktiviert. Während dieses Zeitraums

werden weitere Erkennungen unterdrückt. Dadurch wird verhindert, dass ein einzelnes Glasstück aufgrund kurzzeitiger Signaländerungen mehrfach gezählt wird.

Die Messgeschwindigkeit wird durch das vollständige Entfernen zusätzlicher Wartezeiten im Hauptprogramm erhöht (`sampleIntervalMs = 0`). Nach der Optimierung werden unter den gewählten Versuchsbedingungen etwa 50 bis 80 Messungen pro Sekunde erreicht. Da sich ein Glasstück ungefähr 50 bis 100 ms im Erfassungsbereich befindet, stehen je nach Geschwindigkeit typischerweise drei bis acht Messwerte für die Auswertung eines einzelnen Glasstücks zur Verfügung.

Auch die Ansteuerung der Status-LED wird angepasst. Die Leuchtdauer wird im endgültigen Programm auf 5 ms reduziert. Dadurch bleibt die optische Rückmeldung einer erfolgreichen Grünglaserkennung erhalten, ohne den Programmablauf nennenswert zu unterbrechen oder die Messwerterfassung zu verzögern.

Die Untersuchung des Sensorumfelds zeigt außerdem, dass auch der Untergrund das Messverhalten des Farbsensors beeinflusst. Dafür werden ein weißer und ein schwarzer Untergrund miteinander verglichen. Beim weißen Untergrund sind im Serial Monitor weniger Schwankungen und Ausreißer der Messwerte zu erkennen. Dadurch lassen sich die festgelegten Schwellenwerte zuverlässiger anwenden und Leerlauf sowie Glasstücke besser voneinander unterscheiden. Aus diesem Grund wird für alle weiteren Untersuchungen der weiße Untergrund verwendet. Die in Kapitel 5 beschriebenen Versuche bauen auf dieser Auswahl und den dabei festgelegten Schwellenwerten auf.

Diskussion

Die Ergebnisse zeigen, dass die Kombination aus Blaukanal als Auslösekriterium und Grünkanal als Bestätigung für die vorliegende Anwendung die geeignetste Lösung darstellt. Der Blaukanal reagiert auf grüne Glasstücke deutlich stärker als der Grünkanal und weist im Leerlauf gleichzeitig nur sehr geringe Schwankungen auf. Dadurch kann das Einfahren eines Glasstücks in den Messbereich zuverlässig erkannt werden. Die zusätzliche Bestätigung über den Grünkanal verhindert, dass bereits ein Absinken des Blauwertes allein zu einer Grünglaserkennung führt. Erst das Zusammenspiel beider Farbkanäle ermöglicht eine zuverlässige Unterscheidung zwischen Leerlauf, Weißglas und Grünglas.

Auch die Anpassung der Erkennungslogik trägt wesentlich zur Verbesserung des Sensors bei. Anstatt jede einzelne Messung unmittelbar auszuwerten, wird der gesamte Durchlauf eines Glasstücks betrachtet. Dadurch fließen mehrere Messwerte in die Entscheidung ein und kurzfristige Schwankungen einzelner Messungen wirken sich deutlich weniger auf das Ergebnis aus. Die zusätzliche Sperrzeit verhindert außerdem, dass ein Glasstück während seines Durchlaufs mehrfach erkannt wird. Insgesamt entsteht dadurch ein deutlich stabileres und reproduzierbares Erkennungssignal, das sich als Trigger für die spätere Automatisierung der Ausschleusung eignet.

Die gewählten Schwellenwerte stellen einen Kompromiss zwischen einer möglichst hohen Empfindlichkeit und einer geringen Anzahl an Fehlauflösungen dar. Sie liegen bewusst sehr nah am Leerlaufbereich, sodass bereits kleine Änderungen der Messwerte erfasst werden können. Gleichzeitig bleiben sie ausreichend außerhalb der normalen Schwankungen des Sensors, um Fehlauflösungen im Leerlauf weitgehend zu vermeiden.

Trotz der erreichten Verbesserungen bestehen weiterhin Grenzen. Die Erkennung hängt nach wie vor von der Größe, Dicke und Farbintensität der Glasstücke ab. Besonders kleine Glasstücke befinden sich nur sehr kurz im Erfassungsbereich des Sensors und werden dabei nicht immer vollständig erfasst. Dadurch kann es vereinzelt vorkommen, dass die für eine Erkennung erforderlichen Messwerte nicht vollständig aufgenommen werden und ein Glasstück trotz der optimierten Erkennungslogik nicht erkannt wird. Darüber hinaus arbeitet der verwendete Farbsensor nach dem Prinzip der reflektierten Lichtmessung. Veränderungen des Untergrunds, des Sensorabstands oder der Umgebungsbeleuchtung beeinflussen daher die gemessenen Werte und machen konstante Randbedingungen erforderlich. Die im Rahmen dieser Arbeit festgelegten Schwellenwerte gelten deshalb für die verwendete Versuchsanlage und die gewählten Versuchsbedingungen.

Wie stark sich diese verbleibenden Einschränkungen auf die tatsächliche Erkennungsleistung auswirken, wird im folgenden Versuchskapitel anhand standardisierter Versuchsreihen und der erreichten Erkennungsquoten quantitativ untersucht.

4.2 Implementierung der Lichtschranke

Aufgabenstellung

Die Optimierung der Farbsensorik ermöglicht die automatische Erkennung und Ausschleusung grüner Glasstücke. Zusätzlich wird die Versuchsanlage um eine weitere Sensorlösung erweitert, um eine alternative Ausschleusungsstrategie zu realisieren. Im Gegensatz zum Farbsensor arbeitet die Lichtschranke unabhängig von der Glasfarbe und erkennt ausschließlich das Vorbeifahren eines Glasstücks. Ziel dieses Arbeitsschritts ist es, eine Lichtschranke in die Versuchsanlage zu integrieren und in die bestehende Steuerungslogik einzubinden. Auf dieser Grundlage wird eine Ausschleusungslogik umgesetzt, bei der nach einem festgelegten System – beispielsweise jedes zweite vorbeifahrende Glasstück – automatisch ausgeschleust wird. Die Lichtschranke dient dabei als alternative Triggerquelle und erweitert die Versuchsanlage um eine zweite, von der Farberkennung unabhängige Ausschleusungsmöglichkeit.

Methode

Für die Einbauposition wird die Lichtschranke am Ende des Förderbandes unmittelbar vor dem Übergang zur Rutsche montiert. An dieser Stelle verlassen die Glasstücke das Förderband und bewegen sich anschließend über die Rutsche zum Ausschleusbereich. Da der verbleibende Weg bis zur Düse kurz ist, wirken sich Schwankungen der Förderbandgeschwindigkeit nur noch gering auf den Zeitpunkt der Ausschleusung aus, wodurch ein möglichst konstanter Zeitabstand zwischen Erkennung und Erreichen der Düse entsteht.

Für den Betrieb der Lichtschranke wird bewusst ein eigener Arduino UNO R4 WiFi verwendet, damit ihr Programm unabhängig vom Farbsensor entwickelt, getestet und angepasst werden kann und sich Fehler leichter eingrenzen lassen. Die elektrische Verdrahtung erfolgt über ein Breadboard, das als Verteiler für die Versorgungsspannung dient. Der Sender besitzt zwei Anschlussleitungen und wird mit 5 V und Masse verbunden. Der Empfänger verfügt über drei Anschlussleitungen: neben der Versorgung über 5 V und Masse besitzt er eine Signalleitung, die mit einem digitalen Eingang des Arduino verbunden wird. Über diese Leitung erkennt der Mikrocontroller, ob der Infrarotstrahl unterbrochen oder frei ist. Sender und Empfänger werden gegenüberliegend befestigt und so ausgerichtet, dass der Strahl den Empfänger ungehindert

erreicht. Da bereits geringe Positionsabweichungen dazu führen, dass der Sensorzustand unkontrolliert wechselt oder dauerhaft in einem Zustand verbleibt, werden Sender und Empfänger mehrfach nachjustiert und mit vorbeigeführten Glasstücken überprüft, bis jede Unterbrechung zuverlässig erkannt wird.

Das Programm liest den Sensorzustand fortlaufend über den digitalen Eingang aus. Im Unterschied zum Farbsensor kennt die Lichtschranke nur zwei Zustände – „Licht frei“ und „Licht unterbrochen“ –, sodass keine Auswertung von Farbwerten oder Schwellenwerten erforderlich ist. Der aktuelle Zustand wird direkt eingelesen:

```
bool s = digitalRead(SENSORPIN);
```

Ein wesentlicher Bestandteil der Auswertung ist die sogenannte Flankenerkennung. Für Leser ohne Programmierkenntnisse lässt sich diese anschaulich erklären: Der Sensor meldet viele Male pro Sekunde nur, ob der Lichtstrahl in diesem Moment frei oder unterbrochen ist. Würde das Programm für jeden dieser Momente mitzählen, in denen der Strahl unterbrochen ist, so würde ein einzelnes, langsam vorbeifahrendes Glasstück nicht einmal, sondern viele hundert Male gezählt – nämlich so lange, wie es den Strahl blockiert. Sinnvoll ist es daher, nicht den Zustand selbst zu zählen, sondern nur den Moment des Wechsels von „frei“ zu „unterbrochen“. Dieser Übergang wird als Flanke bezeichnet. Das Prinzip entspricht dem Zählen von Personen an einer Tür: Gezählt wird jede Person genau einmal in dem Moment, in dem sie die Türschwelle überschreitet, und nicht fortlaufend, solange sie in der Tür steht. Technisch wird dazu der zuletzt bekannte Zustand gespeichert und mit jedem neuen Messwert verglichen. Nur wenn sich der neue Zustand vom gespeicherten unterscheidet, hat ein Wechsel stattgefunden; und nur wenn dieser Wechsel in Richtung „unterbrochen“ (LOW) erfolgt, wird gezählt:

```
if (s != lastState) { // ein Wechsel hat stattgefunden (Flanke)
    if (s == LOW) { // nur den Übergang frei -> unterbrochen zählen
        count++;
    }
    lastState = s;
}
```

Ergänzend wird eine Sperrzeit eingeführt. Unregelmäßig geformte Glasscherben mit Kanten oder Spitzen können innerhalb kurzer Zeit mehrere Signalwechsel verursachen, sodass ein einzelnes Glasstück trotz Flankenerkennung mehrfach erfasst werden könnte. Um dies zu verhindern, werden nach einer gültigen Erkennung weitere Signaländerungen für eine festgelegte Zeitspanne ignoriert:

```
const unsigned long lockoutMs = 150;
if (now - lastEdgeMs > lockoutMs) {
    // gültige Erkennung
}
```

Die Länge der Sperrzeit wird anhand praktischer Versuche an der Anlage bestimmt, indem verschiedene Werte getestet und die Zählergebnisse mit der tatsächlichen Anzahl der Glasstücke verglichen werden.

Abschließend wird die Lichtschranke in Home Assistant eingebunden. Der Arduino sendet den Sensorzustand über das MQTT-Protokoll an den vorhandenen MQTT-Broker, wo er in Home Assistant als Binary-Sensor mit der Entität `binary_sensor.lichtschranke_glas` erscheint. Solange der Lichtstrahl frei ist, zeigt die Entität den Zustand „Aus“ an; wird der Strahl unterbrochen, wechselt sie auf „Ein“. Die Entität wird als Karte in das Dashboard übernommen, sodass der Sensorzustand während der Versuche jederzeit sichtbar ist. Zusätzlich wird über einen Counter eine Zählfunktion aufgebaut, die per Automation bei jedem Wechsel von „Aus“ auf „Ein“ um eins erhöht wird, sowie ein Button, mit dem der Zähler vor jeder neuen Versuchsreihe auf null zurückgesetzt werden kann. Der vollständige Arduino-Programmcode der Lichtschranke wird aufgrund seines Umfangs als ergänzendes Handout gemeinsam mit der Bachelorarbeit bereitgestellt.

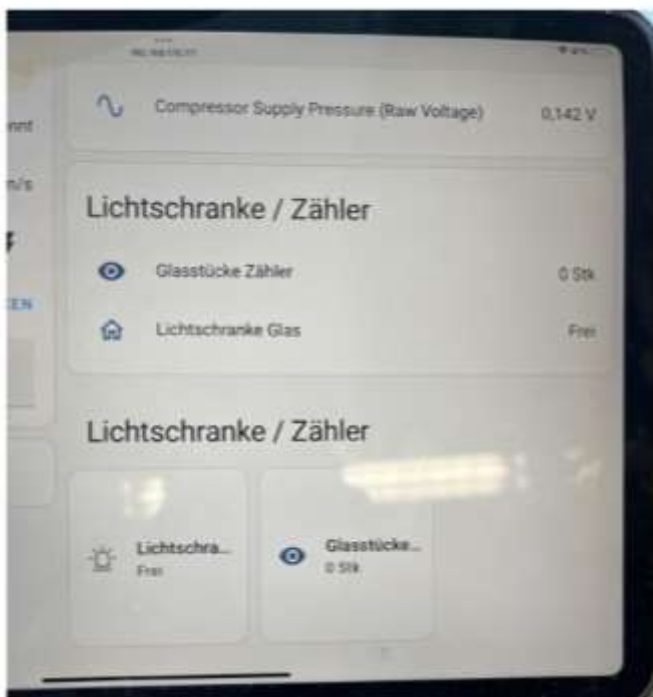


Abbildung 5: Benutzeroberfläche der Lichtschranke in Home Assistant

Ergebnisse

Nach der endgültigen Ausrichtung von Sender und Empfänger wird jede Unterbrechung des Lichtstrahls zuverlässig erkannt. Durch die Flankenerkennung wird jedes Glasstück genau einmal gezählt; ohne diese Auswertung würde der Mikrocontroller während der gesamten Unterbrechung fortlaufend neue Zählimpulse erzeugen und dasselbe Glasstück mehrfach erfassen. Die praktische Bestimmung der Sperrzeit ergibt einen Wert von 150 ms als geeigneten Kompromiss: Eine kürzere Sperrzeit verhindert Mehrfachzählungen bei unregelmäßig geformten Scherben nicht zuverlässig, während eine deutlich längere Sperrzeit dazu führen kann, dass zwei dicht aufeinanderfolgende Glasstücke als ein einziges Ereignis erfasst werden. Da die Glasstücke in den Versuchen mit einem kleinen Abstand auf das Förderband gelegt werden, tritt bei 150 ms kein Fall auf, in dem zwei Stücke innerhalb der Sperrzeit erfasst werden müssten.

In Home Assistant wechselt die Entität `binary_sensor.lichtschranke_glas` bei jeder Unterbrechung zuverlässig zwischen „Aus“ und „Ein“. Der zugehörige Counter erhöht sich bei jeder Erkennung korrekt und lässt sich über den Button zuverlässig auf null zurücksetzen. Die Signale werden ohne merkliche Verzögerung dargestellt, sodass der Sensorzustand und der Zählerstand während der Versuche jederzeit im Dashboard nachvollzogen werden können.

Diskussion

Die Lichtschranke liefert ein unmittelbares, eindeutiges digitales Signal und erfordert im Gegensatz zum Farbsensor keine Messung und Auswertung von Farbwerten. Dadurch arbeitet sie schneller und einfacher und erfasst jedes vorbeifahrende Objekt unabhängig von seiner Farbe. Sie eignet sich damit sowohl zur reinen Zählung als auch als farbunabhängige Triggerquelle. Der entscheidende Vorteil gegenüber dem Farbsensor liegt in der Einbauposition am Bandende: Durch den kurzen verbleibenden Weg bis zur Düse entsteht ein deutlich konstanterer Zeitabstand zwischen Erkennung und Ausschleusung. Die Flankenerkennung in Verbindung mit der Sperrzeit von 150 ms stellt sicher, dass jedes Glasstück auch bei mehreren kurzen Signalwechseln nur einmal gezählt wird. Zu berücksichtigen ist, dass die gewählte Sperrzeit auf den in den Versuchen verwendeten Abstand der Glasstücke abgestimmt ist; bei deutlich dichterem Materialstrom müsste dieser Wert neu bewertet werden. Insgesamt stellt die Lichtschranke damit eine robuste, farbunabhängige Triggerquelle mit günstigerem Zeitverhalten bereit, deren Auswirkung auf die Trennqualität im Versuchskapitel quantitativ untersucht wird.

4.3 Automatisierung der pneumatischen Ausschleusung

Aufgabenstellung

Nach der Optimierung der Farbsensorik und der Implementierung der Lichtschranke stehen zuverlässige Erkennungssignale zur Verfügung, und das Magnetventil lässt sich in Home Assistant manuell schalten. Es fehlt jedoch die automatische Verbindung zwischen Sensor und Aktor: Ein Sensor erkennt zwar ein Glasstück, das Magnetventil reagiert darauf aber nicht selbstständig. Ziel dieses Arbeitsschritts ist es, diese Verbindung herzustellen, sodass ein erkanntes Glasstück ohne manuelles Eingreifen einen Luftstoß auslöst. Damit wird die Prozesskette aus Erkennung, Verarbeitung und Ausschleusung erstmals vollständig geschlossen.

Methode

Voraussetzung für die Automatisierung ist, dass die benötigten Komponenten bereits in Home Assistant verfügbar sind. Das Magnetventil ist als Schalter mit der Entität `switch.magnetvalve_magnetvalve` eingebunden und kann manuell geöffnet und geschlossen werden, wodurch sich zunächst prüfen lässt, ob die Verbindung zum Ventil grundsätzlich funktioniert. Die Farbsensoren liefern Zählerwerte über die Entitäten `sensor.color_1_counter` und `sensor.color_sensor_2_grun_counter`, die sich bei jeder Grünglaserkennung erhöhen. Die Lichtschranke zeigt über `binary_sensor.lichtschranke_glas` an, ob der Lichtstrahl frei oder unterbrochen ist.

Zur Auswahl eines geeigneten Auslösers wird über den Bereich „Entwicklerwerkzeuge → Zustände“ beobachtet, welche Signale sich bei einer Sensorerkennung verändern. Die Farbsensoren geben kein direktes Schaltsignal aus, sondern erhöhen bei jeder Erkennung ihren Zähler, beispielsweise in der Folge 15 → 16 → 17 → 18. Dieser Anstieg des Zählerwertes

eignet sich als Auslöser, da Home Assistant auf jede Änderung eines Zählers reagieren kann. Die Lichtschranke arbeitet demgegenüber mit einem Zustandswechsel: Beim Durchlaufen eines Glasstücks wechselt die Entität von „off“ auf „on“, was ebenfalls als Auslöser genutzt werden kann. Mehrere Testdurchläufe bestätigen, dass sich die Zähler der Farbsensoren bei einer Erkennung erhöhen, die Lichtschranke bei einer Unterbrechung ihren Zustand wechselt und alle Signale ohne merkliche Verzögerung in Home Assistant ankommen.

Auf dieser Grundlage werden die Automationen aufgebaut. Eine Automation in Home Assistant besteht aus einem Auslöser (Trigger), Bedingungen und Aktionen. Um die einzelnen Triggerquellen unabhängig voneinander testen und anpassen zu können, wird für jeden Sensor eine eigene Automation angelegt. Bei den Farbsensoren dient der Anstieg des Zählerwertes als Trigger; bei jeder Erhöhung startet die zugehörige Automation. Bei der Lichtschranke wird der Zustandswechsel von „off“ auf „on“ als Trigger verwendet, und ein eigener Zähler wird bei jeder Unterbrechung um eins erhöht. Anschließend prüft die Automation, ob der aktuelle Zählerstand gerade oder ungerade ist, um gezielt jedes zweite Glasstück auszuschleusen (1 → keine Ausschleusung, 2 → Ausschleusung, 3 → keine Ausschleusung, 4 → Ausschleusung). Auf diese Weise lässt sich die Lichtschranke unabhängig von der Glasfarbe als selektive Triggerquelle nutzen.

Für die eigentliche Ausschleusung wird innerhalb der Automation die Ventil-Entität angesteuert. Zum Öffnen des Ventils wird der Befehl `switch.turn_on`, zum Schließen `switch.turn_off` verwendet. Die Schaltfolge nach einer Sensorerkennung ist so aufgebaut, dass zunächst eine definierte Wartezeit eingefügt wird, in der sich das Glasstück von der Sensorposition bis zur Ausschleusdüse bewegt. Nach Ablauf dieser Wartezeit wird das Ventil geöffnet, sodass Druckluft durch die Düse strömt und auf das Glasstück trifft. Direkt anschließend wird über einen weiteren Zeitschritt das Ventil wieder geschlossen, wodurch ein kurzer, definierter Luftimpuls entsteht. Die konkreten Werte für Wartezeit und Impulsdauer werden nicht theoretisch festgelegt, sondern experimentell bestimmt; die zugehörigen Versuche und Messergebnisse sind im Versuchskapitel dargestellt. Die vollständigen YAML-Automationen für die Ausschleusung über die Lichtschranke sowie den zweiten Farbsensor werden aufgrund ihres Umfangs als ergänzendes Handout gemeinsam mit der Bachelorarbeit bereitgestellt.

Abschließend werden alle relevanten Funktionen in der Bedienoberfläche zusammengefasst. Im Dashboard werden die Sensoren, die zugehörigen Zählerstände und das Magnetventil angezeigt. Über ein Auswahlfeld können die verfügbaren Triggerquellen – „AUS“, „Farbsensor 1“, „Farbsensor 2“ und „Lichtschranke“ – ausgewählt werden, sodass festgelegt werden kann, welcher Sensor die automatische Ausschleusung auslöst. Die Option „AUS“ dient als manueller Betriebsmodus: Die Sensoren bleiben aktiv und ihre Messwerte werden weiterhin aktualisiert, es erfolgt jedoch keine automatische Ansteuerung des Ventils, das in diesem Modus weiterhin manuell schaltbar bleibt. Für die Lichtschranke wird zusätzlich ein Reset-Button eingebunden, mit dem der zugehörige Zähler vor einer neuen Versuchsreihe auf null zurückgesetzt werden kann.

Ergebnisse

Durch die Verknüpfung der Sensorsignale mit dem Magnetventil entsteht erstmals eine direkte, automatische Verbindung zwischen Sensor und Aktor. Bei Verwendung eines Farbsensors löst die Erhöhung des Zählerwertes zuverlässig die Automation aus, die daraufhin den Luftstoß erzeugt. Bei Verwendung der Lichtschranke startet der Zustandswechsel die Automation, und

die Prüfung des Zählerstands führt dazu, dass wie vorgesehen jedes zweite Glasstück ausgeschleust wird. Das Magnetventil wird nach der definierten Schaltfolge automatisch geöffnet und geschlossen, sodass ein kurzer, definierter Luftimpuls entsteht, ohne dass ein manuelles Eingreifen erforderlich ist.

In der Bedienoberfläche stehen sämtliche für die Ausschleusung relevanten Informationen zentral zur Verfügung. Sensorzustände, Zählerstände, das Magnetventil, die Triggerauswahl und die Reset-Funktion können unmittelbar überwacht und bedient werden. Über das Auswahlfeld lässt sich die Triggerquelle wechseln, und über die Option „AUS“ kann die automatische Ausschleusung deaktiviert werden, ohne die Sensoren oder Automationen abzuschalten.

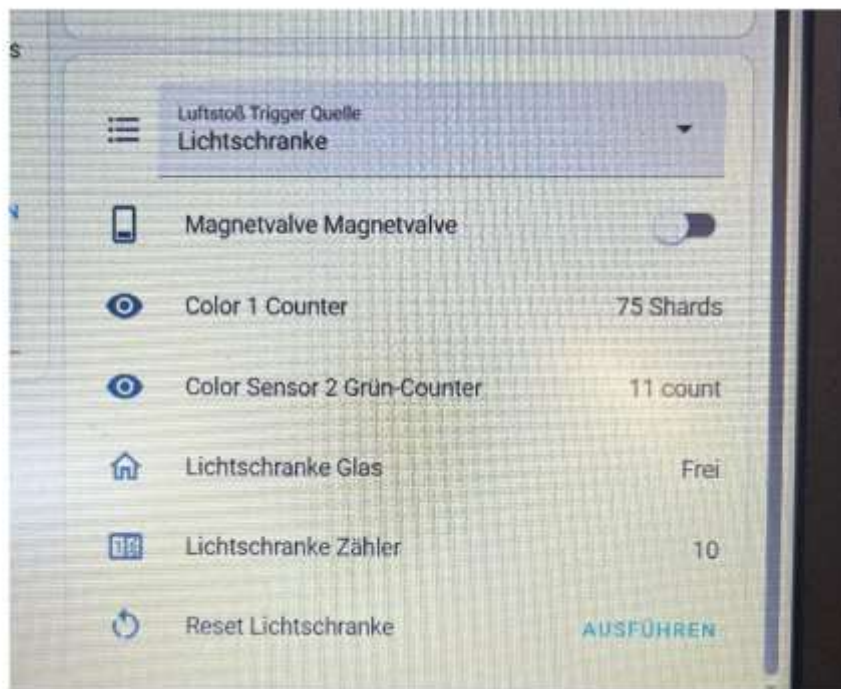


Abbildung 6: Triggerauswahl der Ausschleusung in Home Assistant

Diskussion

Mit der umgesetzten Automatisierung führt eine Sensorerkennung erstmals automatisch zu einer Ausschleusung, sodass die Prozesskette aus Erkennung, Verarbeitung und Ausschleusung geschlossen ist. Ein wesentlicher Vorteil des gewählten Vorgehens liegt darin, dass nicht die Rohdaten der Sensoren, sondern die bereits vorhandenen Zähler- und Zustandssignale als Auslöser verwendet werden. Dadurch bleibt die Automatisierungslogik einfach und robust, und Home Assistant kann auf jede Signaländerung reagieren, ohne die Erkennung selbst durchführen zu müssen. Die Aufteilung in getrennte Automationen und die Triggerauswahl im Dashboard ermöglichen es, die verschiedenen Sensoren unabhängig voneinander zu erproben und bei Bedarf in den manuellen Betrieb zu wechseln, was die Vergleichbarkeit der späteren Versuche erhöht.

Zu berücksichtigen ist, dass das Sensorsignal auf dem Weg über WLAN, MQTT-Broker und Home Assistant bis zur Ansteuerung des Ventils einen Umweg nimmt. Dieser Aufbau ist funktionsfähig, jedoch nicht auf minimale Reaktionszeiten ausgelegt und führt zu einer Systemverzögerung, die für die zeitliche Abstimmung der Ausschleusung von Bedeutung ist. Der Einfluss

dieser Verzögerung auf die Trennqualität wird im Versuchskapitel messtechnisch untersucht und bewertet. Der unmittelbare Nutzen dieses Arbeitsschritts besteht darin, dass die Anlage nach Abschluss der Automatisierung selbstständig zwischen den Betriebsarten wechseln, die Ausschleusung bei Bedarf deaktivieren und das Magnetventil bei aktiver Automatik automatisch ansteuern kann.

5. Versuche und Ergebnisse

Die Analyse des Anlagenzustands in Kapitel 3 hat gezeigt, dass die Versuchsanlage bereits über einen hohen Automatisierungsgrad verfügt und der einzige verbleibende manuelle Schritt die Auslösung der pneumatischen Ausschleusung war. Diese Verknüpfung zwischen Sensor und Aktor wurde in Kapitel 4 hergestellt. In diesem Kapitel wird die Funktion der so automatisierten Anlage experimentell überprüft. Untersucht werden nacheinander die Parametrierung des Farbsensors (Schwellenwerte) und Erkennungsleistung der beiden Sensoren, das Zeitverhalten des Gesamtsystems, die Dauer des Luftstoßes sowie die Trennleistung im vollständigen Zusammenspiel aller Komponenten.

Alle Versuche sind nach einem einheitlichen Schema aufgebaut. Die Aufgabenstellung begründet, warum der Versuch durchgeführt wird. Die Methode beschreibt das Vorgehen so, dass der Versuch nachvollziehbar und reproduzierbar ist. Unter Ergebnisse werden die Messwerte dargestellt. Die Diskussion bewertet und ordnet die Ergebnisse ein. Zur eindeutigen Bezeichnung werden die Versuche abschnittsweise nummeriert; die Abschnittsnummer dient zugleich als Versuchsbezeichnung, sodass im weiteren Verlauf auf einzelne Versuche verwiesen und Versuche miteinander verglichen werden können (z. B. Versuch 5.2).

5.1 Überprüfung der gewählten Schwellenwerte

Aufgabenstellung

Die Zuverlässigkeit der Farberkennung und damit der automatischen Ausschleusung hängt wesentlich von den gewählten Schwellenwerten ab. Sind diese zu hoch oder zu niedrig gewählt, können grüne Glasstücke nicht erkannt oder weiße Glasstücke fälschlicherweise als Grünglas bewertet werden. Eine zuverlässige Trennung der Glasstücke wäre in diesem Fall nicht möglich. Ziel dieses Versuchs ist es daher, die in Kapitel 4 festgelegten Schwellenwerte anhand von Messdaten zu überprüfen. Dazu wird untersucht, wie sich die Messwerte des Farbsensors im Leerlauf sowie beim Vorbeifahren von grünem und weißem Glas verhalten und ob sich diese Zustände mit den gewählten Schwellenwerten eindeutig voneinander unterscheiden lassen.

Methode

Zur Erfassung der Messwerte wurde der Arduino UNO R4 WiFi über die USB-C-Schnittstelle mit einem Laptop verbunden. Die Werte der einzelnen Farbkanäle wurden während des Betriebs über die serielle Schnittstelle der Arduino IDE ausgegeben.

Die Messreihen wurden unter konstanten Versuchsbedingungen durchgeführt. Sensorposition, Beleuchtung, Abstand zwischen Sensor und Förderband sowie die Förderbandgeschwindigkeit blieben während aller Versuche unverändert. Die Glasstücke wurden einzeln manuell auf das Förderband aufgelegt und nacheinander durch den Erfassungsbereich geführt.

Da in diesem Versuch nicht die Erkennungsleistung des Farbsensors, sondern ausschließlich der Einfluss von Grün- und Weißglas auf die Messwerte untersucht wird, konnte so die Veränderung der einzelnen Farbkanäle für jedes Glasstück eindeutig erfasst und mit den Leerlaufmessungen verglichen werden.

Insgesamt werden drei Versuche durchgeführt.

Versuch 1 – Leerlauf: Der Sensor wird zweimal zu unterschiedlichen Zeitpunkten jeweils eine Minute lang ohne Glasstück im Messbereich betrieben. Währenddessen werden die Messwerte des Blau- und Grünkanals kontinuierlich aufgezeichnet. Ziel ist die Untersuchung der Messwertschwankungen im Leerlauf. Während der gesamten Messung befindet sich kein Glasstück im Erfassungsbereich des Farbsensors.

Versuch 2 – Einfluss von Grünglas: Anschließend werden 20 grüne Glasstücke nacheinander über das Förderband geführt. Die Glasstücke unterscheiden sich hinsichtlich ihrer Größe, Dicke und Intensität der Grünfärbung. Für die Auswertung werden ausschließlich Glasstücke berücksichtigt, die während der Messung sicher erkannt wurden, da in diesem Versuch ausschließlich der Einfluss von Grünglas auf die beiden Farbkanäle untersucht wird.



Abbildung 7: Verwendete Grünglasstücke für Versuch 5.1

Versuch 3 – Einfluss von Weißglas: Abschließend werden 20 weiße Glasstücke unter denselben Randbedingungen untersucht. Auch hier werden die Verläufe des Blau- und Grünkanals aufgezeichnet und mit den Messungen von Grünglas sowie dem Leerlauf verglichen.



Abbildung 8: Verwendete Weißglasstücke für Versuch 5.1

Ergebnisse

Versuch 1: Leerlaufmessungen

Die Messreihen des Blaukanals während des Leerlaufs sind in Abbildung 9 und Abbildung 10 dargestellt. Die Messwerte liegen überwiegend bei 142,86 und zeigen nur vereinzelt kurzzeitige Abweichungen.

Tabelle 1: Auswertung der Leerlaufmessungen des Blaukanals

Messreihe	Messdauer	Anzahl Messungen	Grundwert	Abweichung 161,90	Abweichung 178,56
1	ca. 1 min	300	142,86	18	10
2	ca. 1 min	300	142,86	17	8

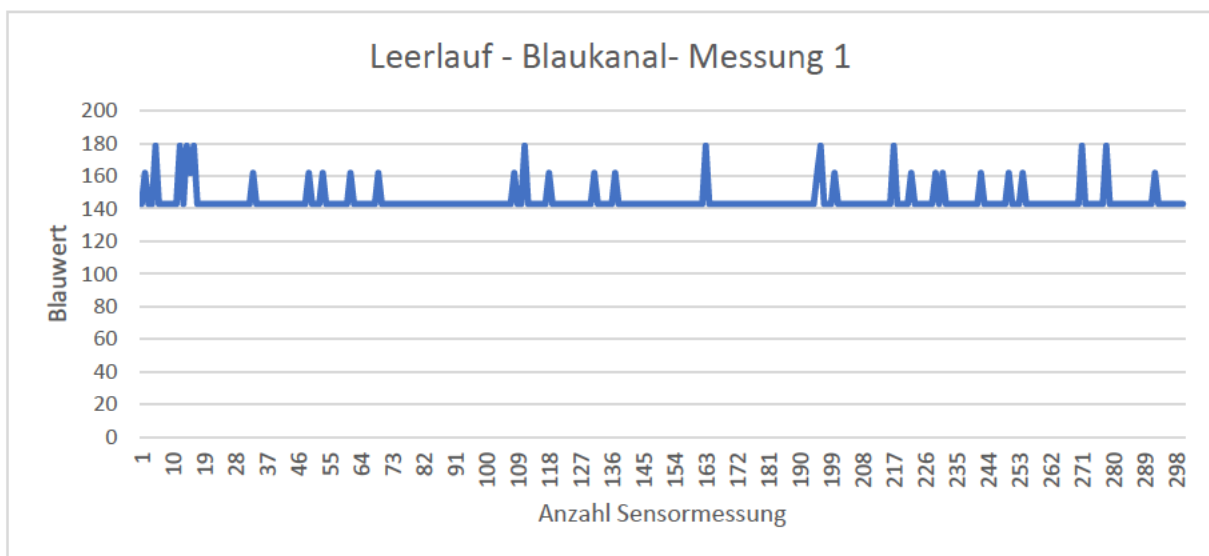


Abbildung 10: Messreihe 1 des Blaukanals im Leerlauf

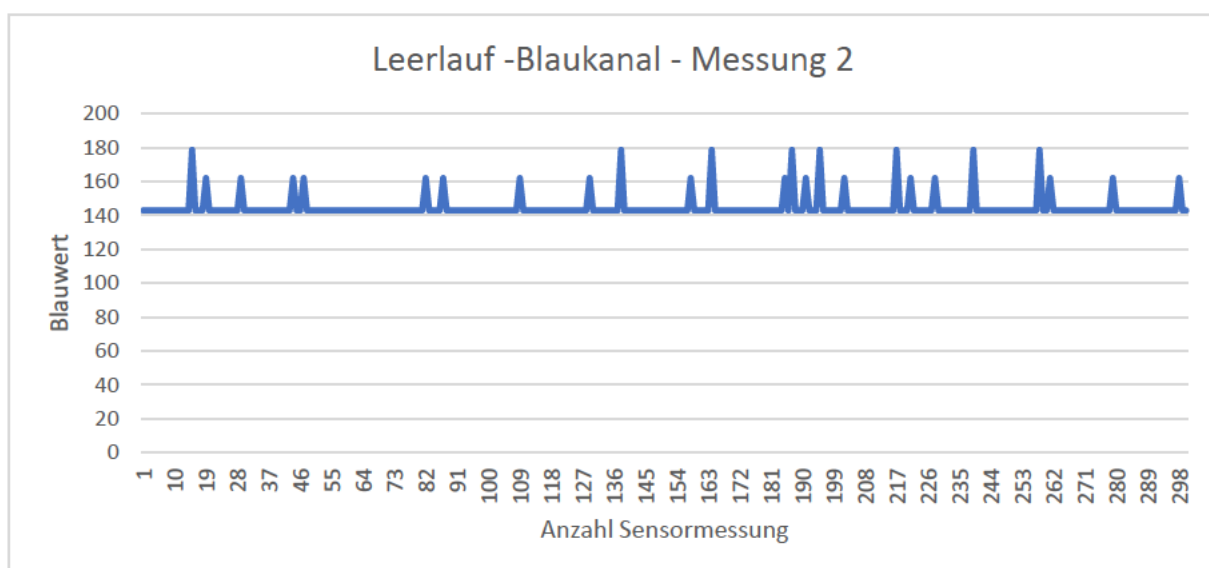


Abbildung 9: Messreihe 2 des Blaukanals im Leerlauf

Die Messreihen des Grünkanals während des Leerlaufs sind in Abbildung 11 und Abbildung 12 dargestellt. Der Messwert liegt überwiegend bei 125,00 und weist insgesamt geringere Schwankungen auf als der Blaukanal.

Tabelle 2: Auswertung der Leerlaufmessungen des Grünkanals

Messreihe	Messdauer	Anzahl Messungen	Messwert	Grundwert	Abweichung 130,95	Abweichung 138,89
1	ca. 1 min	300	125,00	125,00	10	5
2	ca. 1 min	300	125,00	125,00	8	4

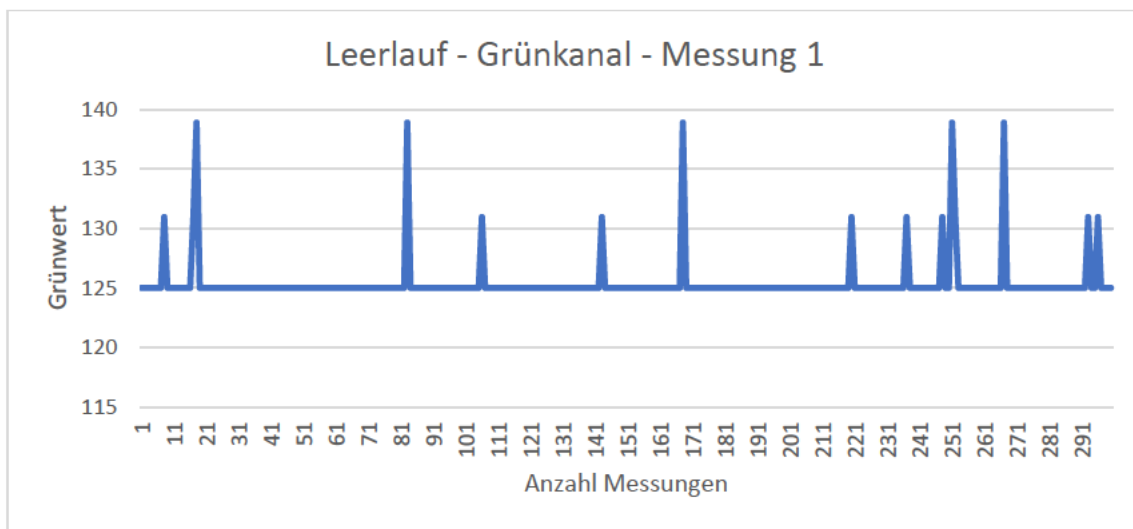


Abbildung 11: Messreihe 1 des Grünkanals im Leerlauf

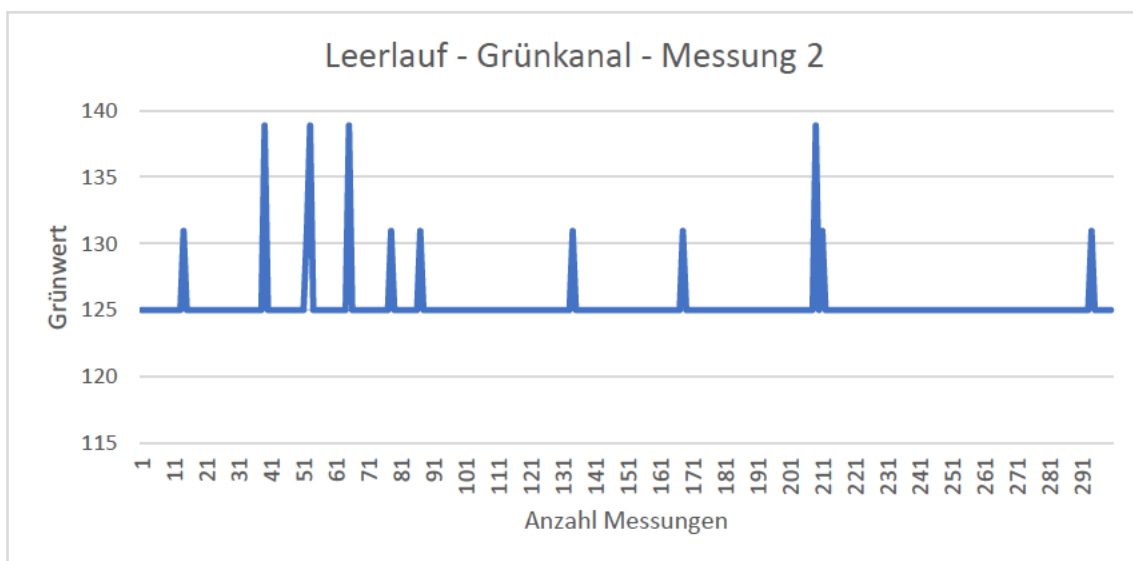


Abbildung 12: Messreihe 2 des Grünkanals im Leerlauf

Versuch 2: Einfluss von Grünglas auf den Blau- und Grünkanal bei konstanten Leerlaufwerten

Die Messverläufe des Blaukanals und des Grünkanals sind in den Abbildungen 13 und 14 dargestellt. Die zugehörigen Messwerte sind in Tabelle 3 zusammengefasst.

Tabelle 3: Messergebnisse bei 20 Grünglasmessungen

Messung	Blaukanal	Grünkanal
1	111,11	100,00
2	111,11	103,70
3	90,91	100,00
4	103,70	103,70
5	110,09	100,00
6	111,11	103,70
7	95,24	100,00
8	107,14	111,70
9	100,00	100,00
10	109,09	103,70
11	92,59	100,00
12	111,11	103,70
13	105,26	100,00
14	98,04	111,70
15	111,11	100,00
16	93,46	100,00
17	108,11	103,70
18	101,69	100,00
19	96,15	103,70
20	110,09	100,00

Im Blaukanal werden Messwerte zwischen 90,91 und 111,11 erfasst. Im Grünkanal liegen die Messwerte zwischen 100,00 und 111,70.

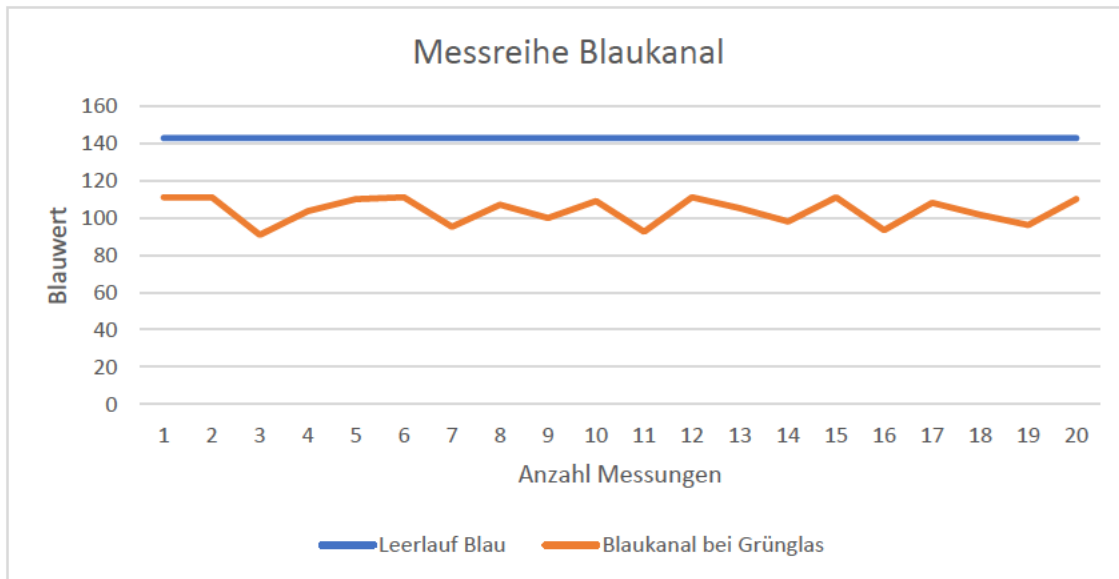


Abbildung 13: Blaukanalmesswerte bei Grünglas im Vergleich zum Leerlauf

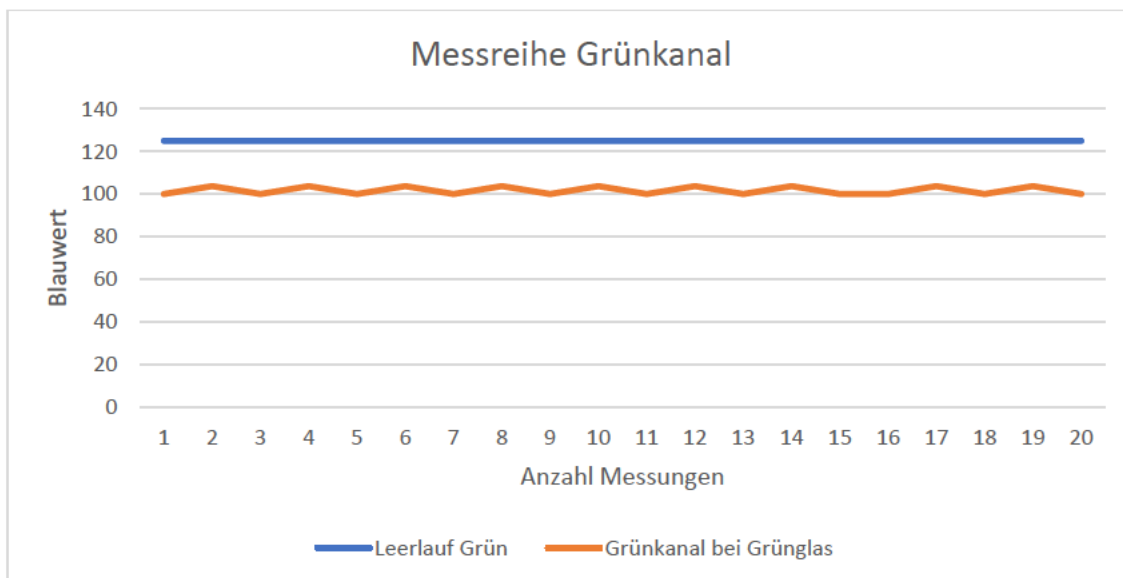


Abbildung 14: Grünnkanalmesswerte bei Grünglas im Vergleich zum Leerlauf

Zur Gegenüberstellung der Messwerte werden die Leerlaufwerte und die Mittelwerte der Grünglasmessungen miteinander verglichen. Die berechneten Werte sind in Tabelle 4 zusammengefasst.

Tabelle 4: Vergleich der Messwerte im Leerlauf und bei Grünglas

Kennwert	Blaukanal	Grünnkanal
Leerlaufwert	142,86	125,00
Mittlerer Messwert bei Grünglas	103,86	102,465
Mittlere Änderung zum Leerlauf	-39,00	-22,535
Relative Änderung zum Leerlauf	-27,3 %	-18,03 %

Versuch 3: Einfluss von Weißglas auf den Blau- und Grünkanal

Während aller 20 Weißglasmessungen bleiben die Messwerte im Blaukanal konstant bei 142,86 und im Grünkanal konstant bei 125,00. Unabhängig von der Größe der Weißglasstücke werden keine Änderungen der Messwerte erfasst.

Diskussion

Die Leerlaufmessungen zeigen, dass beide Farbkanäle während der Messung überwiegend konstante Werte liefern. Die wenigen Abweichungen können beispielsweise durch kleine Änderungen der Umgebungsbeleuchtung, Schwankungen der Stromversorgung oder das allgemeine Messverhalten des Farbsensors entstehen. Im Blaukanal liegt der Messwert überwiegend bei 142,86, im Grünkanal bei 125,00. Die wenigen Ausreißer liegen ausschließlich oberhalb dieser Werte (161,90 bzw. 178,56 im Blaukanal sowie 130,95 bzw. 138,89 im Grünkanal). Da die Ausreißer ausschließlich oberhalb der Leerlaufwerte auftreten, werden die festgelegten Schwellenwerte nicht erreicht. Dadurch erkennt der Sensor im Leerlauf kein Grünglas und es treten keine Fehlmessungen auf.

Die Messungen mit Grünglas zeigen, dass sich beide Farbkanäle gegenüber dem Leerlauf verändern. Besonders deutlich ist die Änderung im Blaukanal. Der mittlere Messwert sinkt von 142,86 auf 103,86 und damit um 39,00 Einheiten beziehungsweise 27,3 %. Im Grünkanal sinkt der Mittelwert von 125,00 auf 102,465 und damit um 22,535 Einheiten beziehungsweise 18,03 %. Die Änderung im Blaukanal ist damit etwa 1,7-mal größer als im Grünkanal. Dies ist auch in den Abbildungen 13 und 14 gut zu erkennen. Die Messwerte des Blaukanals liegen für Leerlauf und Grünglas deutlich weiter auseinander als die Messwerte des Grünkanals. Dadurch lässt sich Grünglas über den Blaukanal besser vom Leerlauf unterscheiden. Dadurch lässt sich Grünglas über den Blaukanal deutlich besser vom Leerlauf unterscheiden. Der Grünkanal verändert sich ebenfalls und dient als zusätzliche Bestätigung der Erkennung.

Die Messungen mit Weißglas zeigen, dass sich die Messwerte weder im Blaukanal noch im Grünkanal verändern. Unabhängig von Größe und Form der Glasstücke bleiben beide Kanäle auf ihren Leerlaufwerten. Dadurch wird Weißglas nicht fälschlicherweise als Grünglas erkannt. Gleichzeitig können die Schwellenwerte nah an den Leerlaufwerten festgelegt werden. Dadurch werden auch kleinere oder schwächer gefärbte Grünglasstücke erfasst, ohne dass Weißglas zu Fehlmessungen oder einer unerwünschten Ausschleusung führt.

Insgesamt bestätigen die drei Versuche die gewählten Schwellenwerte. Die Leerlaufmessungen zeigen nur wenige und unkritische Abweichungen, Grünglas verursacht eine deutliche Änderung der Messwerte und Weißglas verändert die Messwerte nicht. Die festgelegten Schwellenwerte stellen damit einen guten Kompromiss dar. Sie sind empfindlich genug, um auch kleinere oder schwächer gefärbte Grünglasstücke zu erkennen, und gleichzeitig sicher genug, damit Weißglas oder der Leerlauf nicht fälschlicherweise als Grünglas erkannt werden.

5.2 Erkennungsleistung des Farbsensors

Aufgabenstellung

Nach der Parametrierung ist zu prüfen, wie zuverlässig der Farbsensor grüne Glasstücke unter realitätsnahen Bedingungen tatsächlich erkennt. Ziel des Versuchs ist die quantitative Bestimmung der Erkennungsrate, um beurteilen zu können, ob das Sensorsignal als Grundlage für die automatische Ausschleusung geeignet ist.

Methode

Es wurden zwei Versuchsreihen mit jeweils 50 Glasstücken durchgeführt, davon 25 grüne und 25 weiße. Die Glasstücke wurden von Hand mit einem Abstand von etwa 3 cm auf das Förderband gelegt, das während der gesamten Versuche mit konstanter Geschwindigkeit lief. Die Reihenfolge von grünen und weißen Glasstücken wurde zufällig gewählt, um die Bedingungen einer späteren Anwendung nachzubilden. Die Glasstücke unterschieden sich bewusst in Größe, Dicke, Form und Intensität der Grünfärbung. Für jede Versuchsreihe wird erfasst, wie viele der 25 grünen Glasstücke vom Sensor erkannt werden. Zusätzlich wird überprüft, ob die 25 weißen Glasstücke keine Erkennung auslösen.



Abbildung 15: Verwendete Glasstücke für Versuch 5.2

Ergebnisse

In der ersten Versuchsreihe erkannte der Farbsensor 21 der 25 grünen Glasstücke; vier grüne Glasstücke wurden nicht erkannt. In der zweiten Versuchsreihe wurden 19 der 25 grünen Glasstücke erkannt und sechs nicht erkannt. Bei den nicht erkannten Stücken handelte es sich in beiden Reihen überwiegend um kleinere und heller gefärbte Glasstücke. Keines der insgesamt 50 weißen Glasstücke wird fälschlicherweise als Grünglas erkannt.



Abbildung 16: Zählerstand nach Versuchsreihe 1

Tabelle 5: Ergebnisse der Grünglaserkennung in den Versuchsreihen 1 und 2

Ergebnis	Versuchsreihe 1	Versuchsreihe 2
Grünglas gesamt	25	25
Grünglas erkannt	21	19
Grünglas nicht erkannt	4	6
davon kleine Glasstücke	4	5

Über beide Versuchsreihen wurden 50 grüne Glasstücke untersucht, von denen 40 korrekt erkannt wurden. Daraus ergibt sich eine Erkennungsrate von

$$\text{Erkennungsrate} = \frac{40}{50} \cdot 100 = 80 \%.$$

Diskussion

Der Farbsensor erkennt grünes Glas mit einer Erkennungsrate von 80 % grundsätzlich zuverlässig. Die nicht erkannten Glasstücke waren überwiegend klein, dünn oder nur schwach grün gefärbt. Dadurch verändern sich die Messwerte im Blau- und Grünkanal nur gering und die festgelegten Schwellenwerte werden teilweise nicht erreicht. Außerdem befinden sich die Glasstücke nur sehr kurz im Messbereich des Sensors. Besonders kleine Glasstücke können dadurch teilweise nicht vollständig erfasst werden oder den Messbereich bereits wieder verlassen, bevor eine eindeutige Messwertänderung erfolgt. Die Ergebnisse aus Versuch 5.1 zeigen jedoch, dass die gewählten Schwellenwerte grundsätzlich geeignet sind und Leerlauf sowie Weißglas zuverlässig von Grünglas getrennt werden. Die Erkennungsrate wird daher nicht nur von den Schwellenwerten, sondern auch von den Eigenschaften der Glasstücke und der kurzen Messzeit beeinflusst. Die ermittelte Erkennungsrate dient gleichzeitig als Bezugswert für die anschließenden Trennversuche.

5.3 Erkennungsleistung der Lichtschranke

Aufgabenstellung

Als farbumabhängige Triggerquelle muss die Lichtschranke jedes vorbeifahrende Glasstück sicher erfassen. Ziel des Versuchs ist die Bestimmung ihrer Erkennungsrate, um sie mit dem Farbsensor vergleichen und ihre Eignung für Zähl- und Ausschleusaufgaben bewerten zu können.

Methode

Der Versuch wurde unter denselben Bedingungen wie Versuch 5.2 durchgeführt. Es wurden zwei Versuchsreihen mit jeweils 50 Glasstücken untersucht, die mit einem Abstand von etwa 3 cm von Hand auf das mit konstanter Geschwindigkeit laufende Förderband gelegt wurden. Da die Lichtschranke ausschließlich die Unterbrechung des Lichtstrahls auswertet, ist die Glasfarbe für die Erkennung ohne Bedeutung. Für jede Versuchsreihe wurde die vom zugehörigen Zähler erfasste Anzahl mit der tatsächlichen Anzahl der Glasstücke verglichen.

Ergebnisse

In der ersten Versuchsreihe erfasste die Lichtschranke 45 der 50 Glasstücke, in der zweiten 47 der 50. Die nicht erfassten Glasstücke waren überwiegend klein.

Tabelle 6: Ergebnisse der Lichtschrankenerkennung in den Versuchsreihen 1 und 2

Ergebnis	Versuchsreihe 1	Versuchsreihe 2
Glasstücke gesamt	50	50
Glasstücke erkannt	45	47
Glasstücke nicht erkannt	5	3
Erkennungsrate	90 %	94 %

Über beide Reihen wurden 100 Glasstücke untersucht, von denen 92 korrekt erfasst wurden:

$$\text{Erkennungsrate} = \frac{92}{100} \cdot 100 = 92 \, \%.$$

Diskussion

Mit 92 % erreicht die Lichtschranke eine höhere Erkennungsrate als der Farbsensor (80 %, Versuch 5.2). Da sie unabhängig von der Glasfarbe arbeitet und lediglich auf die Unterbrechung des Lichtstrahls reagiert, ist ihr Signal eindeutig und benötigt keine Auswertung von Farbwerten. Die wenigen Nichterkennungen bei sehr kleinen Glasstücken fallen demgegenüber gering aus. Die Lichtschranke eignet sich damit besonders für Zählaufgaben und für festgelegte Ausschleusstrategien wie das gezielte Ausschleusen jedes zweiten Glasstücks.

5.4 Zeitverhalten des Systems

Aufgabenstellung

Für eine zuverlässige Ausschleusung genügt es nicht, ein Glasstück zu erkennen; der Luftstoß muss zusätzlich genau dann ausgelöst werden, wenn sich das Glasstück im Wirkungsbereich der Düse befindet. Zwischen Erkennung und Ausschleusung laufen jedoch mehrere Schritte ab: Das Sensorsignal wird verarbeitet, über WLAN und MQTT an Home Assistant übertragen, dort ausgewertet und anschließend das Magnetventil geschaltet, während sich das Glasstück weiterbewegt. Ziel des Versuchs ist es, die verfügbare Laufzeit des Glasstücks bis zur Düse sowie die Systemverzögerung bis zum wirksamen Luftstoß zu bestimmen und zu bewerten, ob die verfügbare Zeit für eine rechtzeitige Ausschleusung ausreicht. Untersucht werden drei Zeitabschnitte: die Laufzeit vom Farbsensor bis zur Düse, die Laufzeit von der Lichtschranke bis zur Düse und die Systemverzögerung.

Methode

Die Zeitmessung erfolgte mit der Zeitlupenfunktion eines Smartphones, das Bewegungen mit erhöhter Bildrate aufzeichnet und langsamer wiedergibt, sodass auch kurze Zeitabschnitte auswertbar werden. Die reale Aufnahme dauerte etwa 4 bis 5 Sekunden, das erzeugte Zeitlupenvideo etwa 15 Sekunden; daraus ergibt sich ein Verlangsamungsfaktor zwischen 3,0 und 3,75. Die reale Zeit wurde nach der Beziehung

$$\text{Reale Zeit} = \frac{\text{Zeit im Zeitlupenvideo}}{\text{Verlangsamungsfaktor}}$$

berechnet. Für die Laufzeit vom Farbsensor bis zur Düse wurde im Video der Zeitpunkt, an dem das Glasstück den Sensor passiert, und der Zeitpunkt, an dem es sich unmittelbar vor der Düse befindet, bestimmt. Analog wurde für die Lichtschranke der Zeitpunkt der Strahlunterbrechung und das Erreichen der Düse ausgewertet. Für die Systemverzögerung diente als Startpunkt der Moment der Sensorerkennung – im Video am Hochzählen des Counters bzw. am Start der Automation erkennbar – und als Endpunkt der Moment, in dem der Luftstoß an der Düse wirksam wird.

Ergebnisse

Der Farbsensor befindet sich etwa in der Mitte der Rutsche, sodass bis zur Düse nur ein kurzer Weg von rund 10 cm verbleibt. Im Zeitlupenvideo beträgt dieser Abschnitt etwa 1,5 s, woraus sich bei einem Faktor von 3,0 eine reale Laufzeit von 0,50 s und bei einem Faktor von 3,75 eine Laufzeit von 0,40 s ergibt.

Tabelle 7: Ermittlung der Laufzeit vom Farbsensor zur Düse

Laufzeit Farbsensor → Düse	Wert
Position des Farbsensors	ca. Mitte der Rutsche
Restweg bis zur Düse	ca. 10 cm
Zeit im Zeitlupenvideo	ca. 1,5 s
Verlangsamungsfaktor	ca. 3,0–3,75
Reale Laufzeit	ca. 400–500 ms

Die Lichtschranke ist am Ende des Förderbandes vor dem Übergang zur Rutsche montiert; das Glasstück wird dadurch früher erkannt und muss anschließend den Rest des Förderbandes sowie die gesamte Rutsche bis zur Düse zurücklegen. Im Zeitlupenvideo beträgt dieser Abschnitt etwa 3,3 bis 4,1 s, was einer realen Laufzeit von rund 1100 ms entspricht ($3,3 \text{ s} / 3,0 = 1,10 \text{ s}$; $4,1 \text{ s} / 3,75 = 1,09 \text{ s}$).

Tabelle 8: Ermittlung der Laufzeit von der Lichtschranke zur Düse

Laufzeit Lichtschranke → Düse	Wert
Position der Lichtschranke	Ende des Förderbandes vor der Rutsche
Zeit im Zeitlupenvideo	ca. 3,3–4,1 s
Verlangsamungsfaktor	ca. 3,0–3,75
Reale Laufzeit	ca. 1100 ms

Die Systemverzögerung umfasst die Signalverarbeitung, die Übertragung an Home Assistant, die Ausführung der Automation und das Schalten des Magnetventils bis zum Aufbau des Luftstoßes. Im Zeitlupenvideo beträgt dieser Abschnitt etwa 2,4 bis 3,0 s und ergibt in beiden Grenzfällen eine reale Verzögerung von 0,80 s ($2,4 \text{ s} / 3,0 = 0,80 \text{ s}$; $3,0 \text{ s} / 3,75 = 0,80 \text{ s}$).

Tabelle 9: Ermittlung der Systemverzögerung

Ermittlung der Systemverzögerung	Wert
Startpunkt	Sensorerkennung / Counter erhöht sich
Endpunkt	Luftstoß an der Düse
Zeit im Zeitlupenvideo	ca. 2,4–3,0 s
Verlangsamungsfaktor	ca. 3,0–3,75
Reale Systemverzögerung	ca. 800 ms

Aus dem Vergleich der verfügbaren Laufzeiten mit der Systemverzögerung ergibt sich die jeweilige zeitliche Reserve als Differenz aus verfügbarer Laufzeit und Verzögerung. Für den Farbsensor ist diese Reserve negativ, für die Lichtschranke positiv.

Tabelle 10: Vergleich der verfügbaren Laufzeiten mit der Systemverzögerung

Trigger- quelle	Verfügbare Lauf- zeit	Systemverzöge- rung	Zeitliche Re- serve	Bewertung
Farbsensor	400–500 ms	800 ms	–400 bis –300 ms	nicht ausrei- chend
Licht- schranke	1000–1100 ms	800 ms	+200 bis +300 ms	ausreichend

Diskussion

Die Messungen zeigen einen deutlichen Unterschied zwischen den beiden Triggerquellen. Beim Farbsensor ist die Systemverzögerung von rund 800 ms größer als die verfügbare Laufzeit von 400 bis 500 ms; der Luftstoß wird daher erst ausgelöst, nachdem das Glasstück den Ausschleusbereich bereits erreicht oder wieder verlassen hat. Eine zuverlässige Ausschleusung ist mit dem Farbsensor unter diesen Bedingungen somit nicht möglich. Die geringe zeitliche Reserve ist dabei nicht auf die Farberkennung zurückzuführen, sondern auf die kurze Strecke zwischen Sensor und Düse in Verbindung mit der großen Systemverzögerung. Bei der Lichtschranke verbleibt nach Abzug der Verzögerung dagegen eine positive Reserve von 200 bis 300 ms, sodass der Luftstoß rechtzeitig ausgelöst werden kann. Diese Ergebnisse lassen erwarten, dass die Trennleistung mit der Lichtschranke deutlich besser ausfällt als mit dem Farbsensor; überprüft wird dies in den Versuchen 5.6 und 5.7.

5.5 Bestimmung der Luftstoßdauer

Aufgabenstellung

Neben dem Zeitpunkt beeinflusst auch die Dauer des Luftstoßes die Trennqualität. Ist der Luftstoß zu kurz, wird das Glasstück nicht ausreichend abgelenkt und verfehlt den vorgesehenen Behälter; bleibt das Ventil zu lange geöffnet, können nachfolgende Glasstücke miterfasst werden. Ziel des Versuchs ist es, für beide Triggerquellen eine geeignete Luftstoßdauer zu bestimmen, die ein sicheres Ausschleusen ermöglicht, ohne nachfolgende Glasstücke zu beeinflussen.

Methode

Die Luftstoßdauer wurde nicht berechnet, sondern experimentell bestimmt. Dazu wurden verschiedene Öffnungsdauern des Magnetventils eingestellt und praktisch getestet. Für jeden getesteten Wert wurden 50 Glasstücke unterschiedlicher Größe, Form und Farbe mit einem Abstand von etwa 3 cm von Hand auf das Förderband gelegt. Während der Durchläufe wurde beobachtet, ob alle vorgesehenen Glasstücke zuverlässig ausgeschleust wurden und ob dabei nachfolgende Glasstücke unbeabsichtigt vom Luftstrom erfasst wurden. Der jeweils geeignete Wert wurde für den Farbsensor und die Lichtschranke getrennt ermittelt, da sich die Wege zwischen Erkennung und Düse unterscheiden.

Ergebnisse

Für die Lichtschranke erwies sich eine Luftstoßdauer von 1000 ms als geeignet. Bei der Überprüfung mit 50 Glasstücken wurde kein Glasstück aufgrund einer zu kurzen Luftstoßdauer verpasst, und gleichzeitig wurde kein nachfolgendes Glasstück unbeabsichtigt erfasst. Die vergleichsweise lange Dauer ist erforderlich, weil die Glasstücke nach der frühen Erkennung durch die Lichtschranke einen längeren Weg über Förderband und Rutsche zurücklegen und die Düse durch unterschiedliche Glasformen und Reibungsverhältnisse nicht immer zum exakt gleichen Zeitpunkt erreichen.

Für den Farbsensor genügte eine Luftstoßdauer von 500 ms. Auch hier wurde bei 50 getesteten Glasstücken kein Stück verpasst und kein nachfolgendes Glasstück durch einen zu langen Luftstoß beeinflusst. Aufgrund des kurzen Weges zwischen Sensor und Düse fallen die zeitlichen Schwankungen der Ankunft geringer aus, sodass eine kürzere Luftstoßdauer ausreicht.

Tabelle 11: Ergebnisse der Untersuchung zur Luftstoßdauer

Trigger- quelle	Geeignete Luftstoß- dauer	Getestete Glasstü- cke	Verpasst / nachfolgend er- fasst
Licht- schranke	1000 ms	50	keine / keine
Farbsensor	500 ms	50	keine / keine

Diskussion

Die Ergebnisse zeigen, dass die geeignete Luftstoßdauer unmittelbar von der Position der Triggerquelle abhängt. Die frühe Erkennung durch die Lichtschranke erfordert wegen des längeren und stärker streuenden Weges eine längere Luftstoßdauer, während der kurze Weg beim Farbsensor eine kürzere Dauer erlaubt. Beide ermittelten Werte stellen unter den gewählten Bedingungen – insbesondere dem Glasstückabstand von etwa 3 cm – einen geeigneten Kompromiss zwischen sicherer Ausschleusung und Schonung nachfolgender Glasstücke dar. Bei deutlich geringerem Abstand müssten die Werte neu bewertet werden.

5.6 Auswahl der Ausschleusdüse

Aufgabenstellung

Die pneumatische Ausschleusung trifft die Glasstücke nur dann zuverlässig, wenn der Luftstrahl einen ausreichend großen Bereich abdeckt. Da sich Lage und Bahn der Glasstücke auf der Rutsche von Durchlauf zu Durchlauf leicht unterscheiden und die Ankunft an der Düse entsprechend streut (vgl. Versuch 5.4 und 5.5), muss die Düse so gewählt werden, dass auch bei kleinen Lageabweichungen getroffen wird. Ziel dieses Versuchs ist es, aus mehreren Düsenbauformen diejenige mit dem größten Wirkungsbereich zu bestimmen und für die anschließenden Trennversuche festzulegen.

Methode

Es wurden drei Düsen mit unterschiedlicher Austrittsgeometrie nacheinander an der Ausschleuseinheit montiert und unter sonst gleichen Bedingungen erprobt: eine Runddüse mit 0,5 cm Durchmesser, eine Runddüse mit 1 cm Durchmesser sowie eine Flachdüse mit 3 cm Austrittsbreite. Für jede Düse wurden Glasstücke unterschiedlicher Größe, Form und Lage mit einem Abstand von etwa 3 cm von Hand auf das mit konstanter Geschwindigkeit laufende Förderband gelegt und der Luftstoß ausgelöst. Der Kompressor Druck sowie die Position von Düse und Behälter wurden während der Versuche konstant gehalten, sodass sich die beobachteten Unterschiede allein auf die Düsengeometrie zurückführen lassen. Bewertet wurde, wie zuverlässig die Glasstücke vom Luftstrahl erfasst und abgelenkt wurden und wie empfindlich das Ergebnis auf Lageabweichungen der Glasstücke reagierte.

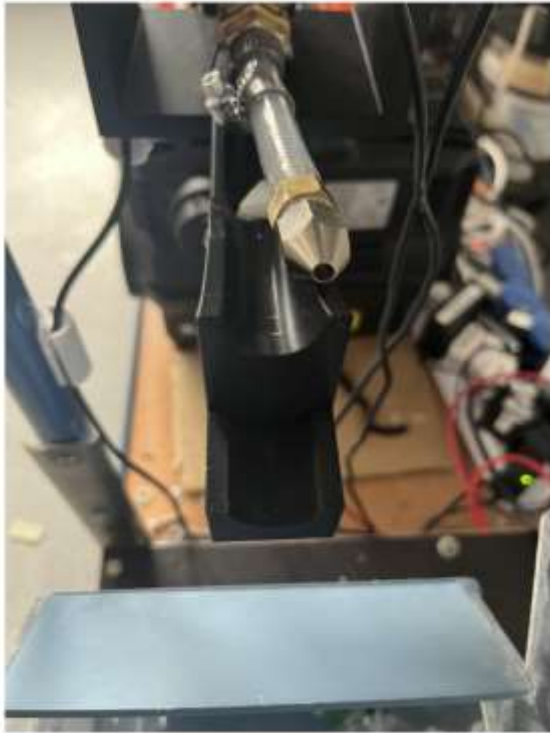


Abbildung 17: Rundstrahldüse mit 0,5 cm Austrittsöffnung



Abbildung 18: Verwendete Flachdüse (3 cm)

Ergebnisse

Die Runddüse mit 0,5 cm Durchmesser erzeugte einen stark gebündelten Luftstrahl, der nur einen kleinen Bereich abdeckte. Bereits geringe Lageabweichungen der Glasstücke führten dazu, dass der Luftstoß sein Ziel verfehlte. Die Runddüse mit 1 cm Durchmesser vergrößerte den Wirkbereich geringfügig, reagierte jedoch weiterhin empfindlich auf unterschiedliche Bewegungen der Glasstücke; gegenüber der kleineren Runddüse ergab sich keine wesentliche Verbesserung. Die Flachdüse mit 3 cm Breite deckte durch den breiteren Luftstrahl einen deutlich größeren Bereich ab und erfasste die Glasstücke auch dann zuverlässig, wenn diese ihre Lage während der Bewegung leicht veränderten.

Tabelle 12: Vergleich der untersuchten Düsen

Düse	Austrittsgeometrie	Wirkbereich	Trefferverhalten
Runddüse Ø 0,5 cm	stark gebündelt	sehr klein	verfehlt schon bei geringer Lageabweichung
Runddüse Ø 1 cm	gebündelt	klein	kaum besser, weiterhin empfindlich
Flachdüse 3 cm	breiter Strahl	groß	erfasst auch bei Lageabweichung → gewählt

Diskussion

Die Ergebnisse zeigen, dass ein breiterer Luftstrahl die Trefferwahrscheinlichkeit deutlich erhöht, weil er die unvermeidbare Streuung in Lage und Bahn der Glasstücke ausgleicht. Die Flachdüse stellt damit den besten Kompromiss zwischen einem großen Wirkbereich und einer gezielten Ausschleusung dar und wird für alle nachfolgenden Trennversuche (Versuch 5.8 und 5.9) verwendet. Eine vollständige Vermeidung von Fehltreffern ist jedoch auch mit der Flachdüse nicht möglich, da einzelne Glasstücke rotieren oder seitlich versetzt an der Düse vorbeilaufen können; dieser verbleibende Einfluss wird in Abschnitt 6.2 aufgegriffen.

5.7 Optimierung der Düsen- und Behälterposition

Aufgabenstellung

Neben der Düsenbauform beeinflusst auch die Anordnung von Düse und Auffangbehälter, ob ein Glasstück tatsächlich im vorgesehenen Behälter landet. Bereits kleine Änderungen der Höhe und des Abstands wirken sich auf die Flugbahn und damit auf die Trennung aus. Ziel des Versuchs ist es, eine Position zu finden, bei der ausgeschleuste Glasstücke zuverlässig den zweiten Behälter erreichen, während nicht ausgeschleuste Glasstücke im ersten Behälter verbleiben. Zusätzlich wird geprüft, ob sich die in Versuch 5.4 festgestellte zu kurze Reaktionszeit des Farbsensors durch eine rein mechanische Vergrößerung der Fallstrecke ausgleichen lässt.



Abbildung 19: Mechanische Optimierung in 4 Positionen der Düsen- und Behälterposition

Methode

Es wurden nacheinander vier Anordnungen von Düse und Behälter untersucht. Zur Bewertung der mechanischen Trennung (Positionen 1 bis 3) wurde die Lichtschranke als Triggerquelle verwendet, da diese nach den Ergebnissen aus Versuch 5.4 über eine ausreichende Reaktionszeit verfügt; dadurch spiegelt das Trennergebnis die Geometrie der Anordnung wider und nicht die Systemverzögerung. Je Position wurden 50 Glasstücke mit einem Abstand von etwa 3 cm von Hand auf das mit konstanter Geschwindigkeit laufende Förderband gelegt, wobei jedes zweite erkannte Glasstück ausgeschleust wurde (ideale Verteilung: 25 zu 25). Erfasst wurde die Verteilung auf beide Behälter; die Trennqualität ergibt sich aus dem Anteil der 25 vorgesehenen Glasstücke, die den zweiten Behälter erreichten.

Die vierte Anordnung diente einer anderen Fragestellung: Hier wurde die Düse gezielt tiefer gesetzt, um die Fallstrecke und damit die verfügbare Zeit für den Farbsensor zu vergrößern. Diese Position wurde daher mit dem Farbsensor als Triggerquelle und 50 grünen Glasstücken erprobt. Zusätzlich wurde die verfügbare Zeit zwischen Farbsensorerkennung und Düse erneut mit der in Versuch 5.4 beschriebenen Zeitlupenmethode gemessen.

Ergebnisse

Position 1 – Ausgangszustand. Der Düsenhalter befand sich direkt an der Behälterkante, die Behälteroberkante etwa 45 cm über dem Boden. Viele Glasstücke wurden zwar vom Luftstoß getroffen, prallten anschließend jedoch gegen die Trennwand zwischen den beiden Behältern und fielen in den ersten Behälter zurück. Von den 25 vorgesehenen Glasstücken erreichten nur 5 den zweiten Behälter:

$$\text{Trennqualität} = \frac{5}{25} \cdot 100 = 20 \, \%.$$

Position 2 – Behälter abgesenkt. Die Behälteroberkante wurde auf etwa 33 cm abgesenkt, wodurch sich der Abstand zwischen Düsenhalter und Behälterkante auf rund 12 cm vergrößerte. Die Kollisionen mit der Behälterkante traten nun kaum noch auf. Gleichzeitig gelangten jedoch viele Glasstücke bereits ohne Luftstoß in den zweiten Behälter; die Verteilung betrug 8 zu 42 Glasstücke. Diese Anordnung trennt somit nicht nach erfolgter Ausschleusung, sondern lässt einen Großteil des Materials unkontrolliert in den zweiten Behälter fallen, und ist daher ungeeignet.

Position 3 – optimierter Kompromiss. Die Behälteroberkante wurde auf etwa 41 cm angehoben, der Abstand zwischen Düsenhalter und Behälterkante betrug rund 4 cm. Glasstücke ohne Luftstoß fielen überwiegend in den ersten Behälter, während ausgeschleuste Glasstücke den zweiten Behälter zuverlässig erreichten. Die Verteilung betrug 28 zu 22 Glasstücke:

$$\text{Trennqualität} = \frac{22}{25} \cdot 100 = 88 \, \%.$$

Position 4 – Vergrößerung der Fallstrecke. Um die Reaktionszeit für den Farbsensor zu verlängern, wurde die Düse um etwa 8 cm nach unten versetzt und der Behälter entsprechend angepasst; der Abstand zwischen Rutschenende und Düse vergrößerte sich dadurch von etwa 4 cm auf rund 12 cm. Die erneute Zeitmessung ergab eine Zunahme der verfügbaren Zeit von etwa 350 bis 400 ms auf 450 bis 500 ms, entsprechend einem Zeitgewinn von rund 100 ms.

Trotz dieser Verlängerung erreichten bei einem Versuch mit 50 grünen Glasstücken nur 3 Glasstücke den zweiten Behälter.

Tabelle 13: Vergleich der untersuchten Behälterpositionen

Position	Behälteroberkante	Abstand Düse–Kante bzw. Rutschenende	Triggerquelle	Verteilung (B1 : B2)	Trennqualität
1 – Ausgangszustand	ca. 45 cm	an der Kante	Lichtschranke	45 : 5	20 %
2 – abgesenkt	ca. 33 cm	ca. 12 cm	Lichtschranke	8 : 42	ungeeignet
3 – Kompromiss	ca. 41 cm	ca. 4 cm	Lichtschranke	28 : 22	88 % → gewählt
4 – Fallstrecke vergrößert	Düse 8 cm tiefer	ca. 12 cm	Farbsensor	47 : 3	nur 3/50

Diskussion

Die Versuche zeigen, dass die Anordnung von Düse und Behälter einen erheblichen Einfluss auf die Trennung besitzt. Position 1 scheitert an der Kollision mit der Trennwand, Position 2 an unkontrolliert in den zweiten Behälter fallendem Material; erst Position 3 stellt mit einer Trennqualität von 88 % einen tragfähigen Kompromiss dar und wird für die Trennversuche mit der Lichtschranke (Versuch 5.9) übernommen. Position 4 belegt, dass sich das Zeitproblem des Farbsensors mechanisch nicht sinnvoll lösen lässt: Die Absenkung um 8 cm bringt nur etwa 100 ms zusätzliche Zeit, während nach den Ergebnissen aus Versuch 5.4 mehrere Hundert Millisekunden fehlen. Der Farbsensor schleust daher auch nach der mechanischen Anpassung nur 3 von 50 Glasstücken aus. Eine überschlägige Abschätzung, welche Fallstrecke rechnerisch nötig wäre und warum sie sich praktisch nicht umsetzen lässt, wird in der Diskussion in Abschnitt 6.1 vorgenommen.

5.8 Trennversuche mit dem Farbsensor

Aufgabenstellung

Nach der Optimierung des Farbsensors und der Einrichtung der automatischen Ausschleusung ist die Gesamtfunktion der Anlage zu bewerten. Untersucht wird nicht mehr allein die Farberkennung, sondern die vollständige Prozesskette von der Erkennung eines grünen Glasstücks über die automatische Auslösung in Home Assistant bis zur pneumatischen Ausschleusung. Ziel ist es, die tatsächlich erreichte Trennqualität zu bestimmen und mit der Erkennungsleistung aus Versuch 5.2 zu vergleichen.

Methode

Am Kompressor wurde ein Druck von 2,5 bar eingestellt und in Home Assistant der Farbsensor als Triggerquelle ausgewählt, sodass jede erkannte Grünglasscherbe automatisch einen Luftstoß auslöste. Es wurden zwei Versuchsreihen mit jeweils 50 Glasstücken durchgeführt, davon 25 grüne und 25 weiße, die mit einem Abstand von etwa 3 cm in zufälliger Reihenfolge von Hand auf das mit konstanter Geschwindigkeit laufende Förderband gelegt wurden. Die Luftstoßdauer entsprach dem in Versuch 5.5 ermittelten Wert von 500 ms. Nach jedem Durchlauf wurde erfasst, wie viele grüne Glasstücke erkannt wurden und wie sich weiße und grüne Glasstücke auf die beiden Behälter verteilten. Bei idealer Trennung befänden sich anschließend 25 weiße Glasstücke im ersten und 25 grüne Glasstücke im zweiten Behälter.

Ergebnisse

In der ersten Versuchsreihe erkannte der Farbsensor 21 der 25 grünen Glasstücke (84 %). Nach dem Durchlauf befanden sich im ersten Behälter alle 25 weißen sowie 22 grüne Glasstücke, im zweiten Behälter lediglich 3 grüne Glasstücke. Von den 21 erkannten grünen Glasstücken wurden damit nur 3 erfolgreich ausgeschleust, was einer Ausschleusquote von 14,3 % entspricht. In der zweiten Versuchsreihe wurden 20 der 25 grünen Glasstücke erkannt (80 %); im zweiten Behälter landeten nur 2 grüne Glasstücke, entsprechend einer Ausschleusquote von 10 %.

Tabelle 14: Ergebnisse der Versuchsreihen 1 und 2 der Gesamtanlage (Farbsensor)

Versuchsreihe 1 (Farbsensor)	Anzahl
Grünglas erkannt	21 von 25 (84 %)
Behälter 1 – Weißglas	25
Behälter 1 – Grünglas	22
Behälter 2 – Grünglas	3
Ausschleusquote	$3 / 21 = 14,3 \%$
Versuchsreihe 2 (Farbsensor)	Anzahl
Grünglas erkannt	20 von 25 (80 %)
Behälter 1 – Weißglas	25
Behälter 1 – Grünglas	23
Behälter 2 – Grünglas	2
Ausschleusquote	$2 / 20 = 10 \%$

Über beide Reihen wurden 41 der 50 grünen Glasstücke erkannt (82 %), von denen insgesamt nur 5 erfolgreich ausgeschleust wurden (Ausschleusquote $5 / 41 = 12,2 \%$). Für die Trennqualität wird die tatsächliche Ausschleusung mit der idealen Trennung von 25 grünen Glasstücken je Versuch verglichen. In der ersten Reihe beträgt die Abweichung 22 Glasstücke, in der zweiten 23:

$$\text{Trennqualität}_1 = \frac{25 - 22}{25} \cdot 100 = 12 \%, \text{Trennqualität}_2 = \frac{25 - 23}{25} \cdot 100 = 8 \%.$$

Daraus ergibt sich eine mittlere Trennqualität von $(12 \% + 8 \%) / 2 = 10 \%$.

Diskussion

Die Farberkennung arbeitet mit 82 % zuverlässig, die tatsächliche Trennung erreicht jedoch nur eine Trennqualität von 10 %. Dieser deutliche Unterschied bestätigt die in Versuch 5.4 ermittelten Zeitverhältnisse: Der Farbsensor erkennt zwar die meisten grünen Glasstücke, die verfügbare Laufzeit von 400 bis 500 ms reicht aber nicht aus, um den Luftstoß innerhalb der Systemverzögerung von 800 ms rechtzeitig auszulösen. Die geringe Trennqualität ist damit nicht auf eine unzureichende Farberkennung zurückzuführen, sondern auf die zu große Systemverzögerung im Verhältnis zur kurzen Laufzeit zwischen Farbsensor und Düse.

5.9 Trennversuche mit der Lichtschranke

Aufgabenstellung

Abschließend wird die Gesamtfunktion mit der Lichtschranke als Triggerquelle untersucht. Da die Lichtschranke nicht zwischen Glasfarben unterscheidet, wird hierbei jedes zweite erkannte Glasstück ausgeschleust. Ziel ist es, die erreichte Trennqualität zu bestimmen und mit den Ergebnissen des Farbsensors aus Versuch 5.8 zu vergleichen.

Methode

Es wurden zwei Versuchsreihen mit jeweils 50 Glasstücken durchgeführt, davon 25 grüne und 25 weiße, die mit einem Abstand von etwa 3 cm in zufälliger Reihenfolge von Hand auf das mit konstanter Geschwindigkeit laufende Förderband gelegt wurden. Als Triggerquelle diente die Lichtschranke, wobei die in Kapitel 4 beschriebene Automation jedes zweite erkannte Glasstück ausschleuste. Die Luftstoßdauer entsprach dem in Versuch 5.5 ermittelten Wert von 1000 ms. Nach jedem Durchlauf wurde die Verteilung der Glasstücke auf die beiden Behälter erfasst. Da die Glasfarbe hierbei keine Rolle spielt, entspricht die ideale Trennung einer gleichmäßigen Verteilung von je 25 Glasstücken auf beide Behälter.

Ergebnisse

In der ersten Versuchsreihe erfasste die Lichtschranke 48 der 50 Glasstücke (96 %), woraus sich bei jedem zweiten Glasstück eine theoretische Anzahl von 24 auszuschleusenden Stücken ergibt. Nach dem Durchlauf befanden sich 32 Glasstücke im ersten und 18 im zweiten Behälter; damit wurden 18 der theoretisch 24 Glasstücke ausgeschleust (Ausschleusquote 75 %). In der zweiten Versuchsreihe wurden 47 der 50 Glasstücke erfasst (94 %); die Verteilung betrug 34 zu 16 Glasstücken, entsprechend einer Ausschleusquote von 66,7 %.

Tabelle 15: Ergebnisse der Versuchsreihen 1 und 2 der Gesamtanlage (Lichtschränke)

Versuchsreihe 1 (Lichtschränke)	Anzahl
Glasstücke erkannt	48 von 50 (96 %)
Theoretisch auszuschleusen	24
Behälter 1	32
Behälter 2	18
Ausschleusquote	18 / 24 = 75 %
Versuchsreihe 2 (Lichtschränke)	Anzahl
Glasstücke erkannt	47 von 50 (94 %)
Theoretisch auszuschleusen	24
Behälter 1	34
Behälter 2	16
Ausschleusquote	16 / 24 = 66,7 %

Über beide Reihen wurden 95 der 100 Glasstücke erkannt (95 %). Für die Trennqualität wird die tatsächliche Verteilung mit der idealen Verteilung von 25 Glasstücken je Behälter verglichen. In der ersten Reihe beträgt die Abweichung 7 Glasstücke, in der zweiten 9:

$$\text{Trennqualität}_1 = \frac{25 - 7}{25} \cdot 100 = 72 \%, \text{Trennqualität}_2 = \frac{25 - 9}{25} \cdot 100 = 64 \%.$$

Daraus ergibt sich eine mittlere Trennqualität von $(72 \% + 64 \%) / 2 = 68 \%$.

Diskussion

Mit einer Erkennungsrate von 95 % und einer mittleren Trennqualität von 68 % erzielt die Lichtschränke ein deutlich besseres Trennergebnis als der Farbsensor (10 %, Versuch 5.8). Dieses Ergebnis bestätigt erneut die Zeitmessungen aus Versuch 5.4: Durch die längere Laufzeit von rund 1100 ms zwischen Lichtschränke und Düse steht genügend Zeit zur Verfügung, um die Systemverzögerung von 800 ms auszugleichen und den Luftstoß rechtzeitig auszulösen. Die Lichtschränke eignet sich unter den gewählten Versuchsbedingungen damit deutlich besser als Triggerquelle für die automatische Ausschleusung. Der verbleibende Abstand zur idealen Trennung ist im Wesentlichen auf die vereinzelt Nichterkennungen sowie auf die verbleibende Streuung der Ankunftszeiten an der Düse zurückzuführen.

6. Diskussion

Nachdem in Kapitel 5 die Einzelergebnisse der Sensor-, Zeit- und Trennversuche dargestellt wurden, werden diese Ergebnisse im Folgenden zusammenführend interpretiert und im Hinblick auf die Aufgabenstellung dieser Arbeit bewertet. Die Diskussion gliedert sich in drei Teile: Zunächst werden die Ergebnisse eingeordnet und die Ursachen der beobachteten Trennleistung herausgearbeitet. Anschließend werden die Grenzen und Schwachstellen der Versuchsanlage kritisch betrachtet. Abschließend werden aus den Erkenntnissen konkrete Ansätze für die Weiterentwicklung der Anlage abgeleitet.

6.1 Einordnung der Ergebnisse

Im Mittelpunkt dieser Arbeit steht nicht die Entwicklung einer vollständig ausgereiften Sortieranlage mit fehlerfreier Erkennung und perfekter Trennleistung. Die Versuchsanlage wurde bereits im Rahmen studentischer Projekte aufgebaut und verfügt über die grundlegenden Komponenten einer automatisierten Sortieranlage. Die automatische Verbindung zwischen Sensorerkennung und pneumatischer Ausschleusung war zu Beginn der Arbeit jedoch nicht vorhanden. Die zentrale Frage lautete daher, ob eine automatische Kommunikation zwischen Sensor und Aktor aufgebaut werden kann, sodass ein erkanntes Glasstück selbstständig einen Luftstoß auslöst und eine automatische Ausschleusung grundsätzlich möglich wird.

Die Ergebnisse zeigen, dass dieses Ziel erreicht wurde. Beide untersuchten Triggerquellen liefern ausreichend zuverlässige Erkennungssignale: Der Farbsensor erreicht in den Trennversuchen eine Erkennungsrate von 82 %, die Lichtschranke eine Erkennungsrate von 95 %. Beide Sensoren eignen sich damit grundsätzlich als Auslöser für eine automatische Ausschleusung. Entscheidend ist jedoch nicht die reine Erkennung, sondern das Zusammenspiel der gesamten Prozesskette. Die Versuche belegen, dass die Kommunikation zwischen Sensor, Mikrocontroller, MQTT-Broker, Home Assistant und Magnetventil zuverlässig funktioniert: Wird ein Glasstück erkannt, wird die zugehörige Automation ausgeführt und das Magnetventil ohne Eingriff des Bedieners angesteuert. Damit gelingt erstmals die automatische Verknüpfung zwischen Sensor und Aktor, die zu Beginn der Arbeit fehlte. Die eigentliche Aufgabenstellung dieser Arbeit ist somit erfüllt.

Bei der Trennleistung zeigt sich hingegen ein deutlicher Unterschied zwischen den beiden Triggerquellen. Mit der Lichtschranke wird eine mittlere Trennqualität von 68 % erreicht, mit dem Farbsensor dagegen nur 10 %. Dieser Unterschied ist das zentrale Ergebnis der Arbeit und bedarf einer genaueren Interpretation, denn er beruht nicht auf einer unterschiedlichen Erkennungsleistung der beiden Sensoren. Im Gegenteil: Der Farbsensor erkennt mit 82 % den überwiegenden Teil der grünen Glasstücke zuverlässig, und auch die Kommunikation und die Ventilansteuerung arbeiten in beiden Fällen fehlerfrei. Die geringe Trennqualität des Farbsensors ist somit weder auf die Farberkennung noch auf die Automatisierung zurückzuführen.

Die Ursache erschließt sich aus den Zeitmessungen in Abschnitt 5.4. Zwischen der Erkennung durch den Farbsensor und dem Erreichen der Düse stehen lediglich 400 bis 500 ms zur Verfügung, während die gemessene Systemverzögerung des Gesamtsystems etwa 800 ms beträgt. Die verfügbare Laufzeit ist damit kleiner als die Reaktionszeit des Systems; die zeitliche Reserve ist negativ. Der Luftstoß wird zwar korrekt ausgelöst, erreicht das Glasstück jedoch

häufig erst, nachdem dieses den Ausschleusbereich bereits passiert hat. Bei der Lichtschranke liegen die Verhältnisse umgekehrt: Durch die frühere Erkennung am Ende des Förderbandes steht eine Laufzeit von etwa 1100 ms zur Verfügung, die über der Systemverzögerung von 800 ms liegt. Es verbleibt eine positive Reserve von 200 bis 300 ms, sodass das Magnetventil rechtzeitig angesteuert wird. Die deutlich höhere Trennqualität der Lichtschranke bestätigt diesen Zusammenhang unmittelbar. Der beobachtete Leistungsunterschied ist damit vollständig durch die verfügbare Reaktionszeit erklärbar und nicht durch die Qualität der Erkennung.

Diese Interpretation wird durch die Positionsversuche in Abschnitt 5.7 gestützt. Dort wurde untersucht, ob sich die für den Farbsensor zu kurze Reaktionszeit durch eine mechanische Anpassung verlängern lässt, indem die Düse um etwa 8 cm nach unten versetzt wird. Die Auswertung ergab, dass sich die verfügbare Zeit dadurch von etwa 350 bis 400 ms auf 450 bis 500 ms erhöht, was einem Zeitgewinn von rund 100 ms entspricht. Überträgt man dieses Verhältnis überschlägig auf die noch fehlende Zeit, so ergibt sich aus dem Zusammenhang von etwa 8 cm zusätzlicher Fallstrecke je 100 ms Zeitgewinn für die fehlenden 300 bis 400 ms ein zusätzlicher Weg von rund 24 bis 32 cm. Die Düse müsste damit gegenüber der günstigsten gefundenen Position nochmals um diesen Betrag abgesenkt werden, woraus sich ein Gesamtabstand von etwa 36 bis 44 cm zwischen Rutschenende und Düse ergäbe. Diese Abschätzung stellt keine exakte Berechnung dar, sondern eine überschlägige Extrapolation der Messdaten. Sie verdeutlicht jedoch, dass sich die erforderliche Verlängerung der Reaktionszeit mit dem vorhandenen Aufbau nicht sinnvoll umsetzen lässt. Die mechanische Optimierung allein kann das Zeitproblem des Farbsensors somit nicht lösen.

Aus der Zusammenschau der Ergebnisse ergibt sich damit die wesentliche Erkenntnis dieser Arbeit: Die begrenzende Größe der automatischen Ausschleusung ist nicht die Sensorik, sondern die Systemverzögerung, die maßgeblich durch die gewählte Steuerungsarchitektur bestimmt wird. Das Sensorsignal nimmt auf dem Weg über WLAN, MQTT-Broker und Home Assistant bis zur Ventilansteuerung einen vergleichsweise langen und nicht auf minimale Reaktionszeiten ausgelegten Weg. Solange die verfügbare Laufzeit eines Glasstücks größer ist als diese Verzögerung – wie bei der Lichtschranke – arbeitet die automatische Ausschleusung zuverlässig. Unterschreitet die Laufzeit die Verzögerung – wie beim Farbsensor – ist eine rechtzeitige Ausschleusung nicht möglich. Neben dieser zeitlichen Einschränkung wird zugleich deutlich, dass auch die mechanischen Randbedingungen der Anlage die Trennqualität beeinflussen, da Größe, Form und Lage der Glasstücke ihren Bewegungsablauf auf der Rutsche und damit den Zeitpunkt des Erreichens der Düse verändern. Diese Aspekte werden im folgenden Abschnitt systematisch betrachtet.

6.2 Grenzen und Schwachstellen der Versuchsanlage

Die durchgeführten Versuche zeigen, dass die Anlage Glasstücke grundsätzlich automatisch erkennen und ausschleusen kann. Gleichzeitig werden mehrere Schwachstellen sichtbar, die die Trennqualität begrenzen und eine vollständig zuverlässige Trennung verhindern.

Förderband und Glastransport: Obwohl das Förderband mit konstanter Geschwindigkeit betrieben wird, bewegt es sich insbesondere bei niedrigen Geschwindigkeiten nicht vollkommen gleichmäßig. Dadurch erreichen die Glasstücke den Ausschleusbereich nicht immer zum exakt gleichen Zeitpunkt. Verstärkt wird dieser Effekt durch die unterschiedlichen Größen, Formen

und Lagen der Glasstücke: Während einige gerade durch die Anlage gleiten, drehen sich andere oder verändern ihre Position beim Übergang auf die Rutsche. Diese zeitlichen Schwankungen erschweren eine exakte Auslösung des Luftstoßes. Zusätzlich können dicht hintereinander liegende oder sich teilweise überdeckende Glasstücke gemeinsam erkannt oder nicht eindeutig erfasst werden.

Farbsensor: Trotz der in Abschnitt 5.1 durchgeführten Optimierung bleibt die Erkennung des Farbsensors von den Eigenschaften der Glasstücke abhängig. Kleine, dünne oder nur schwach grün gefärbte Glasstücke verändern die Messwerte nur geringfügig und werden daher nicht in jedem Fall sicher erkannt, wie die Erkennungsrate von 80 % in Abschnitt 5.2 belegt. Da der Sensor nach dem Prinzip der reflektierten Lichtmessung arbeitet, reagiert er zudem weiterhin auf Fremdlicht; die Abschirmung des Messbereichs reduziert diesen Einfluss deutlich, kann ihn aber nicht vollständig ausschließen. Eine weitere Einschränkung ergibt sich aus der Sensorposition auf der geneigten Rutsche: Die Glasstücke bewegen sich dort mit hoher Geschwindigkeit und befinden sich nur kurz im Messbereich, sodass insbesondere kleine Glasstücke den Sensor passieren können, bevor genügend Messwerte für eine sichere Erkennung vorliegen.

Lichtschranke: Die Lichtschranke arbeitet in den Versuchen insgesamt zuverlässig, besitzt jedoch ebenfalls Grenzen. Auch sie reagiert empfindlich auf infrarotes Fremdlicht, das während der Versuche lediglich durch eine provisorische Abschirmung reduziert wurde. Darüber hinaus müssen Sender und Empfänger exakt zueinander ausgerichtet sein; bereits kleine Verschiebungen können dazu führen, dass der Lichtstrahl den Empfänger nicht mehr zuverlässig erreicht und Glasstücke nicht erkannt werden.

Zeitliche Abstimmung zwischen Sensor und Düse: Die größte Schwachstelle der Anlage ist die zeitliche Abstimmung zwischen Erkennung und Ausschleusung. Wie in Abschnitt 5.4 gezeigt und in Abschnitt 6.1 eingeordnet, reicht die verfügbare Zeit zwischen der Erkennung eines Glasstücks und dem Erreichen der Düse beim Farbsensor für den aktuellen Anlagenaufbau nicht aus. Das Glasstück erreicht den Ausschleusbereich häufig, bevor der Luftstoß wirksam wird. Diese Einschränkung wirkt sich unmittelbar auf die Trennqualität aus und ist die Hauptursache für das schwache Trennergebnis des Farbsensors. Die Ursache liegt dabei nicht in der Sensorik oder der Software, sondern in der zu kurzen verfügbaren Reaktionszeit im Verhältnis zur Systemverzögerung.

Pneumatische Ausschleusung: Schließlich besitzt auch die pneumatische Ausschleusung selbst Grenzen. Die Flugbahn der Glasstücke ist nicht bei jedem Durchlauf identisch; Glasstücke können rotieren, springen oder seitlich versetzt durch die Anlage laufen und befinden sich beim Erreichen der Düse daher nicht immer im optimalen Bereich des Luftstrahls. Der Einsatz der Flachdüse vergrößert den Wirkungsbereich des Luftstoßes zwar deutlich und verbessert die Trefferwahrscheinlichkeit, wie in Abschnitt 5.6 gezeigt; vollständig vermeiden lassen sich Fehl-treffer jedoch auch damit nicht.

6.3 Verbesserungspotenziale

Aus den beschriebenen Schwachstellen lassen sich mehrere Ansätze für die Weiterentwicklung der Versuchsanlage ableiten. Die folgenden Vorschläge bauen direkt auf den Ergebnissen dieser Arbeit auf und zielen darauf ab, die Erkennungs- und Trennleistung weiter zu verbessern.

Optimierung der Steuerungsarchitektur: Da die Ergebnisse die Systemverzögerung als wesentliche Begrenzung identifizieren, besitzt die Steuerungsarchitektur das größte Verbesserungspotenzial. In der aktuellen Umsetzung erfolgt die Ansteuerung des Magnetventils nicht direkt durch den Sensor, sondern über Home Assistant als zentrale Steuerungseinheit. Erkennt der Farbsensor ein grünes Glasstück, sendet der Mikrocontroller ein Signal über das WLAN an Home Assistant, das die Automation ausführt und anschließend einen Befehl über das WLAN an den Mikrocontroller des Magnetventils sendet. Das Signal wird somit zweimal über das WLAN übertragen und zusätzlich von Home Assistant verarbeitet. Die dabei entstehenden Verzögerungen sind nicht konstant und können sich durch die Auslastung des WLANs oder gleichzeitig laufende Automationen verändern, sodass die Reaktionszeit nur schwer vorhersehbar ist. Eine naheliegende Weiterentwicklung besteht darin, Sensor und Aktor direkt miteinander zu verbinden, sodass das Sensorsignal unmittelbar an den Mikrocontroller des Magnetventils weitergegeben wird und der Umweg über WLAN und Home Assistant entfällt. Die für die Ausschleusung erforderliche Verzögerungszeit ginge dabei nicht verloren, sondern könnte direkt im Programm des Aktors hinterlegt werden: Nach Eingang des Sensorsignals würde der Mikrocontroller die eingestellte Wartezeit abwarten und anschließend das Ventil für die gewünschte Dauer öffnen. Sowohl die Verzögerungszeit als auch die Luftstoßdauer blieben als Parameter anpassbar. Durch den Wegfall unnötiger Kommunikationswege ließe sich die Reaktionszeit verkürzen und zugleich zuverlässiger vorhersagen, was besonders bei den kurzen Zeitfenstern des Farbsensors die Trennqualität deutlich verbessern könnte.

Optimierung der Sensorposition und Anlagengeometrie: Eng damit verbunden ist die Position des Farbsensors innerhalb der Anlage. Der Sensor befindet sich derzeit auf der Rutsche und damit nahe an der Düse, sodass nach der Erkennung nur wenig Zeit für die Signalverarbeitung und die Auslösung des Luftstoßes verbleibt. Ein Verlagern des Sensors weiter vor die Düse – etwa direkt auf das Förderband oder an den Übergang zwischen Förderband und Rutsche – würde das Glasstück früher erfassen und die verfügbare Reaktionszeit vergrößern, ähnlich wie es bei der Lichtschranke bereits der Fall ist. Zusätzlich könnte die Geometrie der Rutsche angepasst werden: Eine flachere Neigung würde die Geschwindigkeit der Glasstücke verringern und dadurch sowohl die verfügbare Reaktionszeit als auch die Verweildauer im Messbereich verlängern, was die Farberkennung stabilisieren und die Voraussetzungen für eine zuverlässigere Ausschleusung verbessern würde.

Weiterentwicklung der Farberkennung: Die Versuche zeigen, dass der eingesetzte TCS3200-Farbsensor grüne Glasstücke grundsätzlich erkennen kann, die Erkennung jedoch von Größe, Form und Farbintensität abhängt. Eine mögliche Weiterentwicklung besteht im Einsatz eines industriellen Farbsensors, beispielsweise des SICK CSS High Resolution, der für industrielle Farberkennungsaufgaben ausgelegt ist und über eine integrierte RGB-LED-Beleuchtung sowie verschiedene Teach-in-Verfahren verfügt [19]. Für die vorliegende Anwendung könnte Grünglas als Referenzfarbe eingelernt werden; der Sensor würde jedes vorbeifahrende Glasstück mit der eingelernten Farbe vergleichen und bei Übereinstimmung ein digitales Schaltsignal ausgeben [19]. Da bereits der TCS3200 über einen digitalen Ausgang mit

dem Mikrocontroller verbunden ist, ließe sich ein industrieller Farbsensor grundsätzlich ohne größere Änderungen in die bestehende Steuerung integrieren.

Einsatz eines Kamerasystems: Alternativ könnte ein kamerabasiertes Erkennungssystem, etwa auf Basis eines Raspberry Pi Camera Module 3, eine Weiterentwicklung darstellen. Im Gegensatz zum Farbsensor wird dabei nicht nur ein einzelner Messpunkt erfasst, sondern ein Bild des gesamten Glasstücks aufgenommen, sodass die Farbe über eine größere Fläche bewertet werden kann – ein Vorteil insbesondere bei kleinen oder unregelmäßig geformten Glasstücken [20]. Die Kamera könnte oberhalb des Förderbandes montiert und die aufgenommenen Bilder in Verbindung mit einer gleichmäßigen Beleuchtung mithilfe einer Bildverarbeitungsbibliothek wie OpenCV ausgewertet werden, um Glasstücke automatisch als Grün- oder Weißglas zu klassifizieren [20] [21]. Dem stünden allerdings ein höherer technischer Aufwand sowie zusätzliche Anforderungen an Beleuchtung, Rechenleistung und Softwareentwicklung gegenüber.

Optimierung der Glasführung: Da die Flugbahn der Glasstücke die Ausschleusung wesentlich beeinflusst, könnte eine zusätzliche mechanische Führung zwischen Rutsche und Düse die Trennqualität verbessern. Seitliche Führungsschienen oder ein engerer Führungskanal würden die Bewegung der Glasstücke stabilisieren und sie gleichmäßiger an der Düse vorbeiführen. Ergänzend würde eine gleichmäßigere Vereinzelung der Glasstücke – die während der Versuche teilweise sehr dicht hintereinander liefen – sowohl die Erkennung als auch die Ausschleusung verbessern.

Automatisierung der Versuchsauswertung: Im aktuellen Aufbau erfolgt die Auswertung der Trennqualität durch manuelles Auszählen der Glasstücke in den Auffangbehältern, was zeitaufwendig und insbesondere bei vielen Versuchen fehleranfällig ist. Zusätzliche Lichtschranken in den Auffangbehältern könnten die einfallenden Glasstücke automatisch zählen und die Ergebnisse direkt in Home Assistant anzeigen und speichern. Erkennungsraten, Ausschleusquoten und Trennqualitäten ließen sich dadurch automatisch berechnen und dokumentieren, bei gleichzeitig deutlich geringerem Auswertungsaufwand.

Nutzung beider Farbsensoren: Im aktuellen Aufbau werden zwei Farbsensoren eingesetzt, von denen einer im Wesentlichen der Anzeige und Auswertung der Messwerte dient. Beide Sensoren könnten gezielt für unterschiedliche Aufgaben genutzt werden: Der erste Sensor löst wie bisher die Ausschleusung aus, während der zweite als Kontrollsensor prüft, ob das erkannte Glasstück den weiteren Anlagenbereich tatsächlich passiert hat. Dadurch ließen sich Erkennungs- und Ausschleusrate automatisch vergleichen und wichtige Prozessdaten ohne zusätzlichen manuellen Aufwand erfassen.

Verbesserung der Lichtschranke: Da die Lichtschranke in den Versuchen die besten Ergebnisse erzielt, lohnt sich auch hier eine weitere Optimierung. Für einen dauerhaften Einsatz wäre ein geschlossenes Gehäuse für Sender und Empfänger sinnvoll, das störendes Umgebungslicht dauerhaft reduziert und zugleich über eine stabile mechanische Halterung sicherstellt, dass Sender und Empfänger exakt zueinander ausgerichtet bleiben. Dadurch ließe sich die Zuverlässigkeit der Lichtschranke insbesondere im langfristigen Betrieb weiter erhöhen.

7. Zusammenfassung und Ausblick

Ziel dieser Arbeit war es, die bestehende Versuchsanlage zur optischen Glastrennung so zu erweitern, dass ein erkanntes Glasstück ohne Eingriff des Bedieners automatisch durch einen Luftstoß ausgeschleust wird. Die durchgeführten Untersuchungen zeigen, dass dieses grundlegende Konzept funktioniert: Grünglas kann erkannt und anschließend automatisch ausgeschleust werden. Die zentrale Zielsetzung der Arbeit – der Aufbau einer automatischen Kommunikation zwischen Sensor und Aktor – wurde damit erreicht und praktisch nachgewiesen.

Die wesentlichen Ergebnisse lassen sich wie folgt zusammenfassen. Der Farbsensor wurde ausgehend von einem Zustand mit fortlaufenden Fehlauslösungen so weit optimiert, dass er grüne Glasstücke mit einer Erkennungsrate von rund 80 % zuverlässig erkennt. Ergänzend wurde eine Lichtschranke als farbumabhängige Triggerquelle implementiert, die eine Erkennungsrate von etwa 95 % erreicht. Die automatische Verknüpfung von Sensorik und pneumatischer Ausschleusung wurde über Home Assistant und das Magnetventil umgesetzt und arbeitet zuverlässig. In den Trennversuchen zeigte sich jedoch ein deutlicher Unterschied zwischen den beiden Triggerquellen: Während mit der Lichtschranke eine mittlere Trennqualität von 68 % erreicht wurde, lag sie beim Farbsensor bei lediglich 10 %. Die Analyse der Zeitverhältnisse hat diesen Unterschied eindeutig auf die Systemverzögerung von rund 800 ms zurückgeführt, die beim Farbsensor über der verfügbaren Laufzeit von 400 bis 500 ms liegt, bei der Lichtschranke mit etwa 1100 ms Laufzeit hingegen ausgeglichen werden kann.

Damit ist zugleich die zentrale Erkenntnis dieser Arbeit benannt: Die größte Einschränkung der Anlage ist nicht die Farberkennung, sondern die Systemverzögerung zwischen Sensor und Aktor, die maßgeblich durch die gewählte Steuerungsarchitektur bestimmt wird. Die Versuche zeigen, dass die Trennqualität nicht allein von der Sensorik oder der pneumatischen Ausschleusung abhängt, sondern vom Zusammenspiel des Gesamtsystems: Förderband, Glasführung, Sensorposition, Steuerungsarchitektur und Luftstoß beeinflussen sich gegenseitig, und bereits kleine Änderungen an einer dieser Komponenten können das Verhalten der gesamten Anlage verändern.

Vor diesem Hintergrund liegt die Bedeutung der Anlage nicht darin, ein vollständig ausgereiftes industrielles Sortiersystem darzustellen. Ihr Zweck besteht vielmehr darin, die einzelnen Technologien zu untersuchen und ihr Zusammenspiel unter realitätsnahen Bedingungen zu bewerten. Genau darin liegt ihre Stärke: Sie macht sichtbar, welche Herausforderungen bei einer automatisierten Glastrennung auftreten und welche Faktoren die Trennqualität tatsächlich bestimmen. Ein Vergleich mit industriellen Glassortieranlagen bestätigt die Übertragbarkeit des Ansatzes. Moderne Anlagen erfassen Glasstücke während des Förderprozesses mithilfe optischer Sortiersysteme mit LED-Beleuchtung und farbempfindlichen Kameras in Echtzeit und schleusen sie anschließend über gezielt angesteuerte Druckluftdüsen aus [22]. Das Grundprinzip – Erkennung eines Glasstücks und anschließende pneumatische Ausschleusung – entspricht damit dem der entwickelten Versuchsanlage, die dieses Prinzip erfolgreich im Labormaßstab abbildet.

Für die zukünftige Weiterentwicklung sollte der Fokus daher weniger auf einzelnen Komponenten als auf dem Zusammenspiel des Gesamtsystems liegen. Aus den Ergebnissen ergibt sich als vorrangiger Ansatzpunkt die Steuerungsarchitektur: Da die Systemverzögerung die verfügbare Reaktionszeit und damit die Trennqualität begrenzt, sollten künftige Projekte verstärkt auf direkte Kommunikationswege zwischen Sensor und Aktor oder auf eine gemeinsame

Verarbeitung innerhalb eines einzelnen Mikrocontrollers setzen. Dadurch ließen sich die Reaktionszeiten verkürzen und zuverlässiger vorhersagen, sodass auch der Farbsensor als Triggerquelle nutzbar würde. Eine ausführliche Betrachtung dieses und weiterer Ansätze – etwa zur Sensorposition, zur Farberkennung mittels industrieller Sensoren oder Kamerasysteme sowie zur mechanischen Glasführung – findet sich in Abschnitt 6.3.

Über die Steuerung hinaus bietet auch die weitere Digitalisierung der Anlage Potenzial. Bereits heute ermöglicht Home Assistant eine flexible Steuerung und Parametrierung. Zukünftig könnten zusätzlich Prozessdaten automatisch erfasst und ausgewertet werden, um wichtige Parameter selbstständig an die aktuellen Betriebsbedingungen anzupassen. Ändern sich beispielsweise die Förderbandgeschwindigkeit oder die gemessenen Sensorwerte, könnten Schwellenwerte, Verzögerungszeiten oder die Luftstoßdauer automatisch nachgeregelt werden, sodass eine manuelle Anpassung bei jeder Änderung entfiel und die Anlage dauerhaft mit geeigneten Parametern arbeiten würde. Ergänzend könnte der mechanische Aufbau weiterentwickelt werden: Eine gleichmäßigere Vereinzelung der Glasstücke sowie eine definiertere Führung entlang des Transportwegs könnten die Bewegung der Glasstücke stabilisieren und damit die Voraussetzungen für eine präzisere Trennung schaffen. Gerade industrielle Anlagen zeigen, dass eine reproduzierbare Materialführung einen ebenso großen Einfluss auf die Trennqualität besitzt wie die eigentliche Sensorik.

Insgesamt stellt die entwickelte Versuchsanlage keinen Endpunkt, sondern einen Ausgangspunkt für weitere Entwicklungen dar. Die Arbeit zeigt, dass sich die wesentlichen Funktionen einer automatisierten Glastrennung bereits mit vergleichsweise einfachen und kostengünstigen Komponenten realisieren lassen. Gleichzeitig werden die entscheidenden Einflussgrößen auf die Trennqualität – allen voran die Systemverzögerung und die mechanischen Randbedingungen – identifiziert und bewertet. Die gewonnenen Erkenntnisse bilden damit eine solide Grundlage für zukünftige Arbeiten und die schrittweise Weiterentwicklung der Versuchsanlage.

Literaturverzeichnis

- [1] Umweltbundesamt, „Glas und Altglas,“ 4 November 2025. [Online]. Available: <https://www.umweltbundesamt.de/daten/ressourcen-abfall/verwertung-entsorgung-ausgewaehlter-abfallarten/glas-altglas>. [Zugriff am 9 Juli 2026].
- [2] K. J. Alaameri, A. J. Ramadhan, A. Fatlawi und Z. S. Idan, „Design of a New Sorting Colors System Based on PLC, TIA Portal, and Factory I/O Programs,“ *Open Engineering*, 2024.
- [3] Bundesverband Glasindustrie e. V., „Behälterglas,“ [Online]. Available: <https://www.bvglas.de/ueber-glas/die-branchen/behaelterglas>. [Zugriff am 9 Juli 2026].
- [4] I. S. Arvanitoyannis, „Waste Management in the Food Packaging Industry,“ in *Waste Management for the Food Industries*, Amsterdam, Academic Press, 2008, p. 941–1045.
- [5] United States Environmental Protection Agency (U.S. EPA), „Markets for Recovered Glass,“ United States Environmental Protection Agency, Washington, D.C., 1992.
- [6] G. Maier, R. Gruna, T. Längle und J. Beyerer, „A Survey of the State of the Art in Sensor-Based Sorting Technology and Research,“ *IEEE Access*, 2024.
- [7] E. Adán und A. Adán, „Computer Vision for Glass Waste: Technologies and Sensors,“ *Sensors*, 29 Oktober 2025.
- [8] KEYENCE Deutschland GmbH, „Sensorgrundlagen,“ KEYENCE Deutschland GmbH, [Online]. Available: <https://www.keyence.de/ss/products/sensor/sensorbasics/color/info/>. [Zugriff am 22 Juli 2026].
- [9] ROHM Co., Ltd., „Electronics Basics,“ ROHM Co., Ltd., [Online]. Available: https://www.rohm.de/electronics-basics/sensors/sensor_what7. [Zugriff am 22 Juli 2026].
- [10] SICK AG, „Choose the Right Sensor,“ SICK AG, Waldkirch, Germany, 2013.
- [11] NXP Semiconductors, „Mechatronics – Microcontrollers and Mechatronics,“ NXP Semiconductors, Eindhoven, The Netherlands, 2013.
- [12] Arduino, „Arduino® UNO R4 WiFi,“ Arduino, Turin, Italy, 2023.
- [13] Z. Abidin, R. Ismail und T. Hidayat, „Development of an Automatic Color Sorting Machine on Belt Conveyor,“ in *International Conference on Electrical Engineering, Computer Science and Informatics (EECSI)*, Yogyakarta, Indonesia, 2014.
- [14] ams OSRAM AG, „TCS3200 Programmable Color Light-to-Frequency Converter,“ ams OSRAM AG, 2018.
- [15] G. Halfacree, *Das offizielle Raspberry Pi Handbuch für Anfänger – Lernen Sie Ihren neuen Computer kennen*, Cambridge, United Kingdom: Raspberry Pi Press, 2020.
- [16] Home Assistant, „Home Assistant Documentation,“ [Online]. Available: <https://www.home-assistant.io/docs/>. [Zugriff am 13 Juli 2026].

-
- [17] M. Abdel-Basset, „A conceptual modeling approach of MQTT for IoT-based systems,“ *Journal of Engineering and Applied Science*, pp. 1-16, 2024.
- [18] Adafruit Industries, „IR Breakbeam Sensors,“ 19 April 2013. [Online]. Available: <https://learn.adafruit.com/ir-breakbeam-sensors>. [Zugriff am 10 Juli 2026].
- [19] SICK AG, „Data Sheet – Color Sensor CSS High Resolution, CSS-WBGAD4115AA10Z,“ SICK AG, Waldkirch, Germany, 2023.
- [20] Raspberry Pi Ltd., „Raspberry Pi Camera Module 3 Product Brief,“ Raspberry Pi Ltd., Cambridge, United Kingdom, 2023.
- [21] OpenCV, „OpenCV Documentation,“ 2025. [Online]. Available: <https://docs.opencv.org/4.x/>. [Zugriff am 13 Juli 2026].
- [22] M. Jacoby, „The sensors that make glass recycling possible,“ *Chemical & Engineering News (C&EN)*, Bd. 99, Nr. 28, pp. 20-21, 2021.

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Reflexion des Lichts an unterschiedlich farbigen Oberflächen [9].....	5
Abbildung 2: Versuchsaufbau der Gesamtanlage	11
Abbildung 3: Anschluss der Lichtschranke.....	13
Abbildung 4: Düse zur pneumatischen Ausschleusung	15
Abbildung 5: Benutzeroberfläche der Lichtschranke in Home Assistant.....	23
Abbildung 6: Triggerauswahl der Ausschleusung in Home Assistant	26
Abbildung 7: Verwendete Grünglasstücke für Versuch 5.1	29
Abbildung 8: Verwendete Weißglasstücke für Versuch 5.1	29
Abbildung 10: Messreihe 2 des Blaukanals im Leerlauf.....	30
Abbildung 9: Messreihe 1 des Blaukanals im Leerlauf.....	30
Abbildung 11: Messreihe 1 des Grünkanals im Leerlauf.....	31
Abbildung 12: Messreihe 2 des Grünkanals im Leerlauf.....	31
Abbildung 13: Blaukanalmesswerte bei Grünglas im Vergleich zum Leerlauf	33
Abbildung 14: Grünkanalmesswerte bei Grünglas im Vergleich zum Leerlauf	33
Abbildung 15: Verwendete Glasstücke für Versuch 5.2	35
Abbildung 16: Zählerstand nach Versuchsreihe 1.....	36
Abbildung 17: Rundstrahldüse mit 0,5 cm Austrittsöffnung.....	43
Abbildung 18: Verwendete Flachdüse (3 cm)	43
Abbildung 19: Mechanische Optimierung in 4 Positionen der Düsen- und Behälterposition ..	45
Abbildung 20: Montage der Lichtschranke	61
Tabelle 1: Auswertung der Leerlaufmessungen des Blaukanals	30
Tabelle 2: Auswertung der Leerlaufmessungen des Grünkanals.....	31
Tabelle 3: Messergebnisse bei 20 Grünglasmessungen	32
Tabelle 4: Vergleich der Messwerte im Leerlauf und bei Grünglas	33
Tabelle 5: Ergebnisse der Grünglaserkennung in den Versuchsreihen 1 und 2	36
Tabelle 6: Ergebnisse der Lichtschrankenerkennung in den Versuchsreihen 1 und 2	37
Tabelle 7: Ermittlung der Laufzeit vom Farbsensor zur Düse	39
Tabelle 8: Ermittlung der Laufzeit von der Lichtschranke zur Düse	39
Tabelle 9: Ermittlung der Systemverzögerung	40
Tabelle 10: Vergleich der verfügbaren Laufzeiten mit der Systemverzögerung.....	40
Tabelle 11: Ergebnisse der Untersuchung zur Luftstoßdauer	41
Tabelle 12: Vergleich der untersuchten Düsen	44
Tabelle 13: Vergleich der untersuchten Behälterpositionen.....	47
Tabelle 14: Ergebnisse der Versuchsreihen 1 und 2 der Gesamtanlage (Farbsensor)	48
Tabelle 15: Ergebnisse der Versuchsreihen 1 und 2 der Gesamtanlage (Lichtschranke)	50
Tabelle 16: Verzeichnis der verwendeten KI-basierten Hilfsmittel	62

Anhang

Montage der Lichtschränke

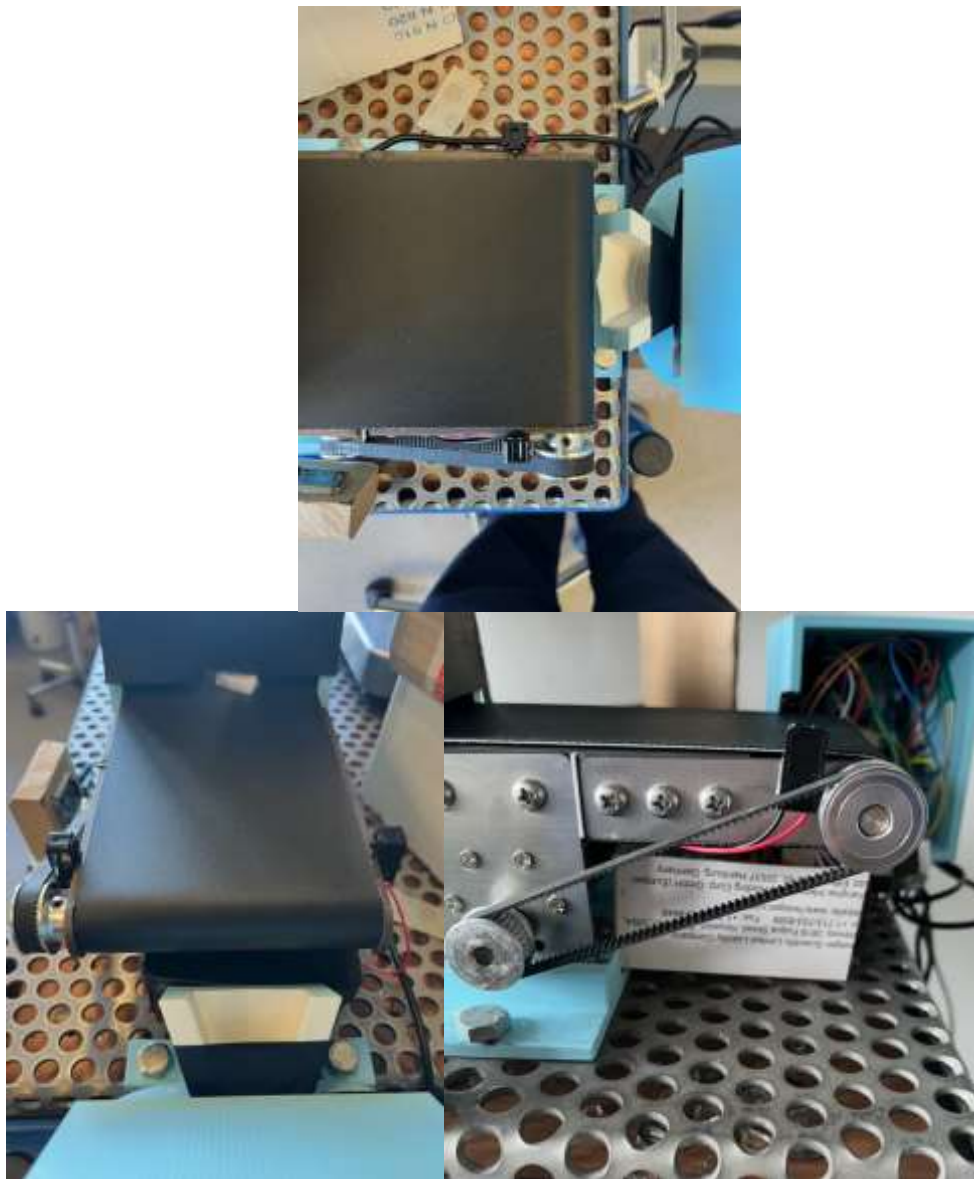


Abbildung 20: Montage der Lichtschränke

KI- Verzeichnis

Tabelle 16: Verzeichnis der verwendeten KI-basierten Hilfsmittel

KI-basiertes Hilfsmittel / Tool	URL	Verwendet am	Einsatzform	Betroffene Teile der Arbeit	Anmerkungen
Chat-GPT (OpenAI, GPT-5.5)	https://chat-gpt.com	01. Juli bis 30. Juli 2026	Sprachliche und stilistische Überarbeitung des Textes	Gesamte Bachelorarbeit	Formulierungen, Grammatik, Rechtschreibung und sprachliche Optimierung; inhaltliche Prüfung und finale Verantwortung erfolgten durch den Verfasser.
Chat-GPT (OpenAI, GPT-5.5)	https://chat-gpt.com	01. Juli 2026	Unterstützung bei der Erstellung der einseitigen Zusammenfassung	Einseitige Zusammenfassung	Erstellung eines Formulierungsvorschlags, anschließend vom Verfasser geprüft und überarbeitet.