



Hochschule Magdeburg-Stendal
Fachbereich Ingenieurwissenschaften und Industriedesign (IWID)
Institut für Elektrotechnik

Diplomarbeit

**zur Erlangung des Grades eines „Diplom-Ingenieur (FH)“
im Studiengang Elektrotechnik**

**Thema: „Entwurf eines Beobachters zur Kompensation von Latenzen
des Bildverarbeitungssystems am automatisierten Kickertisch“**

Eingereicht von: Jens Gerlach

**Angefertigt für: Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg, Institut für
Automatisierungstechnik(IFAT)**

Matrikel: 20022662

Ausgabetermin: 8. September 2015

Abgabetermin: 8. Dezember 2015

Schulischer Betreuer: Herr Prof. Dr.-Ing. Yongjian Ding

Betrieblicher Betreuer: Herr Dipl.-Ing. Stephan Höme

.....
1. Prüfer

.....
2. Prüfer

Aufgabenstellung

Kurzthema: Entwurf eines Beobachters zur Kompensation von Latenzen des Bildverarbeitungssystems am automatisierten Kickertisch

Als Demonstrationsanlage für kooperative Steuer- und Regelverfahren soll ein Kickertisch so umgerüstet werden, dass Menschen nur eine Seite des Tisches bedienen, während die andere Seite durch einen kooperativen Verbund von mechatronischen Modulen gesteuert wird. Dazu wird die Ballposition durch ein optisches System erfasst und jede Spielstange durch eine eigene Steuerung kontrolliert, welche Daten von der Umgebung (z.B. Ballposition) und den anderen Stangen erhält und daraus die notwendigen Aktionen berechnet. In der aktuellen Umsetzung ist ein Bildverarbeitungssystem mit Hochgeschwindigkeitskamera im Einsatz

Dieses weist bedingt durch Kommunikations- und Verarbeitungszeiten eine Zeitverzögerung auf, wodurch die ermittelte Ballposition nicht mehr der realen Ballposition zu einem Zeitpunkt entspricht. Durch Nutzung der bekannten Ballphysik soll ein Beobachter entworfen werden, welcher diese Zeiten kompensiert.

Hierbei sind folgende Teilaufgaben zu lösen:

- Evaluierung des vorhandenen Bildverarbeitungskonzeptes und dessen Umsetzung hinsichtlich seines Zeitverhaltens
- Untersuchung der auftretenden Verzögerungen hinsichtlich Betrag und Jitter
- Untersuchung der notwendigen Modelltiefe, um basierend auf den vorhandenen Informationen eine bestmögliche Schätzung der zeitaktuellen Ballposition zu erhalten
- Entwurf eines Modells, welches das physikalische Verhalten des Modells im Kickertisch beschreibt
- Implementierung des Modells in das vorhandene Bildverarbeitungssystem
- Optimierung des vorhandenen Bildverarbeitungskonzeptes
- Evaluierung des entworfenen Systems anhand von Testaufnahmen

Alle Arbeitsschritte sind detailliert zu dokumentieren.

Selbständigkeitserklärung

Hiermit erkläre ich, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig und ohne fremde Hilfe verfasst und keine anderen Hilfsmittel als angegeben verwendet habe. Insbesondere versichere ich, dass ich alle wörtlichen und sinngemäßen Übernahmen aus anderen Werken als solche kenntlich gemacht habe.

Ort: Magdeburg

Datum:

Unterschrift: Jens Gerlach

Inhaltsverzeichnis

Aufgabenstellung:.....	II
Selbständigkeitserklärung.....	III
Inhaltsverzeichnis	IV
Abbildungsverzeichnis	VI
Tabellenverzeichnis	VIII
Abkürzungsverzeichnis.....	IX
1 Einleitung.....	1
2 Stand der Technik	2
2.1 Übersicht	2
2.2 Aufbau Bildverarbeitungssystem	2
2.2.1 Kamera/Beleuchtung	3
2.2.2 Kameraschnittstelle.....	4
2.2.3 Bildverarbeitungsrechner	5
3 Evaluierung des BV-Systems	5
3.1 Übersicht	5
3.2 Bildgewinnung	6
3.2.1 Belichtung	6
3.2.2 Kamerainterne Verzögerung.....	7
3.3 Bildübertragung	8
3.3.1 Format_0.....	9
3.3.2 Format_7.....	9
3.4 Bildverarbeitung.....	11
3.4.1 Erkannte Verbesserungsmöglichkeiten.....	11
3.5 Messtechnische Evaluierung des BV-Systems	12
3.5.1 Messung mit Netanalyzer-Karte.....	12
3.5.2 Laufzeitmessung BV-Programm	19
3.5.3 Fazit	22
4 Optimierung/Erweiterung der bestehenden Lösung	23
4.1 Implementierung Measurement Klasse	23
4.2 Kombination der Verfahren Format_0 und Format_7(Format_7_static)	24
4.2.1 Ansatz.....	24
4.2.2 Entwurf.....	27
4.2.3 Implementierung	28
4.2.4 Messtechnische Evaluierung/Vergleich Format_7_static.....	29
4.3 Ballerkennung/Reflektionsfilter	33
4.4 Optimierung Momentenmethode	34
4.5 Fazit Optimierung bestehende Lösung.....	36

5	Physikalische Effekte.....	37
5.1	Luftwiderstand / Rollwiderstand.....	37
5.1.1	Luftwiderstand.....	37
5.1.2	Rollwiderstand	38
5.1.3	Simulation Luftwiderstand/Rollwiderstand	41
5.2	Gleitreibung / Effet.....	44
5.2.1	Horizontale Rotationsachse	45
5.2.2	Vertikale Rotationsachse	46
5.3	Stoß des Balls an der Bande	48
5.3.1	Messtechnische Ermittlung der Stoßzahl	49
5.4	Hangabtriebskraft und Magnuseffekt.....	50
5.5	Zusammenfassung	51
6	Beobachters	52
6.1	Entwurf	52
6.2	Implementierung.....	56
6.2.1	Referenzberechnung	59
6.2.2	Zwischenspeicher Positionsdaten.....	59
6.2.3	Verzögerungszeit/Bildwiderholrate für Beobachter	63
6.3	Evaluierung der Lösung.....	63
6.4	Fazit Beobachter	66
7	Ausblick.....	67
7.1	Ausblick Spielfeld Einmessung.....	67
7.2	Ausblick Kamera Optimierung	67
7.2.1	Kamera mit GigE Schnittstelle	67
7.2.2	Zweite Guppy Pro F-031	68
	Anhang	X
	Struktur csv-Dateien.....	X
	Literaturverzeichnis	XII

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Pojektstruktur des automatisierten Kickertisch (nach [1])	2
Abbildung 2: BV-System.....	2
Abbildung 3 Aufbau Spiegel und Kamera [1, pp. ,S3].....	3
Abbildung 4: Aktivitätsmodell der BV-Systems	5
Abbildung 5: Verzerrung während der Belichtung	6
Abbildung 6:Kamerainterne Bearbeitung [4, pp. ,S95].....	7
Abbildung 7:1394b Datenübertragung [4, pp. ,S25].....	8
Abbildung 8:Bildwiderholrate in Abhängigkeit der Höhe [4, pp. ,S189].....	10
Abbildung 9:Messaufbau Verzögerungszeit BV-System	12
Abbildung 10: Histogramm Verzögerungszeit Format_0	13
Abbildung 11:Histogramm Verzögerungszeit Format_7	14
Abbildung 12:Histogramm Bildgenerierung/Übertragungszeit Format_0.....	16
Abbildung 13:Histogramm Bildgenerierung/Übertragungszeit Format_7.....	17
Abbildung 14: Histogramm Durchlaufzeit BV-Programm Format_0.....	19
Abbildung 15: Histogramm Durchlaufzeit BV-Programm Format_7.....	20
Abbildung 16: Histogramm Durchlaufzeit Bildauswertung Format_0.....	21
Abbildung 17: Histogramm Durchlaufzeit Bildauswertung Format_7.....	21
Abbildung 18: PopUp Messungen	23
Abbildung 19: Kamerabild/Spielfeld.....	24
Abbildung 20: Aktivitätsdiagramm Format_7_static.....	27
Abbildung 21: Histogramm Verzögerungszeit BV-System Format_7_static	29
Abbildung 22: Histogramm Übertragung/Bildgewinnung Format_7_static.....	30
Abbildung 23: Histogramm Laufzeit BV-Programm Format_7_static.....	31
Abbildung 24: Histogramm Laufzeit Bildauswertung Format_7_static	32
Abbildung 25: Bandenreflektion.....	33
Abbildung 26: Zustandsautomat Reflektionsfilter.....	34
Abbildung 27: Verschiebung der Position durch Reflektionen	34
Abbildung 28: neue Implementierung der Momentenmethode	36
Abbildung 29: Rollreibung [6, pp. ,S135]	38
Abbildung 30: Beispiel einer Balltrajektorie.....	39
Abbildung 31: Errechnete Ballgeschwindigkeit aus Positionsdaten.....	39
Abbildung 32: Geschwindigkeitsmittelwerte zur Ermittlung der Beschleunigung	40
Abbildung 33: Kräftegleichgewicht.....	42

Abbildung 34: Simulink Modell für Luft-und Rollreibung	43
Abbildung 35: Ausrollversuch	44
Abbildung 36: Effet	45
Abbildung 37: Ball mit horizontalem Effet	45
Abbildung 38: Kontaktfläche des Balls	46
Abbildung 39: Bandenkollision mit Effet.....	47
Abbildung 40: Bandenkollision.....	48
Abbildung 41: Systemmodell	53
Abbildung 42: Subsystem BV-System	53
Abbildung 43: Subsystem Beobachter.....	54
Abbildung 44: Plot Simulation(Spielfeld= $x(t)$ BV-System= $x(kT-t_d)$ Beobachter= $x(kT)$)	54
Abbildung 45: Kollisionsabfrage	55
Abbildung 46: Klassendiagramm Beobachter.....	57
Abbildung 47: Objektflussdiagramm BV-Programm mit Beobachter	58
Abbildung 48: Referenzposition Beobachter.....	59
Abbildung 49: Vector mit den Positionsdaten	59
Abbildung 50: Überschwingen des Beobachters	60
Abbildung 51: Positionsplot mit und ohne Beobachter	62
Abbildung 52 Diagramm MSE bei verschiedenen Vektorgrößen, schneller Ball.....	64
Abbildung 53: Diagramm MSE bei verschiedenen Vektorgrößen, langsamer Ball ...	65
Abbildung 54: Spielfeldteilung mit 2. Kamera	68

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Kamera Spezifikationen	4
Tabelle 2: Spezifikation BV-Rechner	5
Tabelle 3: Gegenüberstellung Verzögerungszeit BV-System	14
Tabelle 4: Gegenüberstellung Übertragungszeit	17
Tabelle 5: Zusammensetzung der gemessenen Zeiten	18
Tabelle 6: Gegenüberstellung Laufzeiten Format_0 und Format_7	22
Tabelle 7: Vor und Nachteile der Modi Format_0 und Format_7	25
Tabelle 8: Gegenüberstellung Verzögerungszeit BV-System der 3 Verfahren	29
Tabelle 9: Gegenüberstellung Bildgewinnung/Übertragung.....	30
Tabelle 10: Gegenüberstellung Laufzeiten der 3 Verfahren	32
Tabelle 11: Gegenüberstellung Momentenmethoden	35
Tabelle 12: statische Größen der Luftreibung.....	37
Tabelle 13: Ermittelte Rollwiderstandsbeiwerte	41
Tabelle 14: Konstanten der Simulation	43
Tabelle 15: Ergebnis der Simulation.....	44
Tabelle 16: Ergebnis ermittelte Stoßzahlen	50
Tabelle 17: Übersicht physikalische Effekte	51
Tabelle 18: Anforderungen an den Beobachter	52
Tabelle 19: Übersicht MSE in Pixel , schneller Ball	64
Tabelle 20: Übersicht MSE in Pixel, langsamer Ball.....	65
Tabelle 21: Abschließender Vergleich des Beobachter bei einer Vektorgröße von 4	66
Tabelle 22: Einsatzscenario 2 Kameras	68

Abkürzungsverzeichnis

Formelzeichen/Abkürzung	Beschreibung	Einheit [Konstante]
ROI	region of interest	-
AOI	area of interest	-
BV	Bildverarbeitung	-
GUI	graphical user interface	-
GPIO	general purpose input/output	-
IQR	interquartile range	-
v_{ball}	Ballgeschwindigkeit	m/s
t_{bel}	Belichtungszeit	s
C	Datenrate	bit/s
t_{über}	Übertragungszeit für ein Bild	s
t_d	gesamte Verzögerungszeit des BV-Systems	s
VarK	Variationskoeffizient	%
F_w	Luftwiderstand	N
c_w	Luftwiderstandsbeiwert	dimensionslos
ρ_L	Luftdichte	1,19kg/m ³
A_p	Anströmfläche des Balls	0,000908m ³
F_R	Rollwiderstand	N
m_{Ball}	Ballmasse	20g
g	Erdbeschleunigung	9,81m/s ²
c_R	Rollwiderstandskoeffizient	dimensionslos
F_T	Trägheitskraft des Balls	N
μ_r	Reibungskoeffizient	dimensionslos
F_G	Gleitreibungskraft	N
$\vec{\omega}$	Winkelgeschwindigkeit des Balls	rad/s
J	Trägheitsmoment	kg·m ²
E_{Rot}	Rotationsenergie des Balls	kg·m ² ·s ⁻²
x(kT)	Berechnete X-Position des Beobachters	Pixel oder m
T	Abtastzeit	s
x(kT-t_d)	Berechnete X-Position des BV-Systems mit Verzögerungszeit	Pixel oder m
x(t)	Zeitkontinuierliche X- Position	Pixel oder m
x_{td}, y_{td}	Positionsfehler des BV- Systems in X bzw. Y Richtung	Pixel oder m
Δx	Positionsdifferenz zwischen 2 Bildern	Pixel oder m

1 Einleitung

Diese Arbeit befasst sich mit der Optimierung des Bildverarbeitungssystems (BV-System) eines automatisierten Kickertisches. Das BV-System ist ein Teilsystem des automatisierten Kickertisches und für die Erkennung und Verfolgung des Spielballs verantwortlich. Die durch das BV-System generierten Positionsdaten des Balls haben einen hohen Einfluss auf die Qualität des Gesamtsystems. Denn ohne Kenntnis der korrekten Ballposition ist es der Steuerung unmöglich den Ball zu schlagen oder abzuwehren.

Das Hauptproblem des BV-Systems ist die durch Kommunikations- und Verarbeitungszeiten entstehende Zeitverzögerung der generierten Ballpositionen. Dadurch entsteht ein Positionsfehler, der im Grunde von der Höhe der Zeitverzögerung sowie der Ballgeschwindigkeit abhängig ist.

Das Hauptziel dieser Arbeit ist es, den Positionsfehler des BV-Systems zu minimieren.

Dieses Ziel wird durch zwei Schritte verfolgt.

Zum einen durch die Analyse des vorhandenen BV-Systems auf Schwachstellen und der Behebung bzw. Verbesserung dieser. In diesem Schritt wird das BV-System in allen Komponenten detailliert untersucht um Verbesserungsmöglichkeiten zu identifizieren, die dem Beobachter und dem Gesamtsystem zugutekommen. Die Änderungen werden dann messtechnisch mit der originalen Lösung verglichen (Abschnitt 3-4).

Zum zweiten der Einführung eines Beobachter, um die Verzögerungszeit des BV-Systems zu kompensieren. In diesem Schritt werden alle physikalischen Effekte die auf die Spielballtrajektorie wirken untersucht. Anschließend wird auf diesen Ergebnissen ein Beobachter entworfen, der die Zeitverzögerung kompensiert. Nach der Implementierung wird die Qualität des Beobachters messtechnisch bewertet(Abschnitt 5-6).

2 Stand der Technik

2.1 Übersicht

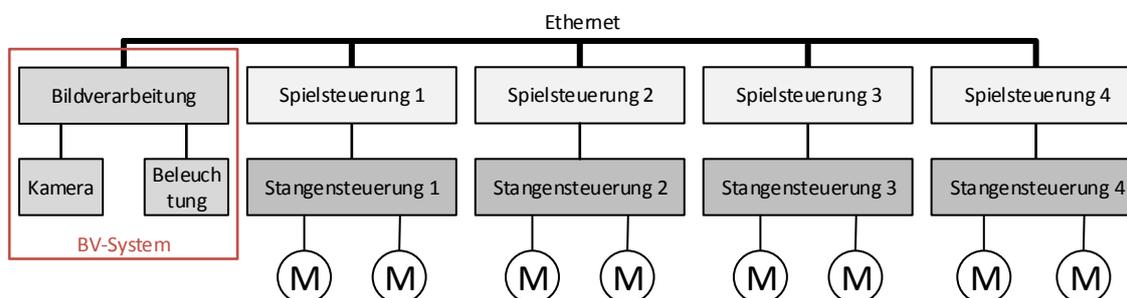


Abbildung 1: Projektstruktur des automatisierten Kickertisch (nach [1])

Das Projekt automatisierter Kickertisch ist in 3 große Teilbereiche zerlegt.

Zum einen das Bildverarbeitungssystem (BV-System), welches zur optischen Erfassung des Balls und Generierung der kinematischen Daten des Balls dient.

Zum zweiten die Spielsteuerung, die als kooperativ verteilte Steuerung umgesetzt wurde und die Spiellogik enthält. Sie ist verteilt auf 4 Raspberry PI und über Ethernet mit der Bilderarbeitung und untereinander verbunden.

Zum dritten die Stangensteuerung, die die Schuss und Positionsbefehle der Spielsteuerung umsetzt. Sie basiert auf einem Cortex M4-Mikrocontroller und enthält die Regelung der DC-Motoren.

Ein Motor ist für den Schuss bzw. die Rotation der Spielstange zuständig, der zweite übernimmt die Positionierung bzw. die Linearbewegung der Spielstange. [1]

2.2 Aufbau Bildverarbeitungssystem

Das BV-System besteht aus Beleuchtung, Kamera und Bildverarbeitung.



Abbildung 2: BV-System

2.2.1 Kamera/Beleuchtung

Zur Erfassung der Ballposition auf einem Kickertisch mit Hilfe einer Kamera gibt es verschiedenste Ansätze. In anderen Projekten wurde z.B. die Kamera oberhalb des Tisches angebracht.

Der Ansatz der Otto-von-Guericke-Universität besteht darin, eine Kamera unter dem Tisch anzubringen um Einflüsse durch Verdeckung z.B. der Spielstangen zu vermeiden. Die Bodenplatte wurde durch eine aus Plexiglas bestehend ersetzt und ein Spiegel in einem Winkel von 45° darunter angebracht.

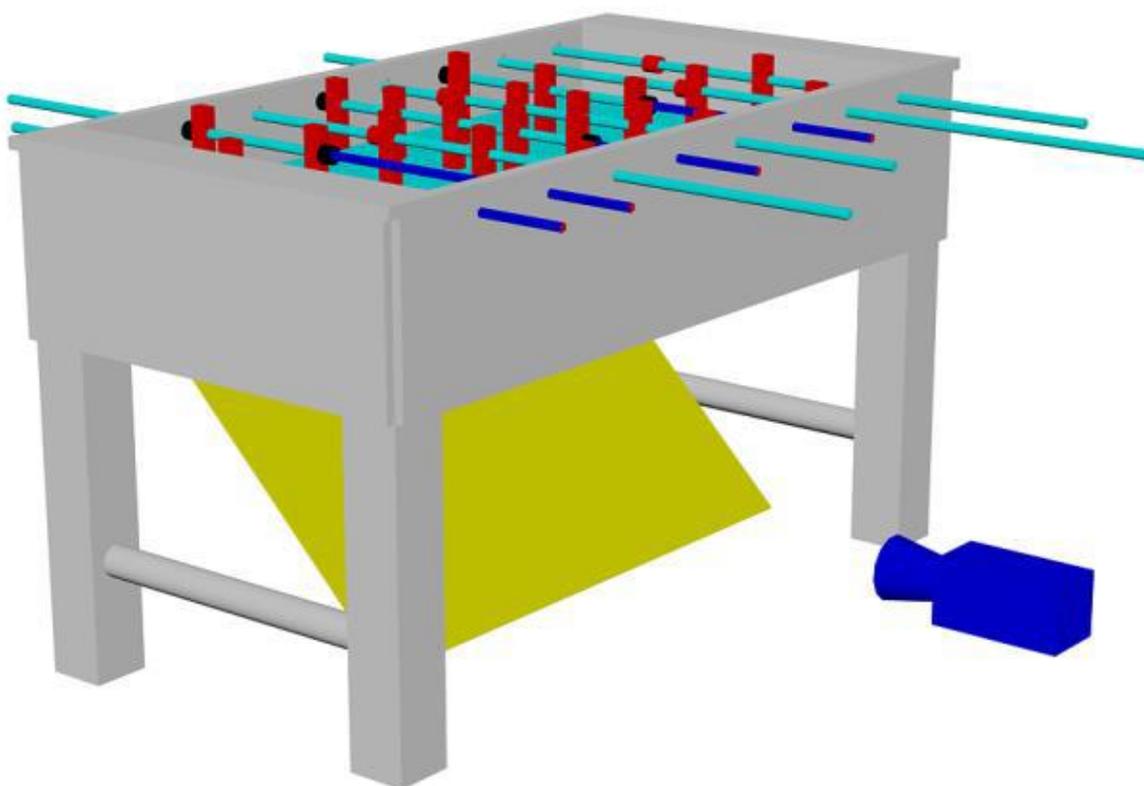


Abbildung 3 Aufbau Spiegel und Kamera [1, p. 3]

Die Kamera befindet sich, wie in Abbildung 3 zu sehen, seitlich unter dem Kickertisch. Die Wellenlänge, mit der die Kamera arbeitet, liegt im nahen Infrarotbereich um Störeinflüsse durch Reflektionen zu eliminieren. Als Infrarotlichtquelle dienen LEDs, die in den beiden Längsseiten eingebracht sind. Die Schwerpunktwellenlänge der LEDs liegt bei 850nm. Die LEDs sind nur für die Dauer der Belichtung aktiv und werden über einen Output der Kamera mit der Belichtungszeit synchronisiert. Auf dem Kameraobjektiv befindet sich ein Filter der Wellenlängen unter 715nm sperrt. Die Farbe des Spielballs ist rot, da nach Tests [2, p. 31] diese Farbe die besten Ergebnisse in der Lichtreflektion lieferte.

Kamera

Als Kamera kommt eine CCD-Kamera der Firma „Allied Vision Technologies“ zum Einsatz. Die wichtigsten Eigenschaften sind in Tabelle 1 aufgeführt.

Guppy PRO	F-031
Interface	IEEE 1394b – 800Mb/s , 1 Port
Sensor	Sony ICX618 AQA
Auflösung	656x492
Sensorgroße	Type 1/4
Zellengröße	5,6 µm
Maximale Framerate bei voller Auflösung	123 fps
Mono-Modi	8/12/16 Bit
General Purpose Inputs/Outputs	1/3

Tabelle 1: Kamera Spezifikationen

Als wichtige Eigenschaft des Sensors ist noch die Empfindlichkeit im nahen Infrarotbereich zu nennen. Die Quanteneffizienz bei einer Wellenlänge von 850nm liegt bei ca. 15%. Um die LEDs mit der Belichtungszeit zu synchronisieren, werden sie durch einen Output der Kamera angesteuert. Die wichtigen Aufnahmemodi sind Format_0 und Format_7. Im Format_0 wird ein Bild mit der Auflösung 640x480 Pixel aufgenommen. Im Format_7 lässt sich eine ROI(Region of interest), bei der nur ein Ausschnitt des Bildes übertragen wird, in der Kamera definieren und so die Bildwiederholrate erhöhen.

Spielfeldmaße	
Spielfeldlänge (X Richtung)	1200mm
Spielfeldbreite (Y Richtung)	700mm
Seitenverhältnis	≈1,7:1
Auflösung der Kamera	1,96mm/Pixel

Tabelle 2: Spielfeldmaße [2]

2.2.2 Kameraschnittstelle

Die Kommunikation erfolgt über den „Firewire(800) IEEE 1394b“ Bus. Das Verhalten von Digitalkameras mit diesem Bus ist in der „IIDC 1394-based digital camera specification“ festgelegt. Die Übertragung der Bilddaten erfolgt isochron. Es wird eine vollständige Übertragung eines Bildes zwischen 2 Frames garantiert. Die genutzte Paketgröße lässt sich aber nicht frei wählen sondern wird durch die Bildwiederholrate und die Bildgröße bestimmt. Dadurch kann die Bandbreite nicht vollständig

ausgenutzt werden. Auf diesen Sachverhalt wird noch genauer im Abschnitt 3.3 eingegangen, da dieser einen starken Anteil an der gesamten Latenz hat.

2.2.3 Bildverarbeitungsrechner

Komponenten	Beschreibung
CPU	Intel Core i7-3770
RAM	16GB
Betriebssystem	Ubuntu 12.04.5
Programmiersprache	C++
Kernbibliotheken	Qt,openCV,libdc1394
Schnittstellen	Ethernet, Firewire

Tabelle 3: Spezifikation BV-Rechner

Die Bildverarbeitung wurde auf einem PC mit i686 Architektur verwirklicht. Ein potenter CPU sorgt für eine schnelle Abarbeitung des BV-Programms.

3 Evaluierung des BV-Systems

In diesem Abschnitt werden alle Schritte des BV-Systems auf Messfehler, entstehende Verzögerungszeiten sowie störende Einflüsse untersucht.

3.1 Übersicht

Das Bildverarbeitungssystem kann in 3 wesentliche Schritte unterteilt werden. Zum ersten aus der Bildgewinnung, zum zweiten aus der Bildübertragung und zum dritten aus der Bildverarbeitung. Jeder einzelne Schritt verursacht eine Verzögerung. Die Summe der einzelnen Schritte ist die Verzögerungszeit mit der die Positionsdaten bereitgestellt werden. Sie sind also um diese Zeit veraltet.

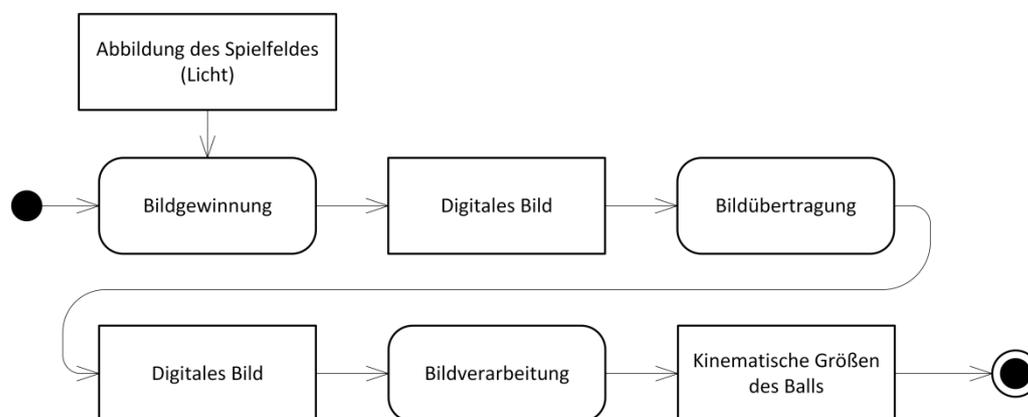


Abbildung 4: Aktivitätsmodell der BV-Systems

Im nachfolgenden Abschnitt werden die einzelnen Schritte näher betrachtet.

3.2 Bildgewinnung

Die Bildgewinnung besteht im Grunde aus der Belichtung des Kamerasensors, dem Aufbereiten der Sensordaten und dem anschließendem Bereitstellen der digitalen Bilddaten im Pufferspeicher der Kamera.

3.2.1 Belichtung

Der Prozess der Bildgewinnung startet mit der Belichtung. Bei der Belichtung wird der Sensor dem reflektierten Licht des Spielfeldes für eine bestimmte Zeit ausgesetzt. Da sich der Ball während dieser Zeit weiterbewegt entsteht schon beim Belichten ein Messfehler.

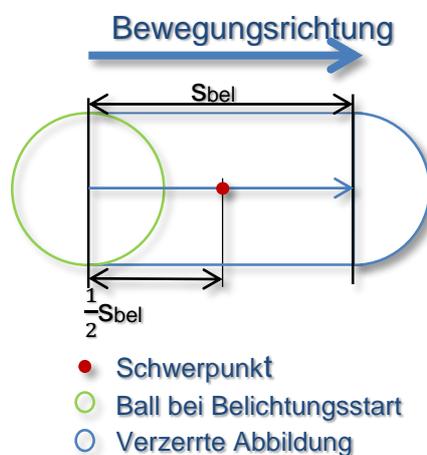


Abbildung 5: Verzerrung während der Belichtung

Es kommt zu einer verzerrten Abbildung des Balls auf dem Kamerasensor. Je länger die Belichtung und je schneller der Ball, je ausgeprägter die Verzögerung. Die Größe der Verzerrung bzw. der Weg s_{bel} des Balls während der Belichtung ist abhängig von der Ballgeschwindigkeit v_{ball} und der Belichtungszeit t_{bel} .

$$s_{bel} = v_{ball} \cdot t_{bel} \quad (1)$$

Um abzuschätzen wie sich die Belichtungsverzerrung auf das digitale Bild auswirkt, wird sie bei der maximal zu erwartenden Ballgeschwindigkeit [3, p. 13] näher betrachtet.

Variable	Wert	Bemerkung
v_{ball}	14m/s	Maximale Ballgeschwindigkeit
t_{bel}	255 μ s	Belichtungszeit
s_{bel}	3,6mm	Ballbewegung während Belichtung

Da die Ballposition über die Schwerpunktmethod bestimmt wird, muss der Messfehler an der Verschiebung des Schwerpunktes bestimmt werden. Der Schwerpunkt der Verzerrung, wie in Abbildung 5 zu sehen, liegt um den halben Weg s_{bew} vom Ballmittelpunkt beim Belichtungsstart entfernt. Es ergibt sich also eine maximale Verzerrung des Schwerpunkts um 1,8mm. Dies entspricht, bei einer Kameraauflösung von 1,96mm je Pixel der Kamera, demzufolge maximal einen Pixel bei der maximal zu erwartenden Geschwindigkeit und kann vernachlässigt werden.

3.2.2 Kamerainterne Verzögerung

Nach dem Belichten werden die Daten des Sensors digitalisiert und aufbereitet. Die Kamera wird im Modus „Mono 8“ betrieben, bei dem jeder Pixel einer Helligkeitsabstufung von $2^8=256$ unterworfen wird. Nach der Aufbereitung werden die digitalen Bilddaten in den Framememory gelegt um sie anschließend über den Firewire 1394b Bus übertragen zu können.

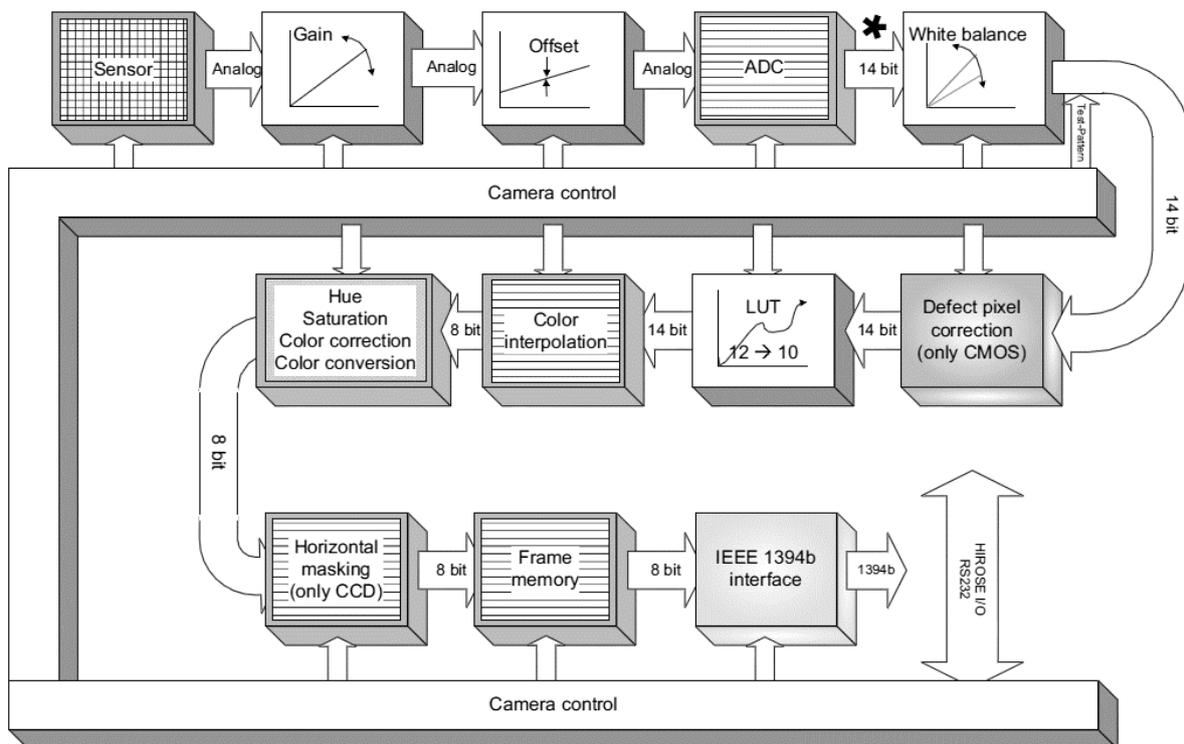


Abbildung 6: Kamerainterne Bearbeitung [4, p. 95]

Die Bearbeitungszeit wird in [4, p. 158] mit $710\mu\text{s} \pm 62,5\mu\text{s}$ angegeben.

3.3 Bildübertragung

In der Bildübertragung findet der Transport der Bilddaten von dem Kamerainternen Framememory über den Firewire-Bus zum Pufferspeicher im Bildverarbeitungsrechner statt. In dem Bildverarbeitungsrechner befindet sich eine Firewire PCI-E Schnittstellenkarte um das Interface bereitzustellen. Die Kommunikation für digitale Kameras über Firewire-1394b wird in der „IIDC 1394-based Digital Camera Specification [5]“, beschrieben. Es beinhaltet sowohl die Spezifikation für die Übertragung der Bilddaten als auch die Spezifikation der Kameraregister zur Steuerung der Kamera. An dem Bus können mehrere Kameras betrieben werden. Die Übertragung der Bilddaten findet in isochronen Paketen statt. Sie werden in einem festen Übertragungszyklus von 125µs verschickt. Pro Übertragungszyklus kann jede Kamera nur ein Paket verschicken.

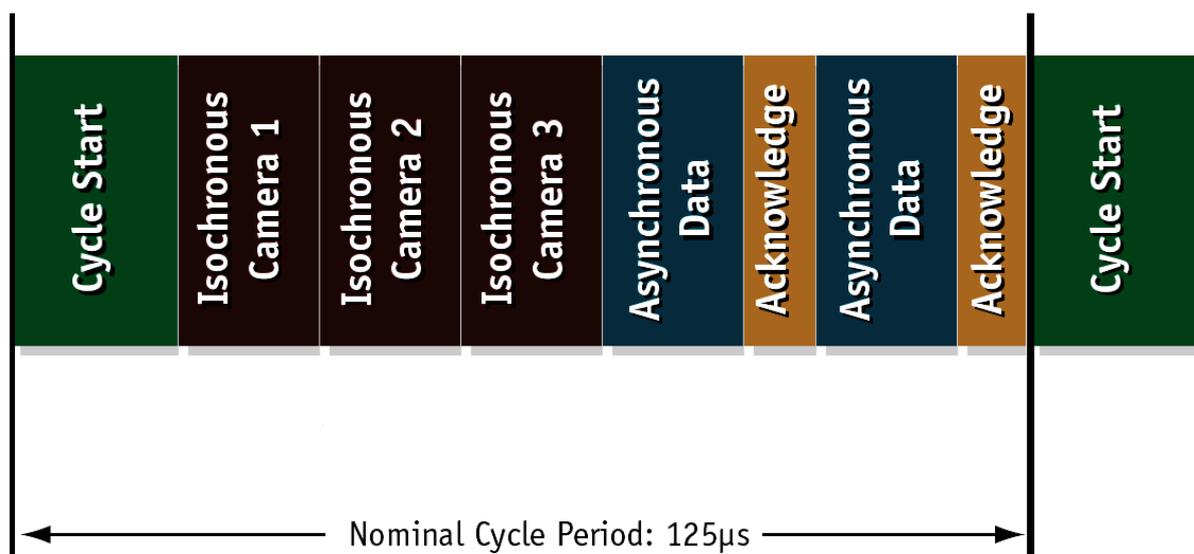


Abbildung 7:1394b Datenübertragung [4, pp. ,S25]

Die Größe des verwendeten Pakets ist vorgegeben [5, p. 52]. Dadurch ist garantiert, dass bei mehreren Kameras am Bus die jeweilige Übertragung abgeschlossen ist, bevor ein neues Bild bereit steht. Die volle Datenrate des Busses, bei z.B. nur einer Kamera, kann dadurch nicht genutzt werden. Die einzige Möglichkeit die Datenrate zu erhöhen ist die Bildrate zu erhöhen, dies wird durch die Spezifikationen der Kamera begrenzt.

Die Datenrate C errechnet sich wie folgt

$$C = \frac{\text{Paketgröße} \cdot \text{Farbtiefe}}{\text{Zykluszeit}} \quad (2)$$

und die Übertragungszeit $t_{\text{über}}$

$$t_{\text{über}} = \left\lceil \frac{\text{Bildgröße}}{\text{Paketgröße}} \right\rceil \cdot \text{Zykluszeit} \quad (3)$$

Variable	Einheit
C	bit/s
$t_{\text{über}}$	s
Paketgröße	Pixel
Farbtiefe	bit/Pixel
Zykluszeit	s
Bildgröße	Pixel

3.3.1 Format_0

Bei dem hier genutzten Modus „Format_0 Mode_5, mit der maximalen Bildwiederholrate von 120fps, ist die Paketgröße auf 5120 Pixel festgelegt. Die Bildgröße beträgt 640x480 Pixel und die Farbtiefe 8bit je Pixel. Daraus folgt mit (2) eine Datenrate von:

$$C = \frac{5120 \text{ Pixel} \cdot 8 \frac{\text{bit}}{\text{Pixel}}}{125 \mu\text{s}} = 327,7 \text{ Mbit/s}$$

und mit (3) eine Übertragungszeit von:

$$t_{\text{über}} = \left\lceil \frac{640 \cdot 480 \text{ Pixel}}{5120 \text{ Pixel}} \right\rceil \cdot 125 \mu\text{s} = 7,5 \text{ ms}$$

Die 800Mbit/s des 1394b werden in diesem Modus nicht annähernd ausgenutzt.

3.3.2 Format_7

Im Format_7 lässt sich eine ROI (region of interest auch AOI(area of interest)) festlegen. Da die Kamera den Sensor Zeilenweise ausliest, kann mit einer Verringerung der Zeilenanzahl eine höhere Bildwiederholrate erreicht werden.

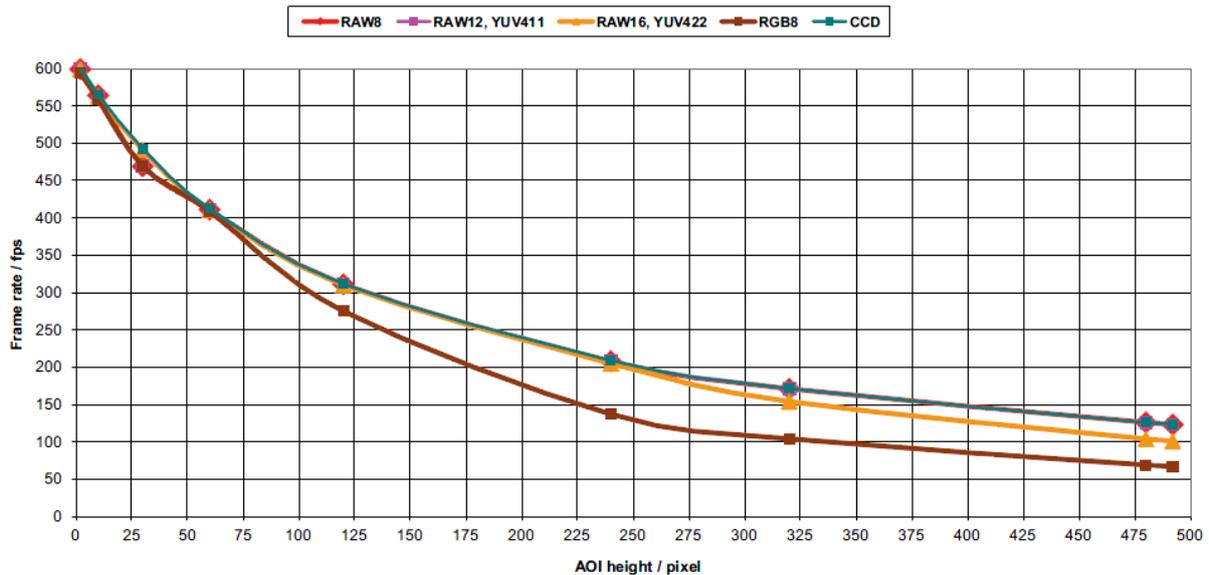


Abbildung 8: Bildwiederholrate in Abhängigkeit der Höhe [4, pp. ,S189]

Die Abbildung 8 zeigt die Bildrate als Funktion der Höhe der ROI für die Kamera Guppy PRO F-031. Die Benutzung einer ROI mit der Größe von 64x64 Pixeln stieß jedoch auf Probleme. Das Neupositionieren der ROI benötigt kamerabedingt ca. 4,2ms, dadurch konnte nicht die maximale Bildrate gesetzt werden. Die Anzahl der Bytes pro Paket wurde auf 112 festgesetzt [2, p. 60]. Daraus ergibt sich mit Gleichung (2)(3) eine Datenrate von:

$$C = \frac{112 \text{ Pixel} \cdot 8 \frac{\text{bit}}{\text{Pixel}}}{125 \mu\text{s}} = 7,17 \text{ Mbit/s}$$

und mit Gleichung (3) eine Übertragungszeit von:

$$t_{\text{übert}} = \left[\frac{64 \cdot 64 \text{ Pixel}}{112 \frac{\text{Pixel}}{\text{Paket}}} \right] \cdot 125 \frac{\mu\text{s}}{\text{Paket}} = 4,625 \text{ ms}$$

Die Bildwiederholrate beträgt in diesem Modus 210fps.

Der Vorteil des kleineren Bildes kann in diesem Modus nicht genutzt werden, da auch hier durch die Abhängigkeit der Paketgröße von der Bildwiederholrate, die Paketgröße limitiert ist.

Fazit

Das Fazit aus diesem Umstand, dass bei dem Firewire-Bus die Bildwiederholrate direkt mit der benutzten Bandbreite verknüpft ist, ist dass die Schnittstelle nicht für

die zeitkritische Anwendung in diesem Projekt geeignet ist. Besonders im Format_7 wird deutlich, dass die verfügbare Bandbreite nur zu $\approx 1\%$ ausgenutzt wird.

3.4 Bildverarbeitung

In der Bildverarbeitung, die im Bildverarbeitungsrechner stattfindet, werden aus dem digitalen Bild die kinematischen Größen des Balls gewonnen. Sie bestehen aus den Geschwindigkeiten in X und Y-Richtung und den Positionskoordinaten. Die verwendete Programmiersprache ist C++ mit den Bibliotheken OpenCV und Qt. OpenCV stellt Algorithmen für die Bildverarbeitung bereit. Für die Visualisierung wird die Bibliothek Qt eingesetzt. Es sind 2 Algorithmen zur Positionsbestimmung in die Bildverarbeitung implementiert, von denen aber nur die Momenten-Methode die zeitlichen Anforderungen erfüllt [2, p. 34]. Die Hough-Transformation wurde nur zu Testzwecken implementiert, da der Rechenaufwand zu hoch ist und dadurch für zeitkritische Anwendungen nicht geeignet ist [2, p. 9]. Zusätzlich wurde eine sogenannte „Alternativ-Methode“ implementiert, bei der das Bild um die letzte bekannte Ballposition beschnitten wird (Software ROI) um den Rechenaufwand zu minimieren [2, p. 34]. Diese kommt aber nur im Format_0 zum Einsatz, da im Format_7 schon eine ROI in der Kamera (Kamera-ROI) gesetzt ist. Die Berechnung der Ballgeschwindigkeiten erfolgt über die Positionsänderung zwischen 2 aufeinanderfolgenden Bildern. Der detaillierte Ablauf der Alternativ-Methode ist in [2, p. 35] beschrieben.

3.4.1 Erkannte Verbesserungsmöglichkeiten

- Die Berechnung der Ballgeschwindigkeit über nur 2 Bilder stellte sich als zu ungenau heraus. Durch die verrauschten Ballpositionen, kam es zu teils deutlich erhöhten errechneten Ballgeschwindigkeiten.
- Im Format_7 kam es bei Ballbewegungen zu unregelmäßigen Ballverlusten in der Ballerkennung. Dies äußerte sich im Umschalten der Kamera-ROI auf das gesamte Bild und der damit verbundenen Absenkung der Bildwiederholrate. Was über das Netzteil der LEDs deutlich hörbar war, da die LEDs mit der Belichtungszeit synchronisiert sind.
- Die Reflektionen der Spielfeldbanden störten die Ballverfolgung, indem nach Sprüngen des Balls nach einer Bandenkollision die Bandenreflektionen als

Ball interpretiert wurden. Die Folge ist dann, dass der Ball nicht mehr gefunden wird und die Bildverarbeitung auf der Bande „hängt“.

3.5 Messtechnische Evaluierung des BV-Systems

Um dem Beobachter die optimalen Voraussetzungen zu gewährleisten wurden die beiden Modi Format_0 und Format_7 hinsichtlich ihres Zeitverhaltens und der gewonnen kinematischen Größen untersucht. Die Laufzeiten des BV-Systems wurden auf 2 unterschiedlichen Wegen analysiert. Zum einen wurde eine Netanalyzer-Karte eingesetzt und zum anderen Laufzeitmessungen direkt im BV-Programm durchgeführt. Im folgenden Abschnitt werden die beiden Verfahren erläutert sowie die Messungen ausgewertet.

3.5.1 Messung mit Netanalyzer-Karte

Mit einer Netanalyzer-Karte der Firma Hilscher wurden 2 unterschiedliche Zeitdifferenzen gemessen. Zum einen die gesamte Verzögerungszeit des BV-Systems und zum zweiten die Zeit zwischen Belichtungsstart und dem Erreichen des digitalen Bildes im BV-Rechner. Die Netanalyzer-Karte besitzt neben den Ethernet-Ports auch GPIOs (General Purpose Input/Output).

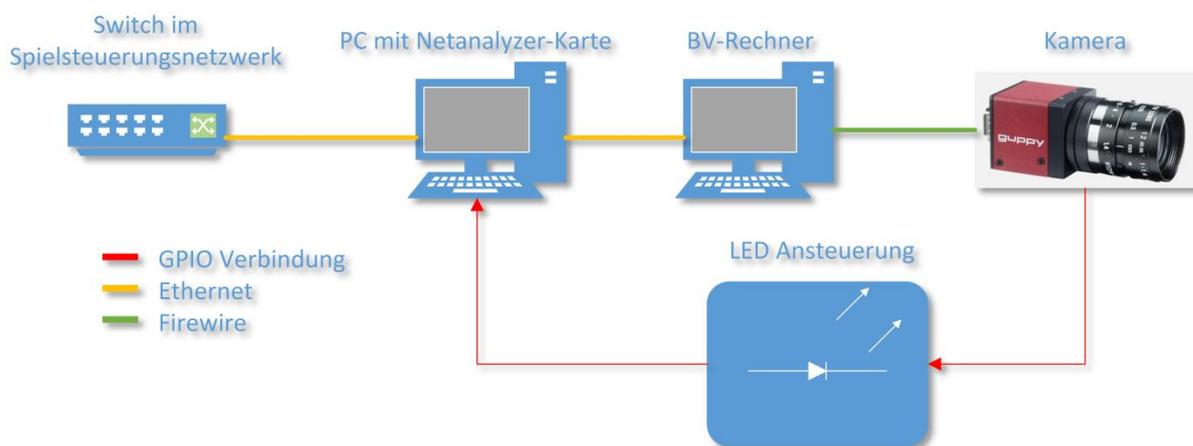


Abbildung 9: Messaufbau Verzögerungszeit BV-System

Die Abbildung 9 zeigt den Messaufbau für diese zwei Messungen.

Ein GPIO der Netanalyzer-Karte wurde mit der LED-Ansteuerung verbunden, um den Zeitpunkt des Belichtungsstarts zu detektieren. Dies ist möglich, da die Ansteuerung, über die GPIOs der Kamera, mit der Belichtung synchronisiert ist. Um die versende Zeitpunkte der UDP-Pakete aufzuzeichnen, wurde die Ethernet Verbindung des BV-Rechners durch die Netanalyzer-Karte geschleift. Während der Messdatenaufnahme wurde der Ball ständig in Bewegung gehalten, um ein Kickerspiel zu simulieren und

das Nachführen der ROI, die ein essentieller Bestandteil der Bildverarbeitung ist, zu erzwingen.

Ausgefiltert wurden alle Daten bei denen der Ball nicht erkannt wurde. Das Programm Wireshark diente zum Generieren einer csv-Datei. Die gewonnenen Daten wurden mit Hilfe von Matlab aufbereitet und ausgewertet.

3.5.1.1 Messung Verzögerungszeit BV-System

Die Differenz der Zeitpunkte Belichtungsstart und dem versenden der kinematischen Daten über Ethernet stellt die gesamte Verzögerungszeit t_d des BV-Systems für ein Bild dar.

Format_0:

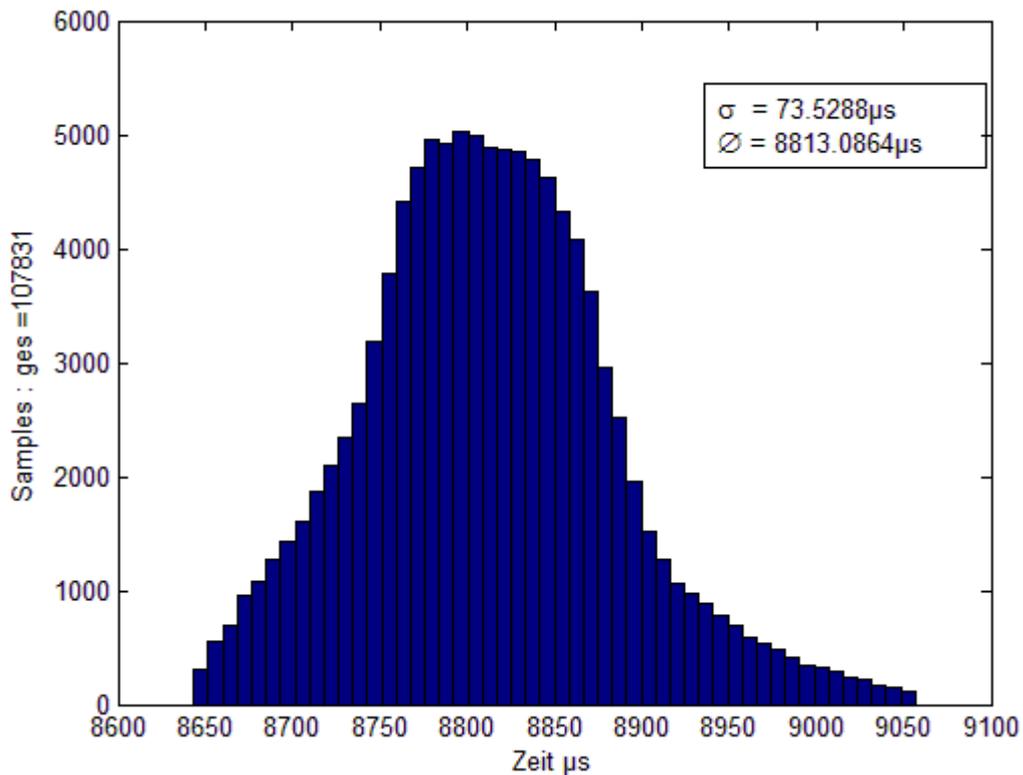


Abbildung 10: Histogramm Verzögerungszeit Format_0

Format_7:

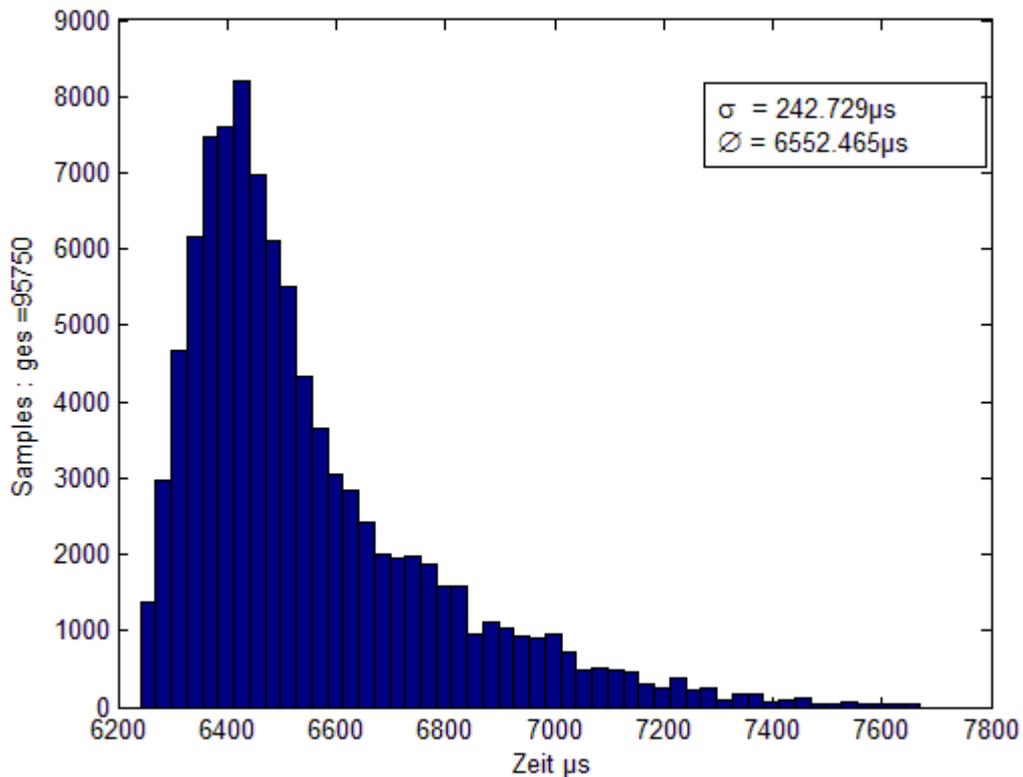


Abbildung 11: Histogramm Verzögerungszeit Format_7

Gegenüberstellung	Format 0	Format 7	Δ Format_7 zu Format_0
Mittelwert Ø	8813µs	6552µs	-25,6%
Std. Abweichung σ	73,5µs	242,7µs	+230%
VarK	0,8%	3,7%	+362%
Ausreißer	6,4%	6,7%	+5%
Extreme Ausreißer	0,07%	1,2%	+1600%

Tabelle 4: Gegenüberstellung Verzögerungszeit BV-System

Hinweis:

Ausreißer sind definiert als Werte zwischen dem 1,5 und 3 fachen des Interquartilsabstand(IQR).

Extreme Ausreißer sind definiert als Werte größer dem 3 fachen des IQR.

IQR=50% der Messwerte um den Mittelwert.

VarK= Variationskoeffizient = $\frac{\text{Standardabweichung}}{\text{Mittelwert}}$

Arbeitet das BV-System mit dem Kameramodus Format 0, benötigt es im Durchschnitt rund 2,3ms länger für einen Durchlauf. Grund ist die im Format 7 höhere Bildwiderholrate und die dadurch resultierende kürzere Übertragungszeit. Wie schon im Abschnitt 3.3 betrachtet, ist die Übertragungszeit direkt von der Bildwiderholrate abhängig. Im Format 7 treten jedoch starke Schwankungen in der Bearbeitungszeit auf, sie sind deutlich an der höheren Standardabweichung zu erkennen. Zusätzlich kommt es zu größeren und häufigeren Ausreißern. Im Abschnitt 3.5.1.2 wird der Grund dieser Ausreißer näher untersucht.

Des Weiteren kam es zu häufigen Ballverlusten in der Kamera-ROI im Format 7. Das Resultat war dann ein Umschalten der ROI auf 640x480px. Diese Zustände wurden aus zwei Gründen aus den Messdaten herausgefiltert. Zum einen wurden in diesem Abschnitt die Durchlaufzeiten des BV-Systems bei gefundenen Bällen untersucht, die durch den Ballverlust verfälscht werden würden. Zum zweiten konnten sie in der Messauswertung nicht von den Fällen unterschieden werden, bei denen der Ball, durch das Simulieren eines Kickerspiels, aus dem Sichtbereich der Kamera gelang.

3.5.1.2 Messung Bildgenerierung/Übertragungszeit

Zum Messen der Bildgenerierung/Übertragungszeit wurde die Bildverarbeitung dahingehend abgeändert, dass ein UDP-Paket versendet wird wenn das Bild aus dem Pufferspeicher ausgelesen wurde. Die gemessenen Zeitdifferenzen setzen sich wie folgt zusammen. Zum ersten aus der Belichtungszeit, die bei beiden Modi $255\mu\text{s}$ beträgt. Zum zweiten aus Kamerainternen Vorgängen wie z.B. der Digitalisierung. Zum dritten aus der Übertragung über Firewire. Zum letzten aus dem Auslesen aus dem Pufferspeicher im BV-Programm und dem anschließendem Versenden der UDP-Pakete über Ethernet.

Format_0:

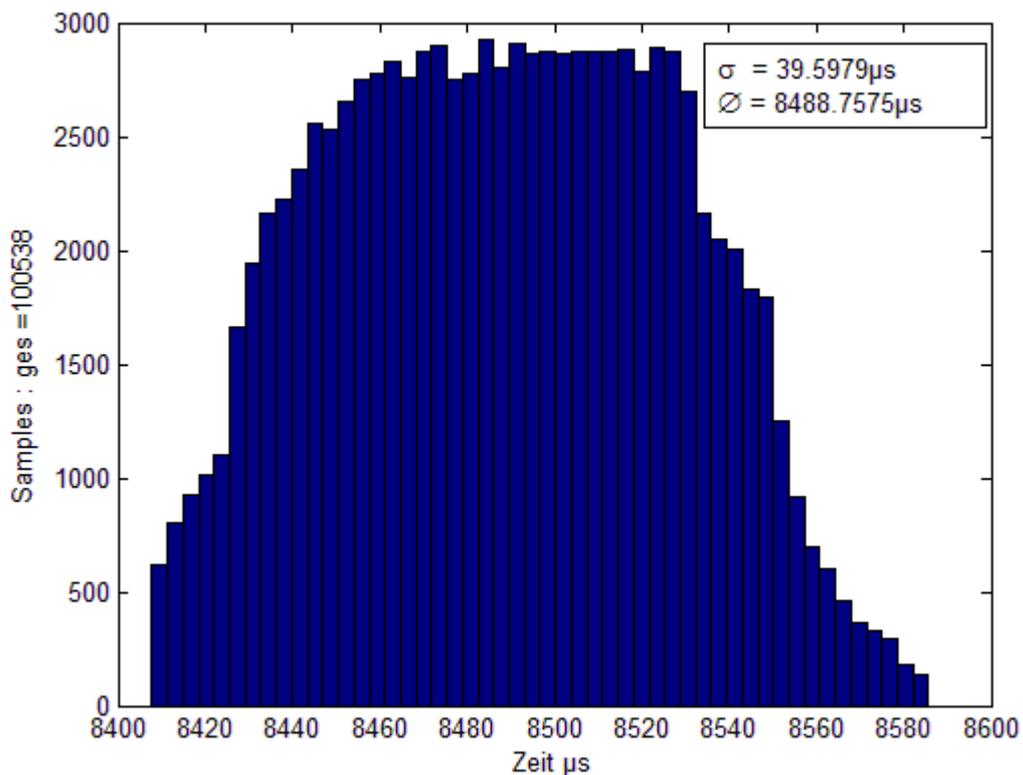


Abbildung 12: Histogramm Bildgenerierung/Übertragungszeit Format_0

Format_7:

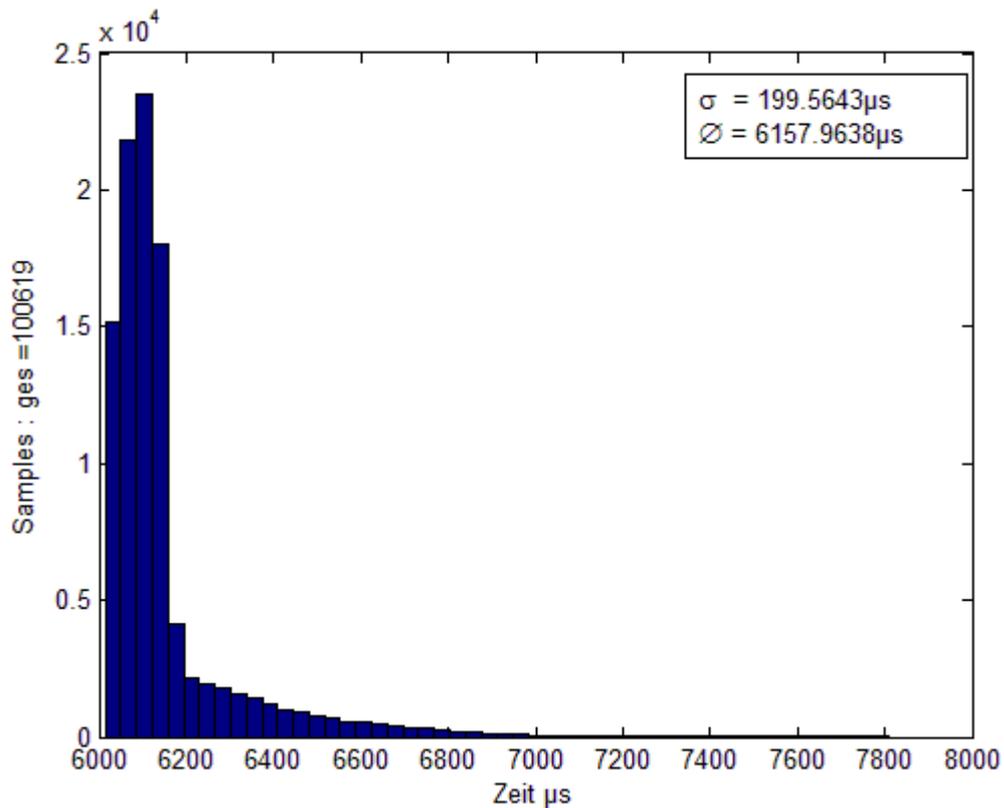


Abbildung 13: Histogramm Bildgenerierung/Übertragungszeit Format_7

Gegenüberstellung	Format 0	Format 7	Δ Format_7 zu Format_0
Mittelwert	8489µs	6158µs	-27,5%
Std. Abweichung	39,6µs	199,4µs	+404%
VarK	0,47%	3,24%	+589%
Ausreißer	0,3%	14,4%	+4700%
Extreme Ausreißer	keine	8,1%	

Tabelle 5: Gegenüberstellung Übertragungszeit

Die Standardabweichung im Format_0 beträgt lediglich 39,6µs. Das ergibt einen Variationskoeffizient im Format 0 von

$$VarK_{format\ 0} = \frac{\sigma}{\bar{x}} = \frac{39,6\mu s}{8489\mu s} = 0,47\%$$

und im Format 7 beträgt der Variationskoeffizient

$$VarK_{format\ 7} = \frac{\sigma}{\bar{x}} = \frac{199,4\mu s}{6158\mu s} = 3,24\%.$$

Die größte Zeit, die im Format 7 gemessen wurde, beträgt 9402µs, dies ist eine Abweichung vom Mittelwert von rund 52%.

Zeiten	Format 0	Format 7
Gemessener Mittelwert t_d	8489 μ s	6158 μ s
Übertragungszeit $t_{\text{über}}$	-7500 μ s	-4625 μ s
Belichtungszeit	-255 μ s	-255 μ s
Restzeit	=734 μ s	=1278 μ s

Tabelle 6: Zusammensetzung der gemessenen Zeiten

Werden die in der Tabelle aufgeführten Firewire-Übertragungszeiten sowie die Belichtungszeit, von den gebildeten Mittelwerten aus den gemessenen Werten, abgezogen. Ergibt sich die Zeitdifferenz in der die kamerainternen Vorgänge und das Auslesen des Puffers sowie das Versenden der Pakete enthalten ist. Da die Bilder im Format_7 kleiner als im Format_0 sind, kann das Auslesen des Pufferspeichers als Grund für die Erhöhung der Zeit ausgeschlossen werden. Denn sie müsste demzufolge kleiner sein. Die UDP-Pakete können ebenso ausgeschlossen werden, da sie in beiden Fällen gleich groß sind und durch die ausschließliche Belastung des Ethernet als deterministisch angesehen werden können. Bleiben also nur kamerainterne Vorgänge als Grund für die größere Zeit. Die gewonnene Verringerung der Übertragungszeit über Firewire im Format_7 gegenüber Format_0 wird durch diesen Effekt erheblich gedämpft.

Fazit:

Was man deutlich erkennen kann, sind die großen Ausreißer im Format_7 und im Gegensatz dazu die sehr gleichmäßigen Zeiten im Format 0. Die Belichtungszeit sowie das Auslesen der Bilder können als relativ konstant angenommen werden. Da der Firewire-Bus isochron überträgt, können Schwankungen auch dort ausgeschlossen werden. Die während der Messungen im Abschnitt 3.5.1.1 aufgetretenen Schwankungen können auf die kamerainternen Vorgänge zurückgeführt werden. Vermutet wird, dass die Kamera nicht für einen ständigen Wechsel der ROI ausgelegt ist.

Der Einsatz des Modus Format_7 birgt also 2 nachteilige Effekte die sich auf die Güte der Bildverarbeitung auswirken. Die Schwankung der Verzögerungszeiten wirken sich besonders nachteilig auf den Beobachter aus, da sie im laufenden Betrieb nicht erfasst werden können. Es können nur Laufzeiten im BV-Programm bestimmt werden. Ist die verstrichene Zeit für einen Satz Positionsdaten seit dem Belichten nicht bekannt, kann die aktuelle Position nicht genau berechnet werden. Schwerer wiegt aber der im Format_7 öfter auftretende Ballverlust während der Ballverfolgung.

3.5.2 Laufzeitmessung BV-Programm

Um die Laufzeiten zu untersuchen wurde die Bildverarbeitung erweitert, genaueres dazu im Abschnitt 4.1.

Die aufgenommenen Messdaten wurden mit Matlab aufbereitet und ausgewertet. Es werden nur Daten berücksichtigt bei denen die Gültigkeit „valid“ ist, also der Ball erkannt wurde. Die Anzahl der Messungen wurde auf 100.000 festgelegt, dies entspricht einer Aufzeichnungsdauer von ca. 8:00min im format_7 und 13:00min im format_0. Während der Messungen wurde der Ball in Bewegung gehalten, aus den schon im vorigen Abschnitt genannten Gründen.

Es wurden 3 Zeitdifferenzen untersucht, des gesamten BV-Programms, der reinen Positionsbestimmung/Bildauswertung und dem auslesen des Bildes aus dem Pufferspeicher. Letzteres wird hier nicht aufgeführt, da keine Unterschiede oder Auffälligkeiten feststellbar waren.

BV-Programm Format_0:

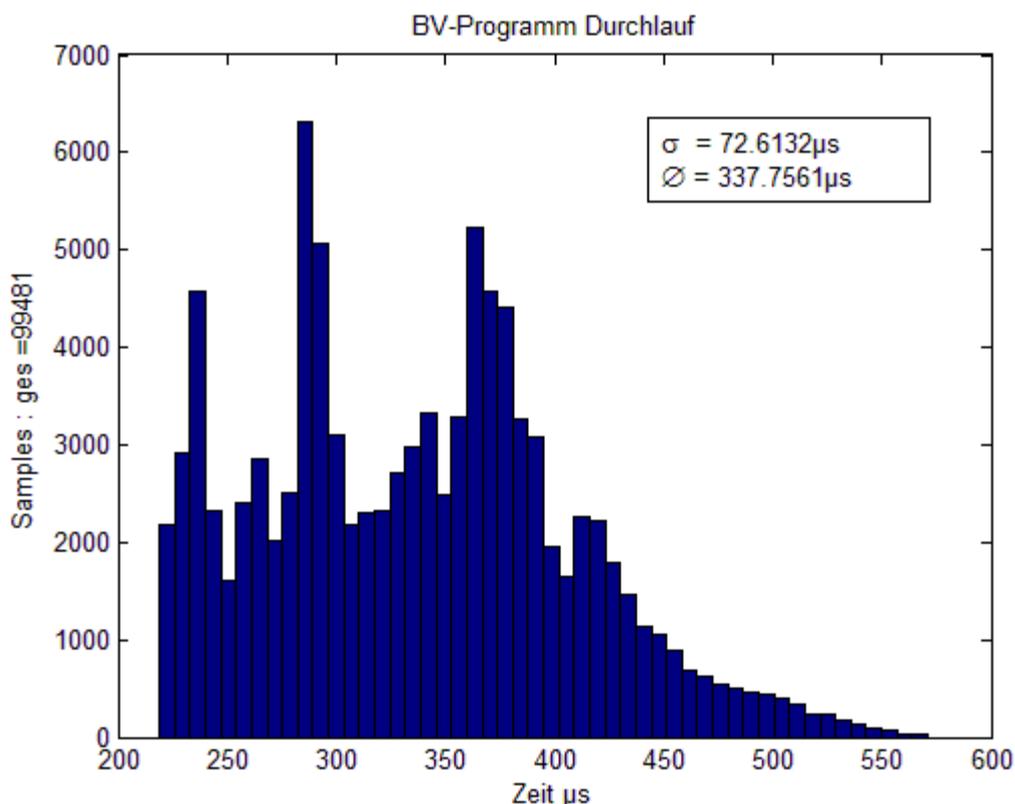


Abbildung 14: Histogramm Durchlaufzeit BV-Programm Format_0

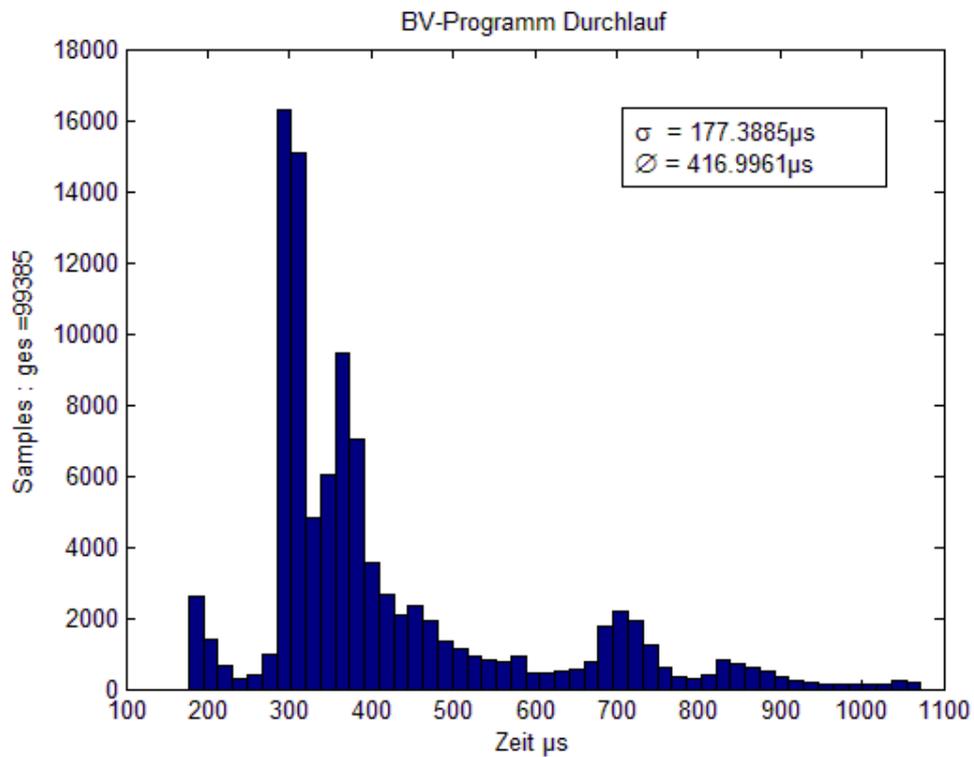
BV-Programm Format_7:

Abbildung 15: Histogramm Durchlaufzeit BV-Programm Format_7

Die beiden Histogramme zeigen die Bearbeitungszeit des BV-Programms in den jeweiligen Modi. Dies ist die Zeit zwischen dem Laden des Bildes aus dem Pufferspeicher und dem Versenden der gewonnenen Informationen über Ethernet.

Bildauswertung Format_0:

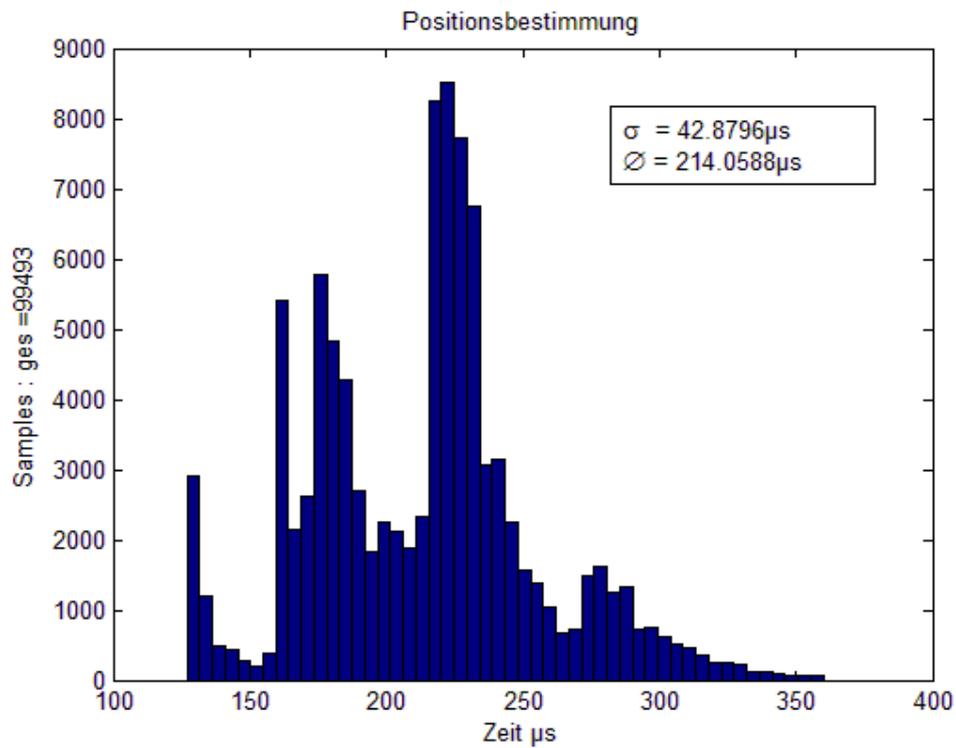


Abbildung 16: Histogramm Durchlaufzeit Bildauswertung Format_0

Bildauswertung Format_7:

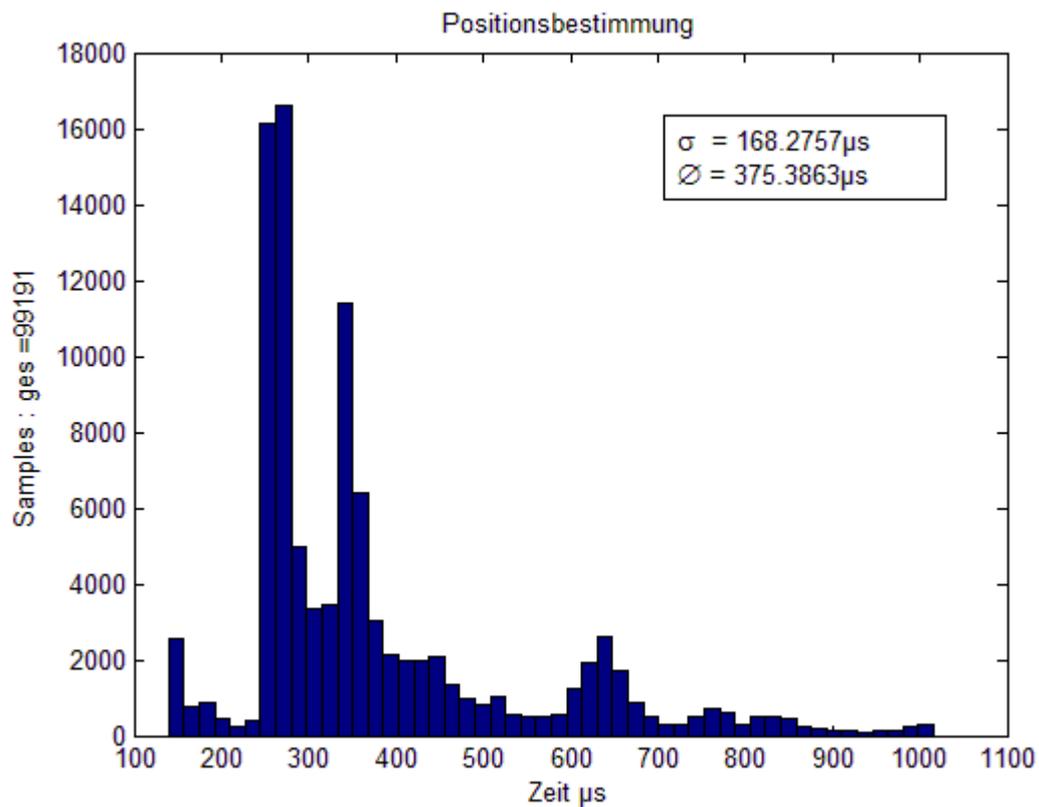


Abbildung 17: Histogramm Durchlaufzeit Bildauswertung Format_7

Die Histogramme der Bildauswertung, zeigen die Zeit die benötigt wird aus den Bildern, mit Hilfe der Momenten Methode, die kinematischen Daten des Balls zu gewinnen. Eingeschlossen ist auch die Fischaugenkorrektur.

Gegenüberstellung	Format_0	Format_7	Δ Format_7 zu Format_0
Gesamtes BV-Programm:			
Mittelwert	337 μ s	417 μ s	+24%
Std. Abweichung	72,6 μ s	177 μ s	+143%
VarK	21,5%	42,4%	+97%
Ausreißer(extreme)	3%(0,1%)	14%(2,6%)	+366%(+2500%)
Positionsbestimmung			
Mittelwert	214 μ s	375 μ s	+75%
Std. Abweichung	43 μ s	168 μ s	+290%
VarK	20,1%	44,8%	+123%

Tabelle 7: Gegenüberstellung Laufzeiten Format_0 und Format_7

Die Tabelle zeigt eine Gegenüberstellung der beiden Modi. Was auch in diesem Teil des BV-Systems auffällt sind die Ausreißer im Format 7. Der Grund der Ausreißer ist ein Verlust des Balls in der Ballerkennung was dazu führt, dass im nächsten Durchlauf das gesamte Bild abgesucht wird.

3.5.3 Fazit

Der Einsatz des Modus Format 7 birgt neben den positiven Effekten der Erhöhung der Bildwiderholrate und der Verringerung der Verzögerungszeit auch den Nachteil der vergrößerten Schwankung der Verzögerungszeit. Zusätzlich kam es im Modus Format_7 bei Ballbewegungen. Das Resultat ist dann ein Umschalten der kamerainternen ROI auf 640x480Pixel, was alle Vorteile zu Nichte macht. Eine Idee aus diesen Umständen ist es die beiden Modi Format_0 und Format_7 zu kombinieren, um deren jeweilige Vorteile zu nutzen. Behandelt wird dieses Thema im Abschnitt 4.2.

4 Optimierung/Erweiterung der bestehenden Lösung

4.1 Implementierung Measurement Klasse

Um die kinematischen Daten des Balls und Laufzeiten in der Bildverarbeitung zu untersuchen, wurde die Bildverarbeitung mit einer Klasse Namens: „measurement“ erweitert. Sie dient dazu, Methoden bereitzustellen die während des Betriebes der Bildverarbeitung, für eine definierte Anzahl, Messdaten in eine .csv Datei zu speichern. Zu Beginn dieser Arbeit befand sich schon eine Klasse zum Speichern von Laufzeiten, mit dem Namen „time_ measurement“, in der Bildverarbeitung. Die Funktionen dieser Klasse wurden teilweise in die neue Klasse integriert. Um die Bedienung für die Messungen zu vereinfachen, wurde auch die graphische Oberfläche erweitert. Mit dem Fortschreiten der Arbeit war es nötig immer mehr Anpassungen an dieser Klasse vorzunehmen, um den Anforderung der Analyseaufgaben gerecht zu werden.

Grafische Oberfläche



Abbildung 18: PopUp Messungen

Abbildung 18: PopUp Messungen zeigt das implementierte PopUp-Fenster für die Messungen. Über den Schieberegler kann die Anzahl der Messungen eingestellt werden. Das linke Display gibt die Soll-Anzahl und das rechte Display die Ist-Anzahl der Messungen an. Der Button Stop beendet die Messung und ruft den Filedialog auf. Während einer aktiven Messung, die über die Start Buttons angestoßen werden, färbt sich der jeweilige Start Button grün, um den aktiven Messvorgang zu signalisieren.

Mit der Funktion „Positionsdaten loggen“ werden die kinematischen Größen des Balls sowie einige Zeitdifferenzen aufgenommen. Über die Funktion BV-Zeiten werden alle relevanten Zeiten aufgenommen. Alle Daten des Beobachters können über „Beobachter loggen“ aufgezeichnet werden. Für den Beobachter sind noch 2

Zusatzoptionen verfügbar. Sie waren für die Evaluierung des Beobachters von Nöten und werden im Abschnitt 6.3 genauer erklärt.

Die Struktur der erstellten csv-Dateien ist im Anhang zu finden. Der Dateinamen besteht der aus gewählten Messung sowie dem verwendeten Modus und einem Zeitstempel (Bsp.: „messung_beobachter_f7s_7.1.15-15.49“).

4.2 Kombination der Verfahren Format_0 und Format_7(Format_7_static)

4.2.1 Ansatz

Die Basis der Überlegung ist der Umstand, dass im Format 0 ein Bild mit 640x480 Pixel aufgenommen und übertragen wird, das tatsächliche Spielfeld in der Abbildung der Kamera aber deutlich kleiner ist. Somit werden Pixel übertragen die nicht dem Spielfeld zuzuordnen sind (siehe Abbildung 19).



Abbildung 19: Kamerabild/Spielfeld

Der Ablauf in der Bildverarbeitung unterscheidet sich mit der Nutzung der Modi Format_0 und Format_7 im Grunde dadurch, dass im Format_0 softwareseitig und im Format_7 kameraseitig eine ROI mit der Größe 64x64Pixel um die letzte bekannte Ballposition gesetzt wird. Im Format_0 nutzt die Bildverarbeitung also eine Software-ROI und im Modus Format_7 eine Kamera-ROI.

Die Idee ist nun im Modus Format_7 eine statische ROI so zu wählen, dass sie nur den Bereich des Spielfeldes überdeckt. So werden nur die relevanten Pixel übertragen. Dadurch kann die Bildrate der Kamera erhöht und damit die

Übertragungszeit über Firewire verringert werden. In der BV würde dann, wie im Modus Format_0, eine ROI mit 64x64Pixel auf die letzte bekannte Ballposition gesetzt werden, um den Rechenaufwand für die Schwerpunktermittlung zu minimieren. Dadurch könnten die Vorteile der beiden Verfahren miteinander Kombiniert werden. Durch die Verwendung einer statischen ROI im Format_7 wurde dem neuen Verfahren der Name „Format_7_static“ gegeben. Um noch einmal die Vor- bzw. Nachteile der Modi aufzugreifen folgt eine Tabelle mit diesen.

Vor-und Nachteile	Format 0	Format 7
Vorteile:	+bei Ballverlust kein Umschalten der kamerainternen ROI notwendig da Software-ROI	+höhere Frameraten möglich(siehe Abschnitt 3.3.2)
	+robustere Bearbeitung in der Bildverarbeitung(siehe Abschnitt 3.5.2)	+kürzere Übertragungszeit der Bilder über Firewire(siehe Abschnitt 3.3)
Nachteile:	-hohe Verzögerungszeit (siehe Abschnitt 3.5.1.1)	-starke Schwankung der Verzögerungszeit (siehe Abschnitt 3.5.1.1)
		-häufigere Ballverluste

Tabelle 8: Vor und Nachteile der Modi Format_0 und Format_7

Wie schon im Abschnitt 3.3.2 erwähnt liest die Kamera die Pixel des CCD Sensors zeilenweise(in X-Richtung) aus. Durch eine Verkleinerung des Bildes in Y-Richtung kann damit die Bildwiderholrate erhöht werden.

Bildwiderholrate:

Die maximale Bildwiderholrate abhängig von der Bildhöhe der Kamera Guppy PRO F-031 im Format_7, errechnet sich wie folgt:

$$Bildrate = \frac{1}{148,71\mu s + Bildhöhe \cdot 16,05\mu s + (508 - Bildhöhe) \cdot 2,93\mu s} \quad (4)$$

[4, p. 189]

Ein eingemessenes Bild hat eine Ausdehnung in der Bildhöhe von 380Pixel. Die Wahl der ROI auf die nächst größere Stufe von 384 Pixel (Anmerkung Kamerabedingt muss die ROI durch 4 Teilbar sein) ergibt mit Gleichung (4) eine maximale Bildrate von rund 150fps.

Übertragungszeit:

Durch die Bildwiederholrate ergibt sich eine maximale Übertragungszeit von:

$$t_{\text{über}} < \frac{1}{150\text{fps}} = 6,67\text{ms}$$

Der genaue Wert kann über die eingestellte Kamera-ROI und der Paketgröße berechnet werden. Nach dem Konfigurieren der Kamera auf eine ROI konnte die automatisch gewählte Paketgröße aus einem Kamera-Register ausgelesen werden. Sie betrug bei einer ROI von 612x384Pixel genau 4436Pixel je Paket. Mit Gleichung (3) ergibt sich dann:

$$t_{\text{über}} = \left\lceil \frac{612 \cdot 384\text{Pixel}}{4436\text{Pixel}} \right\rceil \cdot 125\mu\text{s} = 6,63\text{ms}$$

Datenrate:

Die genutzte Datenrate beträgt dann mit Gleichung (2):

$$C = \frac{4436\text{Pixel} \cdot 8 \frac{\text{bit}}{\text{Pixel}}}{125\mu\text{s}} = 284\text{Mbit/s}$$

4.2.2 Entwurf

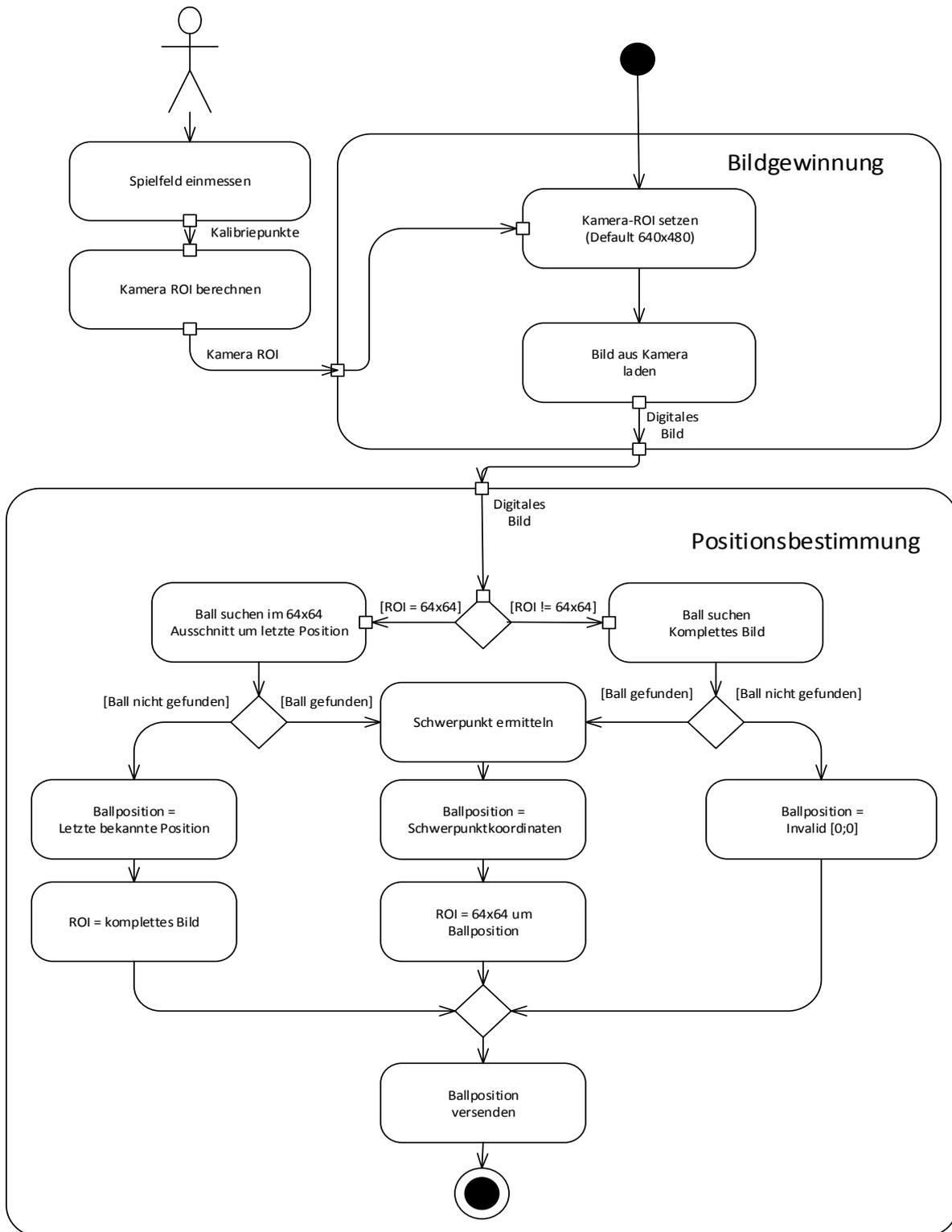


Abbildung 20: Aktivitätsdiagramm Format_7_static

Abbildung 20 zeigt den grundlegenden Ablauf des neuen Verfahrens.

Im Grunde werden bei dem neuen Verfahren zwei statt einer ROI genutzt. Eine Kamera-ROI die den Abmaßen und Position der Spielfeldabbildung in der Kamera entspricht und einer Software-ROI die um die ermittelte Ballposition gelegt wird um den Rechenaufwand für die Schwerpunktbestimmung zu reduzieren.

Die Bildverarbeitung wird mit einer Kamera-ROI von 640×480Pixel initiiert.

Zu Beginn der Inbetriebnahme werden über die Funktion „Spielfeld einmessen“ die Koordinaten der Spielfeldecken aufgenommen. Diese Koordinaten können auch aus einer früheren Einmessung geladen werden. Danach wird eine Berechnung der Kamera ROI aus diesen Koordinaten durchgeführt. Kamerabedingt auf die nächstgrößere durch 4 Teilbare Zahl. Danach wird die Kamera auf diese ROI konfiguriert.

Die Positionsbestimmung ist an die im Format_0 genutzte angelehnt. Ist keine Ballposition bekannt, wird im kompletten von der Kamera übertragendem Bild der Ball gesucht. Wird ein Ball in diesem Bild gefunden, kommt es zur Schwerpunktbestimmung mit Hilfe der Momenten-Methode. Um die Ballposition wird dann eine softwareseitige ROI gesetzt um für das folgende Bild den Rechenaufwand zu minimieren. Die Größe dieser ROI beträgt 64×64 Pixel.

Kommt es zu dem Fall, dass kein Ball in der ROI gefunden wird, wird sie auf das komplette Bild zurückgesetzt und der Ball in dem kompletten Bild gesucht. Der Vorteil liegt hier gegenüber dem Format_7, dass die Kamera nicht auf eine neue ROI umgesetzt werden muss.

4.2.3 Implementierung

Es wurden keine neuen Klassen implementiert sondern die Vorhandenen erweitert. Alle Anpassungen sind über die Präprozessordirektive `#ifdef` in die Bildverarbeitung implementiert. Da wirkliche Tests erst im vollen Ausbau des Kicker Tisches möglich sind wurde darauf Wert gelegt alle 3 Verfahren verfügbar zu machen. Vor der Implementierung konnte über „`#define FORMAT_7`“ in der `main.h` das aktive Verfahren von `Format_0` zu `Format_7` gewechselt werden. Dies war ausreichend für zwei Verfahren, musste aber für einen Dritten erweitert werden. Aus diesem Grund wurde das Programm dahingehen abgeändert, dass über „`#define FORMAT_0`“ dieser explizit gewählt werden kann.

Das neue Verfahren `Format_7_static` kann über „`#define FORMAT_7_STATIC`“ aktiviert werden. Alle 3 Modi schließen sich gegenseitig aus, wobei jetzt einer

zwingend definiert werden muss.

Die Anpassungen des Programms an die neuen Anforderungen waren sehr umfangreich und werden hier nicht näher betrachtet. Die grundlegenden Aufgaben der Klassen wurden aber nicht verändert und können in [2] nachgelesen werden.

4.2.4 Messtechnische Evaluierung/Vergleich Format_7_static

Um das neue Verfahren bewerten zu können wird er in diesem Abschnitt mit den anderen Verfahren hinsichtlich seines Zeitverhaltens verglichen. Untersucht werden, wie schon im Abschnitt 3.5 die anderen Verfahren, die Verzögerung des gesamten BV-Systems, die Bildgewinnung/Übertragung und die Laufzeiten im BV-Programm.

4.2.4.1 Messung Verzögerungszeit BV-System

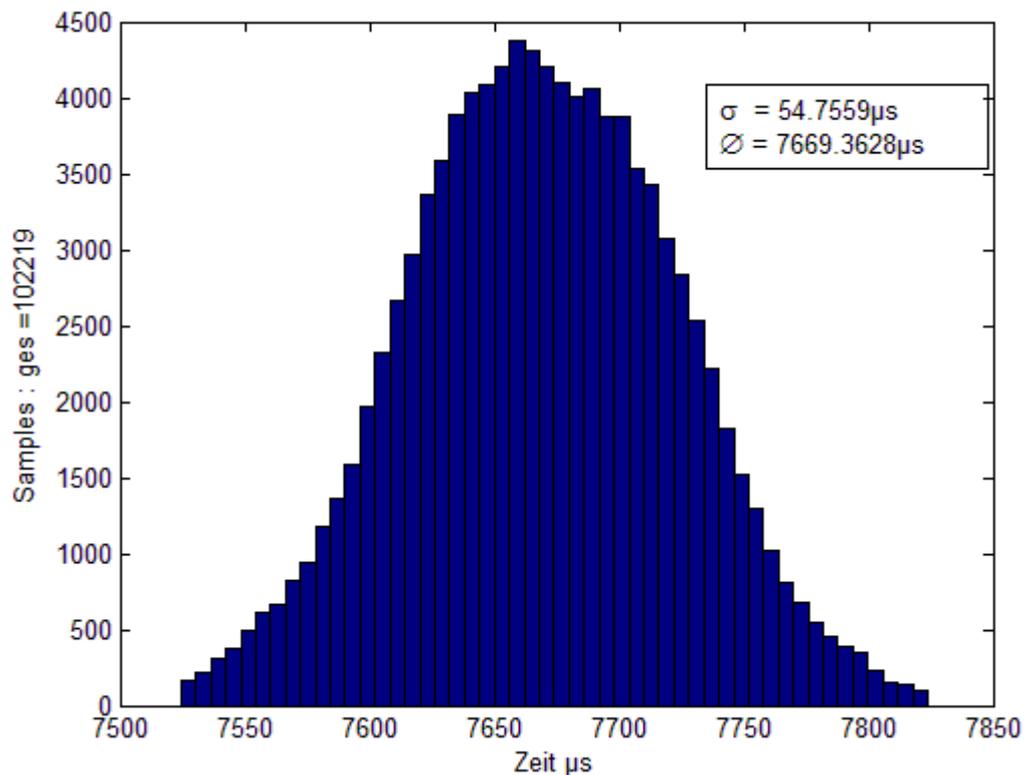


Abbildung 21: Histogramm Verzögerungszeit BV-System Format_7_static

Gegenüberstellung	Format 0	Format 7	Format 7 static	$\Delta F7s$ zu $F0(F7)$
Mittelwert	8813µs	6552µs	7669µs	-13%(+17%)
Std. Abweichung	73,5µs	242,7µs	54,7µs	-26%(-77%)
VarK	0,8%	3,7%	0,7%	-13%(-81%)
Ausreißer	6,4%	6,7%	3,9%	-39%(-42%)
Extreme Ausreißer	0,07%	1,2%	0,03%	-57%(-97%)

Tabelle 9: Gegenüberstellung Verzögerungszeit BV-System der 3 Verfahren

Fazit:

Die Bildverarbeitung arbeitet mit dem neuen Verfahren deutlich besser als im Format_7. Zwar ist die Verzögerungszeit mit durchschnittlich 7669 μ s gegenüber dem Format_7 um 14% größer aber die Schwankungen und Ausreißer sind erheblich kleiner. Besonders die Ballverluste während der Ballbewegung blieben aus. Das neue Verfahren ist dem Format_0 in der Güte sehr ähnlich jedoch in der Verzögerung um -12% kleiner.

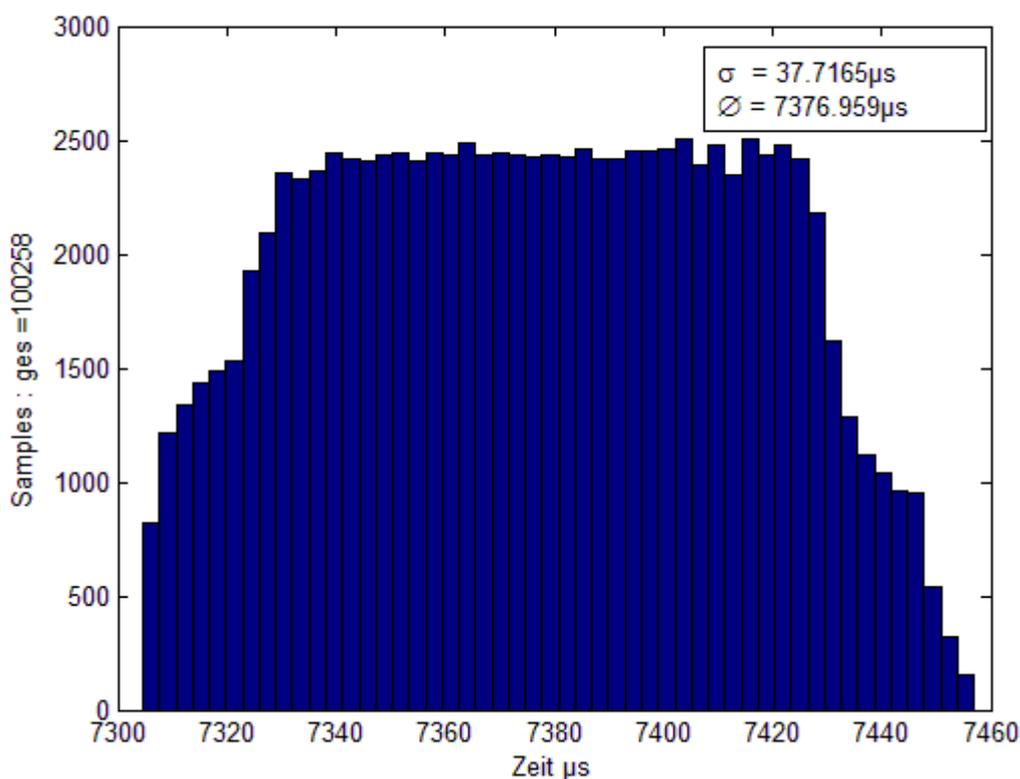
4.2.4.2 Messung Übertragung/Bildgewinnung

Abbildung 22: Histogramm Übertragung/Bildgewinnung Format_7_static

Gegenüberstellung	Format 0	Format 7	Format_7 static	$\Delta F7s$ zu F0(F7)
Mittelwert	8489 μ s	6158 μ s	7377 μ s	-13%(+20%)
Std. Abweichung	39,6 μ s	199,4 μ s	37,7 μ s	-4,8%(-81%)
VarK	0,47%	3,24%	0,51%	+5%(-84%)
Ausreißer	0,3%	14,4%	0,29%	-3%(-98%)
Extreme Ausreißer	keine	8,1%	einer	

Tabelle 10: Gegenüberstellung Bildgewinnung/Übertragung

Fazit:

Die Ergebnisse aus Format_0 und Format_7_static sind bis auf den Mittelwert

nahezu identisch. Da beide Verfahren mit einer statischen ROI arbeiten wurde dieses Ergebnis erwartet.

4.2.4.3 Messung Laufzeit BV-Programm

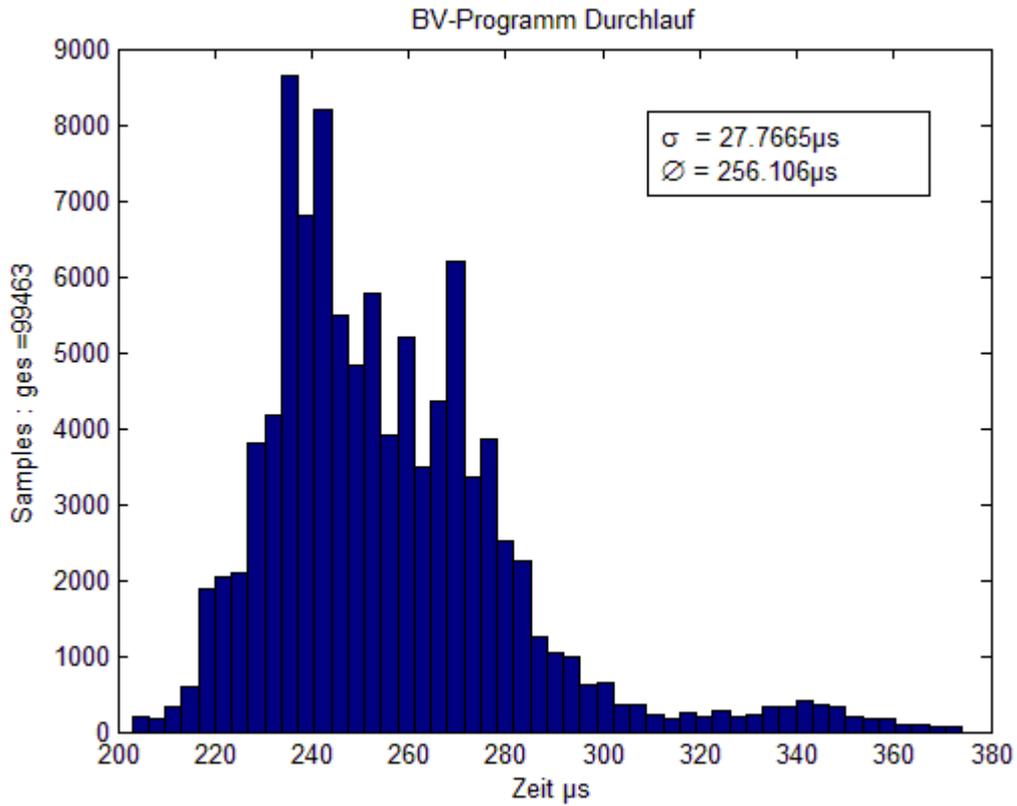


Abbildung 23: Histogramm Laufzeit BV-Programm Format_7_static

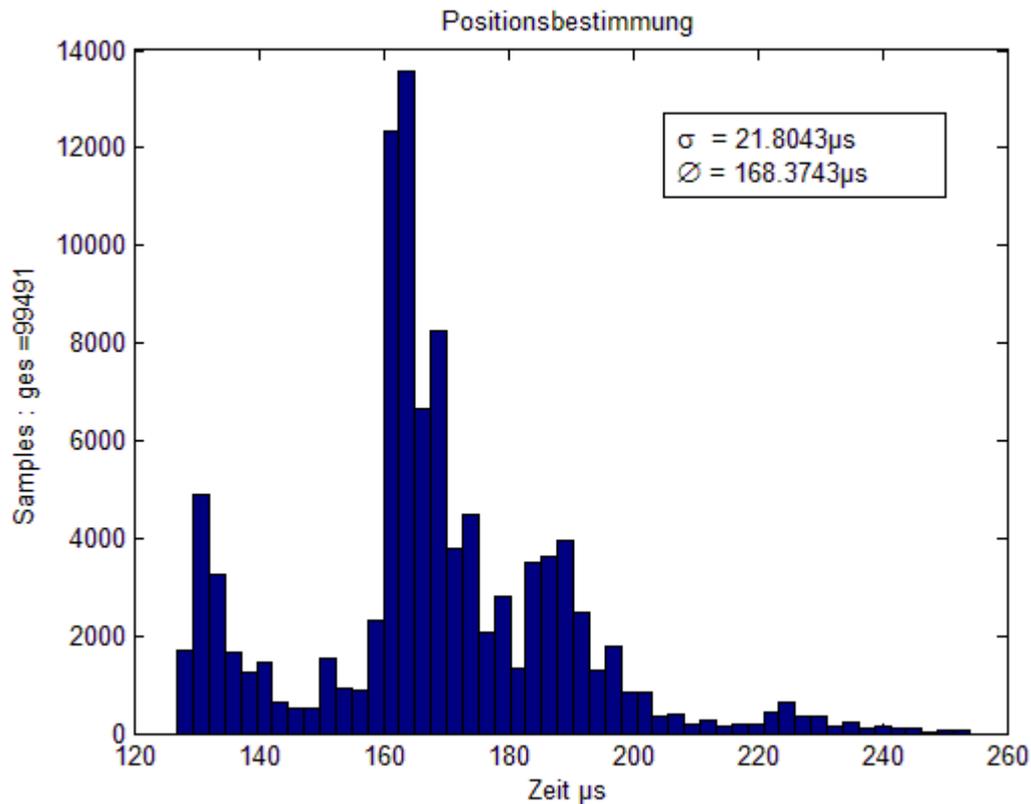


Abbildung 24: Histogramm Laufzeit Bildauswertung Format_7_static

Gegenüberstellung	Format_0	Format_7	Format_7 static	$\Delta F7s$ zu F0(F7)
Gesamte Bildverarbeitung:				
Mittelwert	337µs	417µs	256µs	-24%(-39%)
Std. Abweichung	72,6µs	177µs	27,8µs	-62%(-84%)
VarK	21,5%	42,4%	10,9%	-49%(-74%)
Positionsbestimmung				
Mittelwert	214µs	375µs	168µs	-21%(-55%)
Std. Abweichung	43µs	168µs	21,8µs	-49%(-87%)
VarK	20,1%	44,8%	13%	-35%(-71%)

Tabelle 11: Gegenüberstellung Laufzeiten der 3 Verfahren

Fazit:

Die Umsetzung des neuen Verfahrens erzielt auch in den Laufzeiten des BV-Programms bessere Ergebnisse. Abschließend kann als Resultat eine wirkliche Verbesserung fest gemacht werden. Das neue Verfahren hat zwar gegenüber dem Format_7 eine kleinere Bildwiderholrate und längere Übertragungszeit, arbeitet aber mit deutlich weniger Schwankungen. Durch die statische Kamera-ROI gibt es auch weniger Probleme mit der Ballverfolgung. Das neue Verfahren wird für den späteren Gebrauch empfohlen.

4.3 Ballerkennung/Reflektionsfilter

Problem:

Im Testbetrieb kam es des Öfteren vor, dass die Reflektionen an den längsseitigen Banden von der BV-Software fälschlicherweise als Ball interpretiert wurden. Als Ursache konnte das Springen des Balls nach der Kollision am Spielfeldrand ausgemacht werden. Im Sprung kann der Ball nicht erkannt werden, da er nicht mehr von den LEDs angestrahlt wird.

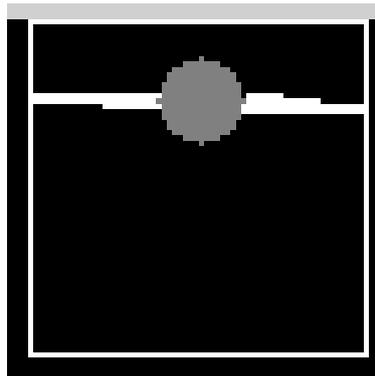


Abbildung 25: Bandenreflektion

Abbildung 25 zeigt die ROI in der die Bande(weiß) als Ball interpretiert wird(dunkelgrau). Das hat zur Folge, dass die ROI auf der Bande „hängt“ und der eigentliche Ball nicht mehr gefunden werden kann. Dies führt dazu, dass das Spiel unterbrochen werden muss.

Optimierung:

Um diesen Effekt zu eliminieren wurde eine Überprüfung implementiert, die sich die Eigenheit der Reflektionen zugute macht. Da sich die Reflektionen nur an der Längsseite befinden, an denen die LEDs angebracht sind, und ihre Ausmaße in Y-Richtung nur einige Pixel betragen, konnte mit einer Zählung der zusammenhängenden Pixel in Y-Richtung ein Filter implementiert werden. Übersteigt die Anzahl der zusammenhängenden Pixel in Y-Richtung nicht einen vordefinierten Schwellwert, was dem Ball entsprechen würde, so wird die Suche in dieser ROI abgerochen und der Ball im gesamten Bild gesucht.

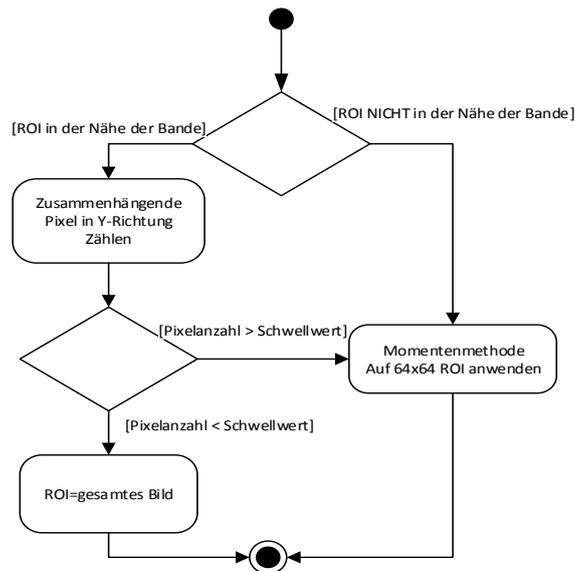


Abbildung 26: Zustandsautomat Reflektionsfilter

In den Optionen für die Alternativmethode kann der Schwellwert eingestellt und auch der Reflektionsfilter aktiviert oder deaktiviert werden. Nach einigen Tests wurde ein Schwellwert von 5 Pixeln als ausreichend befunden, bei dem es nicht mehr zu diesem „hängen“ der ROI kam. Der Schwellwert sollte die Ausdehnung des Balls in Y-Richtung(17 Pixel) nicht überschreiten, da der Ball sonst nicht mehr detektiert werden würde.

4.4 Optimierung Momentenmethode

Problem:

Die Reflektionen an den längsseitigen Banden wirken sich auch negativ auf die Positionsbestimmung über die Momentenmethode aus, die über OpenCV implementiert ist.

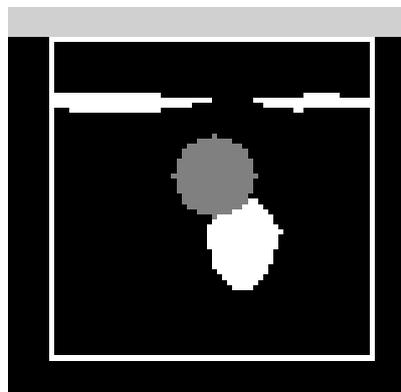


Abbildung 27: Verschiebung der Position durch Reflektionen

In Abbildung 27 sieht man wie, durch die Reflektionen(weiße Striche, oben), der errechnete Schwerpunkt des Bildes(dunkelgrau) vom eigentlichen Ball(weiß)

Richtung Bande verzerrt wird. Das weiße Rechteck stellt die ROI dar. Durch diesen Effekt verschlechtert sich die Qualität der Ballposition in der Nähe der Banden erheblich. In dem Beispielfeld sind es ca. 17 Pixel in Y-Richtung und 5 in X-Richtung.

Optimierung:

Um diesen Fehler zu minimieren wurde die Momentenmethode in einem neuen Algorithmus in das BV-Programm implementiert. Durch die neue Implementierung kann in die Berechnung eingegriffen und die Reflektionen gefiltert werden.

Eine zweite Möglichkeit wäre gewesen, die Bandenreflektionen vor der Momentenmethode zu filtern. Nachteilig daran wäre, dass das Bild zwei Mal durchlaufen werden müsste und sich so die Rechenzeit erhöht hätte.

Die Gleichungen [6] für die Momentenmethode über die der Schwerpunkt berechnet wird lauten:

$$m_{ji} = \sum_{x,y} (array(x, y) \cdot x^j \cdot y^i) \quad (5)$$

$$\bar{x} = \frac{m_{10}}{m_{00}} \quad (6)$$

$$\bar{y} = \frac{m_{01}}{m_{00}} \quad (7)$$

Wobei \bar{x} und \bar{y} die Koordinaten des Schwerpunktes in dem *array*(Bild) darstellen.

In der neuen Implementierung werden die zusammenhängen Pixel in X-Richtung gezählt. Überschreiten sie die Dimensionen des Balls können sie der Bandenreflektion zugeordnet werden und werden nicht für die Schwerpunktberechnung berücksichtigt.

Über das Optionsmenü der Alternativmethode kann die manuelle Momentenmethode aktiviert oder deaktiviert werden. Zusätzlich lässt sich die Pixelschwelle festlegen, bei derer Überschreitung die Pixel als Bandenreflektion markiert werden. Als guter Wert wurden durch Tests 20 Pixel ermittelt.

Ballposition	OpenCV	Neue Implement.	Δ neu zu OpenCV
Bildmitte ohne Refl.	26 μ s	31,97 μ s	+23%
Bildrand mit Refl.	25,82 μ s	42,81 μ s	+66%

Tabelle 12: Gegenüberstellung Momentenmethoden

Wie in der Tabelle 12 zu sehen erhöht sich die Bearbeitungszeit, durch die neue Implementierung der Momentenmethode bezogen auf die gesamte Verzögerung des BV-Systems, nur unwesentlich.

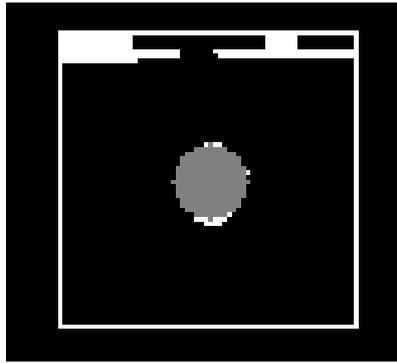


Abbildung 28: neue Implementierung der Momentenmethode

Die Abbildung 28 zeigt ein Bild mit derselben Position des Balls wie in Abbildung 27. Wie man unschwer erkennen kann ist das Ergebnis deutlich besser. Der Fehler beträgt in diesem Beispiel nur einen Pixel in der Y-Richtung.

4.5 Fazit Optimierung bestehende Lösung

Mit einigen Anpassungen war es möglich das BV-Programm deutlich zu verbessern. Besonders die Implementierung des `Format_7_static` erzielte gute Ergebnisse. Da zum Zeitpunkt der Modifikationen der Kickertisch nicht fertig aufgebaut war, konnten die Auswirkungen nicht vollends im Spielbetrieb getestet werden. Aus diesem Grund können über die grafische Oberfläche die meisten Parameter für die Algorithmen verändert werden, sowie die einzelnen Modifikationen aktiviert bzw. deaktiviert werden.

5 Physikalische Effekte

Da der Spielball von physikalischen Effekten in seiner Bewegung beeinflusst wird, ist es unablässig diese Einflüsse zu untersuchen, ob sie in dem Beobachter berücksichtigt werden müssen. Der Spielball wird insgesamt von 6 physikalischen Effekten beeinflusst, die in diesem Abschnitt näher betrachtet werden. Darunter sind 3 Reibungskräfte, die Rollreibung, die Luftreibung und die Gleitreibung. Zusätzlich wirken noch die Hangabtriebskraft, der Stoß und der Magnus Effekt.

5.1 Luftwiderstand / Rollwiderstand

Da die beiden Effekte immer vorhanden sind solange sich der Ball bewegt und sich gegenseitig beeinflussen, werden sie zusammen betrachtet. Die anderen Effekte sind nur bei Rotationen bzw. bei der Kollision mit der Bande vorhanden.

5.1.1 Luftwiderstand

Der Luftwiderstand entsteht, wenn sich ein Körper durch ein Gas bewegt und es dabei verdrängt. Alle Konstanten sind gegeben bzw. können errechnet werden. Die Formel für den Luftwiderstand F_W lautet:

$$F_W = \frac{c_W \cdot \rho_L \cdot A_p}{2} \cdot v^2 \quad (8)$$

Der Luftwiderstand wird von der Luftdichte ρ_L , der Anströmfläche A_p , der Geschwindigkeit v und dem Luftwiderstandsbeiwert c_W (der den Einfluss der Körperform repräsentiert) beeinflusst.

[7, p. 158]

Die Anströmfläche A_p des Spielballs errechnet sich wie folgt:

$$A_p = \frac{\pi \cdot d^2}{4} \quad (9)$$

Konstanten	
Luftdichte ρ_L	1,19kg/m ³
Luftwiderstandsbeiwert für eine Kugel c_W	0,45-0,5 ^[A1]
Anströmfläche A_p	0,000908m ²

Tabelle 13: statische Größen der Luftreibung

[A1] <http://www.code-knacker.de/cw-wert.htm> und <http://aj-dons.de/Physik/Galilei/Luftfall.pdf>

5.1.2 Rollwiderstand

Der Rollwiderstand entsteht durch Verformung der Unterlage und des Balls während der Rollbewegung. Das Eindringen des Balls in die Unterlage führt zu einem Widerstand, da der Ball ständig die Kante überwinden muss.

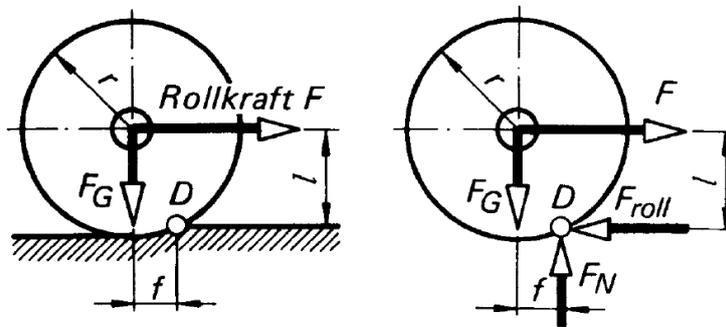


Abbildung 29: Rollreibung [7, p. 135]

Da die Eindringtiefe sehr gering ist kann $l = r$ gesetzt werden.

Die Momentengleichung für die gleichförmige Rollbewegung lautet:

$$\sum M = 0 = F_G \cdot f - F_R \cdot r \quad (10)$$

Die Gleichung für die Rollwiderstandskraft F_R lautet:

$$F_R = F_G \frac{f}{r} = m_{Ball} \cdot g \cdot c_R \quad (11)$$

Der Quotient $\frac{f}{r}$ ist der Rollwiderstandskoeffizient c_R . Die Gewichtskraft F_G errechnet sich über die Summe aus dem Ballgewicht m und der Erdbeschleunigung g .

[7, p. 135]

Da der Hebelarm f für den Spielball nicht bestimmt werden kann und c_R für diese Werkstoffkombination unbekannt ist, wird der Rollwiderstandsbeiwert c_R im nächsten Abschnitt messtechnisch ermittelt.

5.1.2.1 Messtechnische Ermittlung Rollwiderstandsbeiwert

Zur Ermittlung des Rollwiderstandsbeiwertes c_R werden die 3 verschiedenen Bälle diagonal, um eine möglichst lange Ausrollstrecke zu erhalten, über den Kickertisch gerollt. Die Geschwindigkeit wird möglichst klein gewählt um den Einfluss der Luftreibung zu minimieren. Für jeden Ball wurden 5 Messungen durchgeführt.

Die Ballpositionen werden mithilfe des BV-Systems aufgezeichnet und mit dem Programm matlab ausgewertet.

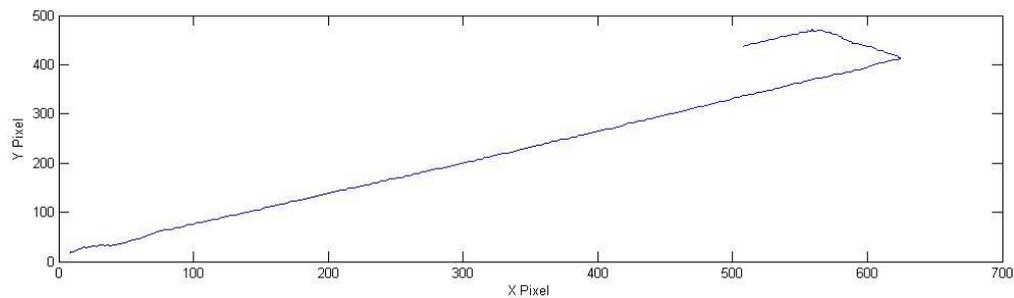


Abbildung 30: Beispiel einer Balltrajektorie

In Abbildung 30 ist beispielhaft die diagonale Ballbewegung zu sehen. Um Störungen die beim Anstoßen entstehen zu vermeiden, werden nur die Daten zwischen den Koordinaten $x:y=100:100$ und $500:350$ ausgewertet.

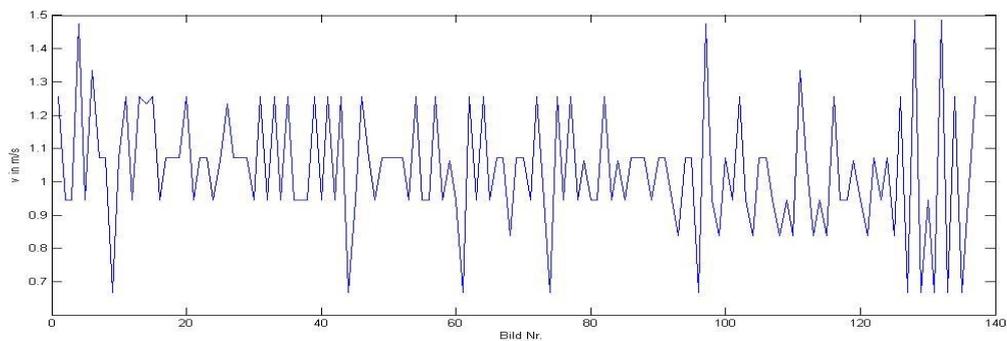


Abbildung 31: Errechnete Ballgeschwindigkeit aus Positionsdaten

Da es durch die grobe Auflösung der Kamera zu starken Sprüngen in der berechneten Geschwindigkeit kommt, wie in Abbildung 31 zu sehen. Wird die Beschleunigung des Balls, einer linearen Abnahme der Geschwindigkeit zu Grunde, über zwei Geschwindigkeitsmittelwerte bestimmt.

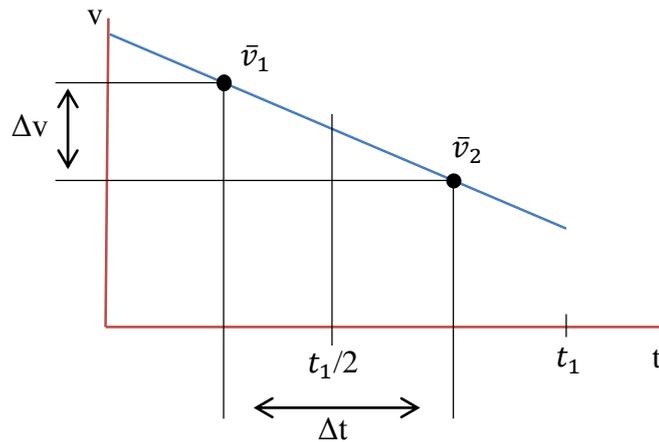


Abbildung 32: Geschwindigkeitsmittelwerte zur Ermittlung der Beschleunigung

Die Geschwindigkeitsgerade $v(t)$ wird bei $\frac{t_1}{2}$ geteilt und über 2 Geschwindigkeitsmittelwerte \bar{v}_1 und \bar{v}_2 sowie der Zeitdifferenz Δt die Beschleunigung a errechnet. \bar{v}_1 im Bereich $0 - \frac{t_1}{2}$ und \bar{v}_2 im Bereich $\frac{t_1}{2} - t_1$. Die Mittelwerte befinden sich auf der Zeitachse bei $t_{v1} = \frac{1}{4}t_1$ bzw. bei $t_{v2} = \frac{3}{4}t_1$. Daraus folgt dann $\Delta t = \frac{t_1}{2}$.

Beweis:

Hinweis: Exemplarisch wird der Beweis für t_{v1} durchgeführt.

$$v(t) = a \cdot t + v_0$$

$$t_{v1} = \frac{\bar{v}_1 - v_0}{a}$$

$$\bar{v}_1 = \frac{1}{b-a} \cdot \int_a^b v(t) dt = \frac{1}{\frac{t_1}{2}} \cdot \int_0^{\frac{t_1}{2}} v(t) dt = \frac{a \cdot t_1}{4} + v_0$$

$$t_{v1} = \frac{1}{4} t_1$$

Für die Ermittlung des Rollwiderstandsbeiwertes wird wie schon erwähnt der Luftwiderstand vernachlässigt. Dadurch wirkt nur die Rollwiderstandskraft F_R gegen die Trägheitskraft F_T des Balls.

$$0 = F_T - F_R \quad (12)$$

$$F_T = -m_{Ball} \cdot a(t) \quad (13)$$

Durch einsetzen der Gleichung 12 für F_T und 10 für F_R in 11 sowie dem Umstellen nach C_R erhält man:

$$C_r = \frac{-a(t)}{g} \quad (14)$$

Die Durchschnittlichen Werte aus den 5 Messungen je Ball sind in Tabelle 14 aufgeführt.

Ball	v1 in m/s	v2 in m/s	a in m/s ²	C _r
Weiß	1,0494	0,969	-1,1186	0,0167
Rot	0,9286	0,8768	-0,0902	0,0099
Kork	1,097	0,9665	-0,25875	0,0263

Tabelle 14: Ermittelte Rollwiderstandsbeiwerte

Erwartungsgemäß hat der weiche Korkball den größten Rollwiderstandsbeiwert. Die Genauigkeit der Messungen ist jedoch nicht als allzu hoch einzuschätzen, da die Auflösung der Kamera, die Ausrollstrecke sowie die Abwurftechnik als Störquellen herausstellten. Für die weitere Betrachtung wird deshalb ein $c_r = 0,1$ angenommen. Der Wert sollte ausreichend hoch sein um eine erste Bewertung durchführen zu können.

5.1.3 Simulation Luftwiderstand/Rollwiderstand

Um zu simulieren, wie sich der Luftwiderstand und der Rollwiderstand auf die Bewegung des Spielballs auswirken, wird für die zeitliche Abhängigkeit ein Simulink Modell erstellt. Alle Konstanten wurden in den vorherigen Abschnitten ermittelt.

Um ein Simulink Modell zu erstellen wird die Differentialgleichung für die Luft- und Rollreibung aufgestellt. Anschließend wird die Gleichung nach der höchsten Ableitung aufgelöst um sie leicht in Simulink einzufügen. Es wurde sich für ein Simulink Modell entschieden, da einfache Änderungen an allen Parametern sowie gute Beobachtbarkeit aller Systemgrößen gewährleistet ist.

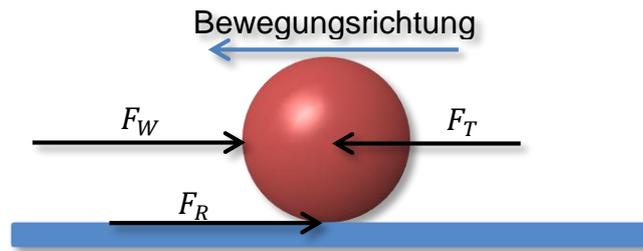


Abbildung 33: Kräftegleichgewicht

Abbildung 33 zeigt die Kräfte die auf den Ball wirken.

$$F_T = F_W + F_R \quad (15)$$

Für die Trägheitskraft F_T gilt:

$$F_T = -m_{Ball} \cdot a(t) = -m_{Ball} \cdot \frac{dv}{dt} \quad (16)$$

Durch einsetzen der Gleichung (11) für F_R und Gleichung (8) für F_W in Gleichung (15) erhält man:

$$-m \cdot \dot{v}(t) = \frac{c_W \cdot \rho_L \cdot A_p}{2} v(t)^2 + m_{Ball} \cdot g \cdot c_R \quad (17)$$

Durch umformen nach der größten Ableitung $\dot{v}(t)$ schließlich:

$$\dot{v}(t) = -\frac{c_W \cdot \rho_L \cdot A_p}{2 \cdot m_{Ball}} v(t)^2 - g \cdot c_R \quad (18)$$

Zur Übersichtlichkeit können noch die Konstanten zusammengefasst werden:

$$C_1 = \frac{c_W \cdot \rho_L \cdot A_p}{2 \cdot m_{Ball}} \quad (19)$$

$$C_2 = g \cdot c_R \quad (20)$$

$$\dot{v}(t) = -C_1 \cdot v(t)^2 - C_2 \quad (20)$$

Die Gleichung (20) wurde dann in das folgende Simulink Modell übertragen.

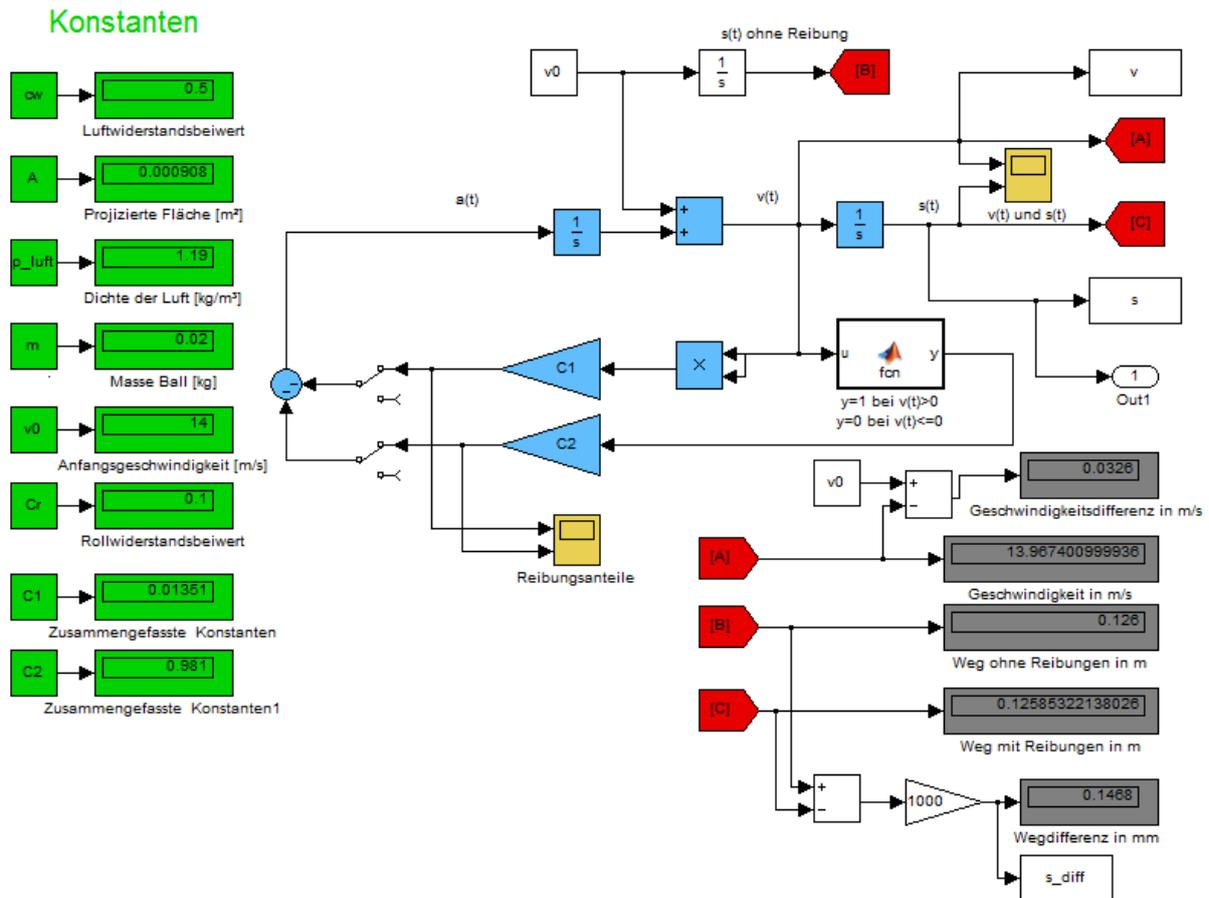


Abbildung 34: Simulink Modell für Luft- und Rollreibung

Abbildung 34 zeigt einen Simulationsdurchlauf des Modells mit einer Simulationsdauer von 9ms. Dies ist etwas mehr als die größte gemessene Verzögerungszeit von 8,7ms, die im Format_0 auftritt. Die Konstanten mit denen Simuliert wurde sind grün hervorgehoben. Die Anfangsgeschwindigkeit beträgt $v_0 = 14 \frac{\text{m}}{\text{s}}$ und stellt den Extremfall mit der höchsten zu erwartenden Ballgeschwindigkeit dar. Sie wurde gewählt da der Luftwiderstand quadratisch von der Ballgeschwindigkeit abhängig ist und somit die größte Auswirkung bei der maximalen Geschwindigkeit hat. Alle anderen Konstanten wurden in den vorherigen Abschnitten ermittelt. Die blau hervorgehobenen Funktionsblöcke bilden die Gleichung (20) ab. Die in dunkelgrau eingefärbten Displays stellen die Systemgrößen mit sowie ohne Luft- und Rollreibung dar.

Konstanten		Konstanten	
c_w	0,5	A	0,000908m ²
c_r	0,1	ρ_{Luft}	1,19kg/m ³
m_{Ball}	0,02kg	v_0	13,9m/s

Tabelle 15: Konstanten der Simulation

Auswertung:

Um den Einfluss der Luft- und Rollreibung während der Verzögerungszeit bewerten zu können, wurde die Abweichung des zurückgelegten Wegs und der Ballgeschwindigkeit zwischen mit und ohne Reibungen verglichen.

Differenzen	Abweichung absolut	Abweichung in %
Δs	0,147mm	$\approx 0,12\%$
Δv	0,0326m/s	$\approx 0,23\%$

Tabelle 16: Ergebnis der Simulation

Die Abweichungen liegen selbst bei dem großzügig gewähltem c_R Wert und der maximalen Ballgeschwindigkeit weit unter einem Prozent. Damit können die Luft- und Rollreibung im Beobachter vernachlässigt werden.

Ausrollversuch:

$$[s(t)] = m; [v(t)] = \frac{m}{s}; [a(t)] = \frac{m}{s^2}$$



Abbildung 35: Ausrollversuch

Vollständigkeitshalber wurde noch eine Simulation mit Reibung bis zum Ausrollen des Balls durchgeführt. Der Ball würde theoretisch, bei einer Anfangsgeschwindigkeit von 14m/s, nach ca. 9 Sekunden und ca. 48 Metern zum Stehen kommen.

5.2 Gleitreibung / Effet

Die Gleitreibung tritt auf, wenn der Ball einen Effet erfährt, z.B. durch einen Zusammenstoß mit einer Spielfigur, die ihn am Rand trifft. Also, wenn sich die Tangentialgeschwindigkeit des Balls von seiner Bewegungsgeschwindigkeit in Richtung und/oder Größe unterscheidet.

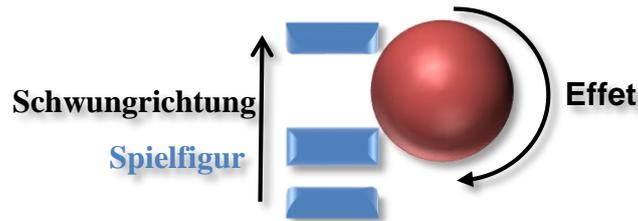


Abbildung 36: Effet

Die Auswirkung des Effets ist abhängig von der Rotationsachse. Darum muss der Effet in seine horizontalen und vertikalen Anteile, in Bezug zur Spielfeldfläche, zerlegt werden.

$$\vec{\omega}_{ges} = \vec{\omega}_{hor} + \vec{\omega}_{vert} \quad (21)$$

5.2.1 Horizontale Rotationsachse

Verläuft die Rotationsachse horizontal bzw. parallel zur Spielfeldfläche, erfährt der Ball eine Beschleunigung oder Bremsung bis die Energie aus dem Effet in die Bewegung des Balls übergegangen ist.

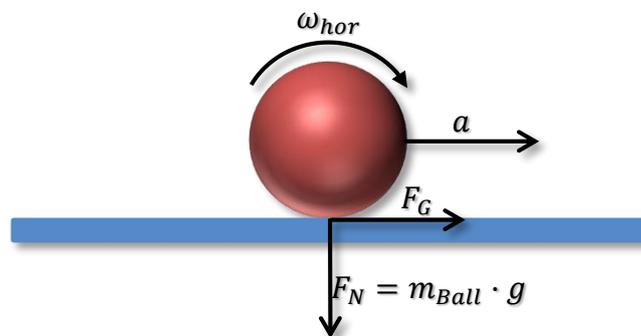


Abbildung 37: Ball mit horizontalem Effet

Ist kein Effet mehr vorhanden, geht der Ball in eine reine Rollbewegung über. Wieviel Energie je Zeit aus dem Effet in die Bewegung fließt bzw. wie groß die Beschleunigung ist, ist abhängig von dem Reibungskoeffizient μ_r . Der Reibungskoeffizient ergibt sich, ähnlich dem Rollwiderstandskoeffizient, aus der Werkstoffpaarung Ball und Unterlage sowie einigen physikalischen Größen z.B. Temperatur oder Feuchtigkeit. Für die Gleitreibungskraft F_G gilt:

$$F_G = m_{Ball} \cdot g \cdot \mu_r \quad (22)$$

Mit dem 2. Newtonschen Gesetz ergibt sich für die Beschleunigung a

$$a = \frac{F_G}{m_{Ball}} = g \cdot \mu_r \quad (23)$$

Sie ist also nicht von der Rotationsgeschwindigkeit und dem Gewicht des Balls abhängig. Die Menge der Energie E_{Rot} , die in der Ballrotation gespeichert ist, ergibt sich aus dem Trägheitsmoment J für eine Kugel, und der Winkelgeschwindigkeit ω .

$$J = \frac{2}{5} \cdot m_{Ball} \cdot r_{Ball}^2 \quad (24)$$

$$E_{Rot} = \frac{1}{2} \cdot J \cdot \omega^2 \quad (25)$$

Da die Rotationsgeschwindigkeit nicht direkt detektiert werden kann, könnte nur indirekt über die Beschleunigung des Balls auf einen horizontalen Effet geschlossen werden. Dies ist aber schwierig umzusetzen, da im Spielbetrieb, anhand der Positionsdaten, schwer zu erkennen ist was wirklich mit dem Ball passiert. Aus diesem Grund wird der Effet mit einer horizontalen Rotationsachse nicht im Beobachter berücksichtigt.

5.2.2 Vertikale Rotationsachse

Anders verhält es sich bei dem Rotationsanteil bei dem die Rotationsachse vertikal bzw. senkrecht auf dem Spielfeld steht. Dieser beeinflusst nicht die Rollbewegung sondern hat nur Auswirkung bei Kollisionen des Balls mit den Spielfeldwänden oder Spielfiguren.

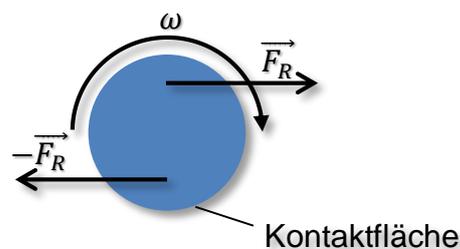


Abbildung 38: Kontaktfläche des Balls

Zerlegt man die Kontaktfläche des Balls mit dem Tisch in viele Flächen, so kann man, abhängig von dem Reibungskoeffizient, für jede einen Kraftvektor bestimmen.

Da die Kontaktfläche des Balls symmetrisch ist, gibt es zu jedem Kraftvektor einen gegenüberliegenden Kraftvektor, mit der gleichen Richtung und Länge, aber einem negativen Wert. Die Summe aller Kraftvektoren ist also 0. Dadurch hat der Effet mit einer Vertikalen Rotationsachse keinen Einfluss auf die Rollbewegung des Balls. Nur wenn die Spielfeldoberfläche Unebenheiten aufweist, wird die Summe der Kraftvektoren nicht 0 sein.

Kollidiert der Ball jedoch mit einem Objekt, z.B. mit dem Spielfeldrand, dann ist die Rotationsachse relativ zum Objekt in der horizontalen und hat dadurch wieder einen Einfluss. Der Effet mit vertikaler Rotationsachse zum Tisch beeinflusst dann sehr stark den Abprall-Winkel β des Balls.

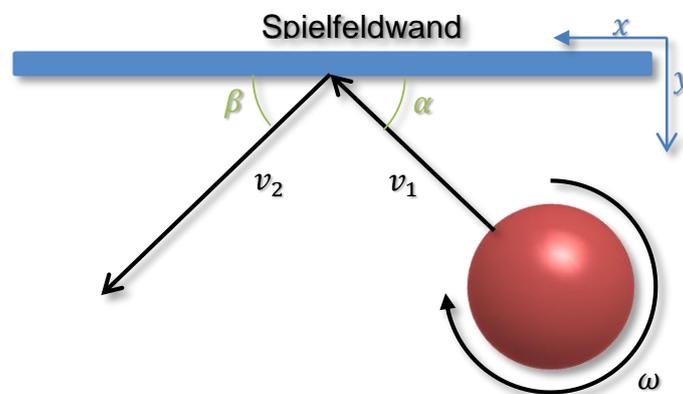


Abbildung 39: Bandenkollision mit Effet

$$\vec{v}_1 = \sqrt{v_{1x}^2 + v_{1y}^2} \quad (26)$$

$$\vec{v}_2 = \sqrt{v_{2x}^2 + v_{2y}^2} \quad (27)$$

Ein Großteil der Rotationsenergie geht dann in die X-Komponente \vec{v}_{2x} des Geschwindigkeitsvektors \vec{v}_2 über. Sie ist positiv wenn die Drehrichtung wie in Abb ist und negativ bei entgegengesetzter Richtung. Der Abprallwinkel β wird also kleiner, bei der Drehrichtung wie in Abbildung 39 und größer bei entgegengesetzter Drehrichtung.

Da der Effet mit senkrechter Rotationsachse nur Auswirkungen bei Kollisionen hat und der Effet des Balls nicht detektiert werden kann, kann keine Aussage über die Austrittsgeschwindigkeit und den Austrittswinkel getroffen werden. Er führt zu

unvorhersehbarem Verhalten nach Kollisionen und kann im Beobachter nicht berücksichtigt werden.

5.3 Stoß des Balls an der Bande

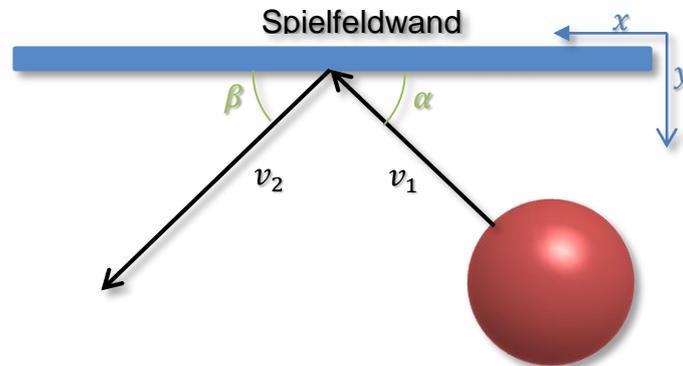


Abbildung 40: Bandenkollision

Trifft der Ball auf die Bande verliert er etwas kinetische Energie, die durch Verformungen in Wärmeenergie übergeht. Man spricht auch von einem realen Stoß. Dies beeinflusst jedoch nur die Geschwindigkeitskomponente des Balls, die senkrecht zur Spielfeldwand steht.

Die Geschwindigkeitsvektoren müssen, siehe Gleichung (26) und (27), in ihre senkrecht und parallel zur Bande verlaufenden Komponenten zerlegt werden. Das Verhältnis der senkrecht zur Bande gerichteten Geschwindigkeiten wird in der Stoßzahl k_s angegeben

$$k_s = \frac{v_{2y}}{v_{1y}} \quad (28)$$

Ein voll elastischer Stoß hat den Wert $k_s = 1$ und ein voll plastischer Stoß den Wert $k_s = 0$.

Es gilt:

$$v_{1x} = v_{2x}$$

$$v_{1y} \geq v_{2y}$$

[7, p. 230]

Dadurch sind die beiden Winkel α und β bei einem realen Stoß unterschiedlich. Will man also vorhersagen wo sich der Ball nach einem Zusammenstoß mit der Bande befindet, ist die Ermittlung der Stoßzahl unumgänglich. Da die Stoßzahl von der Werkstoffkombination (Ball/Bande) abhängt, kann sie nur Messtechnisch ermittelt werden.

5.3.1 Messtechnische Ermittlung der Stoßzahl

Eine Möglichkeit die Stoßzahl messtechnisch zu ermitteln, ist über die Messung der senkrechten Geschwindigkeitskomponente zur Bande vor und nach dem Stoß. Da die Messung über das BV-System ohne große Änderungen zu realisieren ist, wird diese Möglichkeit gewählt.

Da eine hohe Bildwiderholrate zur Genauigkeit der Messung beitragen würde, wäre der Modus Format_7 die beste Wahl. Der Modus litt aber unter Sprüngen in der Positionsbestimmung und unter kompletten Verlusten des Balls. Dadurch konnten nicht genug verwertbare Messdaten generiert werden. Der Einsatz von Format_7_static erzielte bessere Ergebnisse.

Die Ballpositionen wurden über die Bildverarbeitung aufgezeichnet und mit Hilfe von Matlab ausgewertet. Jeder Ball (weiß,rot,kork) wurde manuell während der Messung 50 mal gegen die Bande gerollt, um eine ausreichende Anzahl an Messwerten zu generieren. In dem Messdatensatz wurden dann die Zusammenstöße identifiziert und die Geschwindigkeiten vor und nach dem Stoß ermittelt. Die Geschwindigkeiten werden über 12 Bilder errechnet. 6 vor und 6 Bilder nach dem Stoß. Abzüglich einem Bild offset vor und nach dem Stoß. Das entspricht im Format_7_static einer Zeit von

$$t = \frac{1}{155fps} \cdot 12Bilder \approx 0,08s.$$

In dieser kurzen Zeit ist der Einfluss der Roll und-Luftreibung noch sehr gering und kann deswegen vernachlässigt werden. Die zu erwartende Abweichung der Geschwindigkeit aus Luft-und Rollreibung wurde mit den folgenden Parametern

$$c_r = 0,03; c_w = 0,5; m = 0,02kg; v_0 = 5 \frac{m}{s}; t = 0,08s,$$

auf ca. 0,5% berechnet.

Aus den 50 Stößen je Ball konnten nur ca. die Hälfte verwendet werden, da die Messdaten mit Störungen ausgefiltert wurden. Es kam zu Sprüngen nach dem Stoß. Es konnten je Ball demzufolge ca. 25 Messreihen ausgewertet werden.

Ergebnis:

Ball	Durchschnittliche Stoßzahl
Kork	0,73
Rot	0,73
Weiß	0,66

Tabelle 17: Ergebnis ermittelte Stoßzahlen

Da die Auflösung der Kamera gering ist bzw. der relativ zur Auflösung zurückgelegte Weg des Balls in Pixel gering ist, ist davon auszugehen, dass die Ergebnisse ungenau sind. Dennoch werden die ermittelten Stoßzahlen für den Einsatzzweck im Beobachter genügen. Die Stoßzahl wird für alle Bälle auf 0,7 festgelegt.

5.4 Hangabtriebskraft und Magnuseffekt

Der Magnuseffekt entsteht bei rotierenden Kugeln oder Zylindern in einem Luftstrom. Es entsteht durch Druckunterschiede eine Querkraft die senkrecht zur Drehachse und Windströmung steht. [8]

Dadurch wird der Ball bei sehr großen Rotations- und Bewegungsgeschwindigkeiten abgelenkt, z.B. wie beim Fußball die Bananenflanke.

Der Magnuseffekt wird aber nicht näher betrachtet, da schon die Luftreibung kaum Einfluss in der kurzen Verzögerungszeit auf die Ballbewegung hat. Dadurch kann davon ausgegangen werden, dass der Einfluss zu gering ist um ihn zu betrachten.

Die Hangabtriebskraft tritt auf wenn sich der Ball auf einer Schräge der Spielfeldfläche befindet. Für eine Betrachtung im Beobachter wäre die Kenntnis der Höhe und Position der Unebenheiten vorausgesetzt. Da zum Zeitpunkt dieser Arbeit eine ebene Fläche vorhanden ist und nur Erhöhungen in den Ecken angedacht sind, wird auch dieser Effekt nicht näher betrachtet. Denn in den Ecken gibt es keine Spielfiguren, dadurch muss die Position nicht genau bekannt sein.

5.5 Zusammenfassung

Effekt	Berechnung möglich	Einfluss auf Ballbewegung	Betrachtung im Beobachter
Luftreibung	ja	gering	nein
Rollreibung	ja	gering	nein
Effet horizontale Rotationsachse	schwer	mittel	nein
Effet vertikale Rotationsachse	nein	groß nach Kollis.	nein
Bandenstoß	Ja	mittel	ja
Magnuseffekt	nein	gering	nein
Hangabtriebskraft	ja	nein im aktuellen Aufbau	nein

Tabelle 18: Übersicht physikalische Effekte

Die meisten physikalischen Effekte haben einen geringen Einfluss auf die Bewegung des Balls während der Verzögerungszeit. Alleine der Effekt des Balls mit einer vertikalen Rotationsachse beeinflusste den Ball nach der Kollision sehr stark kann aber nicht detektiert werden.

6 Beobachters

6.1 Entwurf

Anforderungen an den Beobachter
-Nutzbar in allen Modi/Verfahren
-Schnell , keine zusätzliche Verzögerung
-Evaluierungsmöglichkeit
-Robust gegen Störeinflüsse
-Parametrierbarkeit da Spielbetrieb noch nicht getestet werden kann
-hohe Genauigkeit

Tabelle 19: Anforderungen an den Beobachter

Die Aufgabe des Beobachters ist es die entstehende Verzögerungszeit t_d des BV-Systems auszugleichen. Die generierten diskreten Positionsdaten $x(kT - t_d)$ und $y(kT - t_d)$ aus den Ballpositionen $x(t)$ und $y(t)$ des BV-Systems sind um diese Verzögerungszeit veraltet. Während dieser Zeit bewegt sich der Ball weiter und seine aktuelle Position muss durch den Beobachter geschätzt werden. Aufbauend auf der letzten Position und der Geschwindigkeit des Balls, kann die aktuelle diskrete Position $x(kT)$ und $y(kT)$ berechnet werden. Da die meisten physikalischen Effekte, die auf die Ballbewegung wirken, vernachlässigt werden können ergibt sich ein einfaches mathematisches Modell für die lineare Bewegung des Balls (die Bandenkollision wird gesondert betrachtet).

Die Abtastzeit $T = \frac{1}{\text{Bildwiederholrate}}$ ist durch die Bildwiederholrate der Kamera gegeben.

Hinweis: exemplarisch für die X-Richtung

$$x(kT) = x(kT - t_d) + v_x(kT) \cdot t_d \quad (29)$$

$$v_x(kT) = \frac{\Delta x}{T} \quad (30)$$

Die Ballgeschwindigkeit $v_x(kT)$ errechnet sich aus der Positionsänderung Δx zwischen den letzten beiden Bildern und der Abtastzeit T . Dem Beobachter müssen also 3 Größen zugeführt werden. Die Zeit t_d die vergangen ist seit dem das Bild aufgenommen wurde, die Bildwiederholrate der Kamera bzw. die Abtastzeit T und die

ermittelten Positionsdaten $x(kT - t_d)$ aus denen die Ballgeschwindigkeit v_x errechnet wird. Aus diesem Zusammenhang ergibt sich folgendes Blockdiagramm.

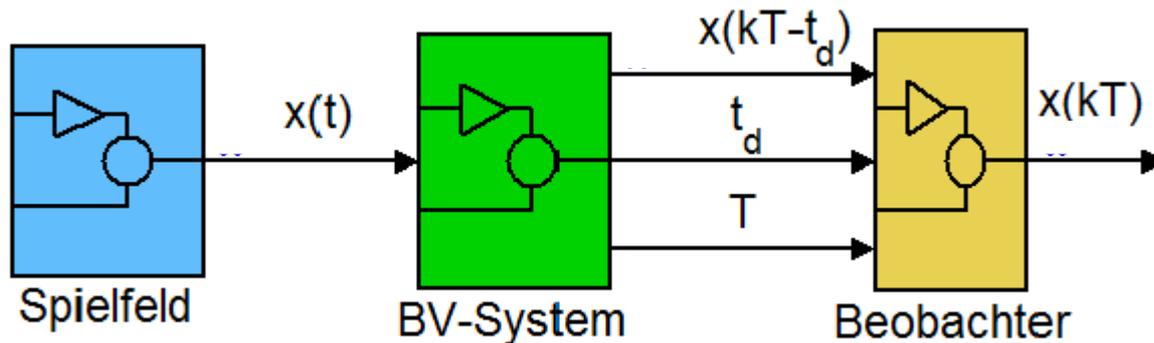


Abbildung 41: Systemmodell

Dieses Modell wurde in Matlab-SIMULINK umgesetzt. Im Folgenden werden die einzelnen Subsysteme näher betrachtet.

Subsystem Spielfeld

Für das Modell des Spielfeldes kommt das schon in Abschnitt 5.1.3 verwendete Modell zum Einsatz. Wobei $s(t) = x(t)$ ist. Die Parameter sind wie in Tabelle 15 eingestellt. Das Spielfeld-Subsystem generiert ein zeitkontinuierliches Signal $x(t)$, welches der X-Koordinate des Balls entspricht.

Subsystem BV-System

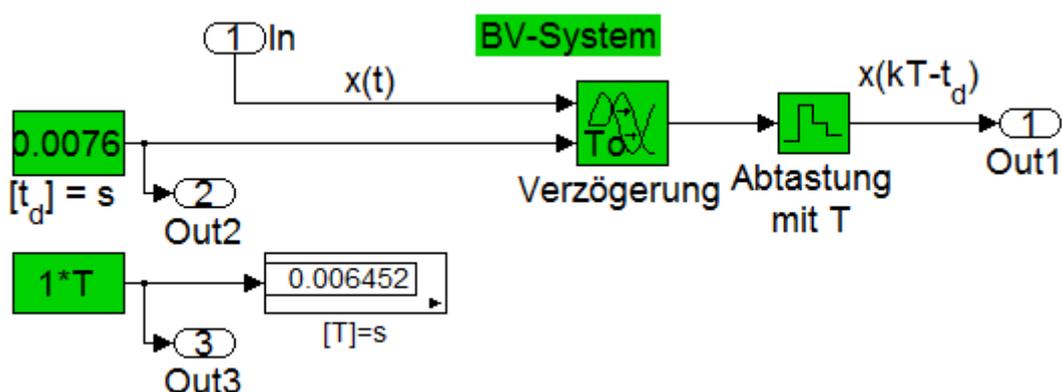


Abbildung 42: Subsystem BV-System

Das BV-Subsystem bildet das BV-System nach, dass aus der zeitkontinuierlichen Position $x(t)$ durch Bildgenerierung, Bildübertragung und Bildauswertung eine zeitdiskrete Position des Balls bestimmt. Die Verzögerung wird durch einen transport-delay Block generiert.

Der transport-delay Block müsste sich streng genommen hinter der Abtastung befinden, er wurde jedoch davor angeordnet, da er nur kontinuierlichen Werte entgegen nimmt und das Ergebnis in diesem Fall nicht verfälscht wird. Die Verzögerungszeit $t_d = 0,0076s$ wurde im Abschnitt 4.2.4.1 für den Modus Format_7_static ermittelt.

Subsystem Beobachter

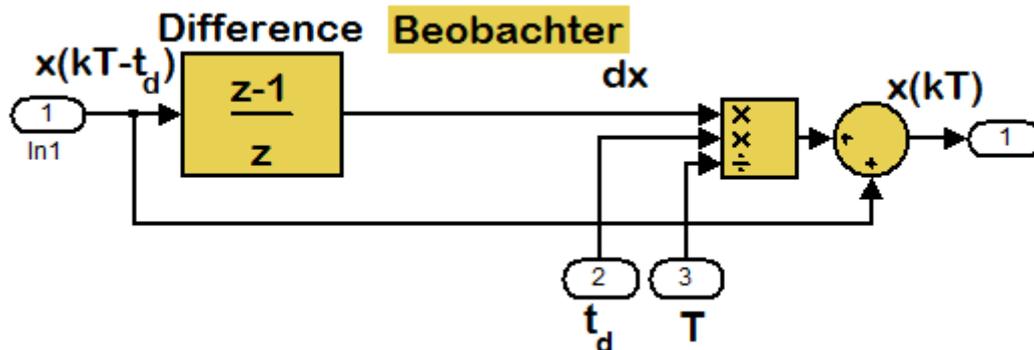


Abbildung 43: Subsystem Beobachter

In dem Beobachter-Subsystem sind die Beziehungen aus den Gleichungen (28)-(30) umgesetzt. Über einen diskreten Differenzblock wird Δx berechnet.

Ergebnis Simulation:

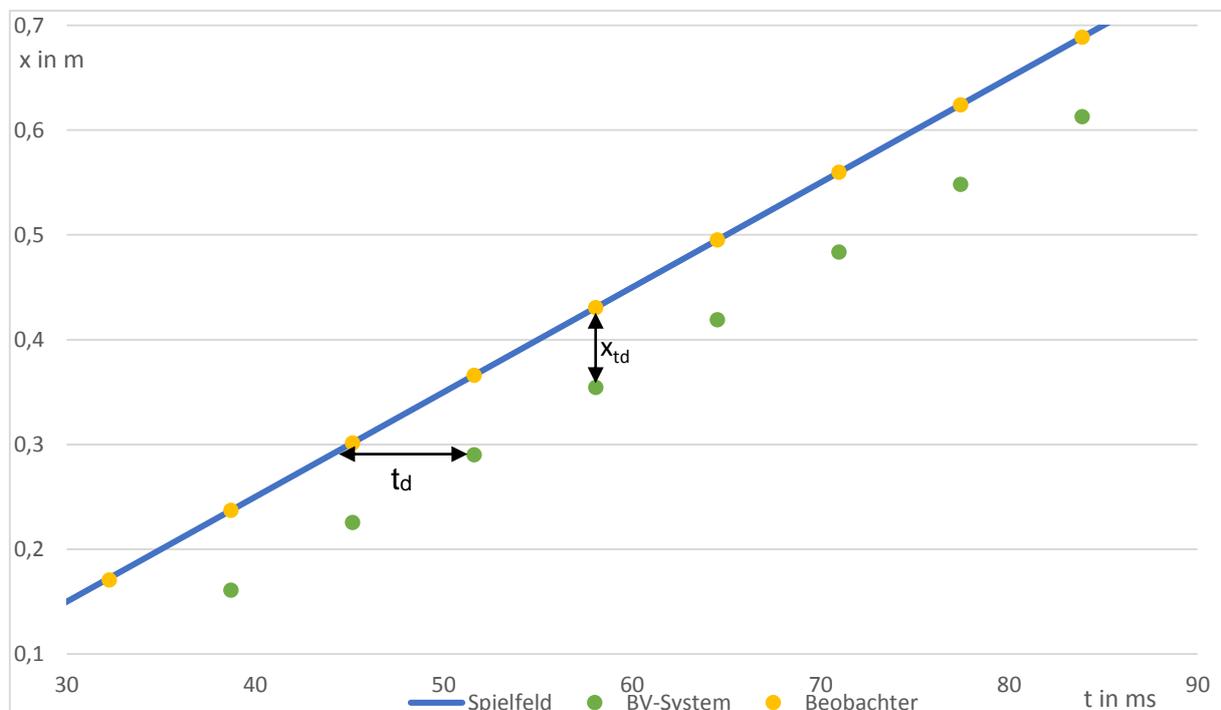


Abbildung 44: Plot Simulation(Spielfeld= $x(t)$ BV-System= $x(kT-t_d)$ Beobachter= $x(kT)$)

Gut erkennbar an den geplotteten Größen in Abbildung 44 sind die um die Zeit t_d verschobene Position $x(kT - t_d)$ des BV-Systems und der damit entstandenen Positionsfehler x_{td} des BV-Systems.

Behält der Ball eine lineare Bewegung bei, so kann der Beobachter genau die Position des Balls berechnen.

Nichtlinearitäten der Eingangsgröße kann dieses Modell jedoch nicht kompensieren. Nichtlinearitäten finden z.B. bei einem Stoß mit einer Spielfigur statt. Da aber über die neue Geschwindigkeit nach einem Stoß erst eine Aussage getroffen werden kann nachdem mindestens zwei Bilder nach diesem Stoß generiert wurden, wird hier auf die Untersuchung bei nichtlinearer Eingangsgröße $x(t)$ verzichtet.

Die Annahme einer linearen Bewegung bezieht sich auf die Untersuchung über die physikalischen Effekte im Abschnitt 5. Streng genommen verlangsamt sich der Ball abhängig von seiner Geschwindigkeit. Jedoch in den kleinen Zeitabständen der relativ hohen Bildwiderholrate vernachlässigbar klein.

Bandenkollision

Über den errechneten zurückgelegten Weg x_{td} und y_{td} während der Verzögerungszeit, kann leicht eine Kollisionsabfrage implementiert werden.

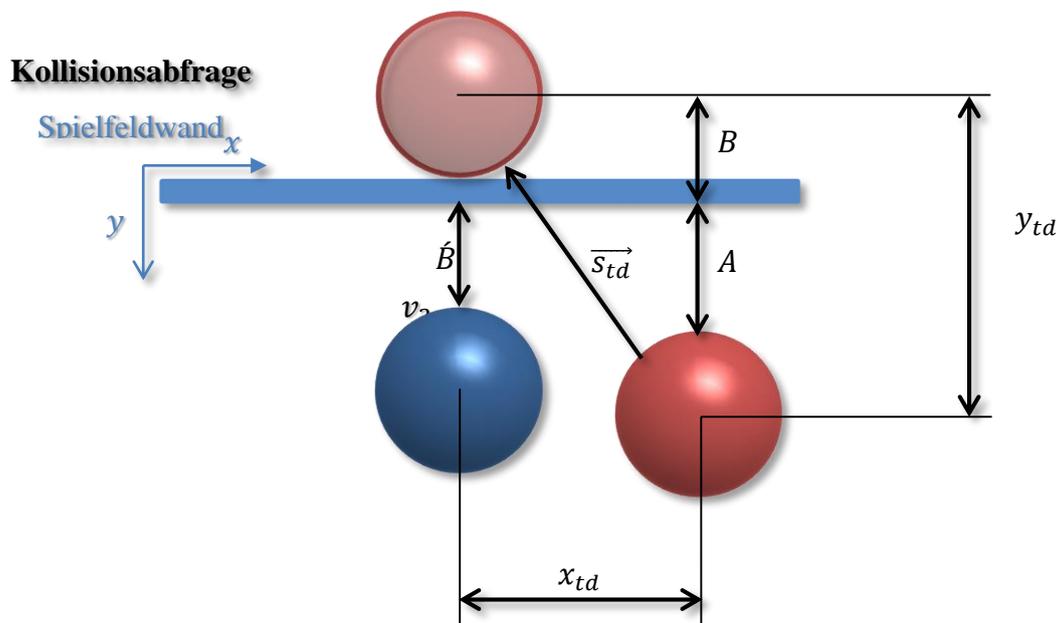


Abbildung 45: Kollisionsabfrage

Exemplarisch wird hier die Kollision an einer Längsbande betrachtet. Der voll rote Ball entspricht der ermittelten Position des BV-Systems. Der durchsichtige rote Ball entspricht der Position an der sich Ball befindet wenn er sich während der Verzögerungszeit weiter bewegt. Der blaue Ball entspricht der durch den Beobachter nach der Kollision errechneten neuen Position.

Es kommt zu einer Kollision wenn der Abstand A des Balls zur Bande kleiner als der zurückgelegte Weg $y_{td} + \text{Ballradius } r_{ball}$ ist.

$$\text{Kollision wenn } A \leq y_{td} + r_{ball} \quad (31)$$

Da es sich um einen realen Stoß handelt und demnach der Ball etwas an Energie verliert errechnet sich der neue Abstand des Balls nach der Kollision über

$$\dot{B} = B \cdot k_s \quad (32)$$

$$B = y_{td} - (A + r_{ball}) \quad (33)$$

6.2 Implementierung

Die Implementierung der Beobachter-Algorithmen wurde über eine neue Klasse mit dem Namen „observer“ durchgeführt. Die Kommunikation mit den anderen Objekten des BV-Programms erfolgt über ereignisgesteuerte Signale und das Slot Konzept von QT. Alle „connects“ befinden sich in der „main_window“ Klasse.

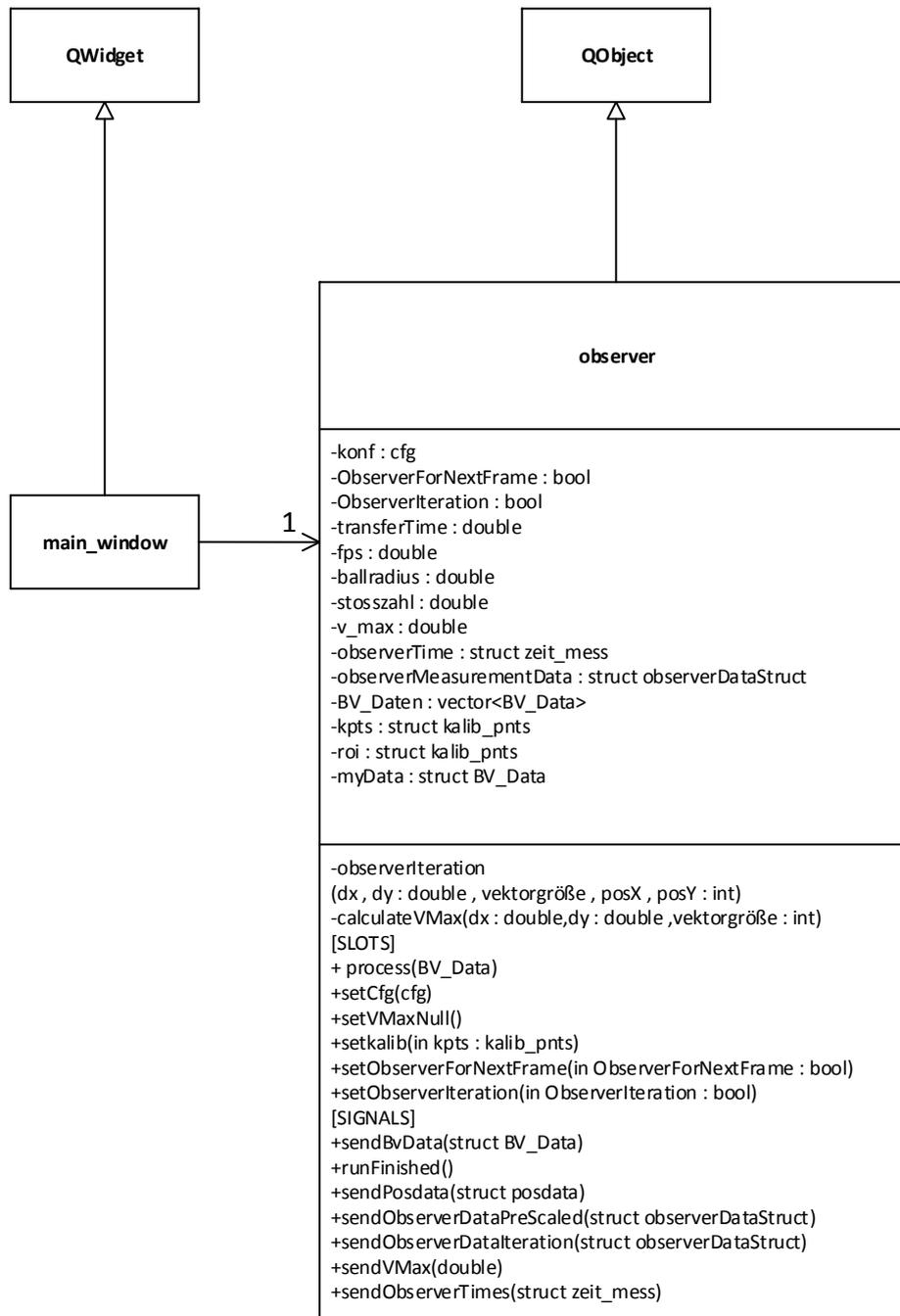


Abbildung 46: Klassendiagramm Beobachter

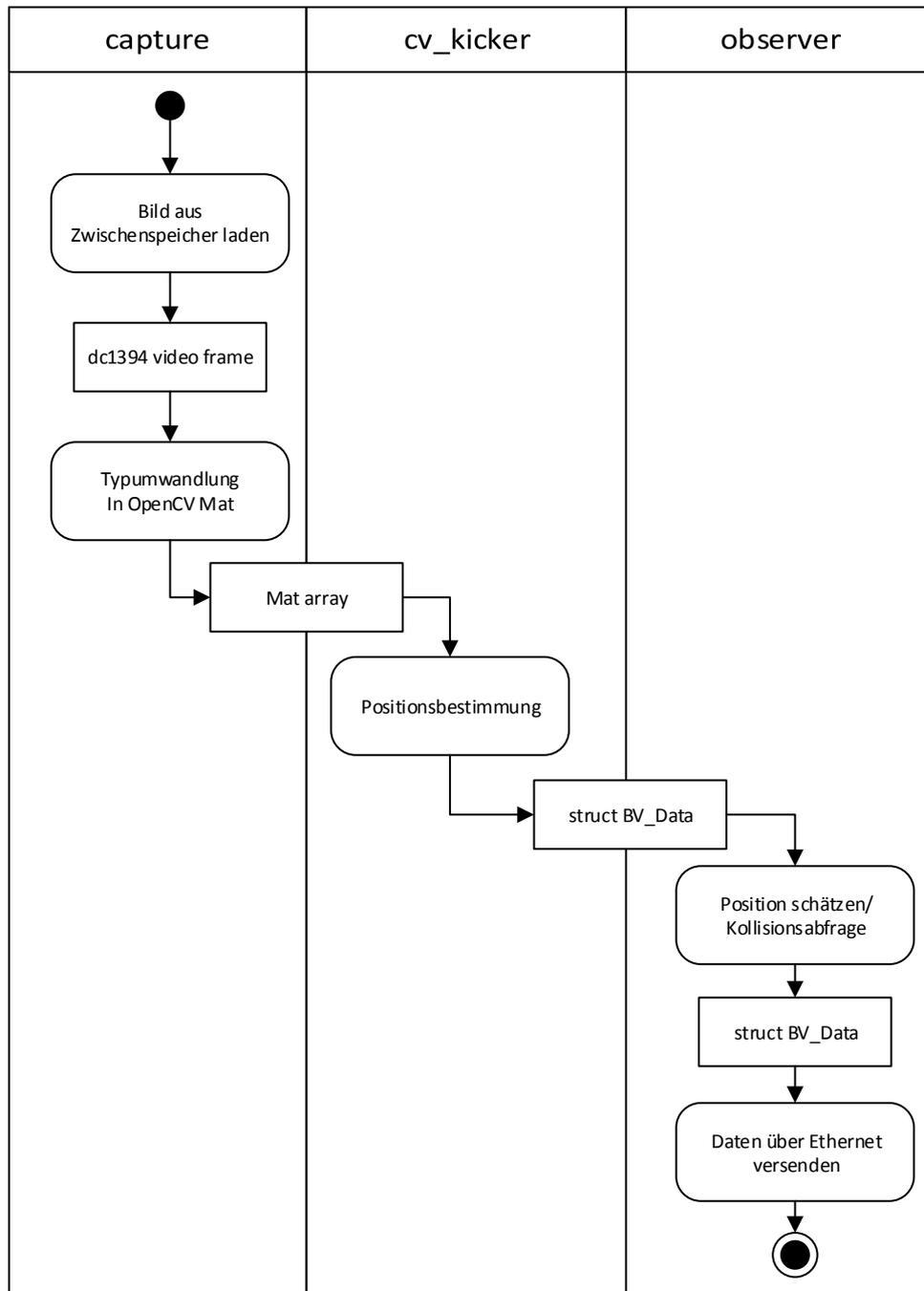


Abbildung 47: Objektflussdiagramm BV-Programm mit Beobachter

6.2.1 Referenzberechnung

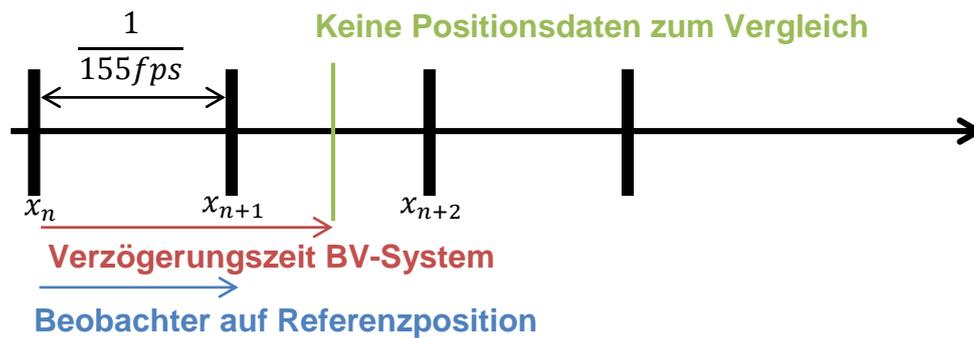


Abbildung 48: Referenzposition Beobachter

Um den Beobachter in seinem Ergebnis bewerten zu können, war es nötig einen Referenzwert für die ermittelten Positionsdaten zu haben. Arbeitet der Beobachter mit der Verzögerungszeit des BV-Systems, dann stehen keine Referenzwerte zur Verfügung. Aus diesem Grund wurde die Möglichkeit geschaffen, dass der Beobachter mit der Verzögerungszeit von $t_d = T = \frac{1}{\text{Bildiederholrate}}$ arbeitet. Somit schätzt der Beobachter auf die Ballpositionen aus dem nächsten Bild x_{n+1} und kann dann mit ihr verglichen werden. Aktiviert werden kann diese Variante über die Messoptionen im GUI.

6.2.2 Zwischenspeicher Positionsdaten

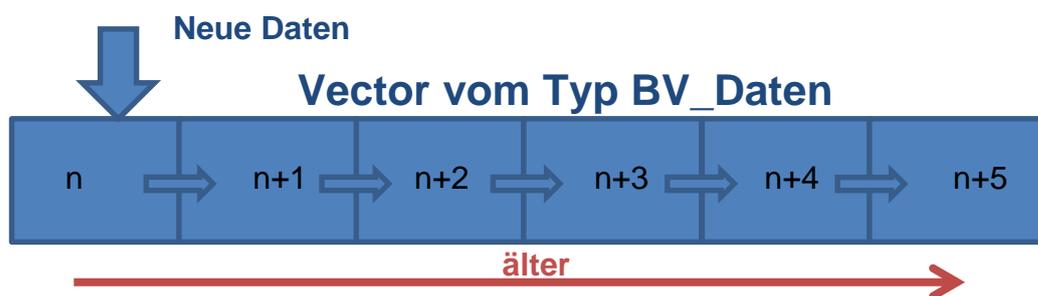


Abbildung 49: Vector mit den Positionsdaten

Da die ermittelten Positionen des BV-Systems, z.B. durch die Auflösung, fehlerbehaftet sind, wird die Ballgeschwindigkeit über mehrere Bilder berechnet. Über den generischen Typ „vector“ werden die Positionswerte zwischengespeichert. Die

neuesten Daten befinden sich an der ersten Stelle im Vector und werden dann weitergeschoben (siehe Abbildung 49). Die Größe des Vektors wurde variabel implementiert und kann über das Beobachter Optionsfenster eingestellt werden. Auch die Kalkulation der Maximalgeschwindigkeit, die im GUI angezeigt wird, erfolgt über mehrere Bilder. Die frühere Berechnung über nur eine Differenz zweier Bilder war zu ungenau.

Überschwingen:

Durch die Erhöhung der Bildanzahl zur Berechnung der Ballgeschwindigkeit entsteht ein Berechnungsfehler. Wird der Ball von seiner linearen Bewegung abgebracht, z.B. durch einen Spielfigurenstoß, werden Positionsdaten im Vektor vor dem Stoß ungültig. Das Resultat ist dann ein Überschwingen des Beobachters. Die Anzahl der neuen Bilder mit Positionsdaten nach dem Stoß, muss dann der Größe des Vektors entsprechen, um nur noch Daten nach dem Stoß vorzufinden. Dieses Überschwingen kann man gut im folgenden Diagramm erkennen. Für dieses Diagramm wurde der Ball auf eine Spielstange zugerollt und dann per Spielfigur umgelenkt. Die Referenzposition ist die eigentliche Ballposition, die errechnet werden soll.

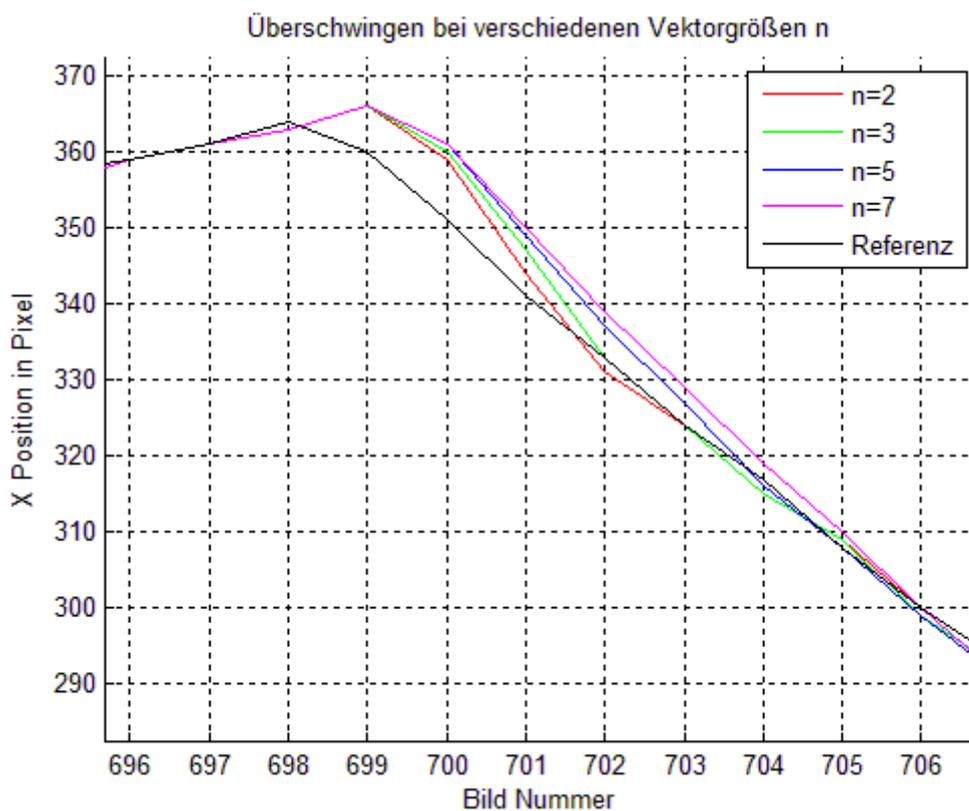


Abbildung 50: Überschwingen des Beobachters

Um diese Fehlberechnung zu vermeiden wurde eine Überprüfung der Positionsdaten im Vektor implementiert. Im Grunde wird überprüft ob der Ball von seiner linearen Bewegung abgewichen ist. Ist dies der Fall werden alle Daten im Vektor, die sich davor befinden, nicht für die weitere Berechnung berücksichtigt. Somit werden nur Daten nach dem Stoß zur Berechnung benutzt.

Realisiert wird dies durch Überprüfung der Positionsdifferenzen im Vektor. Weichen zwei aufeinander folgende Differenzen zu stark voneinander ab, so kann von einer Störung der linearen Bewegung ausgegangen werden. Durch die Einführung eines Schwellwerts werden die Differenzen bewertet. Exemplarisch für die X-Richtung:

$$Abweichung = |\Delta PosX_n - \Delta PosX_{n-1}| \quad (34)$$

$$\Delta PosX_n = PosX_n - PosX_{n-1} \quad (35)$$

$$\Delta PosX_{n-1} = PosX_{n-1} - PosX_{n-2} \quad (36)$$

Überschreitet diese Abweichung den Schwellwert $Abweichung > Schwellwert$ werden die folgenden(älteren) Daten im Vektor als ungültig erkannt und nicht weiter Berücksichtigt.

Ein Schwellwert von 4 Pixeln(entspricht ca. 1m/s) schien ausreichend und ist voreingestellt. Der Schwellwert kann über die Beobachtoptionen verändert werden und wird auch in der XML Konfigurationsdatei abgespeichert.

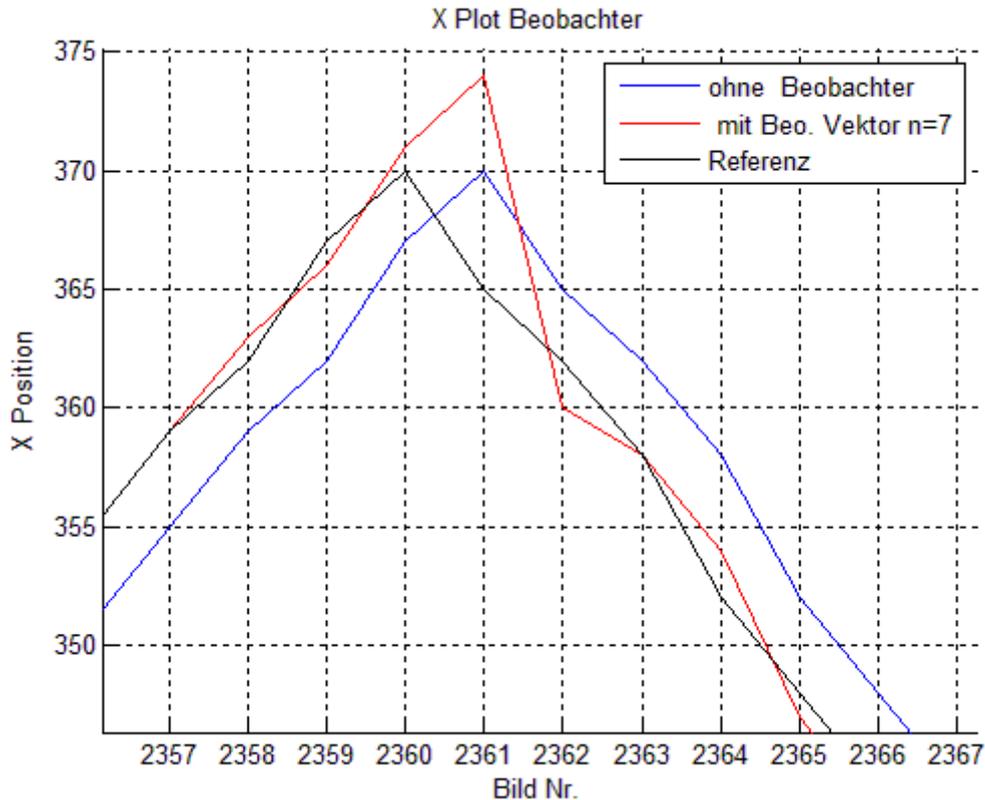


Abbildung 51: Positionsplot mit und ohne Beobachter

Zum Verifizieren der Funktionstüchtigkeit wurde der Ball auf der X-Achse entlang gerollt und mit einer Spielfigur in die entgegengesetzte Richtung umgelenkt. Wie man in der Abbildung 51 erkennen kann, verhält sich der Beobachter mit einer Vektorgröße von $n=7$ wie mit einer Vektorgröße von $n=2$. Alle Daten vor dem Spielfigurenstoß (Bild 2360) werden nicht berücksichtigt und nach 2 Bildern ist das Überschwingen beendet und gleicht sich dem Referenzwert der Ballposition an. Ausschließlich im Bild direkt nach dem Spielfigurenstoß (Bild 2361), kann ein Fehler nicht verhindert werden, da zu diesem Zeitpunkt noch keine Indizien für eine Störung der Ballbewegung vorhanden sind.

Fazit:

Abschließend kann gesagt werden, dass durch die Erweiterung um diesen Schwellwert, jede Vektorgröße ohne den Nachteil des Überschwingens benutzt werden kann.

6.2.3 Verzögerungszeit/Bildwiderholrate für Beobachter

Die Verzögerungszeit t_d des BV-Systems setzt sich aus einem zur Laufzeit messbaren und aus einem nicht messbaren Teil zusammen. Der zur Laufzeit nicht messbare Anteil bildet sich aus der Übertragungszeit über die Firewire Schnittstelle zwischen Kamera und BV-Rechner und der kamerainternen Verzögerung. Diese im Programm genannte Variable „transferTime“ wurde im Abschnitt 3.5.1.2 sowie 4.2.4.2 Messtechnisch ermittelt und für jeden Kamera Modus fest im Programm hinterlegt.

Die Bearbeitungszeit des BV-Programms ist der zur Laufzeit erfassbare Anteil und wird für jedes Bild gesondert berechnet. Sie wird als Differenz zwischen dem Zeitpunkt wenn das Bild aus dem Pufferspeicher geladen wird und dem Abschluss der Bildauswertung gebildet. Abschließend werden beide Zeiten summiert um die gesamte Verzögerungszeit des BV-Systems zu erhalten.

Die Bildwiderholrate wird für die Kameramodi format_0 und format_7 statisch hinterlegt, da sie sich nicht ändert. Im Modus format_7_static wird sie aus der Kamera-ROI berechnet, da sie von der Größe der ROI abhängig ist.

6.3 Evaluierung der Lösung

Da das Ergebnis des Beobachters abhängig von der Vektorgröße bzw. von der Anzahl der Positionsdifferenzen zur Ballgeschwindigkeitsermittlung ist, war es nötig eine weitere Funktion zu implementieren um diese Auswirkung zu bewerten. Der Beobachter wird in dieser mit verschiedenen Vektorgrößen iteriert um die optimale Vektorgröße zu ermitteln. Für jedes Bild wird die Berechnung der Positionen mit Vektorgrößen von 2 bis 9 durchgeführt und dann anschließend mit der Referenzposition verglichen. Die Bewertung erfolgt anhand des Mittleren-Quadratischen-Fehlers(MSE) zwischen Beobachter-und Referenzposition. Es wurden 2 Testläufe mit unterschiedlichen Ballgeschwindigkeiten durchgeführt. Als Hinweis vorweg, der geringe MSE der Y-Position ist in der kleineren Geschwindigkeit in Y-Richtung zu erklären. Der Ball wurde für den Test mit der Torwart-Spielfigur beschleunigt, was dann einer eher kleinen Geschwindigkeit in Y-Richtung zur Folge hatte.

Schneller Ball ca. 6m/s:

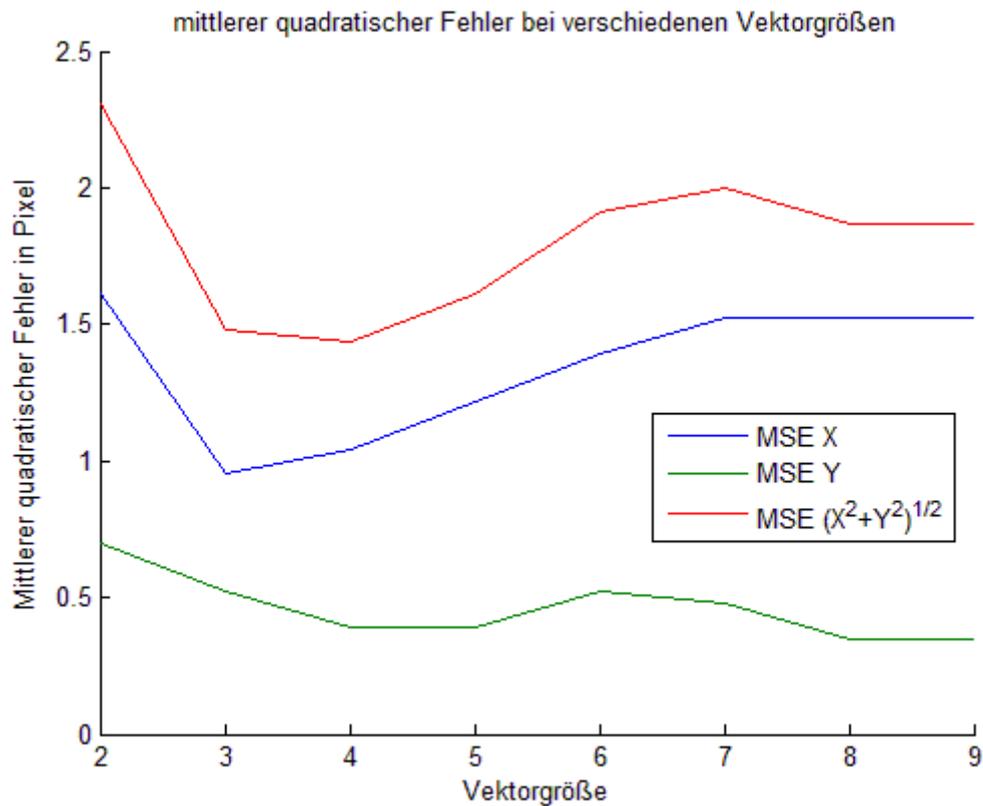


Abbildung 52 Diagramm MSE bei verschiedenen Vektorgrößen, schneller Ball

Vektorgröße	Ohne Beob.	2	3	4	5	6	7	8	9
MSE X	328	1,61	0,96	1,04	1,22	1,39	1,52	1,52	1,52
MSE Y	0,3	0,7	0,5	0,39	0,39	0,52	0,48	0,35	0,35
MSE XY	328	2,3	1,48	1,43	1,61	1,91	2	1,87	1,87
Maxima X	20	3	2	2	2	2	2	2	2
Maxima Y	1	2	2	1	1	2	2	1	1

Tabelle 20: Übersicht MSE in Pixel , schneller Ball

Bei einem „schnellen“ Ball, welches der entscheidende Fall ist, ist der MSE ohne Beobachter gegenüber dem mit Beobachter wie erwartet riesig. Die maximale Abweichung ohne Beobachter betrug hier 20 Pixel, das entspricht ca. 40mm. Mit Beobachter liegt die maximale Abweichung bei 2 Pixeln und man kann von einer deutlichen Verbesserung sprechen. Das beste Ergebnis wird mit den Vektorgrößen 3 und 4 erzielt. Da die maximale Abweichung in Y-Richtung bei einer Vektorgröße von 4 nur einen Pixel beträgt, wird diese als optimale Größe identifiziert.

Langsamer Ball ca. 1m/s:

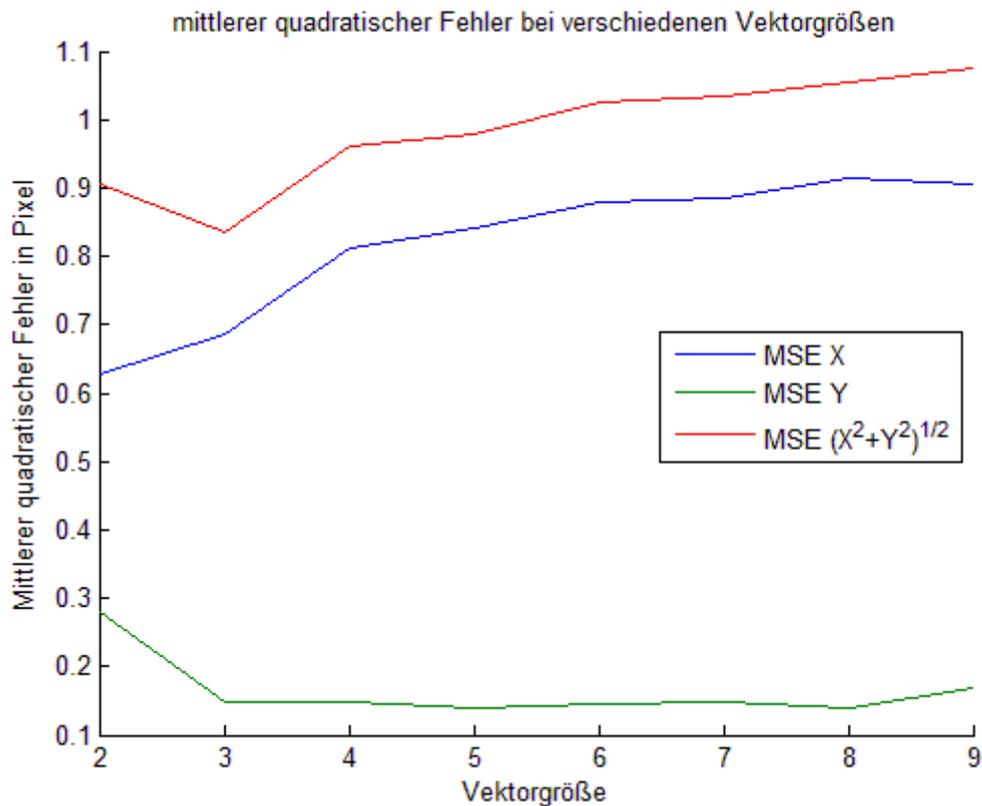


Abbildung 53: Diagramm MSE bei verschiedenen Vektorgrößen, langsamer Ball

Vektorgröße	Ohne Beob.	2	3	4	5	6	7	8	9
MSE X	5,1	0,63	0,69	0,81	0,84	0,88	0,89	0,92	0,91
MSE Y	0,1	0,28	0,15	0,15	0,14	0,14	0,15	0,14	0,17
MSE XY	5,2	0,91	0,84	0,96	0,98	1,02	1,03	1,05	1,07
Maxima X	4	3	2	2	3	3	3	3	3
Maxima Y	2	3	2	2	2	2	2	2	2

Tabelle 21: Übersicht MSE in Pixel, langsamer Ball

Der Unterschied zwischen aktiviertem und deaktiviertem Beobachter ist bei einem langsamen Ball nicht mehr so deutlich. Aber dennoch in diesem Fall um ca. den Faktor 9 besser. Auch bei einem Ball mit einer Geschwindigkeit von 1m/s ist das Ergebnis mit der Vektorgröße 4 optimal.

Bewertung:

Da der hier gemessene Fehler sich auf das nächste Bild bezieht und der Beobachter mit einer Verzögerungszeit von $\frac{1}{155\text{fps}} = 6,5\text{ms}$ rechnet, muss der Fehler für die eigentliche Verzögerungszeit linear extrapoliert werden. Über das Verhältnis der

Verzögerungszeit des BV-Systems zu der Zeit zwischen zwei Bildern, kann der Fehler hochgerechnet werden.

$$\text{Fehler extrapoliert} = \frac{t_d}{T} \cdot \text{gemessener Fehler} \quad (37)$$

Das Verhältnis beträgt $\frac{t_d}{T} = \frac{7,67\text{ms}}{6,5\text{ms}} \approx 1,2$ und damit folgende Ergebnisse in Tabelle 22 bei einer Vektorgröße von 4.

	langsamer Ball mit Beobachter	langsamer Ball Ohne Beobachter	schneller Ball mit Beobachter	schneller Ball Ohne Beobachter
MSE XY	≈1 Pixel	≈6 Pixel	≈1,3 Pixel	≈400 Pixel
Maximaler Fehler	≈3 Pixel	≈5 Pixel	≈3 Pixel	≈24

Tabelle 22: Abschließender Vergleich des Beobachter bei einer Vektorgröße von 4

6.4 Fazit Beobachter

Abschließend kann gesagt werden, dass die Einführung des Beobachters die Genauigkeit des BV-Systems erheblich verbessert. Je schneller der Ball je deutlicher ist der Qualitätsgewinn.

Anmerkend muss noch einmal erwähnt werden, dass die errechneten Positionen nicht mit der realen Position verglichen werden konnten. Sondern mit Positionsdaten des BV-Systems, welches selbst Ungenauigkeiten unterliegt.

7 Ausblick

7.1 Ausblick Spielfeld Einmessung

Da es essentiell ist, die Ecken des Spielfeldes genau einzumessen, sollte die aktuelle Methode verbessert werden. Aktuell werden die Ecken mit Hilfe eines Gegenstandes(z.B. Ball) markiert, indem der Gegenstand in die jeweiligen Ecke platziert wird. Das Resultat ist sehr ungenau, was besonders bei der Kollisionsabfrage zu starken Ungenauigkeiten führt, da die genaue Position der Bande von großer Bedeutung ist.

Abhilfe könnten z.B. an den Ecken angebrachte und nach unten gerichtete LEDs schaffen, die zum Zeitpunkt der Spielfeld Einmessung die Eckenpositionen genau abbilden. Im Spielbetrieb müssten sie dann deaktiviert werden, um die Ballerkennung nicht zu stören. [2, p. 39]

7.2 Ausblick Kamera Optimierung

Der Spielbetrieb konnte mit der jetzigen Konfiguration noch nicht getestet werden, da der Aufbau noch nicht abgeschlossen war. Daher ist es nicht ausgeschlossen, dass die aktuelle Konfiguration des BV-Systems gegen einen menschlichen Spieler zu schlechte Ergebnisse liefert. Zwar wurde durch den Beobachter das BV-System verbessert, doch über die Leistungsfähigkeit im Spielbetrieb kann noch keine Aussage getroffen werden. Der Flaschenhals des Systems ist die Übertragungszeit und damit die hohe Verzögerungszeit sowie die Bildwiderholrate. Zwei denkbare Optimierungen sollen hier vorgestellt werden.

7.2.1 Kamera mit GigE Schnittstelle

Die 2. Möglichkeit wäre der Austausch der Kamera gegen eine mit Gigabit-Ethernet Schnittstelle. Diese Schnittstelle ist zwar nicht deterministisch, doch durch den alleinigen Einsatz der Kamera an dieser Schnittstelle sind große Schwankungen in der Übertragungszeit auszuschließen. Der große Vorteil dieser Schnittstelle gegenüber Firewire, ist die komplette Ausnutzung der Bandbreite. Anders als über Firewire bekommt die Kamera keinen festen Übertragungsrahmen zugewiesen, sondern nutzt die ganze Bandbreite zur Übertragung des Bildes.

Eine Kamera desselben Herstellers wäre z.B. die Manta G-031. Sie besitzt den gleichen Sensor wie die Guppy Pro F-031 und das Objektiv wäre kompatibel. Die mögliche maximale Bildwiderholrate, für den im Format_7_static ausgewählten

Bereich, ist der der Guppy Pro F-031 mit 152fps [9, p. 129] nahezu identisch. Die Übertragungszeit würde jedoch deutlich verbessert werden. Ohne Overhead ergibt sich ca.

$$t_{\text{übert}} = \frac{612 \times 384 \text{ Pixel} \cdot 8 \text{ bit}}{1 \text{ Gbit/s}} \approx 1,9 \text{ ms},$$

was einer Verbesserung der Übertragungszeit von -71% zur aktuellen Lösung entspricht.

7.2.2 Zweite Guppy Pro F-031

Durch den Einsatz einer zweiten Kamera des gleichen Modells, könnte die Bildwiderholrate sowie die Übertragungszeit verbessert werden.

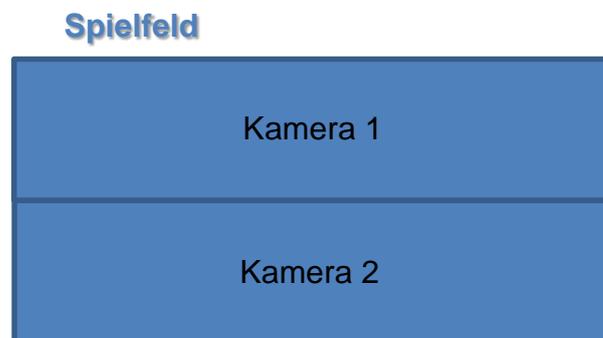


Abbildung 54: Spielfeldteilung mit 2. Kamera

Die Teilung des Spielfelds in der Länge, hätte eine höhere Framerate für jede Kamera zur Folge. Die Kameras würden mit einer statischen ROI wie in Abbildung 54 arbeiten. Im BV-Programm würden dann die beiden Bilder der Kameras zu einem Bild zusammengefügt werden. Die nachfolgende Bildauswertung müsste damit nicht verändert werden. Mit der Gleichung (4) aus dem Abschnitt Ansatz4.2.1 wären folgende Bildwiderholraten und Übertragungszeiten möglich.

	Eine Kamera	Zwei Kameras
Bildhöhe	384 Pixel	Je Kamera 192 Pixel
Bildwiderholrate	150fps	240fps
Übertragungszeit	6,63ms	4,2ms

Tabelle 23: Einsatzscenario 2 Kameras

Die Kameras könnten zusammen an einem Firewire-Bus betrieben werden. Die Schwierigkeit bei dieser Idee ist die Synchronisation der beiden Kameras. Sie müssten über die GPIOs extern getriggert werden. Zusätzlich hätten die Bildhälften einen Zeitversatz, die Zusammengefügt werden müssten.

Anhang

Struktur csv-Dateien

Positionsdaten loggen:

Spalte	Beschreibung	Einheit
1	Nummerierung	
2	Gültigkeit der Daten (0=valid,1=error,2=unknown,3=lastknown)	
3	Position X (ohne Beobachter)	Pixel
4	Position Y (ohne Beobachter)	Pixel
5	Geschwindigkeit X (ohne Beobachter)	Pixel/s
6	Geschwindigkeit Y (ohne Beobachter)	Pixel/s
7	Zeitdifferenz Bild laden bis beginn Positionsbestimmung	μ s
8	Zeitdifferenz Balldaten ermitteln bis versenden über Ethernet	μ s
9	Zeitdifferenz BV gesamt	μ s
10	Zeit zwischen 2 Bildern Bild laden	μ s
11	Zeit zwischen 2 Bildern Daten versenden	μ s

BV-Zeiten loggen:

Spalte	Beschreibung Zeitpunkte	Zeitpunkt aus Klasse
1	Nummerierung	
2,3	Vor kopieren des Bildes in den Speicher	capture.cpp
4,5	Vor versenden des Bildes an den cv_kicker Thread	capture.cpp
6,7	Beginn der Bildverarbeitung	cv_kicker.cpp
8,9	Nach der Schwerpunktbestimmung	cv_kicker.cpp
10,11	Nach der Fischaugen- und Offset-Korrektur	cv_kicker.cpp
12,13	Nach der Skalierung	cv_kicker.cpp
14,15	Nach der Geschwindigkeitsberechnung	cv_kicker.cpp
16,17	Nach dem Versenden über Ethernet	cv_kicker.cpp

Beobachter loggen:

Spalte	Beschreibung	Einheit
1	Nummerierung	
2	Gültigkeit der Daten (0=valid,1=error,2=unknown,3=lastknown)	
3	Position X (ohne Beobachter)	Pixel
4	Position Y (ohne Beobachter)	Pixel
5	Position X (mit Beobachter)	Pixel
6	Position Y (mit Beobachter)	Pixel
7	Verwendete Vektorgröße	
8	Wegdifferenz X im Vektor	Pixelx1000
9	Wegdifferenz Y im Vektor	Pixelx1000
10	Verzögerungszeit	ms
11	Verzögerungszeit	µs
12	Kollision berechnet (0=Nein 1=Ja)	

Beobachter loggen mit Iteration aller Vektorgrößen:

Spalte	Beschreibung	Einheit
1	Nummerierung	
2	Gültigkeit der Daten (0=valid,1=error,2=unknown,3=lastknown)	
3	Position X (ohne Beobachter)	Pixel
4	Position Y (ohne Beobachter)	Pixel
5	Vektorgröße =2	
5	Position X (mit Beobachter Vektorgröße n)	Pixel
6	Position Y (mit Beobachter Vektorgröße n+1)	Pixel
7	Vektorgröße =3	
8	Position X (mit Beobachter Vektorgröße 3)	Pixel
9	Position Y (mit Beobachter Vektorgröße 3)	Pixel
...	... (bis eingestellte Größe)	...

Literaturverzeichnis

- [1] S. Höme, F. Bangemann, H. Zipper, D. Curdts und C. Diedrich, „Kooperativ verteiltes Steuerungssystem für einen Tischkicker,“ 2014.
- [2] B. Zeise, „MA Kameraoptische Erfassung der Ballposition eines automatisierten Kickertisches,“ 2013.
- [3] K. Theuerkauf, „Entwurf eines Konzeptes zur kameraoptischen Erfassung der Ballposition eines automatisierten Kickertisches,“ 2012.
- [4] Allied Vision Technologies, "Technical Manual AVT Guppy PRO," 2012.
- [5] 1394 Trade Association, „IIDC 1394-based Digital Camera Specification,“ 2004.
- [6] „opencv documentation,“ [Online]. Available: http://docs.opencv.org/modules/imgproc/doc/structural_analysis_and_shape_descriptors.html?highlight=moments#moments.
- [7] A. Böge, Technische Mechanik, Springer Vieweg, 2013.
- [8] P. D. K. Weltner, „Magnuseffekt und Coandaeffekt - Demonstrationen zu ihrem besseren Verständnis,“ Hannover, 2010.
- [9] Allied Vision Technologies, „Technical Manual AVT GigE Vision Cameras,“ 2014.