

Untersuchung rotierender Systeme



Wettbewerb "Jugend Forscht" 2006

Alexander Buhr (18 Jahre)

Christian Becker (18 Jahre)

Jens Mahmood (19 Jahre)

**Arbeitsgemeinschaft "Jugend Forscht"
des Christian-Gymnasiums Hermannsburg
Leitung: StD Thomas Biedermann**

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	3
1.1	Wie sind wir auf dieses Thema gekommen?	3
1.2	Anschauliche Vergleichsmöglichkeit (Analogie)	3
1.3	Arbeitsteilung	3
2	Physikalischer Hintergrund	3
2.1	Einführung "Rotierende Systeme"	3
2.2	Erste Überlegungen	4
2.3	Mögliche Bewegungsarten	4
2.3.1	Frei fliegender bewegter Körper	4
2.3.2	Abrollen einer Kugel mit Zwangsführung	5
2.3.3	Abrollen einer Kugel ohne Zwangsführung	7
2.4	Bahnkurven für die beiden Beobachter	8
2.4.1	Ruhender Beobachter	8
2.4.2	Rotierender Beobachter	8
3	Das Experiment	9
3.1	Aufbau/Durchführung	9
4	Verarbeitung der Bilddaten	11
4.1	Aufbau der VB-Anwendung	11
4.2	Aufbau des Algorithmus zum Suchen des Kreismittelpunkts	12
5	Ergebnis	13
6	Schwierigkeiten bei der Umsetzung unserer Ideen	15
6.1	Probleme mit der Apparatur	15
6.2	Probleme mit der Datenverarbeitung	15
6.3	Probleme mit dem physikalischen Hintergrund	16
7	Danksagung	16
8	Literaturverzeichnis	16

1 Einleitung

1.1 Wie sind wir auf dieses Thema gekommen?

Rotierende Systeme in der Physik sind ein sehr komplexes Thema und werden deswegen innerhalb des Schulunterrichtes häufig nur am Rande behandelt. Wir versuchen mit unserer Arbeit, einige Einblicke in dieses Thema zu gewinnen. Dazu haben wir zunächst den physikalischen Hintergrund betrachtet, um uns vor der Entwicklung eines geeigneten Versuchsaufbaues einen Überblick zu verschaffen, wobei wir recht schnell auch mit mathematischen Problemen konfrontiert wurden, die über die üblichen Inhalte des Mathematikunterrichts weit hinausgehen.

Auf Grundlage eines alten Plattenspielers haben wir eine Versuchsanordnung gebaut, die mit zwei Kameras sowohl den Standpunkt des ruhenden als auch des bewegten Beobachters digital als AVI-Datei dokumentiert. Diese wird dann mit einer selbst programmierten Visual-Basic-Anwendung ausgewertet, sodass wir unsere physikalischen Überlegungen daran überprüfen können.

1.2 Anschauliche Vergleichsmöglichkeit (Analogie)

Das wohl bekannteste rotierende System ist unsere Erde. Sie dreht sich um ihre eigene Achse und besitzt zwei markante Punkte, die auf der Rotationsachse liegen. Diese Punkte sind in Ruhe und werden als geografischer Nord- und Südpol bezeichnet.

Wie bei einem Autoreifen nimmt die Bahngeschwindigkeit mit zunehmendem Radius zu. Deshalb rotieren Punkte auf dem Äquator schneller um die Drehachse als Punkte die näher an den Polen liegen. Aufgrund dieser Tatsache kann man interessante Beobachtungen in diesem System machen.

Wolkenfelder, die sich nicht auf dem Äquator befinden werden in Rotation versetzt, wenn sie sich aber auf dem Äquator befinden sind sie in Ruhe. Dies hat folgenden Hintergrund: Wolken, die sich auf dem Äquator befinden, rotieren stets mit der gleichen Bahngeschwindigkeit um die Rotationsachse der Erde, da sie sich nur auf der äußeren Bahn der Erde befinden. Bei den Wolkenfeldern, die sich nicht auf dem Äquator befinden, ist das anders. Sie erstrecken sich über mehrere Breitengrade, die jeweils unterschiedliche Bahngeschwindigkeiten besitzen. Daher rotiert der Teil der Wolke, der sich näher am Äquator befindet schneller als der Teil, der näher an den Polen liegt. Diese Felder werden aufgrund der unterschiedlichen Geschwindigkeiten, mit denen sich die Erde unter ihnen dreht, in Rotation versetzt.

Analog zu diesem Phänomen beobachten wir eine Scheibe, die sich um eine Drehachse dreht und auf der wir einen Körper positionieren, der kontrolliert losgelassen und aus zwei verschiedenen Perspektiven beobachtet werden kann.

1.3 Arbeitsteilung

Diese Jugend Forscht Arbeit wird von uns Dreien in einer Gruppenarbeit angefertigt. Dabei haben wir die Hauptthemen möglichst gleich aufgeteilt, so dass sich Alexander mit der Theorie, Christian mit der Informatik und Jens mit der experimentellen Verwirklichung beschäftigt.

2 Physikalischer Hintergrund

2.1 Einführung "Rotierende Systeme"

Das Verstehen der verschiedenen Phänomene in rotierenden Systemen ist oft nicht sehr leicht. Durch die komplexen mathematischen und physikalischen Zusammenhänge die während einer Rotation entstehen muss man immer

wieder zurück zum richtigen Faden finden. Bei einem rotierenden System handelt es sich um einen rotierenden Untergrund, der aufgrund seiner Rotation verschiedene Kraftwirkungen auf seiner Oberfläche auf andere Körper erzeugt. Dabei spielt die Form der Körper eine große Rolle, da z.B. eine Kugel auf einem solchen Untergrund selbst in Rotation gerät und somit ein neues rotierendes System entsteht.

2.2 Erste Überlegungen

Um während der Untersuchung des physikalischen Ablaufs nicht durcheinander zu kommen, müssen vor der detaillierten Analyse einige Idealisierungen vorgenommen werden. Zunächst vernachlässigen wir die Luftreibung, da diese im Verhältnis zu den anderen Kräften und aufgrund der aerodynamischen Form der Versuchskörper sehr klein sein wird. Außerdem gehen wir davon aus, dass zwischen Körper und Drehplatte ausschließlich Haftreibungskräfte auftreten. Des Weiteren nehmen wir an, dass sich die Drehgeschwindigkeit nicht ändert und die Drehplatte vollkommen eben und horizontal ausgerichtet ist.

2.3 Mögliche Bewegungsarten

Es gibt prinzipiell drei Möglichkeiten, wie sich ein Körper in einem rotierenden System bewegen kann. Für jede dieser Bewegungen muss jeweils der Standpunkt des ruhenden und des bewegten Beobachters eingenommen werden.

2.3.1 Frei fliegender bewegter Körper

Unsere ersten Gedankenversuche beschäftigten sich mit der Frage, ob die Rotation eine Auswirkung auf die Bewegungsart eines Körpers hat. Um diese Frage beantworten zu können, nehmen wir an, dass sich ein Bogenschütze in der Mitte der Drehplatte befindet und eine Zielscheibe, die am Rand der Drehplatte befestigt ist, anvisiert. Er schießt den Pfeil unter den Anfangsbedingungen:

$$r(0) = 0 \quad (1a)$$

$$v(0) = v_0 \quad (1b)$$

$$\omega = \text{const} \quad (1c)$$

ab. Auf den Pfeil wirkt eine einmalige Kraft, die vom Bogen des Schützen ausgeübt wird und den Pfeil während des Schusses auf die Geschwindigkeit v_0 beschleunigt. Während des Fluges wirken keine weiteren Kräfte auf den Pfeil, so dass für den Zeitpunkt t_1 (Flugdauer) zu dem sich der Pfeil an einem bestimmten Ort r_1 befindet gilt:

$$t_1 = \frac{r_1}{v_0} \quad (2)$$

Der Pfeil fliegt also in einer gleichförmigen Bewegung über die sich unter ihm drehende Platte hinweg.

Der Pfeil wird aufgrund der Rotation der Platte die Scheibe verfehlen, die in der Zeit t_1 um den Winkel α rotiert.

$$\alpha(t_1) = \omega \cdot t_1 \quad (3a)$$

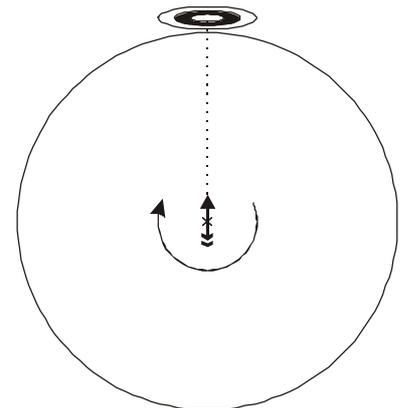


Abb. 1a: Abschuss eines Pfeils von der Mitte einer rotierenden Scheibe

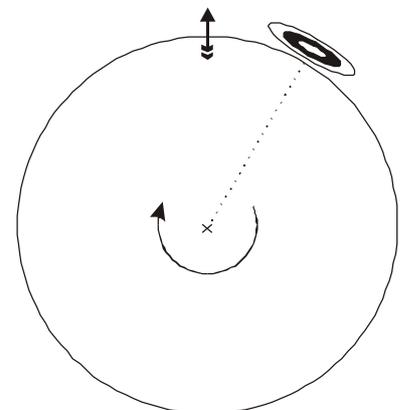


Abb. 1b: Obwohl genau gezielt, verfehlt der Pfeil die Scheibe

Analog gilt deshalb für den Kreisabschnitt b , der in der Zeit t_1 von der Scheibe durchlaufen wird:

$$b(t_1) = \alpha(t_1) \cdot r_1 \quad (3b)$$

Ein ruhender Beobachter der sich nicht auf der Drehplatte befindet wird aufgrund der gleichförmigen Bewegung eine gerade Flugbahn des Pfeils sehen. Der Pfeil wird zum Zeitpunkt t_0 von der Bogenkraft F_b losgeschossen und fliegt frei auf einer Geraden weiter. Da die Scheibe ihren Ort zeitlich ändert wird der Pfeil also die Scheibe nicht treffen, es sei denn die Flugzeit beträgt einen ganzzahligen Vielfaches der Umlaufzeit der Scheibe.

Der Bogenschütze als bewegter Beobachter, der sich mit der Platte in dieser Zeit mitdreht, wird die Scheibe immer direkt vor sich sehen, der Pfeil wird hingegen von der Bahn zur Scheibe abgelenkt und beschreibt aus seiner Sicht eine Kurvenbahn. Obwohl auf den Pfeil keine weiteren Kräfte wirken, sieht der bewegte Beobachter eine Ablenkung des Pfeils von seiner erwarteten geraden Flugbahn, was aus seiner Sicht auf das Auftreten einer ihn ablenkenden Kraft zurückzuführen ist.

2.3.2 Abrollen einer Kugel mit Zwangsführung

Zur Abschätzung der Zeit, die ein Versuchsablauf etwa dauert, wollten wir eine Gleichung herleiten, die uns in Abhängigkeit vom Anfangsort r_0 eine Aussage über die Zeit t liefert, bis die Kugel einen Ort r_1 erreicht.

Zunächst haben wir dazu in Excel eine iterative Lösung probiert, indem wir ausgehend von unseren Anfangsbedingungen sukzessive den nächsten Ort berechnet haben. Die Anfangsbedingungen lauten:

$$r(0) = r_0 \quad (4a)$$

$$v(0) = 0 \quad (4b)$$

$$\omega = \text{const} \quad (4c)$$

Der Startpunkt darf nicht im Kreismittelpunkt liegen ($r_0 = 0$), weil sonst keine Beschleunigung auftritt. Die Anfangsgeschwindigkeit v_0 wird in unseren Versuchen 0 sein, da wir die Objekte aus der Ruhelage heraus starten. Die Winkelgeschwindigkeit ω unserer Kreisplatte ist konstant.

Für die einzelnen Iterationsschritte gelten nun folgende Gleichungen:

$$s(t + \Delta t) = s(t) + \frac{1}{2} a(t) \cdot \Delta t^2 + v(t) \cdot \Delta t \quad (5)$$

$$v(t + \Delta t) = v(t) + a(t) \cdot \Delta t \quad (6)$$

während sich die Beschleunigung aus dem Gesetz über die Zentrifugalkraft ergibt:

$$a(t) = \omega^2 \cdot s(t) \quad (7a)$$

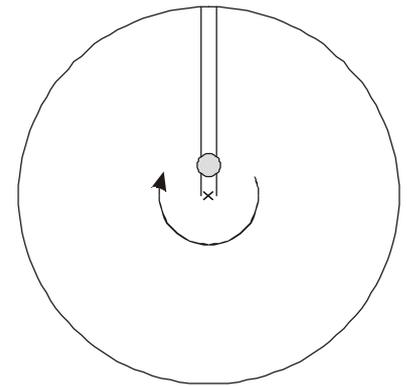


Abb. 2a: Die Kugel startet auf einer Rinne im Abstand r_0 vom Mittelpunkt

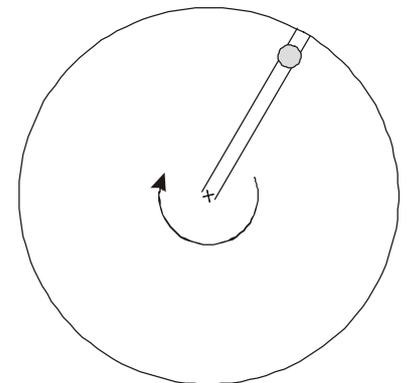


Abb. 2b: Durch die Rotation wird sie nach außen bis zum Abstand r_1 beschleunigt und gleichzeitig von der Rinne mitgenommen.

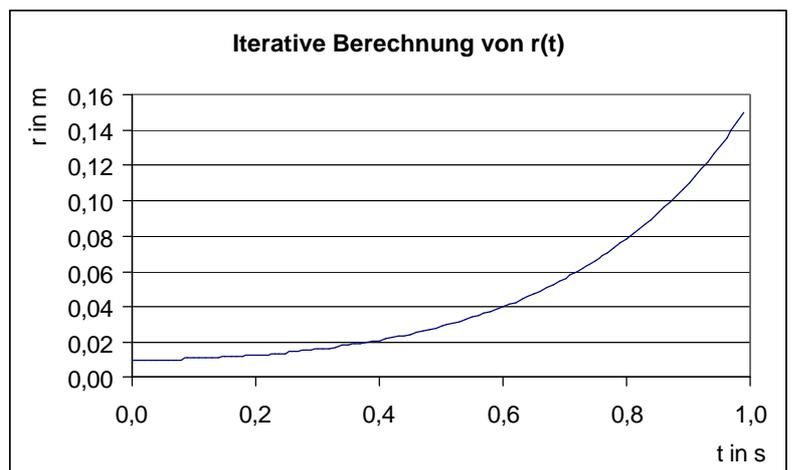


Abb. 3: Weg-Zeit-Diagramm einer zwangsgeführten Kugel

Innerhalb eines Zeitintervalls Δt wird die Beschleunigung als konstant angenommen. In dieser Iteration kann auch die Anfangsgeschwindigkeit v_0 frei gewählt werden. Für die oben angegebenen Randbedingungen ergibt sich für eine Umdrehungsgeschwindigkeit von 33 Umdrehungen pro Minute ein Weg-Zeit-Diagramm nach Abb. 3. Dem konnten wir entnehmen, dass es für $r_0 = 1$ cm etwa eine Sekunde dauert, bis unsere Kugel den Rand erreicht.

Um t auch analytisch berechnen zu können, versuchten wir anschließend, eine entsprechende Gleichung aufzustellen, die uns das gleiche Weg-Zeit-Diagramm liefert. Für die träge Masse m der Kugel gilt ein Kräftegleichgewicht nach

$$F_Z(t) + F_m(t) = 0 \quad \text{mit} \quad F_Z(t) = m \cdot \omega^2 \cdot r(t) \quad \text{und} \quad F_m(t) = m \cdot a(t)$$

wobei gilt:

$$a(t) = \ddot{r}(t) \quad (7b)$$

Eingesetzt erhält man

$$m \cdot \omega^2 \cdot r(t) = m \cdot \ddot{r}(t) \Rightarrow \ddot{r}(t) = \omega^2 \cdot r(t) \quad (8)$$

Der allgemeinste Ansatz für diese Differentialgleichung ist

$$r(t) = A \cdot e^{\omega t} + B \cdot e^{-\omega t} \quad (9)$$

mit den Ableitungen

$$\dot{r}(t) = \omega \cdot A \cdot e^{\omega t} - \omega \cdot B \cdot e^{-\omega t} \quad \text{und} \quad \ddot{r}(t) = \omega^2 \cdot A \cdot e^{\omega t} + \omega^2 \cdot B \cdot e^{-\omega t} = \omega^2 \cdot r(t)$$

Die Randbedingungen für diese DGL sind wie bei der Iteration auch

$$\text{I} : r(t_0) = r_0 \quad \text{und} \quad \text{II} : \dot{r}(t_0) = v_0 \quad (10)$$

Aus I. ergibt sich

$$A + B = r_0 \Rightarrow A = r_0 - B \quad \text{und aus II. erhält man} \quad \omega \cdot A - \omega \cdot B = v_0$$

Eingesetzt von I. in II. erhält man

$$r_0 - B - B = r_0 - 2B = \frac{v_0}{\omega} \Rightarrow B = \frac{r_0}{2} - \frac{v_0}{2 \cdot \omega} \quad \text{sowie} \quad A = r_0 - B = r_0 - \frac{r_0}{2} + \frac{v_0}{2 \cdot \omega} = \frac{r_0}{2} + \frac{v_0}{2 \cdot \omega}$$

Damit sind die beiden Formparameter in Glg. (9) vollständig bestimmt und man erhält

$$r(t) = \left(\frac{r_0}{2} + \frac{v_0}{2 \cdot \omega} \right) \cdot e^{\omega t} + \left(\frac{r_0}{2} - \frac{v_0}{2 \cdot \omega} \right) \cdot e^{-\omega t} = \frac{r_0}{2} \cdot (e^{\omega t} + e^{-\omega t}) + \frac{v_0}{2 \cdot \omega} \cdot (e^{\omega t} - e^{-\omega t}) \quad (11)$$

Laut Formelsammlung [Bronstein] kann dieser Ausdruck durch eine hyperbolische Funktion dargestellt werden:

$$r(t) = r_0 \cosh(\omega t) + \frac{v_0}{\omega} \sinh(\omega t) \quad (12)$$

Die graphische Darstellung dieser Funktion stimmt bis auf geringfügige Abweichungen durch die unvermeidlichen Iterationsfehler mit der von der Iteration erstellten überein. Da nach unseren Bedingungen $v_0 = 0$ ist, vereinfacht sich die Gleichung, da der zweite Summand verschwindet.

Leider reichen unserer mathematischen Kenntnisse nicht aus, diese Funktion nach t aufzulösen, sodass wir für die Zeitabschätzung nach wie vor auf unsere Iteration zurückgreifen müssen.

2.3.3 Abrollen einer Kugel ohne Zwangsführung

Nun erweitern wir das Experiment und entfernen die Zwangsführung, die zuvor Auswirkungen anderer Kräfte, die nicht von der Zwangsführung zugelassen werden, verhindert hat. Die Kugel kann sich nach dem Aufsetzen frei in alle Richtungen bewegen und wir können eine Aussage über die Bewegung eines freien Körpers in einem rotierenden System treffen.

Auf die Kugel wirken nun zwei Kräfte: die Kreisbewegung führt zu einer Zentrifugalkraft F_G , und die Haftreibung auf der Plattenoberfläche zu einer am Kugelradius angreifenden Kraft F_R . Durch beide Kräfte wird die Kugel in Rotation versetzt. Da wir von Haftreibung ausgehen, lässt sich im ersten Fall die Rotation aus der Geschwindigkeit des Massenschwerpunktes und dem Kugelradius, im zweiten Fall aus der Bahngeschwindigkeit der Platte im Abstand r vom Plattenmittelpunkt bestimmen. Die beiden Rotationsachsen stehen senkrecht aufeinander.

Für die Rotation in Folge der Zentrifugalkraft gilt aus Sicht des bewegten Beobachters:

$$\vec{\omega}_Z = \vec{v}_Z \times \vec{r}_K \quad (13)$$

Für die Rotation in Abhängigkeit vom Mittenabstand gilt:

$$\vec{\omega}_R = \vec{v}_R \times \vec{r}_K \quad (14)$$

Durch die Haftreibung wird die Geschwindigkeit v_Z durch die Geschwindigkeit des Massenmittelpunktes der Kugel bestimmt. Diese ergibt sich aus der in Gleichung (12) angegebenen Funktion für $r(t)$ durch die 1. Ableitung zu

$$v_Z(t) = \frac{r_0 \cdot \omega}{2} \cdot (e^{\omega t} - e^{-\omega t}) = \frac{r_0 \cdot \omega}{2} \cdot \sinh(\omega \cdot t) \quad (15)$$

Für die Abrollgeschwindigkeit aufgrund der Rotation der Platte ergibt sich für v_R die Beziehung

$$v_R(t) = \omega \cdot r(t) \quad (16)$$

Die resultierende Geschwindigkeit der Kugel v_K ist also

$$\vec{v}_K = \vec{v}_Z + \vec{v}_R \quad (17)$$

Die beiden Geschwindigkeitskomponenten v_Z und v_R stehen senkrecht aufeinander, also erhält man für den Betrag von v_K :

$$v_K = \sqrt{v_Z^2 + v_R^2} \quad (18)$$

wobei v_K mit dem Radius (oder der Richtung von v_Z) den Winkel

$$\varphi = \arctan\left(\frac{v_R}{v_Z}\right) \quad (19)$$

einschließt. Durch Einsetzen von Glg. (15) und (16) in (18) erhält man für $v_K(t)$ den Ausdruck

$$v_K(t) = \sqrt{\left(\frac{r_0 \cdot \omega}{2} \cdot \sinh(\omega \cdot t)\right)^2 + (\omega \cdot r(t))^2} = \omega \cdot \sqrt{\left(\frac{r_0}{2} \cdot \sinh(\omega \cdot t)\right)^2 + r(t)^2} \quad (20)$$

Die Ortskurve ergibt sich hieraus durch Integration von $v(t)$ zu

$$s(t) = \frac{r_0 \cdot e^{-t\omega} \cdot \sqrt{5 \cdot e^{4t\omega} + 6 \cdot e^{2t\omega} + 5} \cdot |r_0|}{8} \quad (21)$$

Abb. 4 zeigt die beiden Graphen für $s(t)$ nach Glg. (21) und $v(t)$ nach Glg. (20).

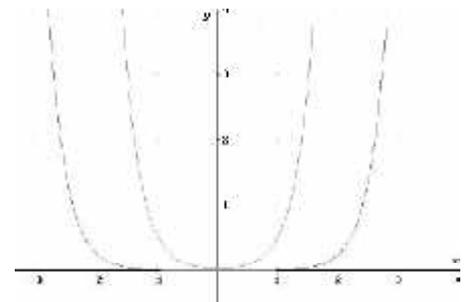


Abb. 4: Bahnkurven für $v(t)$ (innen) und $s(t)$ (außen)

2.4 Bahnkurven für die beiden Beobachter

2.4.1 Ruhender Beobachter

Der ruhende Beobachter beobachtet während der drei Versuche immer einen anderen Bahnverlauf des Versuchskörpers (gestrichelte Linien in den Abb. 5 - 7) als der rotierende Beobachter (durchgezogene Linien). Wenn im ersten Experiment ein Pfeil aus der Plattenmitte hinausgeschossen wird, beschreibt der Pfeil für den ruhenden Beobachter eine Gerade in Richtung Plattenrand. Diese Bewegung ist auf die Bogenkraft zurückzuführen, mit der der Pfeil beschleunigt wird und schließlich eine gleichförmige Bewegung einnimmt.

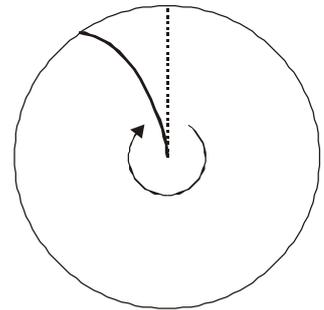


Abb. 5: Fliegender Pfeil

Im zweiten Versuch beobachtet der ruhende Beobachter eine Kurvenbahn, da durch die Zwangsführung, auf der die Kugel läuft, die Kugel mit der Platte mitgezwungen wird und nun nicht nur die Zentrifugalkraft, sondern auch eine Zwangskraft durch die Zwangsführung auf die Kugel wirkt. Addiert man die beiden Kräfte, die senkrecht aufeinander stehen, so erhält man die resultierende Kraft und die Bewegung. Dabei wirkt die Zentrifugalkraft in Richtung Plattenrand und die Zwangskraft immer in Richtung der Plattenrotation. Damit liegt die resultierende Kraft zwischen diesen beiden und lässt die Kugel bei einer rechts drehenden Platte eine rechtsgekrümmte Kurve beschreiben.

Der ruhende Beobachter sieht beim dritten Versuch auch eine Bahnkurve, die die (nun freie) Kugel beschreibt. Die Abweichung der Zieldiagonalen von der Anfangsdiagonalen ist jedoch nicht so groß wie im zweiten Fall, da nun zu der Bewegung die Rotation der Kugel hinzukommt, die aufgrund ihrer Trägheit bestrebt ist den Ort im Raum zu halten. Diese Kurve ist ebenfalls rechts gekrümmt.

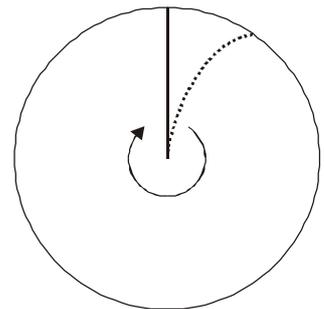


Abb. 6: Kugel mit Zwangsführung

2.4.2 Rotierender Beobachter

Aus der Sicht des bewegten Beobachters beschreibt die Kugel (der Pfeil) nun in jedem Experiment eine andere Bahn als aus der Sicht des ruhenden. Dieses Problem haben wir bereits in 2.3.1 beschrieben. Im ersten Fall wird der Pfeil von seiner geraden Flugbahn gegen die Richtung der Plattenrotation abgelenkt und beschreibt somit eine Kurvenbahn. Diese Kurve ist auf die Rotation des Beobachters zurückzuführen. Es wirkt also keine wirkliche Kraft auf den Pfeil, sondern aus Sicht des bewegten Beobachters eine Scheinkraft, die Corioliskraft. Diese steht senkrecht zur Bewegungsrichtung und führt deshalb zu einer Kurvenbahn des Pfeils.

Im zweiten Experiment wird aus der Sicht des bewegten Beobachters, der sich mit der gleichen Winkelgeschwindigkeit wie die Zwangsführung bewegt, die Kugel in der Zwangsführung eine Gerade beschreiben, da lediglich die Zentrifugalkraft auf die Kugel wirkt und alle anderen Kräfte von der Zwangsführung verhindert werden.

Im dritten Experiment wird die Kugel aus Sicht des bewegten Beobachters eine enge Kurvenbahn beschreiben. Diese Kurvenbahn ist der aus Sicht des ruhenden Beobachters entgegengesetzt und enger als alle anderen Kurvenbahnen, da sich

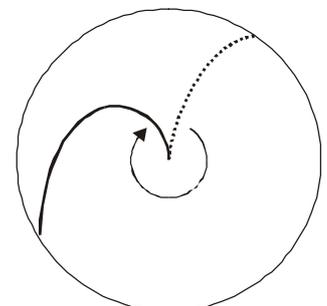


Abb. 7: Kugel ohne Zwangsführung

hier die Rotation der Kugel zusätzlich auf die Bewegung auswirkt. Damit hat die Kugel in diesem Experiment die größte Geschwindigkeit auf der Drehplatte. Die Kurvenbahn entsteht einerseits durch die Rotation in Richtung Plattenrand aufgrund der Zentrifugalkraft und andererseits durch die Rotation entgegen der Plattenrotation aufgrund der Haftreibung. Dabei stehen die Rotationsachsen senkrecht aufeinander, wodurch ein Rotationsparallelogramm entsteht, aus dem man die resultierende Rotation entnehmen kann.

3 Das Experiment

3.1 Aufbau/ Durchführung

Um die Verhaltensweisen verschiedener Gegenstände in einem rotierenden System beschreiben zu können benötigt man zunächst ein rotierendes System.

Der Einfachheit halber haben wir uns dazu entschieden einen Plattenspieler als Grundgerüst für unseren Versuch zu verwenden, da wir es uns somit ersparen können die Rotationsgeschwindigkeit des Systems mit Lichtschranken zu ermitteln. Der Plattenspieler kann auf zwei Rotationsgeschwindigkeiten umgeschaltet werden, zum einen 45 Umdrehungen pro Minute und zum anderen 33 Umdrehungen pro Minute. Der Synchronmotor gewährleistet eine konstante Rotationsgeschwindigkeit, dies liegt daran, dass seine Drehzahl durch die Netzfrequenz (50 Hz) bestimmt wird.

Um nun die Verhaltensweisen eines Gegenstandes in einem rotierenden System beschreiben zu können, verwenden wir zwei Videokameras. Die feststehende Kamera (ruhender Beobachter) ist eine Webcam mit direktem USB-Anschluss, die rotierende Kamera (bewegter Beobachter) ist eine Funkkamera, die einen Analog-Digital-Wandler benötigt, da die analogen Signale der Funkkamera für den PC digitalisiert werden müssen.

Die USB-Kamera ist an einem stabilen Haltegestell befestigt, welches wiederum an dem Plattenspieler montiert ist. Die Kamera ist senkrecht auf den Plattenteller ausgerichtet.

Die Funkkamera ist an einem Aluminiumhaltegestell befestigt, da dieses sehr leicht ist und somit Umwuchterscheinungen verhindert werden können. Das Aluminiumgestell ist an den Plattenteller montiert. Die Funkkamera ist, wie die USB Kamera, senkrecht auf den Plattenteller ausgerichtet, jedoch leicht zur USB Kamera versetzt, damit sie nicht in deren Bildausschnitt geraten kann, wenn sie mit dem Plattenteller rotiert. Den endgültigen Versuchsaufbau zeigt Abb. 8.

Man hätte jedoch den Versuchsaufbau auch mit einem halbdurchlässigen Spiegel konstruieren können. Dieser halbdurchlässige Spiegel wird in einem Winkel von 45° über der Mitte des Plattentellers angebracht. Die nicht mitfahrende Kamera befindet sich dann senkrecht über der Plattentellermitte, so dass sie durch den Spiegel hindurch sehen kann, die mitfahrende Kamera wird waagrecht montiert und kann durch die Reflexion am Spiegel ebenfalls auf die

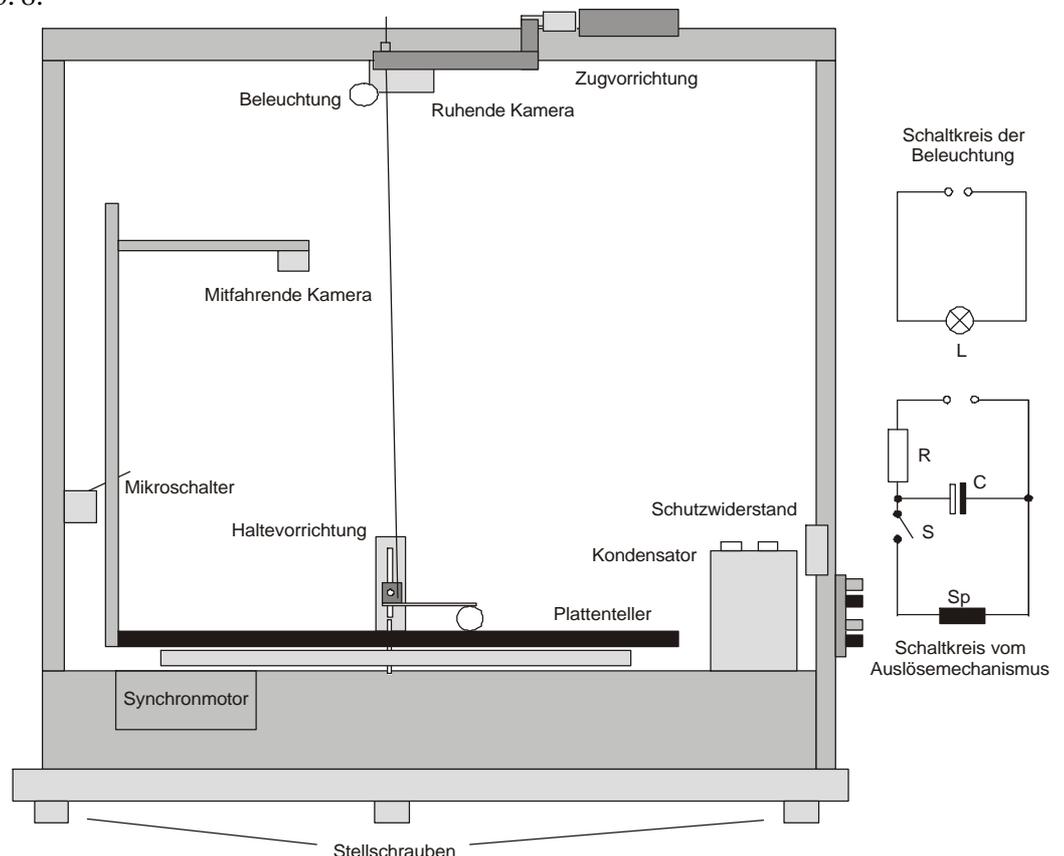


Abb. 8: Seitenansicht des gesamten Versuchsaufbaus

Plattentellermite sehen. Somit hätte man ebenfalls zwei koaxiale Beobachtungsperspektiven erhalten, die beide senkrecht und auf den Mittelpunkt des Plattentellers ausgerichtet gewesen wären. Wir haben auf diese Konstruktion verzichtet, weil ein hinreichend großer halbdurchlässiger Spiegel zu teuer ist.

Um nun einen definierten Startpunkt für die Gegenstände, deren Eigenschaften in unserem rotierenden System untersucht werden sollen, zu gewährleisten, benötigt man eine Vorrichtung, die den Gegenstand zu einem von uns vorgegebenen Zeitpunkt loslässt, damit die Messung beginnen kann. (Abb. 9 und 10)

Diese Auslösevorrichtung besteht aus zwei Teilen. Die Haltevorrichtung ist im Zentrum des Plattentellers montiert und die Zugvorrichtung ist an dem Haltearm oberhalb der USB-Kamera befestigt.

Die Haltevorrichtung (Abb. 9) besteht aus einem Kunststoffteil mit einem Kugellager. An diesem Kunststoffteil ist an der Unterseite ein Haltearm mit Stelllöchern angebracht an dem wiederum eine Scheibe montiert ist. Der Haltearm wird durch eine Zugfeder heruntergezogen, damit der eingespannte Gegenstand festgehalten werden kann. Die Verstellbarkeit der Scheibe ermöglicht uns die Variation des Anfangsabstandes r_0 zum Mittelpunkt. Der Haltearm ist höhenverstellbar, was es uns ermöglicht Gegenstände verschiedener Größen einzuspannen und zu untersuchen.

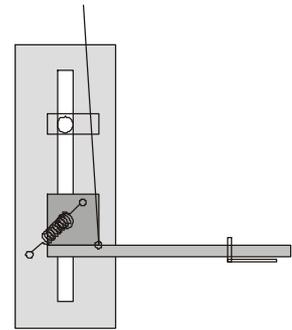


Abb. 9: Skizze der Haltevorrichtung

Zum Auslösen der Haltevorrichtung dient die Zugvorrichtung (Abb. 10). Sie besteht aus einem Stahldraht, einem Winkelhebel, einer Feder, einem Elektromagneten, einem Kondensator, einem Widerstand, einem Mikroschalter und einem Gleichstrom-Netzgerät.

Bei geöffnetem Mikroschalter lädt sich der Kondensator über einen Strombegrenzungswiderstand auf. Wird nun der Mikroschalter durch die Kamerahaltevorrichtung ausgelöst, entlädt sich der Kondensator und überträgt die in ihm gespeicherte elektrische Energie von ca. 800 Ws in wenigen Millisekunden auf den Elektromagneten. Dessen Zugkraft wird durch den Winkelhebel auf den Stahldraht übertragen, der mit Hilfe eines Gleitlagers, das ein Verdrehen des Drahtes während der Rotation der Platte verhindert, den Hebel an dem Haltearm der Haltevorrichtung anhebt. Eine Feder zwischen dem Elektromagneten und dem Winkelhebel verringert den Zugwiderstand für den Elektromagneten und stabilisiert zusätzlich den Winkelhebel. Nachdem der Haltearm angehoben wurde, wird er durch eine Feder in dieser Position arretiert und der Gegenstand kann sich frei auf der Platte bewegen.

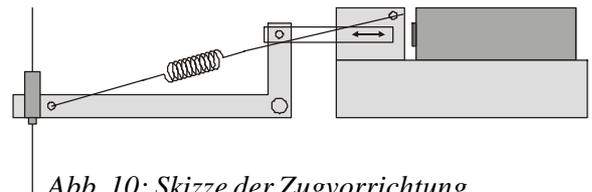


Abb. 10: Skizze der Zugvorrichtung

Da der Mikroschalter immer an derselben Stelle ausgelöst wird, liefert der Zeitpunkt des Hochklappens der Vorrichtung einen definierten Startpunkt für die Messung, welchen wir benötigen um die beiden Kameraperspektiven zu synchronisieren. Außerdem hat es den Vorteil, dass sich der Gegenstand immer im gleichen Bildausschnitt der Kameras zu bewegen beginnt.

Ein weiteres Problem stellt die Beleuchtung der Versuchsanordnung dar, weil das Tageslicht Schatten entstehen lässt, die das Auswertungsprogramm behindern. Gelöst wird das Problem durch eine Halogenlampe, die über dem Experiment angebracht wird und eine nahezu punktförmige Lichtquelle darstellt. Um unerwünschte Reflexionen zu vermeiden, wurden der Plattenteller sowie die Anbauten auf der Platte mit matter Pappe beklebt.

Der gesamte Versuchsaufbau steht auf einer Grundplatte, die mit zwei Stellschrauben und einem starren Fuß eine horizontale Ausrichtung des Plattentellers erlaubt.

4 Verarbeitung der Bilddaten

4.1 Aufbau der VB-Anwendung

Mein Teil der Jugend Forscht Arbeit befasst sich mit der Verarbeitung der Bilddaten am Computer. Dafür entwickelte ich eine Visual Basic Anwendung, die einen komplizierten Algorithmus zum Bearbeiten der Bilddaten enthält. Ich entschied mich für die Programmiersprache Visual Basic, da ich schon seit längerer Zeit für private Verwendung diverse Programme in Visual Basic schreibe und ich somit das für die Programmierung des Algorithmus benötigte Vorwissen mitbringe. Außerdem war mir schon vor Beginn der Jugend Forscht Arbeit klar, dass ich durch die Entwicklung dieses Programms mehr Erfahrung in Visual Basic und der problemorientierten Programmierung erhalten werde.

Als Input verlangt meine Anwendung eine mit der jeweiligen Kamera aufgenommene Videodatei im AVI Format, die mit Hilfe eines Videoschnittprogramms so beschnitten wurde, dass im ersten Frame die Kugel losgelassen wird und im letzten Frame die Kugel die Drehscheibe verlassen hat. Als Output liefert sie eine Bilddatei mit den gleichen Abmessungen wie die Videodatei, auf der man den Verlauf der Kugel sehen kann.

Damit die Bearbeitung des Videos vereinfacht wird, haben wir den Plattenteller sowie die ganze verwendete Hardware, die von den Kameras erfasst wird, mit schwarzer Pappe überklebt bzw. an kleineren Stellen mit einem schwarzen Edding übergemalt, da wir für unsere Versuche eine stark reflektierende Kugel benutzen und ansonsten nichts von dem Versuchsaufbau reflektiert. Somit haben wir im Optimalfall eine sich bewegende, weißen Fläche vor einem schwarzen Hintergrund. Um dieses Optimum zu erreichen, stellten wir die Einstellungen der Treiber der USB-Webcam bzw. der analogen Funkkamera so ein, dass wir einen Schwarz-Weiß-Stream erhalten, indem wir die Farbsättigung minimierten. Dazu stellten wir auch noch den Kontrast- und den Helligkeitswert der Kamera so ein, dass ein kontrastreiches Bild entsteht.

Das wohl größte Problem bei der von mir entwickelten VB-Anwendung war nun jedoch die Umwandlung des Videostreams der beiden Kameras in einzelne monochrome Videoframes. Diese kommen mit 24 Bit Farbtiefe, benötigt wird jedoch lediglich ein nur aus den Farben Schwarz und Weiß bestehendes Bild, wo sich die Kugel bzw. der Zylinder von dem Hintergrund des Bildes komplett in einer Farbe abhebt und das keine Graustufen mehr enthält. Diesen Schritt der Bildverarbeitung nennt man Bildsegmentierung. Ich habe mich bei meiner Anwendung für ein pixelorientiertes Bildsegmentierungsverfahren mit Schwellenwertverfahren entschieden.

Um von dem AVI-Stream einzelne Frames extrahieren zu können, musste ich auf die WinAPI zurückgreifen, die die von mir benötigten Funktionen enthält. Es war mir jedoch nicht möglich die Funktionsweise der WinAPI-Funktionen hinreichend zu verstehen, da die WinAPI sehr schlecht dokumentiert ist, deswegen nehme ich die Funktionen als Blackbox hin [3].

Nachdem ich den AVI-Stream geöffnet habe (siehe nächste Seite, Abb. 11: "Öffnen vom AVI-Stream"), extrahiere ich den ersten Frame und zeichne diesen in die PictureBox ein ("Erstes Frame laden"). Nun sucht mein Programm mit dem von mir entwickelten Scan-Algorithmus den Kreismittelpunkt ("Kreismittelpunkt suchen"). Den ermittelten Kreismittelpunkt speichere ich in dem dafür vorgesehen Feld des Punkt-Typs ab ("Kreismittelpunkt im Punkt-Feld speichern"). Mit dem ermittelten Kreismittelpunkt bestimme ich den Radius des Kreises, indem ich vom Mittelpunkt aus die Ränder des Kreises bestimme ("Radius des Kreises bestimmen").

Nun lade ich das folgende Frame aus dem AVI-Stream und zeichne dies in die PictureBox ("n. Frame laden"). Die Bearbeitung dieses Frames ist erheblich leichter als die Bearbeitung vom ersten Frame, da ich die Position des vorhergehenden Mittelpunkts schon kenne, und sich die Kugel innerhalb eines Frames nicht weit bewegt hat. Mit

dieser Information untersuche ich zunächst eine quadratische Umgebung um den alten Mittelpunkt mit einer hinreichend großen Seitenlänge, so dass die Kugel noch erfasst wird ("Suchframe setzen"). In diesem Quadrat sucht der Scan-Algorithmus nun nach dem Kreismittelpunkt ("Kreismittelpunkt suchen") und speichert ihm im Feld ab ("Kreismittelpunkt im Punkt-Feld speichern").

Mit dem oben beschriebenen Verfahren suche ich auch in den restlichen Frames nach dem Mittelpunkt ("Mit restlichen Frames"). Nun habe ich alle Mittelpunkte in einem Feld gespeichert und kann sie in eine PictureBox einzeichnen, damit man den Verlauf der Kreise bzw. die Bewegung der Kugel auf der rotierenden Platte besser erkennen kann ("Einzeichnen und Verbinden der Mittelpunkte in eine PictureBox").

Im folgenden Abschnitt werde ich den Scan-Algorithmus genauer beschreiben, da er sehr komplex ist.

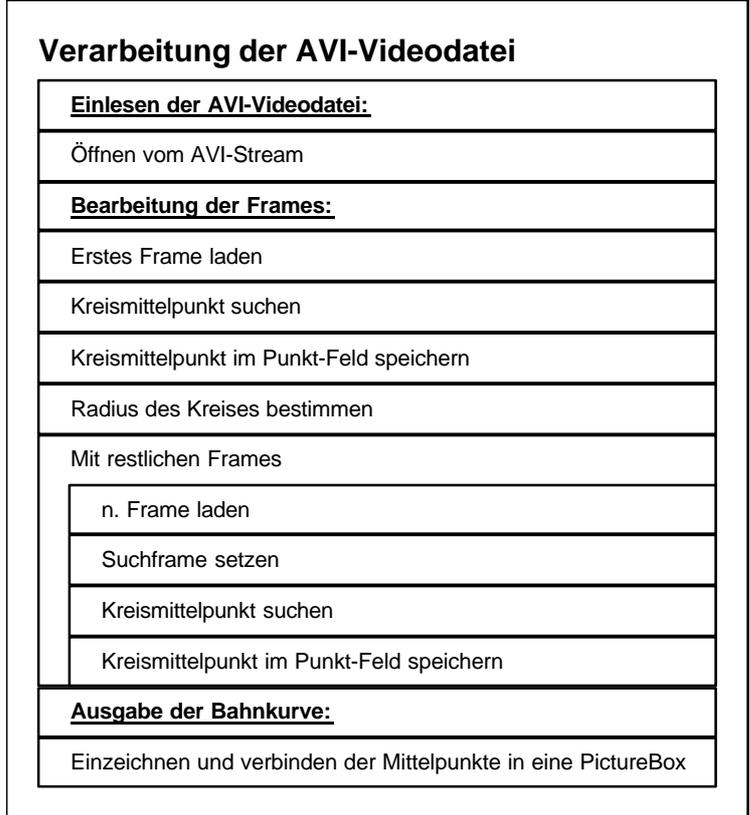


Abb. 11: Struktogramm zur Verarbeitung der Bilddaten

4.2 Aufbau des Algorithmus zum Suchen des Kreismittelpunkts

Den Scan-Algorithmus habe ich in meinem Programm durch die GetCircle-Funktion realisiert. Die Funktion erwartet die Parameter PictureBox, x0, y0, x1 und y1 und gibt einen Wert als Punkt-Typ zurück.

PictureBox ist ein Verweis auf die PictureBox, in der das Frame eingezeichnet ist. Die restlichen Parameter definieren den Bereich, in dem gescannt werden soll. Die Punktkoordinaten (x0 | y0) und (x1 | y1) definieren diagonal gegenüberliegende Eckpunkte des zu durchsuchenden Rechtecks.

GetCircle besitzt deshalb die Möglichkeit, die Suche nach dem Kreismittelpunkt auf einen bestimmten Bereich einzugrenzen (Abb. 12), weil man ab dem zweiten Frame den vorhergehenden Kreismittelpunkt bereits kennt, sich die Kugel innerhalb eines Frames noch nicht weit bewegt hat und sich somit voraussichtlich in einer engeren Umgebung des alten Mittelpunktes befindet. Diese Umgebung lege ich dadurch fest, dass ich ein Quadrat um den alten Mittelpunkt mit einer hinreichend großen Seitenlänge lege.

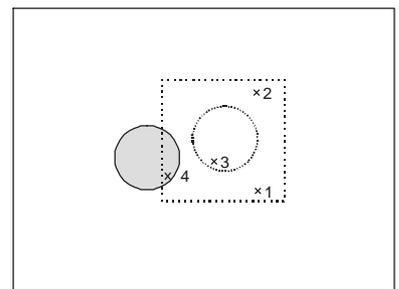


Abb. 12: Reduktion des Suchbereichs

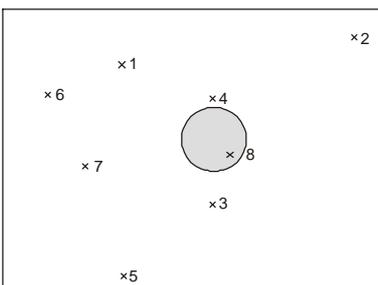


Abb. 13: Suchen des Objektes mit der Monte-Carlo-Methode

Als Erstes überprüft mein Programm, ob die übergebenen Ränder auch wirklich innerhalb des Bildes sind und nicht negative oder zu große Werte enthalten, die über die Bildgrenzen hinausgehen. Sobald die Ränder negativ oder zu groß sind, setzt der Algorithmus die Ränder auf den dazu gehörigen Bildrand (siehe nächste Seite, Abb. 14: "Übergebene Ränder überprüfen"). Der nächste Schritt ist eine Fußschleife, in der eine Fußschleife eingebettet ist. Die innere Fußschleife erzeugt so lange Zufallskoordinaten (Abb. 13), die innerhalb der definierten Ränder liegt ("Zufallswerte für die X- und Y-Koordinaten

innerhalb der Rändern erzeugen"), bis die Helligkeit von dem erzeugten Zufallspunkt über eine a priori definiertem Schwellenwert liegt ("Wiederhole bis Helligkeit des Zufallspunkts über einem Schwellenwert") und somit ein möglicher Punkt der Kugel gefunden sein könnte. Ist jedoch nach 1000 Versuchen kein Punkt mit der notwendigen Helligkeit gefunden worden ("Ist $i = 1000$?"), soll ab nun das gesamte Bild und nicht nur ein kleiner Bereich durchsucht werden ("Setze Ränder auf ihr jeweiliges Minimum bzw. Maximum").

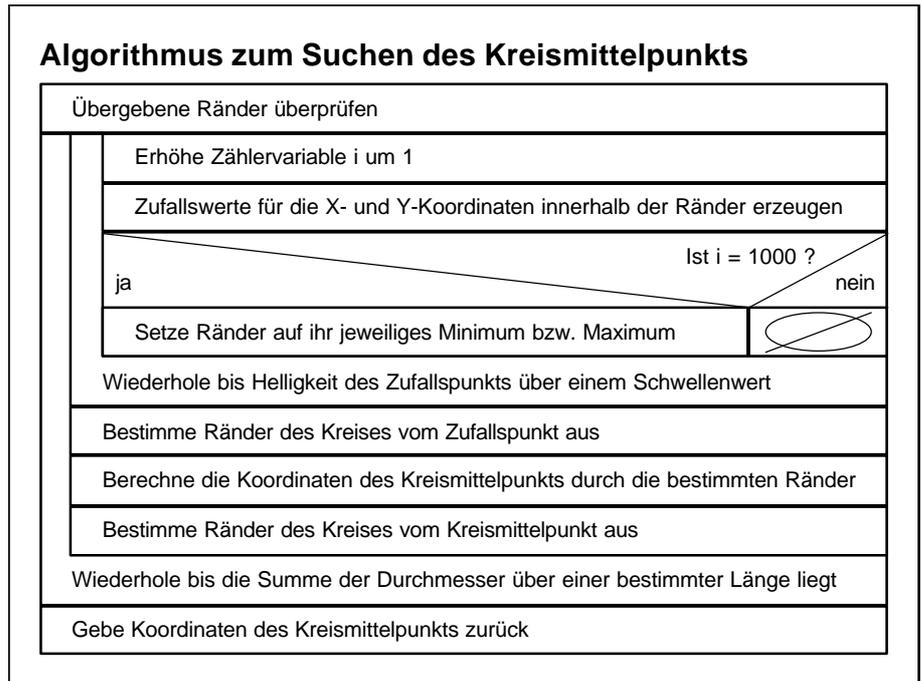


Abb. 14: Struktogramm zur Bestimmung des Kreismittelpunktes

Nachdem nun ein möglicher zum Kreis gehörender Punkt gefunden wurde, sollen von diesem Punkt aus die Ränder der Kugel bestimmt werden ("Bestimme Ränder des Kreises vom Zufallspunkt aus"), um mit diesen Randpunkten den Mittelpunkt des Kreis berechnen zu können ("Berechne die Koordinaten des Kreismittelpunkts durch die bestimmten Ränder"). Von dem berechneten Mittelpunkt sollen nun erneut die Ränder bestimmt werden ("Bestimme Ränder des Kreises vom Kreismittelpunkt aus"). Mit den bestimmten Rändern kann man nun zwei Durchmesser der Kugel bestimmen (Abb. 15).

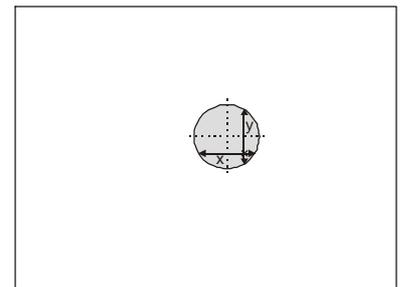


Abb. 15: Bestimmung des Kugelmittelpunktes

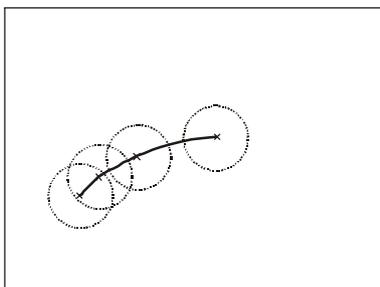


Abb. 16: Bahnkurve aus mehreren Kreismittelpunkten

Ist die Summe der beiden Durchmesser

nun jedoch kleiner als eine bestimmte Länge ("Wiederhole bis die Summe der Durchmesser über einer bestimmter Länge liegt"), ist der Punkt kein zum Kreis gehörender Punkt und somit geht die Fußschleife wieder zu ihrem Anfang zurück und es werden neue Zufallspunkte erzeugt, weil es nicht das gesuchte Objekt war. Andernfalls wird die Fußschleife verlassen und die Koordinaten des Mittelpunkts werden als Funktionswert der GetCircle-Funktion zurückgegeben ("Gebe Koordinaten des Kreismittelpunkts zurück"). Die Folge der gefundenen Kreismittelpunkte ist die gesuchte Bahnkurve (Abb. 16).

5 Ergebnis

Nun kommen wir zu der Zusammenfassung unserer Vorarbeiten. Zunächst haben wir mit Hilfe der in Kap. 3 beschriebenen Versuchsausrüstung einige Aufnahmen aus Sicht der ruhenden und der bewegten Kamera aufgenommen, um diese durch die VB-Anwendung aus Kap. 4 auswerten zu können. Die Abbildungen 17 und 18 zeigen aus Darstellungsgründen nur jedes 8. Frame der Bildsequenzen der beiden Beobachtungskameras, die verwendeten Bilder sind jedoch äquidistant aus den AVI-Dateien extrahiert. Die Bildfolgen beginnen im oberen Bild mit dem Start der Kugel, die schematische Darstellung jeweils unten zeigt die daraus extrahierte Bahnkurve.

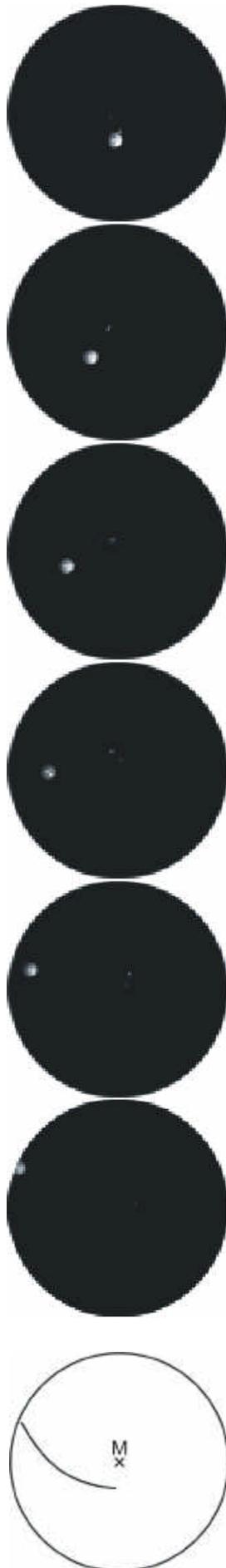


Abb. 17: Bahnkurve aus Sicht des ruhenden Beobachters

Die in Abb. 17 dargestellte Bahnkurve zeigt den Verlauf der Kugel ohne Zwangskraft aus Sicht des ruhenden Beobachters. Vergleicht man diese mit Abb. 7 (S. 8, gestrichelte Linie) aus Kap. 2, so kann man feststellen, dass die aus den physikalischen Überlegungen hervorgegangenen Bahnkurven mit den experimentell erstellten nahezu übereinstimmen.

Genauso verhält es sich mit den Aufnahmen aus der Perspektive des bewegten Beobachters. Abb. 18 zeigt die experimentell erfasste Bahnkurve dieser Kamera. Sie ist mit Abb. 7 (S. 8, durchgezogene Linie) aus Kap. 2 vergleichbar, die einen aus den dort dargestellten Überlegungen hergeleiteten Verlauf zeigt.

Anhand dieser beiden Bildsequenzen kann man außerdem die deutlich die unterschiedliche Richtung der wirkenden resultierenden Kräfte erkennen sowie die daraus resultierende unterschiedliche Beschleunigung der Kugel, da diese in den zwei Abläufen unterschiedliche Strecken in gleicher Zeit zurücklegt, obwohl es sich um denselben Versuch handelt.

Unter den Bildsequenzen sind jeweils die resultierenden Bahnkurven gezeigt, die durch Verwendung des Algorithmus aus Kap. 4 erstellt wurden. Die Kugel bewegt sich aus Sicht des ruhenden Beobachters vom Ausgangspunkt gesehen nach rechts und beschreibt eine Kurve. Aus Sicht des bewegten Beobachters bewegt sich die Kugel nach links und schlägt eine engere Kurve ein, wobei sie trotzdem nach der gleichen Zeit den Plattenrand verlässt.

Dies lässt darauf schließen, dass in einem rotierenden System ein Versuchskörper aus zwei verschiedenen Perspektiven unterschiedliche Bewegungen beschreiben kann (siehe Kap. 2.3.1) und durch den Wechsel von einem Beobachter zum anderen unterschiedliche Ortskurven, jeweils andere Kräfte und verschiedene Beschleunigungen auftreten (siehe Kap. 2.3.2).

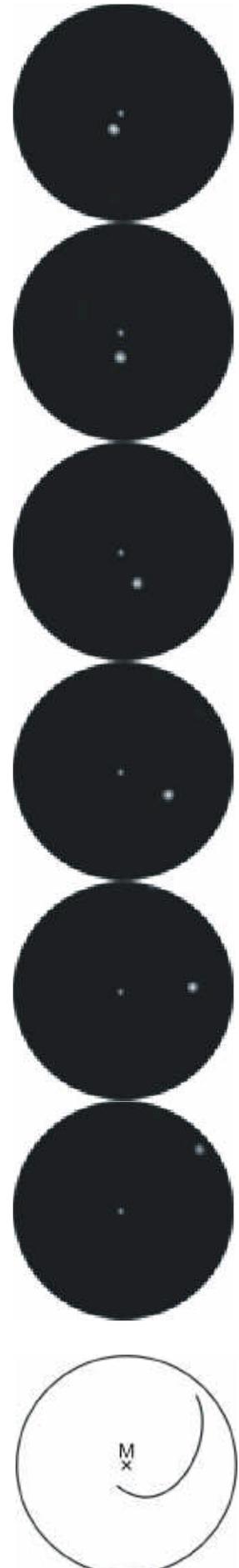


Abb. 18: Bahnkurve aus Sicht des bewegten Beobachters

6 Schwierigkeiten bei der Umsetzung unserer Ideen

6.1 Probleme mit der Apparatur

Momentan ist es leider nicht möglich die Rotationsgeschwindigkeit des Plattentellers zwischen 45 und 33 Umdrehungen pro Minute zu variieren. Die Spannung des hier normalerweise eingesetzten Flachriemens war zu gering, als dass damit der Plattenteller mit den zusätzlichen Anbauten angetrieben werden konnte. Statt dessen setzen wir derzeit provisorisch einen runden Antriebsriemen ein, der aber für das vorhandene mechanische Umschaltsystem nicht geeignet ist und beim Umschalten auf 45 Umdrehungen pro Minute von der Antriebsfläche des Tellers abspringt. Deshalb wurden bisher die Messungen nur mit der konstanten Rotationsgeschwindigkeit von 33 Umdrehungen pro Minute durchgeführt.

Damit eine Variation der Rotationsgeschwindigkeit möglich wird, muss der Antrieb des Plattentellers verbessert werden. Dazu wird der Versuchsaufbau in naher Zukunft mit einem neuen Antrieb versehen. Dieser wird voraussichtlich aus einem drehzahlgesteuerten Gleichstrommotor bestehen, dessen Rotationsgeschwindigkeit mit Hilfe eines Regelkreises konstant gehalten werden kann. Dies ermöglicht genauere Messergebnisse und eine erweiterte Beobachtung der Versuchsobjekte in einem rotierenden System in Abhängigkeit der Rotationsgeschwindigkeit.

6.2 Probleme mit der Datenverarbeitung

Ein großes Problem bei der VB-Anwendung ist die Verwendung von Zufallspunkten, da der Algorithmus auch mit einem Zufallspunkt weiterrechnet, der nicht unbedingt auf der Kugel liegen muss, aber dessen Helligkeit über dem Schwellenwert liegt. Der Algorithmus würde mit diesem Punkt weiterarbeiten, obwohl es sich bei dem Punkt um ein Artefakt handelt. Gründe für diese Artefaktbildung sind zum Einen die umgestellten Helligkeits-, Kontrast- und Farbsättigungswerte bei den Kameratreibern und zum Anderen eine nicht vollständig abgedunkelte Hardwarestelle, die von der Kamera erfasst wurde. Durch so ein Artefakt erzielt mein Algorithmus nicht mehr das Ergebnis, auf das er programmiert wurde. Um diesem Effekt entgegen zu wirken, könnte man das Bild so beschneiden, dass nur noch die Drehscheibe zentriert auf einem quadratischen Bild zu sehen ist. Hierfür müsste man jedoch den Mittelpunkt der Drehscheibe kennen, den man erhalten kann, wenn man zu erst die weiße Kugel zentral auf die Drehscheibe liegt, dann mit einer VB-Anwendung den Mittelpunkt der weißen Kugel und somit auch der Drehscheibe bestimmt, diesen Mittelpunkt auf den Mittelpunkt eines neuen quadratischen Bildes verschiebt und das restliche Bild passend zu dem Mittelpunkt einzeichnet. Somit erreicht man, dass das zu bearbeitende Bild nur die Drehscheibe und keine Hardware enthält, die außerhalb der Drehscheibe liegt. Nun kann man auch die Treibereinstellungen der Kameras zurücksetzen, um die Artefaktbildung zu verringern. Auch mit zurückgesetzten Treibereinstellungen erhält man nun ein Bild, welches mit meinem Algorithmus bearbeitet werden kann, da man auf diesem Bild eine weiße Fläche auf einem schwarzen Hintergrund sieht.

Ein weiteres Problem meiner VB-Anwendung ist, dass sie nur a priori zugeschnittene Videos bearbeiten kann, bei dem auf jedem Bild die Kugel komplett zu erkennen ist, also wo die Kugel auf dem ersten Frame ihre Bewegung gerade begonnen hat und auf dem letzten Frame gerade die Platte verlassen hat. Es wäre jedoch von Vorteil, dass mein Programm direkt die Videos bearbeiten kann, die die Kameras aufgenommen hat. Dies kann man dadurch erreichen, indem man einen Algorithmus schreibt, der das Startframe bestimmt. Dieser Algorithmus verfolgt auf den Frames einen auf der Haltestange der Kugel gezeichneten Punkt. Bei der bewegenden Kamera ist dieser Punkt immer an der gleichen Stelle, was die Überprüfung dieses Punktes leicht macht. Bei der festen Kamera hingegen ändert sich die Position des Punktes bei jedem Frame, was den Algorithmus komplizierter macht, da man für jedes Bild die zu überprüfende Position neu berechnen muss. Wenn dieser Überprüfungspunkt seine Farbe von weiß auf schwarz ändert, wurde die Haltestange hochgeklappt und der Punkt zeigt auf den schwarzen Hinter-

grund. Im folgenden Frame zeigt der Überprüfungspunkt wieder auf einen weißen Pixel, da sich die Kugel mittlerweile von ihrem Startpunkt wegbewegt hat und nun den Überprüfungspunkt durchläuft. Das Startframe liegt also da, wo die Änderung der Farbe von weiß auf schwarz und wieder zurück auf weiß vollzogen wurde. Durch dieses Verfahren hat man auch gleich einen Kreispunkt, wodurch die Verwendung von Zufallspunkten im ersten Frame unnötig wird, was meinen Algorithmus sicherer macht.

Bisher arbeitet mein Programm mit der von Visual Basic mitgelieferten PictureBox-Komponente. In ihr werden alle Frames eingezeichnet und alle Helligkeitsabfragen werden mit der .Point-Methode realisiert um die Farbe des Punktes herauszufinden. Dieses Einzeichnen des Frames in die PictureBox und die .Point-Methode sind jedoch im Gegensatz zum Bearbeiten des Bildes im Speicher und der GetPixel-Funktion aus der WinAPI sehr langsam. Man kann also durch Bearbeiten des Bildes im Speicher und durch Verwendung der GetPixel-Funktion das Programm erheblich beschleunigen.

6.3 Probleme mit dem physikalischen Hintergrund

Bei der Erarbeitung der physikalischen Zusammenhänge in den drei betrachteten Experimenten sind einige zusätzliche Überlegungen angebracht. Zunächst betrachten wir die in Kap. 2.3.2 beschriebene Kugel mit Zwangsführung. In unseren Experimenten haben wir nicht wirklich eine Zwangsführung verwendet, da wir hierzu unseren Versuchsaufbau ergänzen müssten. Die gleiche Wirkung wie eine Zwangsführung hat die Verwendung eines Zylinders als Versuchsobjekt. Ein Zylinder berührt die Unterlage nicht in einem Punkt wie die Kugel, sondern in einer Linie parallel zur Zylinderachse. Dadurch können auftretende Querkräfte durch die Rotation der Platte den Zylinder nicht in eine Drehung um die Zylinderachse versetzen, solange seine Breite ausreicht, ihn nicht kippen zu lassen. Sind die Querkräfte groß genug, um den Schwerpunkt des Zylinders über eine Seite hinauszubewegen, gerät er in eine instabile Lage und beginnt zu rotieren. Diese Art der Rotation tritt bei unseren Versuchen nicht auf, so dass wir sagen können, dass die Querkräfte keinen Einfluss auf den Zylinder haben und der Verlauf einer Kugel mit Zwangsführung gleicht.

Zudem gab es auch einige erhebliche Hürden in der mathematischen Bearbeitung der Physik. Unser erster Ansatz für die Differentialgleichung nach Glg. (8) stimmte nicht überein mit den Ergebnissen der iterativen Lösung. Herr Zilk empfahl uns mit Glg. (9) einen erweiterten allgemeineren Ansatz zur Lösung solcher Gleichungen, bei deren Umsetzung wir mit den Hyperbolicusfunktionen konfrontiert wurden, die im Mathematikunterricht normalerweise nicht behandelt werden. Die Funktionen wurden jedoch schnell zu komplex für unsere Kenntnisse, deshalb haben wir uns dann auf das Computer-Algebra-System Derive gestützt, um die Funktionen auf- und abzuleiten sowie graphisch darzustellen.

7 Danksagung

Wir danken Herrn Biedermann, dass er uns die benötigten Materialien zur Verfügung gestellt und uns tatkräftig bei der Umsetzung unseres Projektes unterstützt hat, und Herrn Zilk, dass er uns bei der mathematischen Herleitung unterstützt hat.

8 Literaturverzeichnis

- [1] Alonso-Finn: Fundamental University Physics, Addison-Wesley, USA 1967
- [2] Georg Joos: Lehrbuch der Theoretischen Physik, AULA-Verlag Wiesbaden, 1989
- [3] API-Funktionen zur Extrahierung von AVI-Frames
(http://www.vbaccelerator.com/home/VB/Code/vbMedia/Movies/AVI_Extractor/VB6_AVI_Extractor.asp)