Brio2: Alternative Ansteuerung und Ballmagazin

Programmierung alternativer Ansteuerungen eines Brio Labyrinth Spieles und Konstruktion eines Ballmagazins

Bachelor-Projekt von Marc Tabie und Johannes Teiwes

Bachelor Projekt im Studiengang Systems Engineering

Marc Tabie, Johannes Teiwes
Bremen, 5. Februar 2009
Verantwortlich: Elsa Kirchner
Prof. Dr. Frank Kirchner
Universität Bremen

Universität Bremen

Inhaltsverzeichnis

1 Einleitung **1**

2 Zieldefinition **3**

3 Zusammenfassung **4**

4 AP1: Entwicklung der Joystickansteuerung **5**
4.1 Integration des Joysticks 5
4.2 Skalierung der Werte 6
4.2.1 Parallele Ansteuerung: 7
4.2.2 Diagonale Ansteuerung: 8

5 AP2: Ausrichten des BRIO Labyrinths **11**
5.1 Implementierung des Zentrieralgorithmus 11
5.1.1 Manuelle Kalibrierung 11
5.1.2 Automatische Kalibrierung 13
5.2 Test 13
5.2.1 Funktion der Kalibrierung 14
5.2.2 Reproduzierbarkeit der Kalibrierung 15
5.2.3 Fehlertoleranz der Kalibrierung 18
5.3 Lagesensoren 18
5.3.1 Zusammenfassung: 20

6 AP3: Ballmagazin **22**
6.1 Konzepte 22
6.1.1 Konzept 1 22
6.1.2 Konzept 2 23
6.1.3 Konzept 3 24
6.2 Konstruktion und -Bau 25
6.2.1 Kugel Reservoir 26
6.2.2 Auslösemechanismus 27
6.2.3 Korpus 28
6.2.4 Module zum Auslösen 28
6.2.4.1 Mechanischer Auslöser 29
6.2.4.2 Elektronischer Auslöser 29

6.3 Analyse der Daten des Piezosensors zur Einschlagserkennung einer Kugel 31
6.3.1 Einschlagsdetektion durch Zeitversetzte-Schwellwertüberprüfung . 31
6.3.2 Analyse der Power des Signals zur Einschlagserkennung 32
6.3.2.1 Testergebnisse 37
6.3.3 Frequenzanalyse zur Einschlagserkennung 38
6.3.4 Analyse des Ergebnisses: 39
6.4 Systemintegration 40

Literaturverzeichnis **44**

Anhang **44**

1 Motivation und Hintergrund der Arbeiten

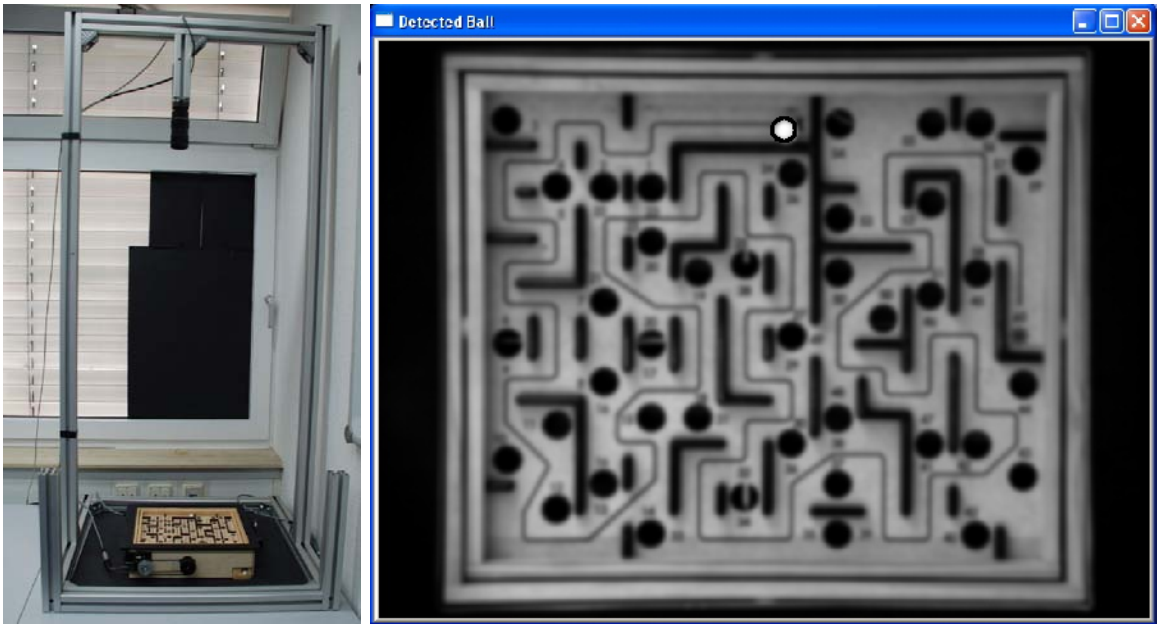


Abbildung 1.1: Versuchsaufbau des BRIO-Systems mit Servomotoren, Videoaufzeichnung und Kugeldetektion

Dieses Bachelorprojekt ist ein Teil des DFKI internen BRIO2 Projektes. Bei dem BRIO2 Projekt handelt es sich um ein Projekt, dass sich mit Fragestellungen aus den Bereichen Neurowissenschaften und Reinforcement Learning beschäftigt. Innerhalb des vorangegangenen BRIO-Projektes wurde ein BRIO-Labyrinth dahingehend umgebaut, das es möglich ist dieses mit Hilfe von Servomotoren zu steuern. Diese Servomotoren werden über eine RS485-Verbindung von einem PC angesteuert. Des Weiteren verfügt das BRIO-Labyrinth über vier Endschalter, die für beide Ebenen als Anschlag für beide Richtungen dienen, zwei Potentiometer, welche die absolute Neigung der Spielfläche auf den beiden Achsen messen, und einen Piezosensor, der im Boden des Spiels integriert ist. Der Piezosensor soll später dazu benutzt werden, das Durchfallen einer Kugel zu detektieren. Des Weiteren ist in das BRIO Spiel noch eine LED eingebaut. Sie ist in den Rand des Spiels eingelassen und zeigt nach oben. Über dem Spiel ist eine Kamera angebracht (Siehe Abbildung 1.1). Über diese Kamera wird das Spielverhalten einer Testperson und das Signal der LED als Video aufgezeichnet. Weiterhin wird mit der Kamera eine Kugeldetektion durchgeführt. Damit kann Kugelgeschwindigkeit und Position bestimmt werden.
Mit Hilfe der LED-Signale im Video können später Video-, EEG- und Sensordaten synchronisiert werden. Die Endschalter, die LED, die Potentiometer sowie der Piezosensor

sind mit einem National Instruments AD-Wandlers und der dazugehörigen PCI-Karte mit dem PC verbunden. Die Kamera ist über Ethernet an den steuernden Rechner angeschlossen.
Im Rahmen des BRIO-Projektes wurde bereits eine Softwareumgebung geschrieben, die es ermöglicht die Sensorwerte auszulesen und weiter zu verarbeiten, sowie die Servomotoren anzusteuern. Diese Software ist in Python geschrieben und ist Objektorientiert aufgebaut. Zeitkritische Teile der Steuerung sowie das Loggen des Spielzustands (Ballposition, Potentiometerwerte, Endschalter etc.) laufen in eigenen Threads.

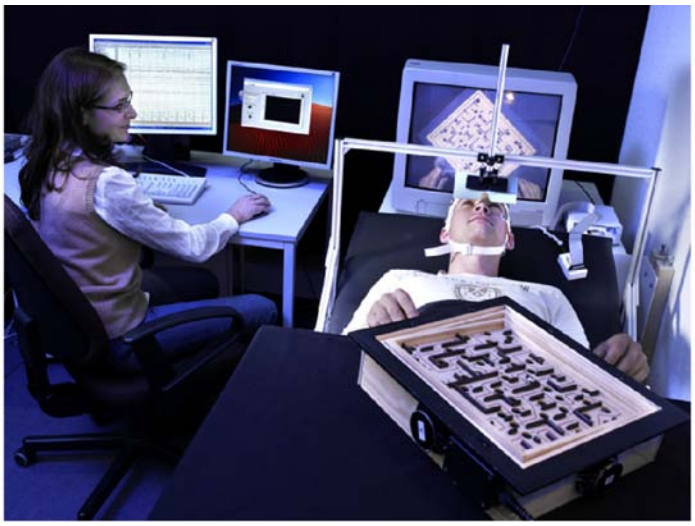


Abbildung 1.2: Brio System Versuchsaufbau mit EEG-Datenerfassung

Im BRIO2-Projekt wird das umgebaute Labyrinth für EEG Untersuchungen genutzt. Während ein Proband das Brio-Labyrinth spielt, werden EEG Aufnahmen am Probanden durchgeführt (Siehe Abbildung 1.2) und später analysiert. Es sollen hiermit Erkenntnisse über das Lernverhalten von Menschen gewonnen werden. Weiterhin soll das Labyrinth genutzt werden um Lernalgorithmen aus der KI zu testen. Zum einen sollen in einer BRIO-Simulation gelernte Bewegungen auf das reale System übertragen werden, zum anderen sollen Lernalgorithmen direkt mit dem realen Labyrinth lernen, dieses fehlerfrei zu durchqueren.

2 Zieldefinition

- Implementieren einer Ansteuerung mit Joystick. (AP1, Seite 5)
- Implementieren eines Zentrieralgorithmusses. (AP2, Seite 11)
- Entwurf und Integration eins Ballmagazins. (AP3, Seite 22)
- Analyse der Daten des Piezosensors zur Verbesserung der Einschlagserkennung und Ansteuerung des Ballmagazins. (AP3, Seite 31)

Im AP1 soll ermöglicht werden, dass das BRIO Labyrinth mit einem Joystick gespielt werden kann. Hierzu steht ein analoger 3-Achsen Joystick mit zehn Knöpfen (Logitech Freedom 2.4 cordless) zur Verfügung. Die Bewegung der Joystickachsen soll auf die Bewegung der Spielfläche übertragen werden. Dazu müssen die Werte unterschiedlich skaliert werden: Bei der parallelen Ansteuerung enspricht die X-Achse des Joysticks der X-Achse der Spielfläche. Bei der diagonalen Ansteuerung des Spiels sollen die Koordinaten des Joysticks um 45° gedreht auf die Achsen des Spiels übertragen werden.

Die Aufgaben in AP2 sollen gewährleisten, dass wenn das Spiel mit Joystick gespielt wird, die Spielfläche immer waagerecht ausgerichtet ist. Vor Spielbeginn soll durch einen automatisch ablaufenden Mechanismus die Mittelposition der Spielfläche bestimmt und als Ausgangslage genommen werden.

Im AP3 soll ein Ballmagazin entwickelt werden. Mit dem Ballmagazin wird es dann möglich sein, das Spiel Mehrere Male nacheinander unterbrechungsfrei zu spielen. Das führt einerseits dazu, dass sich ein Proband mehr auf das Spiel konzentrieren kann und weniger durch äußere Faktoren abgelenkt wird, andererseits, dass ein virtueller Agent mehrmals spielen kann. Zur Detektion, ob eine neue Kugel benötigt wird, steht ein Piezosensor zur verfügung. Es soll Analysiert werden, ob es möglich ist, das Durchfallen einer Kugel beispielsweise von dem Anschlagen einer Ebene an einen Endschalter in den Piezosensorwerten zu unterscheiden.

3 Zusammenfassung

Es wurde ein Interface für das Brio-System entwickelt, welches die Ansteuerung des Labyrinths über einen Joystick ermöglicht. Die Ansteuerung kann in zwei unterschiedlichen Modi erfolgen: Parallele Ansteuerung und diagonale Ansteuerung. Der Modus zur diagonalen Ansteuerung kommt geübten Brio-Spielern entgegen, da sie bei Spielen mit dem Joystick ihren Blickwinkel auf das Spielbrett nicht ändern müssen.

Weiterhin wurde ein Zentrieralgorithmus implementiert, der die Spielfläche über die in den Rahmen integrierten Endschalter waagerecht ausrichtet. Im Rahmen der Entwicklung des Algorithmus ergab eine Analyse verschiedener Spielverhalten, dass die Integration eines Lagesensors unter die Spielfläche des Labyrinths nicht nötig ist. Über die Messwerte des Lagesensors wäre es über eine Lageregelung möglich gewesen, die Spielfläche absolut waagerecht auszurichten. Die Integration des Sensors kann jedoch für spätere Szenarios, in denen das Spiel von einem Agenten gesteuert wird, erforderlich sein.

Es wurde ein Kugelmagazin kunstruiert und gebaut, welches eine Kugel auf der Starposition des Labyrinhts positionieren kann. Die Positionierung kann automatisch, über einen elektronischen Auslöser, oder manuell, über einen mechanischen Auslöser, geschehen. Das Magazin ist modular gestaltet, so dass es für verschiedene Experimente genutzt werden kann. Mit dem Magazin ist es möglich, verschiedene Kugeln zu verwenden. Es werden sowohl Stahlkugeln ($ø12,7mm$) als auch Keramikkugeln ($ø12mm$) unterstützt.

Zur Kugeleinschlagsdetektion ist in die Bodenplatte des Brio-Labyrinths ein Piezosensor integriert. In einer Analyse des Signals bei Spielbedingungen wurden verschiedene Verfahren zur Verbesserung der Einschlagserkennung getestet. Die Analyse der Ergebnisse hat gezeigt, dass es unter den derzeitigen Bedingungen nicht möglich ist, einen Einschlag mit absoluter Sicherheit zu erkennen. Es wurde ein Verfahren entwickelt, dass sich besser an verschiedene Umgebungen anpassen lässt. Zusätzlich ist dieses Verfahren etwas zuverlässiger bei der Einschlagserkennung als das schon im Software-Framework bestehende Verfahren aus dem Vorläuferprojekt BRIO1.

4 Integration des Joysticks und dessen Skalierung

Bisher war die Ansteuerung der Servomotoren nur aus einem Programm heraus mit festen Werten möglich. Jetzt sollen in Echtzeit die Werte eines Eingabegerätes verarbeitet werden. Die bereits vorhandene Software Umgebung des Brio-Labyrinthes wurde so erweitert, dass sie auch Joystickeingaben als Steuerwerte für die Servomotoren verarbeiten kann. Dazu wurde eine neue Klasse *Joystick_ Control* implementiert. Diese Klasse bildet das Interface zum Joystick und stellt dessen aktuellen Werte bereit. Um die Werte zu lesen, kann sich jede andere Klasse ein Objekt von *Joystick_ Control* erzeugen und auf die implementierten Funktionen zugreifen. In der eigentlichen Klasse *Joystick_ Control* werden die Werte vom Joystick in Steuerungssignale für die Motoren übersetzt. Diese Werte werden noch nicht auf die Motoren übertragen sondern nur als Wert zurückgegeben. Über die Auswahl zweier verschiedener Modi (Siehe Abbildung 4.1) ist es möglich, die Achsen des Joysticks exakt auf die Achsen des Spiels zu übertragen oder die Joystickachsen diagonal auf die Spielachsen abzubilden. Diese Drehung um 45° kann für geübte BRIO-Spieler wichtig sein: Im Handbetrieb wird das Spiel in dieser Position gespielt, da man dabei bequem mit beiden Händen an die Drehknöpfe herankommt.

Abbildung 4.1: Links: um 45° gedrehte Ansteuerung, rechts: normale Ansteuerung

Nach der Initialisierung läuft das Programm dann als Thread weiter, um unabhängig von anderen Operationen zu sein. Dies ist vor allem deswegen nötig, da die Ansteuerung mit dem Joystick in Echtzeit erfolgen muss.

4.1 Integration des Joysticks

Nach einiger Recherche zum Thema Python und Joystickansteuerung ergab sich, dass es am einfachsten ist, für unsere Aufgabe das Pythonmodul PYGAME [2] zu verwenden. Bei diesem Modul handelt es sich um Freeware, welche meistens zur Programmierung

kleinerer Spiele genutzt wird. Da es sich bei einem Joystick um ein klassisches Spieleingabegerät handelt, verfügt PYGAME auch über eine Joystick Bibliothek [3].
Mit dieser Bibliothek wird ein Joystick Handle erzeug, hierbei werden an den Computer angeschlossenen Joysticks automatisch erkannt und erhalten fortlaufende Adressen, beginnend bei 0. Im Normalfall wird nur ein Joystick zurzeit an den Computer angeschlossen, daher wird standardmäßig mit der Adresse 0 gearbeitet.
Das erzeugte Handle besitzt mehrere Funktionen, von denen werden vornämlich zwei benutzt: Die Funktion $get_axis(achse)$ dient zum Auslesen der Joystickauslenkung und $get_button(knopf)$ zum Auslesen des Zustandes eines Knopfes des Joysticks. Als Übergabewert erwarten beide Funktionen einen Integerwert. Ähnlich wie bei der Joystickadresse handelt es sich bei diesem Wert auch um eine joystickinterne Adresse. Diese Adresse gibt an, welche Achse bzw. welcher Knopf des Joysticks ausgelesen werden soll.

- Die Funktion $get_axis(achse)$ liefert Fließkomawerte zurück. Der Wertebereich liegt zwischen -1 und 1, die Auflösung beträgt sechs Stellen hinter dem Komma. Wenn der Joystick kalibriert ist repräsentiert der Rückgabewert 0 die Mittelsstellung des Joysticks. Negative Werte für die X-Achse entsprechen einer Auslenkung des Joysticks in negative X-Richtung im karthesischesn Koordinatensystem. Analog verhält es sich mit positiven Werten.

- Die Funktion $get_button(knopf)$ liefert integer/boolean Werte zurück. Es können die Werte 0 und 1 angenommen werden. Hierbei entspricht 1 dem Zustand Knopf gedrückt und 0 Knopf nicht gedrückt.

Bei der Initialisierung von PYGAME wird automatisch ein Handle auf alle angeschlossenen Joysticks erstellt. Dieses Handle stellt alle beschriebenen Funktionen bereit. Das Auslesen und die Weiterverarbeitung der Joystickwerte erfolgt in einer Schleife. In dieser Schleife werden laufend alle Joystickwerte ausgelesen skaliert und weiterverarbeitet. Diese Schleife hat ein Flag als Abbruchkriterium und wird durch den Aufruf der *stop()* Funktion aus dem Hauptprogramm heraus abgebrochen.

4.2 Skalierung der Werte

Im Rahmen dieses Arbeitspaketes wurden die Ausgelesenen Joystickwerte so aufgearbeitet, dass es nun möglich ist diese zur Ansteuerung des Brio-Labyrinthes zu nutzen.

Es gibt zwei Verfahren die Werte zu skalieren. Das erste Verfahren bildet die Joystickachsen direkt auf die Spielachsen ab. Diese Art der Ansteuerung ist die parallele Ansteuerung.
Das zweite Verfahren dreht die Joystickachsen um 45° und bildet sie dann auf die Spielachsen ab. Diese Art der Ansteuerung ist die diagonale Ansteuerung.

4.2.1 Parallele Ansteuerung:

Bei der parallelen Ansteuerung wird je eine Joystickachse auf eine Labyrinthachse abgebildet. Der Wertebereich einer Joystickachse liegt zwischen -1 und 1. Die Joystickrohwerte werden als Fliesskommazahlen Zahlen mit einer Genauigkeit von sechs Stellen hinter dem Komma zurückgeliefert. Der Arbeitsbereich des Servomotors umfasst 300°, die in 1024 Schritte unterteilt sind. Damit ergibt sich für den Servomotor eine Auflösung von 0,293° pro Schritt.
Wir haben es uns zu Nutze gemacht, dass der Ausschlag jeder Fläche von der waagerechten Position in jede Richtung symmetrisch ist. Mit Hilfe eines Zentrieralgorithmus wird vor Begin eines Spieldurchgangs die Labyrinthfläche waagerecht ausgerichtet. Dieser Zentrieralgorithmus liefert des Weiteren vier Werte zurück. Für jede Achse wird die Servomotorposition für die Mittelstellung zurückgeliefert. Zusätzlich wird noch der Wert von dieser Position bis zum maximalen Ausschlag der Ebene in eine Richtung angegeben.
Die Skalierung wird im Folgenden am Beispiel einer Ebene unter der Annahme erklärt, dass sich die Servomotorposition für die Mittelstellung bei 512 befindet und der Vollausschlag der Ebene in jede Richtung ca. 8° beträgt.
Von der Mittelposition kann die Ebene maximal um 28 Positionen nach links bzw. nach rechts gedreht werden. Dies entspricht den Positionen 484 und 540, der Bewegungsraum ist also symmetrisch genau wie der Wertebereich des Joysticks.
Um die Nullpositionen beider Systeme übereinander zu bringen, wird zu dem Joystickwert 512 dazu addiert. Somit liefert der Joystick in der Mittelstellung den Wert 512 zurück, welcher die Servomotorposition für die Mittelstellung der Spielfläche repräsentiert.
Zu diesem Wert wird dann noch das gerundete Produkt aus Joystickrohwert und 28 dazuaddiert. Die Skalierungsformel sieht also wie folgt aus:

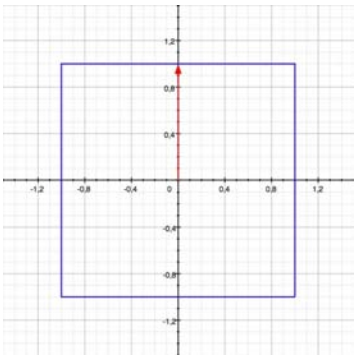
$$Servomotorstellwert = 512 + |Joystickrohwert * 28| \tag{4.1}$$

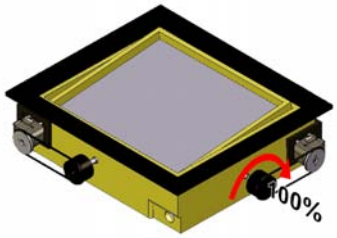
Die in dem Beispiel verwendeten Werte für die Mittelposition und dem maximalen Ausschlag werden in dem realen System durch die von dem Zentrieralgorithmus bestimmten Werte ersetzt.

4.2.2 Diagonale Ansteuerung:

Wenn ein Proband das Brio-Labyrinth von Hand spielt, steht es normalerweise diagonal vor ihm. Das ist komfortabler da die Position der beiden Drehgriffe des Labyrinths sich so am ehesten der Ergonomie des menschlichen Körpers anpasst. Da das Labyrinth für Vergleichsstudien der Hirnaktivitäten eines Probanden bei Hand- bzw. Joystickbetrieb genutzt werden soll, ist es sehr wichtig, dass die zwei Szenarien sich möglichst wenig voneinander unterscheiden. Daher ist es nötig die Joystickrohwerte um 45° zu drehen, damit das Labyrinth auch mit dem Joystick diagonal gespielt werden kann.

Bei den Joystickrohwerten handelt es sich um kartesische Koordinaten. Der Wertebereich beschreibt ein Quadrat mit der Kantenlänge 2 dessen Mittelpunkt sich im Ursprung des Koordinatensystems befindet. Jede Achse hat einen Wertebereich von -1 bis 1.





Da es sich um kartesische Koordinaten handelt, wurde die Punktrotation für den kartesischen 2D-Raum benutzt. Bei dieser Rotation wird ein Punkt, ein Wertepaar bestehend aus den Rohdaten der zwei Joystickachsen, um einen bestimmten Winkel gedreht. Dabei verändert sich der Abstand zu dem Ursprung nicht.
Die Rotation ergibt sich aus den folgenden Formeln:

$$\varphi = 45° \tag{4.2}$$

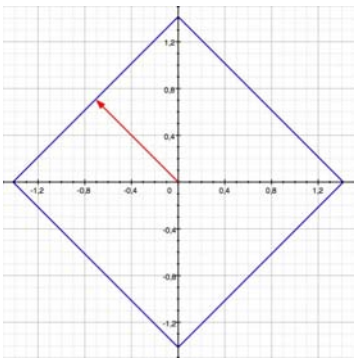
$$x' = x * cos(\varphi) - y * sin(\varphi) \tag{4.3}$$

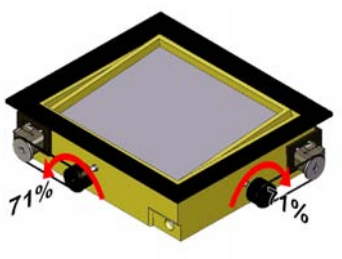
$$y' = x * sin(\varphi) + y * cos(\varphi) \tag{4.4}$$

Dabei stellen x' und y' die rotierten Werte, x und y die Ausgangswerte dar. φ ist der Winkel um den gedreht wird.

Mit dieser Methode wurden die Joystickrohwerte um 45° gegen den Uhrzeigersinn (positive Winkelrichtung) gedreht.

Nach der Rotation erhält man die gedrehten Werte des Joysticks. Trägt man alle möglichen Wertepaare in ein Koordinatensystem ein erhält man eine auf der Spitze stehende Raute. Die Eckpunkte liegen bei $(\sqrt{2}, 0)$, $(0, \sqrt{2})$, $(-\sqrt{2}, 0)$ und $(0, -\sqrt{2})$.

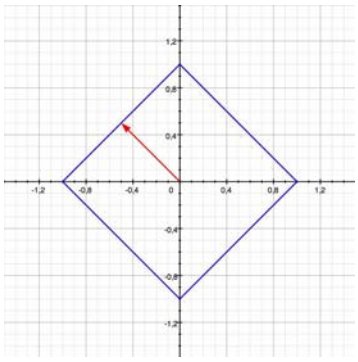


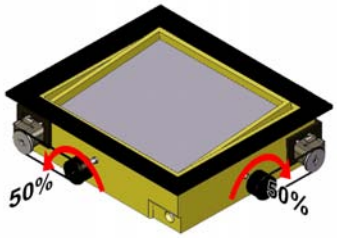


Die Drehung der Koordinaten reicht allerdings nicht aus. Die Werte müssen jetzt noch skaliert werden. Jetzt liegen die Joystickrohwerte bereits um 45° gedreht vor. Durch die Rotation bewegen sich die Joystickrohwerte der einzelnen Achsen nicht mehr zwischen -1 und 1 sondern zwischen $-\sqrt{2}$ und $\sqrt{2}$.

Bevor die Joystickrohwerte auf die Servomotorpositionen abgebildet werden, wird der Wertebereich der rotierten Joystickwerte denen der parallele Ansteuerung angenähert. Dafür wurde der Wertebereich von $-\sqrt{2}$ bis $\sqrt{2}$ für jede Achse auf -1 bis 1 skaliert, indem alle Joystickrohwerte durch $\sqrt{(2)}$ geteilt wurden.

Die Werte beschreiben weiterhin eine Raute im Arbeitsbereich. Jetzt ist der gesamte Bereich um den Faktor $\sqrt{2}$ kleiner. Die Eckpunkte liegen nun wieder innerhalb der gewünschten Grenzen. Jedoch besitzt der markierte Vektor nur noch eine Länge von $\frac{1}{\sqrt{2}}$.





In einem ersten Ansatz wurden diese Werte bereits auf die Servomotorpositionen abgebildet. Es war zu erkennen, dass diese Methode prinzipiell funktioniert. Jetzt ergab sich ein weiteres Problem: Die vollständige Auslenkung der einen Joystickachse resul-

tierte wie gewollt in einer vollständigen Auslenkung beider Spielflächenachsen. Die vollständige Auslenkung beider Joystickachsen hingegen resultierte lediglich in einer halben Auslenkung eines Servomotors. Diese Reduktion des Bewegungsraumes ist die Folge der Rotation. Wie oben beschrieben wird zum Beispiel das Koordinatenpaar $(1, 1)$ auf den Punkt $(0,71, 0,71)$ abgebildet. Bei dem ersten Skalierungsschritt (teilen durch $\sqrt{2}$) wird daraus der Punkt $(0,5, 0,5)$. Dies erklärt den verringerten Bewegungsraum.
In dem nächsten Schritt wird das um 45° gedrehte Quadrat so skaliert, dass es wieder einem nicht gedrehten Quadrat ähnelt. Ziel ist es, den Arbeitsbereich so zu vergrößern, dass eine vollständige Auslenkung einer Joystickachse in einer vollständigen Auslenkung der Spielfläche resultiert. Das bedeutet, dass die vier Punkte $(\pm 0,5, \pm 0,5)$ auf die vier Punkte $(\pm 1, \pm 1)$ abgebildet werden sollen. Zur Lösung diese Problems wurde folgende Skalierungsformel verwendet:

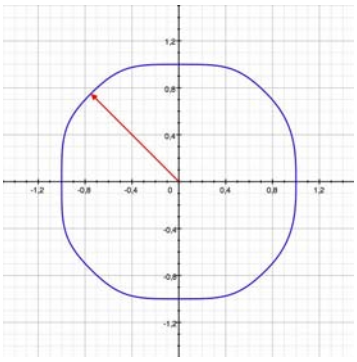
$$x = \begin{cases} x = & x * (1 + |x|) \quad wenn|x| \quad < \quad 0.5 \\ x = & x * (2 - |x|) \quad wenn|x| \quad \geq \quad 0.5 \end{cases} \tag{4.5}$$

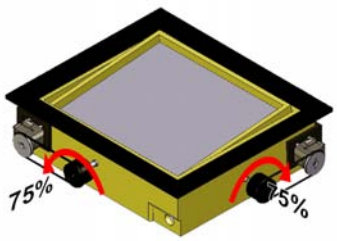
Analog dazu:

$$y = \begin{cases} y = & y * (1 + |y|) \quad wenn|y| \quad < \quad 0.5 \\ y = & y * (2 - |y|) \quad wenn|y| \quad \geq \quad 0.5 \end{cases} \tag{4.6}$$

Die so mit den Formeln skalierten Werte wurde dann wie bei der parallelen Ansteuerung verwendet.

Werden die Formeln 4.5 und 4.6 auf die vorhandenen Werte angewendet nähert sich die Form des Arbeitsbereiches wieder eines Quadrats an. In den Bereichen in denen nur eine Joystickachse aktiv ist wird der Arbeitsbereich vergrößert.





Hat die Bewegung einer Joystickachse zuvor Auswirkung auf nur einen Wert des Koordinatenpaares gehabt, so beeinflusst sie jetzt beide Werte. Wenn man den Joystick gerade nach vorne auslenkt, neigt sich die Labyrinthfläche in die vorderste Ecke wenn das Spiel diagonal zum Spieler steht. Vor der Rotation hätte diese Auslenkung des Joysticks lediglich die Y-Achse beeinflusst.

5 Ausrichten des BRIO Labyrinths

5.1 Implementierung des Zentrieralgorithmus

Die verwendeten Servomotoren (Dynamixel DX-117) können 1024 Positionen anfahren zwischen denen jeweils $0,293°$ liegen [1]. Dies entspricht 300°. Von diesen 300° werden nur ca. 16° für die X-Achse und 13° für die Y-Achse benötigt, um eine Fläche des Brio-Labyrinth in beide Richtungen voll auszulenken. Das entspricht ca. 55 Servopositionen. Die Ansteuerung der Servomotoren erfolgt über eine Funktion, der man die absolute Position (0-1023), die der Servomotor anfahren soll, als integerwert übergibt.

5.1.1 Manuelle Kalibrierung

Zuerst wurden von Hand die minimalen und maximalen Werte der Servomotoren bestimmt. Dazu haben wir die Servomotoren in ihre Mittelstellung gebracht und die zwei Ebenen danach Waagerecht ausgerichtet. Mit einem eigens entwickelten Testprogramm wurde die maximale Position in eine Richtung mit dem Servo angefahren. Den so ermittelten Motorstellwert haben wir als maximalen Ausschlag definiert. Das wurde für jeden Motor und für jede Richtung durchgeführt. So haben wir die 4 Positionen erhalten, die zu den 4 Maximalauslenkungen der Spielfläche korrespondieren.
Als Referenz zur Positionierung der Ebene dienen die Potentiometer. Um den Sensorwert besser einschätzen zu können haben wir 300 Messwerte der Potentiometer aufgenommen während keine Bewegung der Spielfläche stattgefunden hat. Wie in Abbildung 5.1 zu sehen ist, sind die Messwerte leicht verrauscht. Die Berechnungen ergaben eine Standardabweichung von 0.0002248937 für die X-Achse, und 0.0002173902 für die Y-Achse des BRIO Labyrinths.

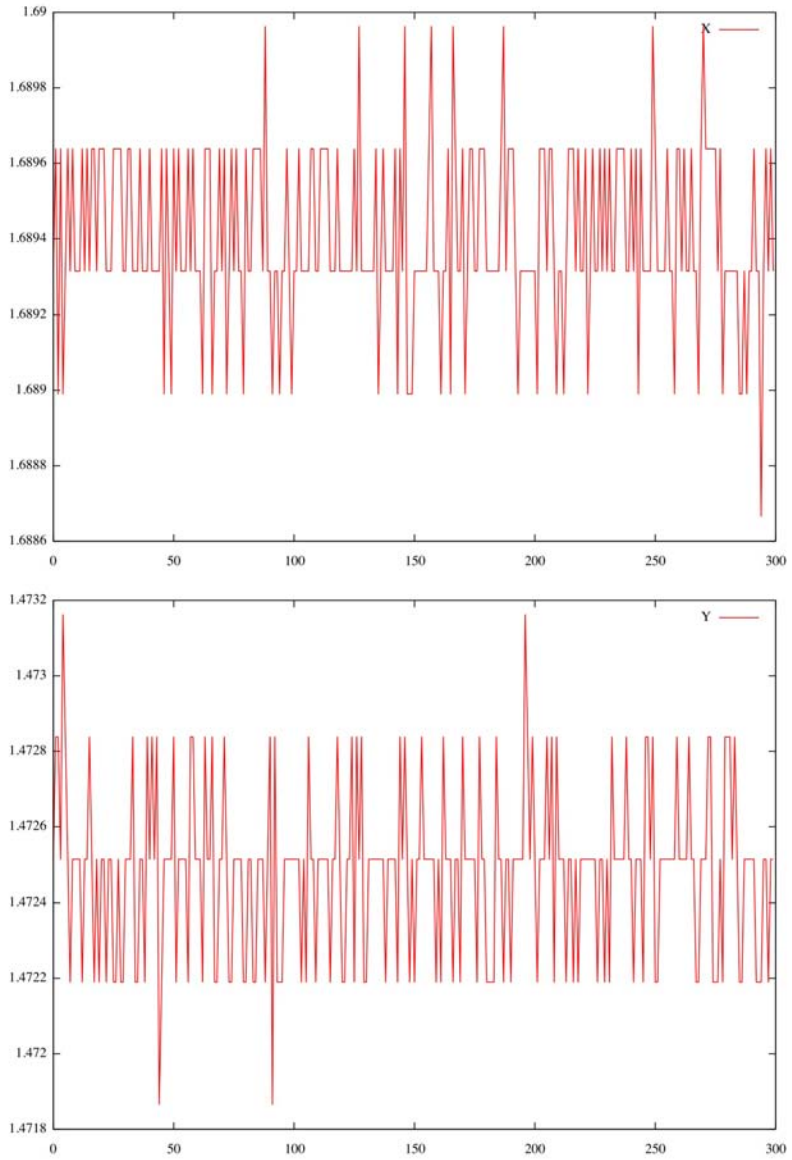


Abbildung 5.1: Rauschen der Messwerte: Links Messwerte für die X-Achse des Spiels, rechts für die Y-Achse. Legende der Plots: **X-Achse:** Anzahl der Messungen, **Y-Achse:** Messwert des Potentiometers in Volt

Aus diesen Werten haben wir die Maximalauslenkung der Servomotoren relativ zu ihrer Mittelstellung bestimmt. Aufgrund der Symmetrie des Brio-Labyrinthes ist die Rotation von der Mittelstellung zum linken bzw. rechten Maximalwert identisch. Diese Werte liegen bei ca. 50 Schritten des Servomotors. Die Servomotorposition für die mittlere Stellung berechnet sich als wie folgt:

$$S1_{mittel} = \frac{S1_{max} + S1_{min}}{2} \tag{5.1}$$

$$S2_{mittel} = \frac{S2_{max} + S2_{min}}{2} \tag{5.2}$$

5.1.2 Automatische Kalibrierung

Im zweiten Ansatz wurde die Kalibrierung automatisiert. Aus diesem Grund wurde eine Zentrierroutine geschrieben, die die jeweiligen minimalen und maximalen Werte ermittelt. Diese Werte werden zur Ausrichtung der Spielfläche und zur Skalierung des Joysticks verwendet.
Das Brio-Labyrinth verfügt über vier Endschalter. Jeder dieser Schalter signalisiert das Erreichen der maximalen Auslenkung einer Achse in eine Richtung. Zu Beginn werden die beiden Servos in ihre Mittelposition (512, 512) gefahren. Im Folgenden wird der Servomotor mit Schritten von einer Position in um eine Achse gedreht, bis der entsprechende Endschalter ausgelöst wird. Nach dem Auslösen des Endschalters wird die Position des Servomotors zu dieser Auslenkung gespeichert. Dieses Verfahren wird analog für die andere Richtung angewendet. Die so ermittelten Werte repräsentieren die minimale und maximale Servomotorposition. Damit die Endschalter während des Spielens nicht auslösen wird der Aktionsraum des Servos auf jeder Seite um 5 Servomotorpositionen verringert. Die Mittelstellung ergibt sich aus dem arithmetischen Mittelwert der zwei ermittelten Positionen. Siehe Formeln 3.1 und 3.2. Diese Methode wird analog für den zweiten Servo angewendet.
Mit den so ermittelten Werten wird die Spielfläche waagerecht ausgerichtet. Wie in Kapitel 2.2.2 beschrieben werden für die Skalierung des Joysticks die Mittelstellung und die maximale Auslenkung relativ zur Mittelstellung in eine Richtung benötigt. Diese Werte werden dem Joystick-Objekt von dem Zentrieralgorithmus bereitgestellt. Dann beginnt der eigentliche Spielvorgang.

5.2 Test

Nach der Fertigstellung des Zentrieralgorithmus haben wir ihn einer Reihe von Tests unterzogen.

5.2.1 Funktion der Kalibrierung

Der erste Test sollte zeigen, ob der Algorithmus prinzipiell funktioniert. Hierzu wurden die Gummiriemen, die die Servomotoren mit den Drehgriffen des Brio-Labyrinths verbinden entfernt und zunächst beide Servomotoren auf ihre Mittelstellung (512) gefahren. Danach haben wir die Ebene leicht außerhalb ihrer waagerechten Position ausgerichtet und die Gummiriemen wieder montiert. Im diesem Test näherten wir uns den vier Endschaltern mit einer Geschwindigkeit von einem Servomotorschritt an. Der Test ergab, dass diese Geschwindigkeit bei drei der vier Endschalter funktioniert. Bei dem vierten Endschalter trat das Problem auf, dass die Rückstellfeder des Schalters stärker als die Sicherheitsfeder [1] des Brio-Labyrinths ist. Dadurch dehnt sich die Sicherheitsfeder bis zu einem gewissen Grad und erst dann wird der der Endschalter ausgelöst. Das hat zur Folge, dass sich der Servomotor in Richtung dieses Endschalters weiter dreht als er sollte. Dadurch wird ein falscher Wert zur Berechnung der Mittelstellung genutzt. Nach der Ausrichtung ist die Ebene in Richtung dieses Endschalters geneigt.
Um dieses Problem zu beheben haben wir die Geschwindigkeit systematisch der Servomotoren erhöht. Es stellte sich heraus, dass ab einer Geschwindigkeit von 5 Servomotorpositionen pro Schritt der Endschalter zum richtigen Zeitpunkt auslöst.
Das Erhöhen der Anfahrgeschwindigkeit ergab wiederum einen Nachteil: Die Auflösung der ermittelten Position für den vierten Schalter war nun geringer und konnte im schlimmsten Fall einen Fehler von 5 Servomotorschritten aufweisen, was einem Offset von 1,6° entspricht.
Dieses Problem wurde durch einen Austausch der aktuellen Feder durch einen O-Ring gelöst. Damit war gegeben, dass der Endschalter zuerst auslöst, bevor sich die Feder bzw. der O-Ring am dem Faden spannt.
Jetzt konnten wieder alle Endschalter mit einer Geschwindigkeit von einem Servomotorschritt angefahren werden. Damit stehen für die Berechnung der Mittelposition Werte in der höchsten zu erreichenden Auflösung zur Verfügung.

[1] Die Ebenen des Brio-Labyrinths sind durch Fäden mit den Achsen verbunden. Diese Fäden übertragen die Rotation der Achsen auf die Fläche. Um ein Überdrehen des Spiels zu vermeiden, bzw. ihm entgegen zu wirken ist je eine Feder pro Faden installiert. Wird die Spielfläche weiter als eine Maximalposition ausgelenkt verhindert dei Feder das Reissen des Fadens indem sie das Überdrehen durch Dehnung kompensiert.

5.2.2 Reproduzierbarkeit der Kalibrierung

Nachdem der Algorithmus optimiert wurde haben wir untersucht, ob der Algorithmus deterministisch ist. Hierzu haben wir die Ebene zentriert und danach den Algorithmus 100 mal ausgeführt. Nach den 100 Durchläufen war die Ebene noch immer zentriert. Der Algorithmus ist also robust genug, um auch eine bereits zentrierte Ebene zuverlässig waagerecht auszurichten.
Die berechnete Standardabweichung an der Mittelposition der Ebene war mit 0.0047982 für die X-Achse und 0.0044073 für die Y-Achse etwas höher als die Standardabweichung des Rauschens des Signals (Siehe Seite 11). In Abbildung 5.2 sind 300 Messwerte für die, durch die Kalbrierung angefahrene, Mittelposition aufgetragen. Der Zentrieralgorihmus wurde dafür 300 mal nacheinander ausgeführt.

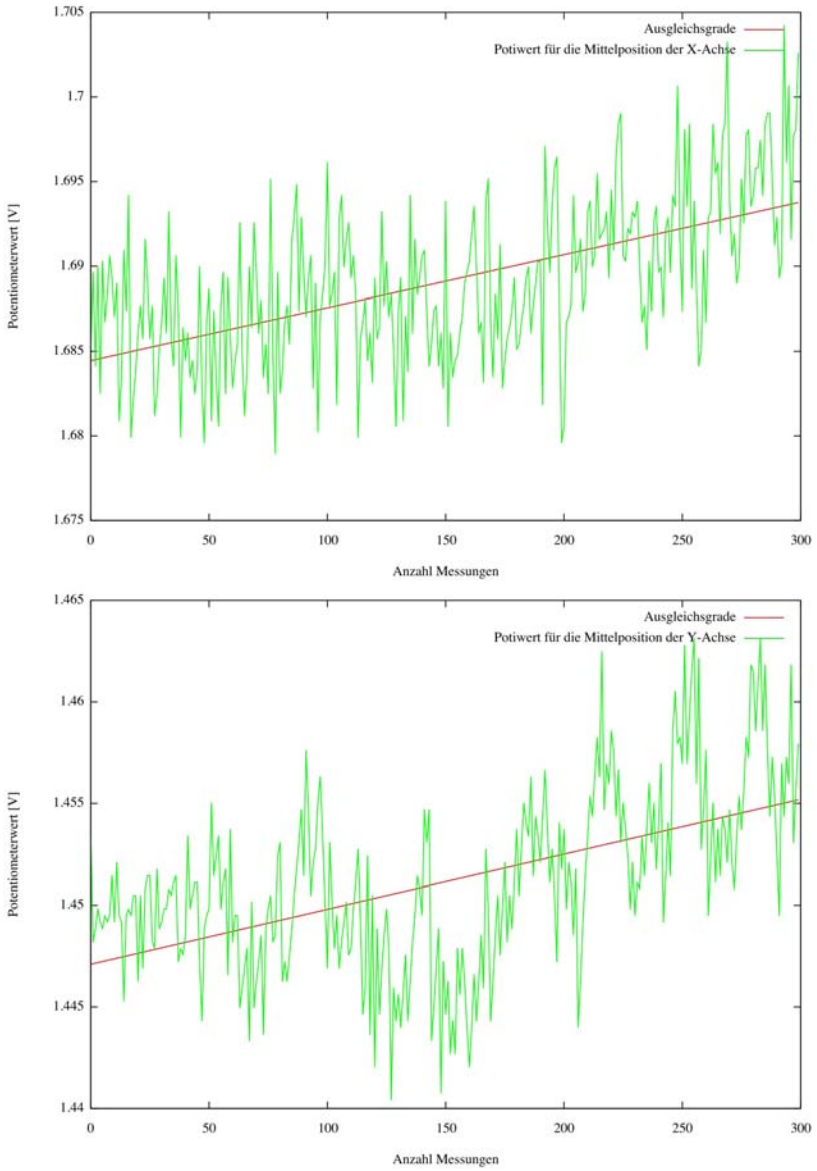


Abbildung 5.2: Rauschen und Drift der Mittelposition der Potentiometerwerte

In Abbildung 5.2 ist zu erkennen, dass die Mittelposition, mit zunehmender Anzahl nacheinander ausgeführter Messungen, in eine Richtung driftet. Das Rauschen des Signals ist etwas höher als beim Stillstand der Potentiometer. Allerdings ist hier anzumerken, dass die Mittelstellung auf der X-Achse lediglich in einem Bereich von $1,5\%$ des gesamten Bewegungsraums der X-Achse schwankt. Bei der Y-Achse beträgt dieser Wert $1,6\%$.

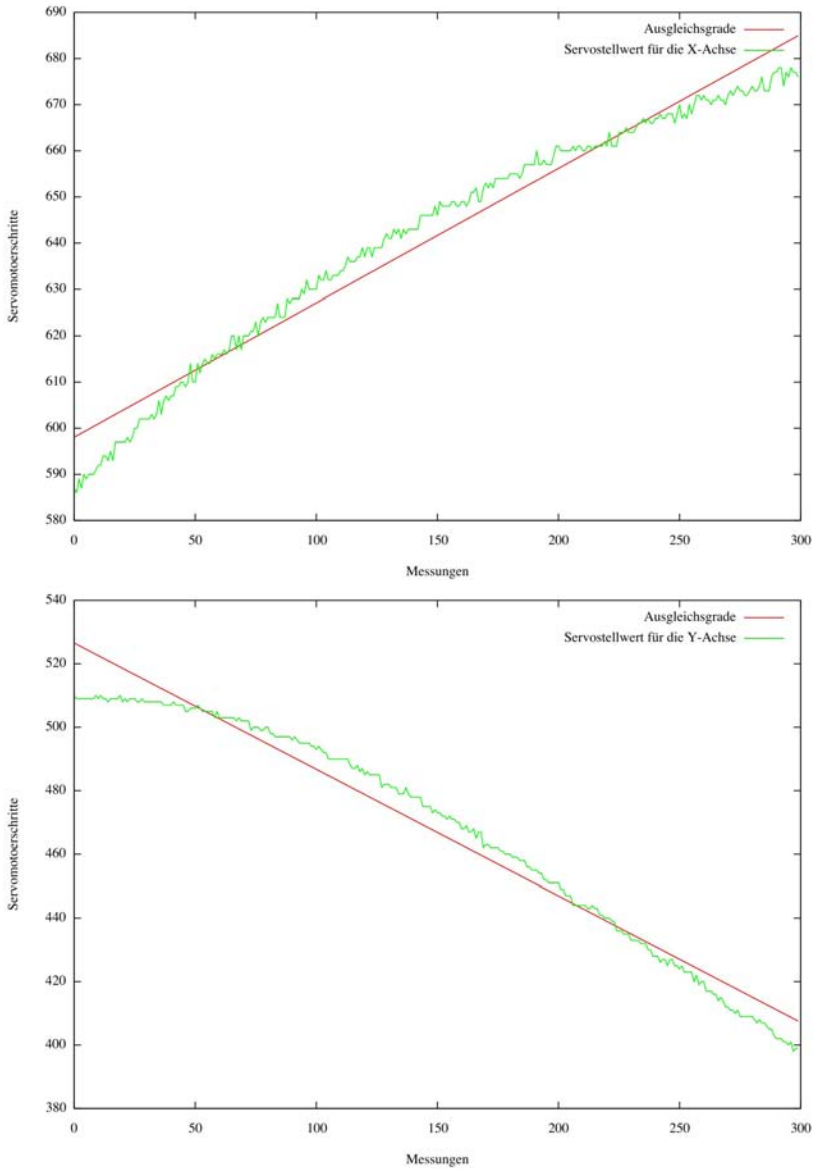


Abbildung 5.3: Rauschen und Drift der Mittelposition der Servomotoren

In Abbildung 5.3 ist zu erkennen, wie stark die Mittelposition, gemessen in Servomotorschritten, driftet. Der Zentrieralgorithmus wurde in diesem Test 300 mal nacheinander ausgeführt. Dieser Drift ist damit zu erklären, dass der Gummiriemen zum Antrieb der Achsen beim Auslösen eines Schalters leicht verrutscht.
Die Funktion der Kalibrierung lässt sich an diesem Beispiel gut erkennen. Vergleicht man den Drift der Servomotorposition (Abbildung 5.3) mit dem Drift der Mittelstellung der Potentiometerposition (Abbildung 5.2), stellt man fest, dass der Einfluss des Drifts der Servos minimal ist.

5.2.3 Fehlertoleranz der Kalibrierung

Als Letztes haben wir gestestet wie sich der Algorithmus bei verschiedenen Ausgangslagen der Ebene verhält. Hierzu haben wir die Servomotoren in ihre Mittelstellungen (512) gefahren und danach die Ebene willkürlich ausgerichtet. Bei jeder Startkonfiguration war der Algorithmus in der Lage die Labyrinthebene waagerecht auszurichten. Nach dem Anfahren der Mittelposition aus verschiedenen Positionen befand sich die Spielfläche mit einer Unsicherheit von $\pm 0.3°$ in der Waagerechten. Diese minimale Schrägstellung der Ebene reicht nicht aus, um die Kugel ins rollen zu bringen. Weiterhin kann diese Auslenkung mit bloßem Auge nicht wahrgenommen werden.

5.3 Lagesensoren

In einer theoretischen und praktischen Untersuchung sollte ermittelt werden, ob der Einsatz eines Lagesensors zum Ausrichten der Spielfläche erforderlich ist. Mit den Daten eines Lagesensors kann man die Spielfläche absolut waagerecht im Raum ausrichten. Dafür muss der Sensor unter der Spielfläche angebracht werden und in das Gesamtsystem integriert werden. Mit dem Sensor ist es möglich auch während eines Spielvorgangs die Mittelstellung der Spielfläche in der Waagerechten zu halten. Damit ist der Schlupf, der an den Gummiriemen während einer Bewegung auftritt und zu bleibenden Fehlern in der Mittelstellung führt, kompensiert.
Technisch kann das Problem mittels eines geschlossenen Regelkreises verdeutlicht werden. Ein Regelkreis beschreibt den Zusammenhang zwischen Sollwert, Istwert, Störungen und Steuersignal. Der Sollwert wird vorgegeben. Der Istwert soll möglichst schnell den Sollwert annehmen. Dabei gilt es, alle Störungen, die von Außen auf den Istwert einwirken, zu kompensieren. Die Differenz zwischen Soll- und Istwert wird durch die Rückkopplung eines gemessenen Istwertes an den Anfang des Regelkreises berechnet. Der Istwert wird dabei vom Sollwert abgezogen und ergibt so einen kleineren Sollwert als Führungsgröße.
Wird so eine Regelung technisch realisiert, übernehmen Proportional-, Differential- und Integral-Glieder die Anpassung des Istwertes an den Sollwert. Diese Glieder verändern das an sie angelegte Steuersignal und reichen es an das zu steuernde Element weiter. Ein Proportionalglied verstärkt sein Eingangssignal um einen konstanten Faktor. Das Differentialglied bildet die Ableitung vom bestehenden Fehler zwischen Soll- und Istwert. Im Integralglied wird der bestehende Fehler integriert und als Ausgangssignal weitergege-

ben.
In dem Fall, dass ein Mensch das Brio-Labyrinth bedient, stellt sich der Signalfluss wie folgt dar: Den Sollwert für eine Position gibt der Spieler vor. Auf den Istwert der Kugelposition wirken während der Umsetzung viele Störfaktoren ein. Über die visuelle Wahrnehmung der Position bekommt der Spieler eine Rückmeldung über seine Aktion und passt den Sollwert dementsprechend an (Abbildung 5.4).

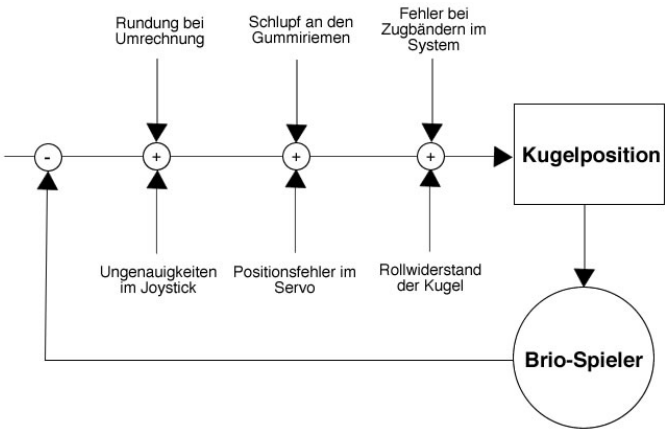


Abbildung 5.4: Regelkreis mit Einfluss des Spielers

Lässt der Spieler den Joystick los, stellt er sich mit Federn automatisch in die Mittelposition. Im Idealfall ist das Spielfeld nun auch exakt waagerecht. Durch die bleibenden Störeinflüsse ist dies aber nicht gegeben. Durch den Einsatz des Lagesensors kompensiert man viele Störgrößen, da die Lage des Spielbretts als Referenz verwendet wird (Abbildung 5.5). Somit kann man eine waagerechte Ausrichtung der Spielfläche in der Ruheposition des Joysticks erreichen.

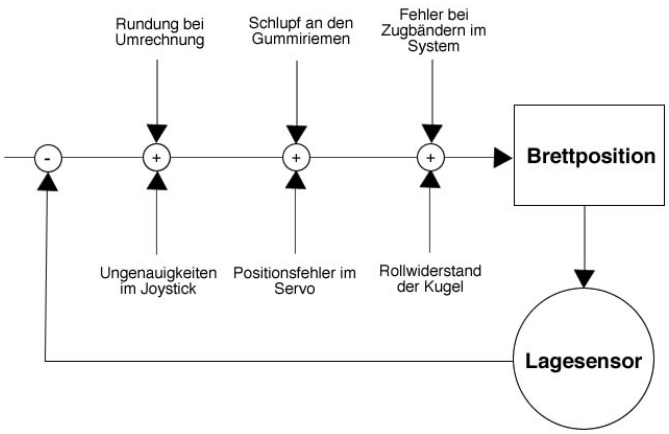


Abbildung 5.5: Ausrichtung des Spielbretts in der Ruheposition

Wird das Spiel von einem Menschen gespielt, abstrahiert er den komplexen Zusammenhang der oben beschriebenen Regelstrecke und denkt, er steuert die Kugel. Somit wird das Regelproblem auf die Zwei Komponenten Joystick und Ball runtergebrochen (Abbildung 5.6). Der Rest der Regelung wird unbewusst vom Spieler ausgeführt.

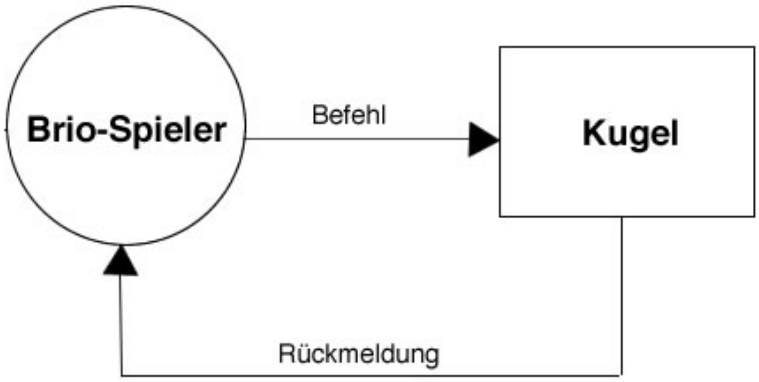


Abbildung 5.6: Abstrahierung des Problem durch aktive Kompensation der Störgrößen durch den Spieler

5.3.1 Zusammenfassung:

Im Vorfeld konnte nicht abgeschätzt werden, wie gut ein Zentrieralgorithmus basierend auf den Endschalterwerten funktioniert. Die Praxis hat gezeigt, das keine absolute

Genauigkeit erforderlich ist. Das ist darauf zurückzuführen, dass der Mensch bei der Steuerung nur relative Bewegungen macht und sich weder an der Nullstellung des Joysticks orientiert noch diese als Ruheposition nutzt. Im Briospiel werden Ruhepositionen erreicht, indem der Ball in eine Ecke bewegt wird und durch einen Vollausschlag der Spielfläche in die entsprechenden Richtungen dort gehalten wird. Aufgrund dieser Erkenntnisse ist es zu diesem Zeitpunkt nicht nötig, einen Lagesensor in das Brio System zu integrieren.
Wird in der Zukunft das Spiel von einem Agenten bzw. einem Lernverfahren gesteuert, kann der Einbau eines solchen Sensor erforderlich sein. Hat der Agent zuvor in der Simulation den Umgang mit einem absolut waagerecht ausgerichteten Spielbrett gelernt, wird es ihm auf dem realen System leichter fallen, wenn er die waagerechte Ausrichtung auch hier vorfindet. Abhängig vom Verfahren, mit dem der Agent in der Simulation gelernt hat, steuert er das Spiel dann u.U. nicht durch relative Änderungen, sondern durch absolute Steuerbefehle, die als Referenz die Mittelposition des Spielbretts haben.

6 Konstruktion und Integration des Ballmagazins

Das Brio Labyrinth wird für EEG/fMRI-Versuche mit Probanden und als Testbed für Lernalgorithmen verwendet. Bei fMRI-Versuche befindet sich der Proband in einer liegenden Position und kann die Spielfläche nur über einen Spiegel betrachten. Daher ist es dem Probanden nur sehr schwer möglich einen verlorenen Ball auf die Startposition zurückzulegen, da er sich in einer ungewohnten Lage befindet und sich nicht ausreichend bewegen kann. Aufgrund dessen sollte ein Ballmagazin mit folgenden Spezifikationen entwickelt werden:

- Kapazität für mindestens 10 Bälle.
- Verwendung von Bällen mit einem Durchmesser von 12mm bis 12,7mm.
- Manuelles Bereitstellen eines Balles.
- Automatisches Bereitstellen eines Balles.
- Konstruktion aus unmagnetischen Materialien.
- Kein Verdecken der Spielfläche.
- Einfaches An- und Abmontieren des Magazins.

6.1 Konzepte

Im Verlauf des Projektes wurden 3 Konzepte entwickelt. Im Folgenden wird jedes Konzept skizziert und erklärt. Ziel ist es, ein realisierbares Konzept zu erhalten, welches allen Anforderungen entspricht.

6.1.1 Konzept 1

Das erste Konzept für das Ballmagazin bestand aus einer senkrecht stehenden Röhre in der bis zu zehn Kugeln übereinander liegen. Mittels eines Kippmechanismus sollte es möglich sein, die unterste Kugel über eine Rinne auf das Spielfeld zu befördern. Alle anderen Kugeln werden blockiert, so dass jeweils eine Kugel herausrollen kann. Wird die Rinne wieder an die Röhre geklappt, fallen die verbleibenden Kugeln nach.

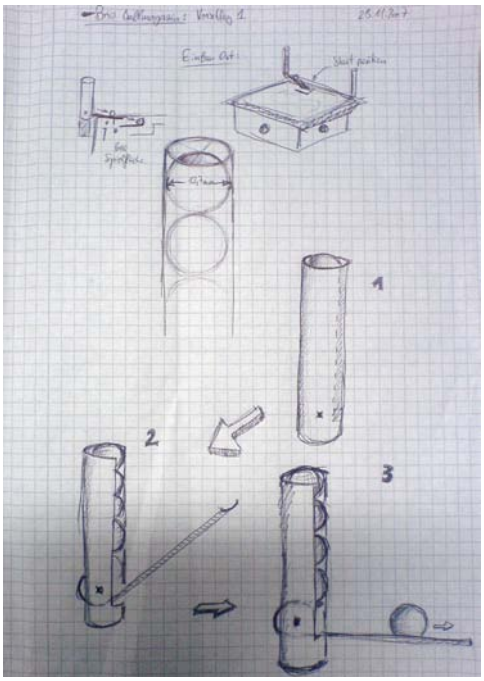


Abbildung 6.1: Erstes Konzept

Diese Konzept wurde verworfen, da es schwierig geworden wäre, eine Kugel manuell auszulösen. Die notwendige Bewegung wäre nur sehr schwer mit einem Druckknopf realisierbar. Über einen Druckknopf hätte eine lineare Bewegung von 1-2cm erzeugt werden können. Für eine Bewegung der Rinne um mehr als 90° wäre eine zu große Übersetzung der Knopfbewegung nötig gewesen. Dadurch wäre der Auslösemachanismus schwer zu bedienen bzw. mit einem hohen Kraftaufwand verbunden und sehr anfällig gegenüber Abnutzung geworden.

6.1.2 Konzept 2

Im zweiten Konzept wurde das Prinzip der senkrecht stehenden Röhre zur Kugelaufbewahrung aufgegriffen. Der Auslösemachanismus wird durch eine schwenkbare Platte, an der eine weitere Röhre befestigt ist, realisiert. Die Platte kann um 90° geschwenkt werden und so zwei Positionen einnehmen. In der ersten Position fällt eine Kugel durch das Loch in der Platte in die untere Röhre, wird da aber noch blockiert. In der zweiten Position werden alle verbleibenden Kugeln von der Platte blockiert, die das Loch in der Platte durch die Drehung nicht mehr unter der ersten Röhre befindet. Die Kugel, die in der ersten Position in die untere Röhre gefallen ist, wird nun freigegeben und rollt auf die Spielfläche.

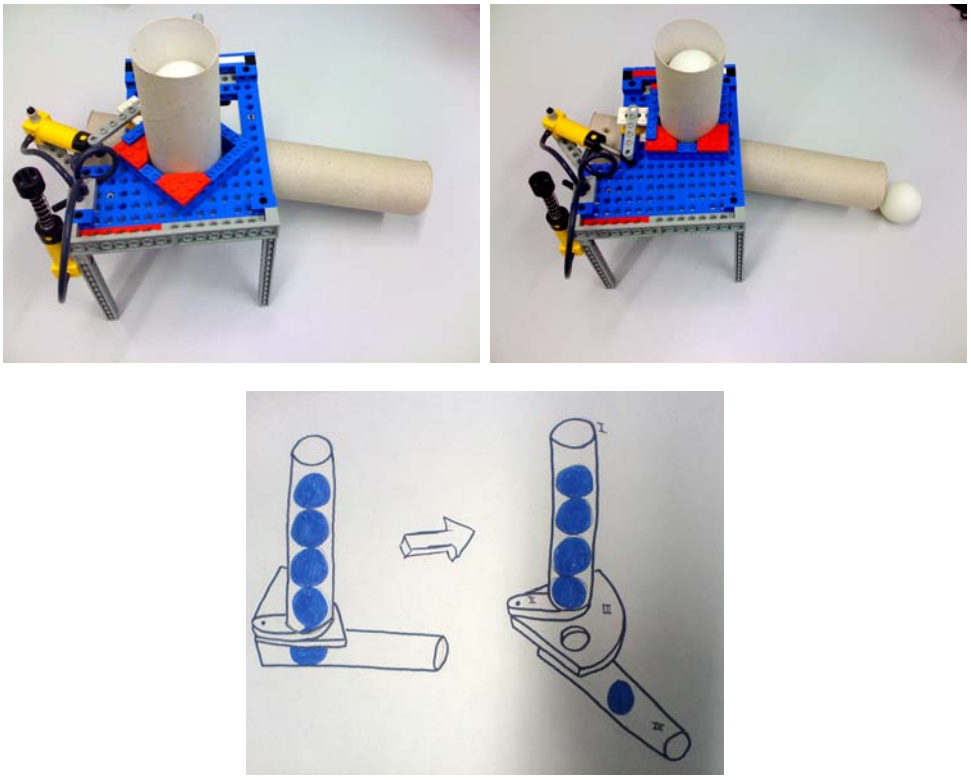


Abbildung 6.2: Testaufbau Zweites Konzept und Skizze

Das Konzept wurde in einem ersten Testaufbau realisiert. Der Testaufbau aus Lego-Technik© demonstrierte die prinzipielle Machbarkeit. Beim Anfertigen der ersten Zeichnungen in Solidworks stellte sich heraus, dass alle Teile und somit der gesamte Aufbau sehr filigran und instabil geworden wäre. Aus diesem Grund wurde auch dieses Konzept verworfen.

6.1.3 Konzept 3

Im dritten Konzept haben wir die Röhre nicht senkrecht gestellt, sondern nur leicht aus der Waagerechten bewegt. Damit können die Kugeln langsam aus der Röhre rollen.
Der Auslösemechanismus basiert auf dem Prinzip einer Wippe. Stifte, die auf jeder Seite der Wippe angebracht sind, können durch zwei Löcher in das Innere der Röhre eindringen und so die Kugeln blockieren. In der ersten Position der Wippe werden alle Kugeln blockiert. In der zweiten Position wird die vorderste Kugel freigegeben und alle verbleibenden blockiert.

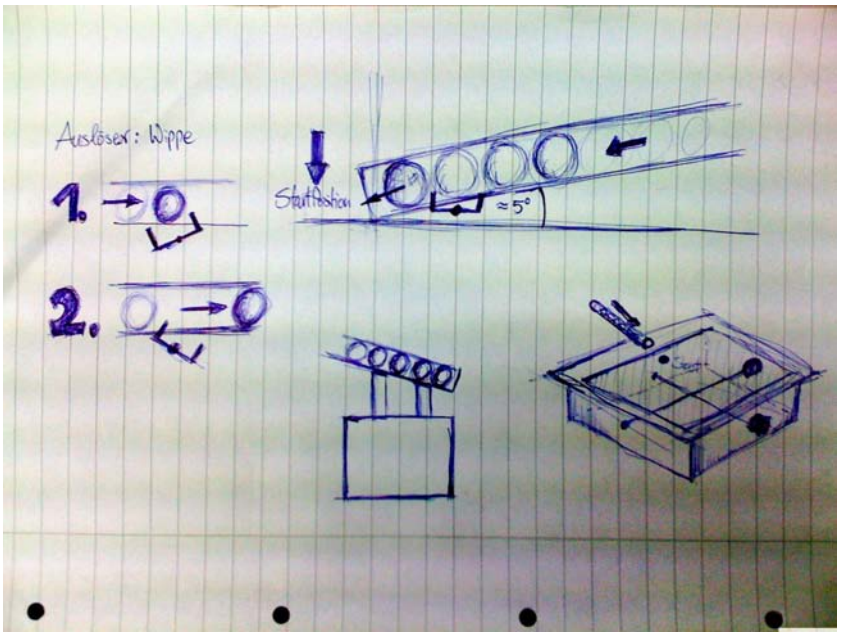


Abbildung 6.3: Drittes Konzept

In einem Testaufbau haben wir die Machbarkeit des Konzepts überprüft. Dabei befestigten wir eine Röhre direkt neben der Startposition des Brio-Labyrinths. Die Öffnung der Röhre war so ausgerichtet, dass eine Kugel aus der Röhre direkt auf die Startposition rollen kann. Da das Magazin die Spielfläche nicht verdecken darf, endete die Röhre direkt über dem Rand der Spielfläche. Der Test soll zeigen, dass die Kugel zuverlässig auf der Startposition landet. Nach dem verschiedene Steigungen gestestet wurden, kamen wir zu dem Ergebnis, dass bei einer Steigung von 5° die Geschwindigkeit der Kugel ausreicht, um auf der Starposition zu landen. Bei höheren Steigungen war die Kugel so schnell, dass sie über Barrieren auf dem Spielfeld sprang und direkt in eines der Löcher fiel.
Dieses Konzept haben wir ausgearbeitet, da der Mechanismus zum Auslösen einer Kugel einfach zu realisieren war. Weiterhin ergaben die ersten Konstruktionszeichnungen, dass das System stabil und robust werden würde.

6.2 Konstruktion und -Bau

Die Konstruktion und Verifikation der Funktion des Ballmagazins wurde mit dem Softwaretool Solidworks 2008 durchgeführt. Bevor die Konstruktion beginnen konnte, haben wir das Brio-Labyrinth vermessen um so die ersten Maße für die Struktur des Magazins zu bekommen.

6.2.1 Kugel Reservoir

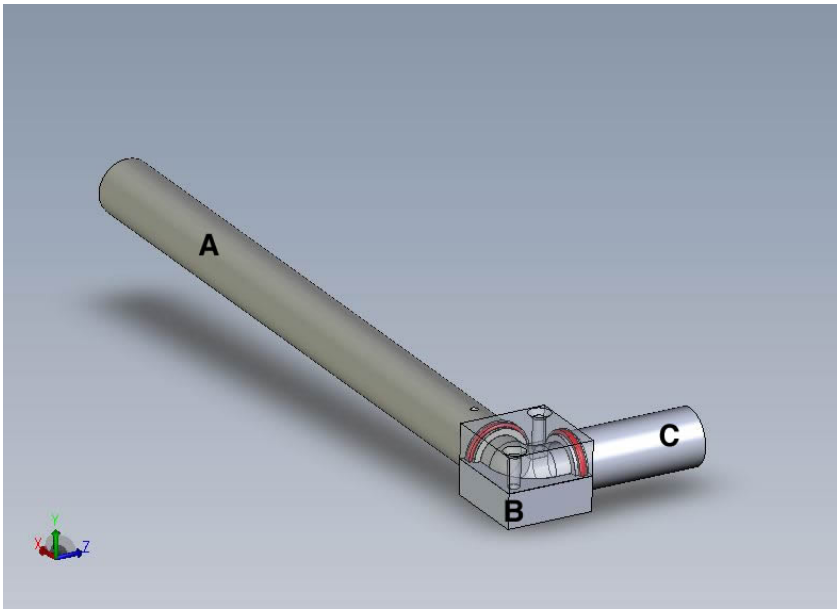


Abbildung 6.4: Röhren für Kugelreservoir (A), Umlenkung (B) und Auslassröhre (C).

Im Folgenden wird das Kugel-Reservoir, dargestellt in Abbildung 6.4, erläutert:

Teil A: Die Spielkugeln haben einen Durchmesser zwischen 12mm (Keramikkugeln) und 12,7mm (Stahlkugeln). Mit einer ausreichenden Toleranz wurde der Innendurchmesser der Röhre mit 14mm bestimmt. Für eine ausreichende Steifigkeit und um noch genug Material zur Befestigung der Röhre zu haben wählten wir den Außendurchmesser mit 18mm. In der Spezifikation wurde festgelegt, dass mindestens 10 Kugeln in der Röhre Platz finden sollen. Ausgegegangen von den Stahlkugeln ergibt sich daraus eine Länge von mindestens 127mm. Zusätzlich werden noch noch 21mm Platz für den Auslösemachnismus benötigt. Die am Ende konstruierte Länge von 191mm haben wir gewählt, um auch bei konstruktiven Änderungen noch genug Platz für 10 Kugeln zu haben.

Teil C: Eine kürzere Röhre mit dem gleichen Außen- und Innendurchmesser steht im 90° Winkel zum Kugel Reservoir. Durch diese Röhre rollt die Kugel über den Rand des Brio-Labyrinths zur Startposition.

Teil B: Die Verbindung zwischen den Röhren wird von einer um 90° abgewinkelten Röhre hergestellt. Diese Röhre besteht aus einer Ober- und einer Unterhälfte die durch eine Schraubverbindung zusammengehalten werden. Auf der Innenseite jeder Hälfte des

Verbindungsstücks ist eine halbrunde Vertiefung auf einer Viertelkreisbahn eingefräst. Zusammengesetzt ergeben die beiden Hälften also ein um 90° abgewinkeltes Röhrenstück welches denselben Innendurchmesser wie die beiden anderen Röhren hat. Die Röhre des Reservoirs und die Auslassröhre dringen jeweils 4mm in das Verbindungsstück ein. Die O-Ringe der zu verbindenden Röhren fassen dabei in die Nuten des Verbindungsstücks und arretieren so die Röhren im Verbindungsstück.

6.2.2 Auslösemechanismus

Der Auslösemechanismus muss garantieren, dass nur eine Kugel zur Zeit das Ballmagazin verlässt. Wir haben uns für einen Wippmechanismus entschieden. Die Wippe ist in einer Aufnahme unterhalb der Reservoirröhre angebracht. Auf der Wippe befinden sich im Abstand von 14mm zwei Pins mit einer Höhe von 5 mm. Diese Pins können durch Löcher in der Reservoirröhre hereinragen. Der Abstand zwischen Wippe und Reservoirröhre ist so bestimmt, dass beim Anschlagen der Wippe auf einer Seite der Röhre je ein Pin komplett in die Röhre ragt und der andere die Kugeln in der Röhre nicht behindert. Der gesamte Mechanismus wird über Schubstangen und einen Umlenkungswinkel bedient. Somit ist es möglich, durch eine lineare Bewegung an der Schubstange in eine rotatorische an der Wippe umzusetzen (Siehe Abbildung 6.5).

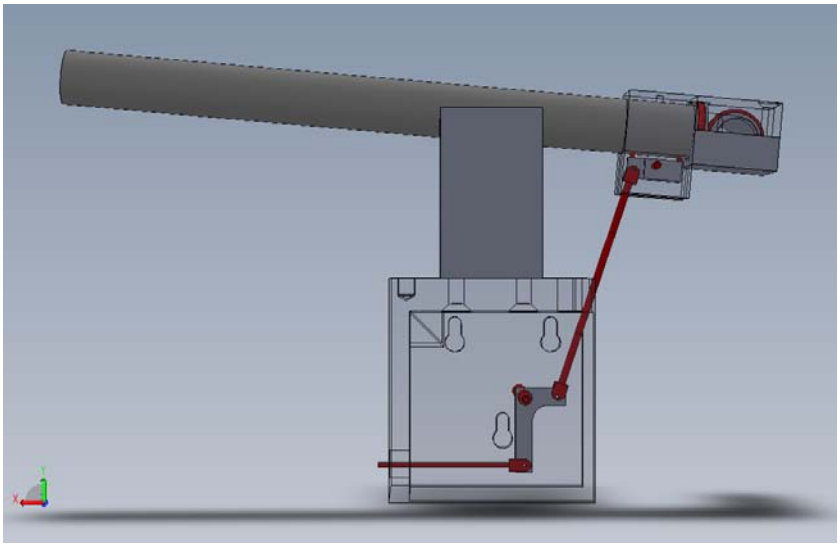


Abbildung 6.5: Auslösemachnismus über Wippe und Stifte

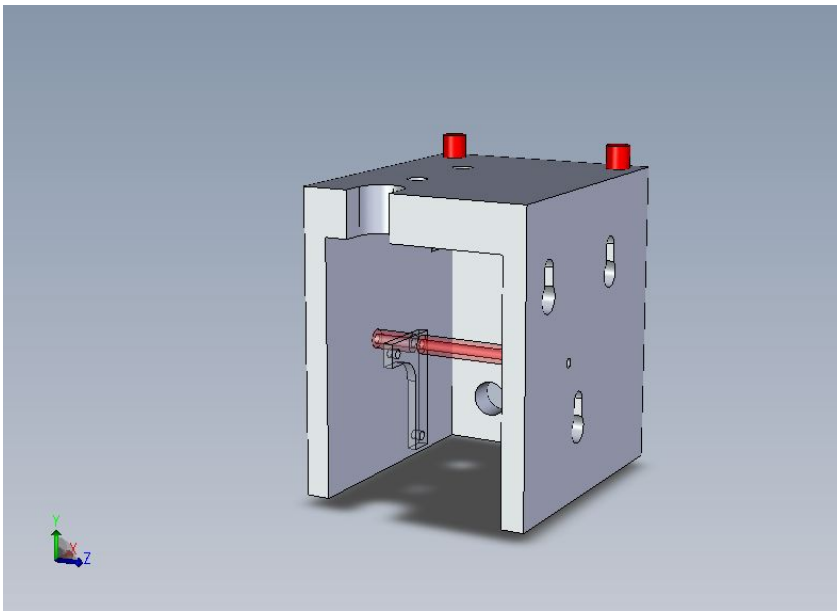


Abbildung 6.6: Korpus

6.2.3 Korpus

Die Grundform für den Korpus ist ein an der Vorder- und Unterseite geöffneter Kasten. Auf der Oberseite wird die Aufnahme für das Kugelreservoir angeschraubt. Weiterhin stellt der Korpus eine feste Verbindung zwischen dem Magazin und dem Spiel her. Die Verbindung zwischen Spiel und Magazin wird über 3 Langlöcher mit einem Durchmesser von 4mm hergestellt. Über eine 6mm große Bohrung an der Unterseite jedes Langlochs wird der Kopf einer M4 Schraube durch die Wand des Korpuss gesteckt. Anschliessend kann der Korpus 6mm abgesenkt werden und klemmt zwischen Schraubenkopf und der Außenwand des Brio-Labyrinths.
Zwei weitere Bohrungen ermöglichen die Aufnahme einer Welle. Diese Welle dient zum Umlenken der Bewegung der Schubstangen des Auslösemechanismusses im Inneren des Korpusses.
Ein weiteres Loch dient zur Aufnahme eines Gleitlagers, in dem die durch die Umlenkung entstehenden radialen Bewegungen der Schubstange ausgeglichen werden. (Siehe Abbildung 6.6)

6.2.4 Module zum Auslösen

Als Aktuator für den Auslösemachnismus soll ein mechanischer und ein elektronischer Auslöser sorgen. Es werden zwei Auslösemodule gebaut. Von den äußeren Maßen sind

die beiden Module identisch. Durch einfaches Aufstecken auf zwei Stifte auf der Rückseite des Magazins stellen sie eine Verbindung zum Korpus des Magazins her. Jedes Modul verfügt an der dem Brio-Labyrinth zugewandten Seite über genau die gleichen Langlöcher wie der Korpus des Magazins. In diese Langlöcher werden genau wie bei dem Korpus M4 Schrauben gesteckt um eine feste Verbindung zwischen dem Modul und dem Brio-Labyrinth herzustellen.

6.2.4.1 Mechanischer Auslöser

Im Mechanischen Auslöser (Siehe Abbildung 6.7) wird eine Schubstange durch einen Knopf, der durch die Aussenwand des Modules ragt, in Bewegung gesetzt. Der maximale Weg der Stange wird durch zwei Anschläge auf 7,5mm begrenzt. Zusätzlich sorgt eine Druckfeder dafür, dass der Knopf immer in seine Ausgangsposition zurückkehrt. An der dem Knopf gegenüberliegenden Seite ist eine Scheibe mit einem Durchmesser von 10mm angebracht. Über diese Scheibe wird die Kraft und Bewegung auf die Schubstange des Magazins übertragen.

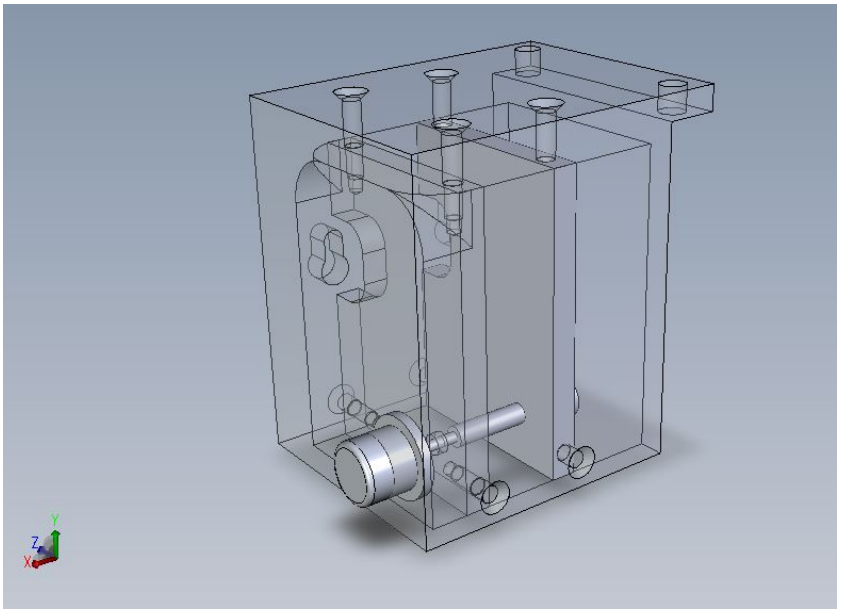


Abbildung 6.7: Mechanischer Auslöser

6.2.4.2 Elektronischer Auslöser

Um eine einfaches An- und Abbauen des elektronischen Auslösers (Siehe Abbildung 6.8) zu gewährleisten befindet sich im elektronischen Auslöser ein Servo des Typs Dynami-

xel DX-117 [1]. Servos diesen Typs werden bereits für die Ansteuerung der Spielfäche im Brio-Labyrinth verwendet. Die Ansteuerung der Servos erfolgt über ein Bussystem, welches einfach erweiterbar ist. Hierbei ist nur ein Servo mit der seriellen Schnittstelle verbunden. Jeder weitere Servo wird mit seinem Vorgänger verbunden, also ist die Art der Verschaltung eine "Daisy-Chain". Damit kann nun der Servo einfach an den zweiten Servo des Spiels angeschlossen und verwendet werden.
Auf der Nabe des Servos ist ein Flansch montiert. Auf diesem Flansch ist eine Platte verschraubt. Die Platte ist so angeordnet, dass durch Rotation des Servos die Schubstange des Magazins bewegt werden kann. Ein Anschlag für die Platte sorgt dafür, dass durch unsachgemäße Bedienung des Servos das Magazin nicht beschädigt werden kann.

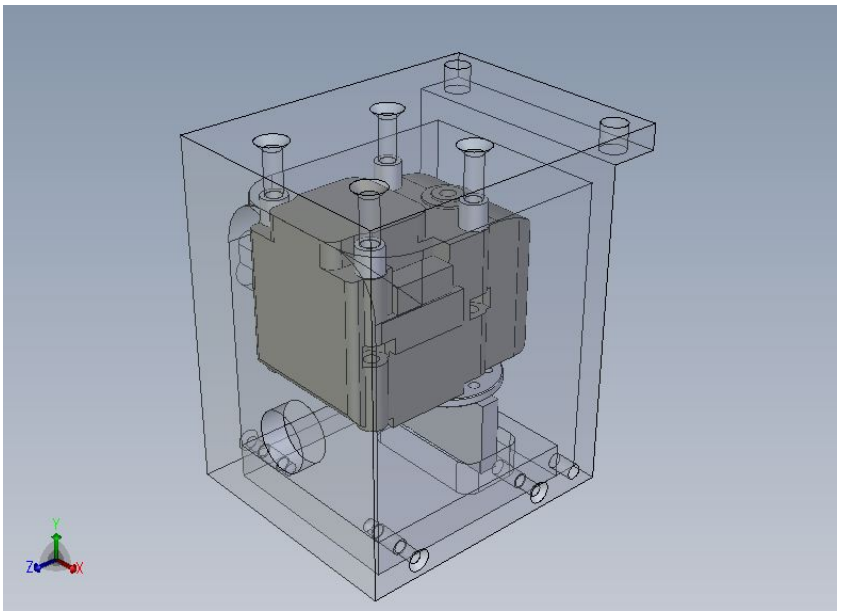


Abbildung 6.8: Elektronischer Auslöser

6.3 Analyse der Daten des Piezosensors zur Einschlagserkennung einer Kugel

Über eine Karte von National Instruments sind an den Computer analoge Sensoren angeschlossen. Die Frequenz, mit der neue Werte der Sensoren verfügbar sind liegt bei ca. 600 Hz. Die Rohwerte des Sensors sind digitalisiert und liegen zwischen Null und Fünf.

6.3.1 Einschlagsdetektion durch Zeitversetzte-Schwellwertüberprüfung

In Abbildung 6.9 sind exemplarisch typische Signalverläufe dargestellt, die experimentell ermittelt wurden. Darauf aufbauend exisitert in dem Brio-Softwareframework bereits ein Verfahren zur Kugel-Einschlagserkennung. Dieses Verfahren basiert auf einfachen Schwellwerten. Der ungestörte Sensorwert wird zunächst auf die Mitte seines Wertebereichs abgebildet (Formel 6.1). Falls der aktuelle Wert dadurch ins negative gerutscht ist wird er um fünf erhöht (Formel 6.2). Danach wird überprüft, ob der Sensorwert zwischen der oberen $(3,25)$ und unteren $(1,75)$ Grenze liegt (Formel 6.3). Ist dies nicht der Fall, wird ein Kugeleinschlag detektiert. Zusätzlich ist in dem Verfahren noch Zeitbegrenzung eingebaut. In den drei Sekunden nach einem detektierten Kugeleinschlag liefert die Funktion keinen Wert zurück um Mehrfacherkennungen des selben Einschlags zu vermeiden.

$$piezoValue_1 = rohWert - 2,45 \tag{6.1}$$

$$piezoValue_2 = \begin{cases} piezoValue_1 + 5 \quad wenn \quad piezoValue_1 < 0 \\ piezoValue_1 \end{cases} \tag{6.2}$$

$$Kugeleinschlag \quad wenn \quad \begin{cases} piezoValue_2 < 1,75 \\ piezoValue_2 > 3,25 \end{cases} \tag{6.3}$$

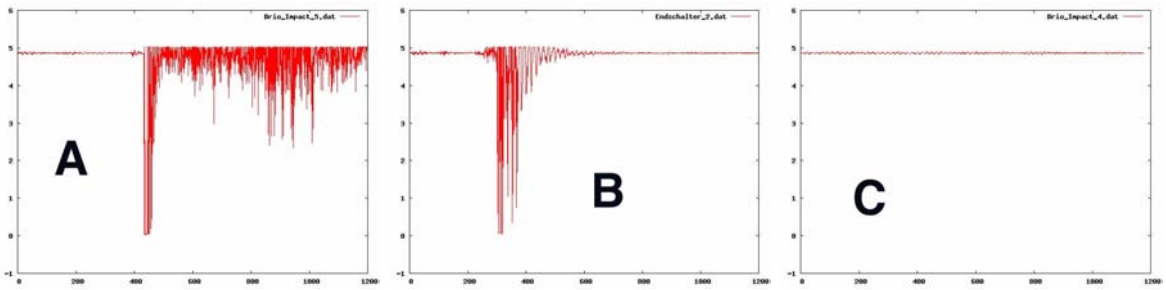


Abbildung 6.9: Charakteristische Signalverläufe des Piezosensors. **A:** Aufschlag einer Kugel. **B:** Auslösen des Endschalters. **C:** Ruhesignal

Die Bilder in Abbildung 6.9 stammen aus einer Messreihe zur Ermittlung von charakteristischen Sensorantworten. Auf den Plots bezeichnet die Y-Achse Volt[1] und die X-Achse die Zeit, unterteilt in Samples. Dabei wurde für jeden Event zwei Sekunden lang bei 600 Hz also 1200 Werte in einem Logfile gespeichert. Die in dieser Testreihe aufgezeichneten Aktionen waren: Das Durchfallen einer Kugel (für jedes Loch), das Anschlagen der Ebene an allen Anschlägen und Messungen während eines Spielvorgangs. Diese Messwerte wurden dann, wie im weiterem erläutert, ausgewertet.
Ziel der Untersuchung sollte sein, ein Einschlag einer Kugel gegenüber dem Anschlagen eines Endschalters zu unterscheiden. Weiterhin sollte die Einschlagserkennung verbessert werden.

6.3.2 Analyse der Power des Signals zur Einschlagserkennung

Es gilt zunächst mal einige Annahmen zu den Signalen zu treffen. Schlägt ein Ball auf der Bodenplatte des Spiels auf, erzeugt der Aufschlag für einen kurzen Moment einen sehr starken Ausschlag auf dem Piezo-Sensor. Durch die Schräge der Bodenplatte rollte die Kugel nach einem Aufschlag über einen Teil der Bodenplatte und erzeugt dabei über einen längeren Zeitraum einen leichten Ausschlag des Signals des Piezosensor. Diese Charakteristiken des gesuchten Signals kann man sich zu Nutze machen. Dazu wurden die aufgenommenen Werte in Fenster eingeteilt. Diese Fenster haben eine Länge von 50 Werten.

Detektieren von Einschlägen:

Den Abstand zwischen zwei Datenpunkten erhält man durch Quadrierung der Differenz. Aufsummiert über eine Fensterlänge von 50 Werten erhält man somit die Summe der Abstände zwischen allen aufeinander folgenden Datenpunkten. Geteilt durch die Län-

[1] Bei dem Piezosensor handelt es sich um einen analogen Sensor. Die über dem Sensor abfallende Spannung wird gemessen und in einer begrenzten Auflösung über einen AD-Wandler (Siehe Seite 1) digitalisiert. Daher ist die Einheit des Signals Volt.

ge des Fensters ergibt sich ein durchschnittlicher Abstand. Der Schwellwert $S_i = 1,25$ wurde durch Auswertung eines typischen Signalverlaufes für einen Einschlag einer Kugel ermittelt.

$$\begin{aligned}
&Schwellwert && S_i && = && 1,25 \\
&Piezomesswerte && p_{t-1}, p_t \\
& && dist && = && (p_{t-1} - p_t)^2 \\
& && Summe_{window} && = && \textstyle\sum_{I=0}^{50} dist_i \\
& && Summe_{avg} && = && \frac{Summe_{window}}{50} \\
&Kugeleinschlag && wenn && Summe_{avg} && > && S_i
\end{aligned} \tag{6.4}$$

Wird der Wert $Summe_{avg}$ größer als der Schwellwert S wird in der Klasse BrioState der Zeitwert des letzten Ballverlustes auf die aktuelle Zeit gesetzt. Dieses Verfahren erkennt starke Einschläge der Bälle auf dem Boden des Brio-Labyrinths.

Detektieren von Rollen über den Boden:

Ein Ringbuffer mit der Länge von 10 Elementen nimmt die 10 letzten Werte von $Summe_{avg}$ auf. Eine zweite Überprüfung der Werte greift darauf zurück. In einer Schleife werden die Werte der n letzten Fenster zu einem Wert aufsummiert und Anschließend durch n geteilt. Überschreitet die Summer der n zurückliegenden Fenster einen zweiten Schwellwert wird ebenfalls ein Ballverlust detektiert. Der Schwellwert $S_r = 0,3$ wurde durch eine Analyse von Testdaten über eine Länge von 5 Fenstern bestimmt.

$$\begin{aligned}
&Schwellwert && S_r && = && 0,3 \\
& && Summe_{avg}(t) && = && \frac{Summe_{window}(t)}{50} \\
& && Summe_{roll} && = && \frac{\sum_{t=0}^{n} Summe_{avg}(t)}{n} \\
&Kugeleinschlag && wenn && Summe_{roll} && > && S_r
\end{aligned} \tag{6.5}$$

Diese Methode eignet sich gut, um das Rollen einer Kugel über die Bodenplatte zu detektieren.

Um Überlagerungen der beiden Methoden zu vermeiden, sorgt ein Timer dafür, dass höchstens alle 5 Sekunden ein Ballverlust detektiert werden kann. Sonst wäre es möglich, dass Beim Einschlag einer, und beim Rollen der zweite Ballverlust detektiert werden würde.

Test und Vergleich der Verfahren: Der Test soll einen direkten Vergleich der beiden Verfahren ermöglichen. Daher haben wir einen praktisches Testverfahren ausgewählt. Die Güte der beiden Verfahren wurde am realen System getestet. Eine Keramikkugel wurde fünf mal in Folge durch jedes Loch fallen gelassen. Im besten Fall wurden dabei auch fünf Einschläge detektiert.
Der Test sollte folgende Ergebnisse liefern:

- Zuverlässigkeit des aktuellen Verfahrens.
- Vergleich der Performance des Window-basierten Verfahrens gegenüber dem aktuellen.
- Lokalisierung von Zonen auf dem Spielfeld, in denen die Einschlagsdetektion generell schwierig ist.

Im folgenden werden wir die erreichten Ergebnisse als True Positive (TP), False Negative (FN) und False Positive (FP) bezeichnen. True Positive bedeutet, dass ein Balleinschlag stattgefunden hat und auch detektiert wurde. False Negative ist das Ergebnis, wenn ein Einschlag stattgefunden hat, jedoch nicht erkannt wurde. False Positive bedeutet, dass ein Einschlag erkannt wurde, der nicht stattgefunden hat.

Zeitvers.-Schw.-Ü.(Seite 31):			**Windowbas. (Seite 32):**			
TruePos	FalsePos	FalsNeg	TruePos	FalsePos	FalsNeg	Lochnummer
3	2		5			23 bzw. 1
5			5			22 bzw. 2
5			5			3
5			5			4 bzw. 5
5			5			6 bzw. 9
5			5			21 bzw. 7
5			5			8 bzw. 16
5			5			10
4	1		4		1	11
5			4		1	12
5			5			13
5			5			14 bzw. 33
5			5			15
5			5			17
5			5			18 bzw. 31
4	1		5			19
4	1		5			20
5			5			24 bzw. 26
5			5			25 bzw. 28
5			5			27 bzw. 29 bzw. 49
5			5			30 bzw. 36
5			5			32 bzw. 34
5			5			35 bzw. 39
5			5			38 bzw. 48
5			5			37
5			5			40
5			5			41 bzw. 47
5			4		1	42
4		1	5			43
4		1	5			44
4		1	5			45 bzw. 58
5			5			51 bzw. 46
5			5			50_1
5			5			50_2
5			5			52
5			5			53
5			5			54
5			5			55
5			5			56

Tabelle 6.1 fortgesetzt:

Zeitvers.-Schw.-Ü.(Seite 31):			**Windowbas. (Seite 32):**			
TruePos	FalsePos	FalsNeg	TruePos	FalsePos	FalsNeg	Lochnummer
5			5			59 bzw. 57

Tabelle 6.1: Testergebnisse

Test des Bestehenden Verfahrens:

Die nebenstehenden Abbildung ist eine Visualisierung der Testergebnisse aus der Tabelle 6.1 auf Seite 36. Hierbei sind alle Löcher, bei denen die Einschlagserkennung geklappt hat, mit grün markiert (TruePositive). Alle Löcher, bei denen nicht geschehende Einschläge erkannt wurden (FalsePositive), Blau markiert. Löcher, bei denen Einschläge nicht erkannt wurden (FalseNegative), sind rot markiert.
Dieses Verfahren ist recht zuverlässig bei der Einschlagsdetektion. Jedoch ist es genenüber Vibrationen im Spiel zu anfällig. Ein leichter Stoß auf den Tisch oder Spiel reicht aus um eine False Positive zu erzeugen. Die False Negatives am rechten Rand des Spiel erklären sich über den Kurzen Weg der Kugel zum Ausgang.

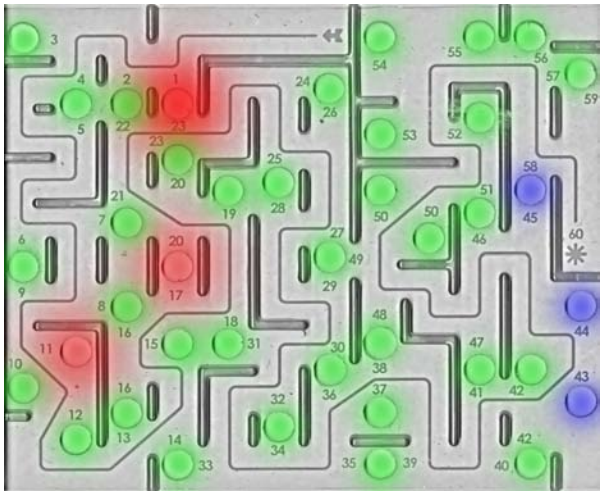


Abbildung 6.10: Performance des bestehenden Verfahrens. Legende: ●TP, ●FN, ●FP

Test des optimierten Verfahrens:

Die nebenstehenden Abbildung ist eine Visualisierung der Testergebnisse aus der Tabelle 6.1 auf Seite 36. Hierbei sind alle Löcher, bei denen die Einschlagserkennung geklappt hat, mit grün markiert (True-Positive). Alle Löcher, bei denen nicht geschehende Einschläge erkannt wurden (FalsePositive), Blau markiert.
Dieses Verfahren zeigt eine größere Robustheit gegenüber Vibrationen. Ein Nachteil ist allerdings, dass dadurch False Negatives entstehen. Insgesamt schneidet das Verfahren besser als das bestehende ab und bietet darüber hinaus noch mehr Einstellmöglichkeiten.

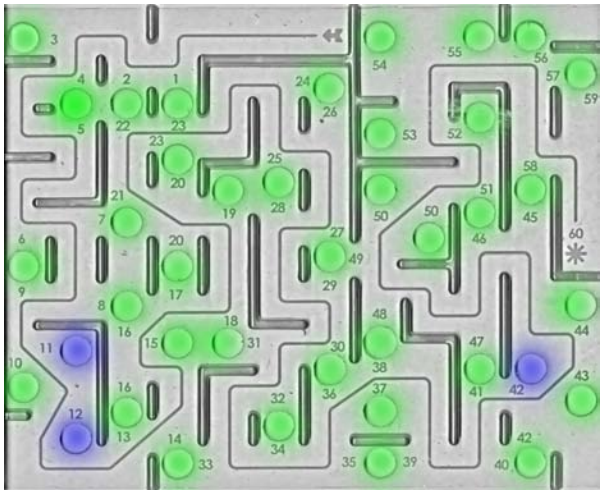


Abbildung 6.11: Performance des optimierten Verfahrens. Legende: •TP, •FN, •FP

6.3.2.1 Testergebnisse

- Die Zuverlässigkeit des aktuellen Verfahrens ist ausreichend, kann aber noch verbessert werden. 193 von 200 Einschlägen wurden korrekt erkannt. Dreimal wurde ein Einschlag nicht erkannt. Viermal erkannte das Verfahren Einschläge wo keine stattgefunden hatten.

- Das window-basierte Verfahren schneidet insgesamt besser ab. 197 von 200 Einschlägen wurden korrekt erkannt. Drei Einschläge wurden nicht erkannt (False Negative). Weiterhin ist es nicht so anfällig gegenüber Störungen des Signals des Piezosensors.

- Eine Region, in der die Detektion von Einschlägen schwierig ist, liegt genau vor dem Kugelausgang in der rechten unteren Ecke des Spielbretts. Das kann man dadurch begründen, dass der Weg der Kugel über die Bodenplatte nur sehr kurz ist und die Schwingfähigkeit der Platte bei einem Einschlag nah am Rand sehr gering ist.

Absolut korrekt erkennt keines der vorgestellten Verfahren einen Kugeleinschlag. Zusammenfassend kann man sagen, dass es am Ende darauf ankommt, welche Art des Fehler in der Anwendung schlimmer ist. Lässt man FalsePositives zu, werden vom Ballmagazin mehrere Kugeln ins Spiel gebracht. Bei FalseNegatives wird nach einem Kugelverlust keine Kugel auf der Startposition positioniert. In diesem Fall kann über einen Knopf am Joystick ein neuer Ball nachgeführt werden.
Das Verhalten der Algorithmen kann man über die Schwellwerte sowie die Zeit, die vergehen muss bevor ein neuer Einschlag erkannt werden kann, einstellen. Je nach gewolltem Verhalten kann dann die Einschlagserkennung über diese Parameter entsprechend eingestellt werden.

6.3.3 Frequenzanalyse zur Einschlagserkennung

Im zweiten Ansatz haben wir die diskrete Fouriertransformation[4] benutzt. Bei der diskreten Fouriertransformation (DFT) handelt es sich um eine Transformation, die ein diskretes Signal nach folgender Formel in sein Frequenzspektrum transformiert:

$$a_k = \sum_{j=0}^{N-1} \omega^{j*k} * a_j \quad \text{für} \quad k = 0, \ldots, N-1$$

Ziel bei dieser Untersuchung war es Frequenzen zu finden, die beim Durchfallen der Kugel durch ein Loch, eine starke Intensität haben und bei allen anderen Events eher klein sind, sich also signifikant von diesen Unterscheiden. Da die Analyse aller Werte sehr aufwendig ist, haben wir ein C++ Programm geschrieben, welches die Messreihe analysiert. Die Analyse umfasste die folgende Schritte:

1. Alle Messwerte fouriertransformieren.
2. Nach Frequenzintensitäten suchen, die für jedes Loch größer sind als bei den zwei anderen Events.
3. Gefundene Frequenzen mit dem Intensitätsunterschied ausgeben.

Diese Analyse hatte zu Ergebnis, dass bei einer Frequenz von 483 Hz eine Mindestdifferenz von 0,11 zwischen der Intensität der Frequenz beim Durchfallen einer Kugel gegenüber dem Berühren eines Endschalters und dem normalen Spielbewegungen besteht. Dies war auch die einzige Frequenz, bei der die Intensität für alle Testdaten, in denen ein Kugeleinschlag stattgefunden hat, größer war als die Intensitäten der anderen Events. Das Signal des Piezosensors liegt im Bereich zwischen 0 und 5, eine Differenz von 0,11 entspricht also 2,2% des gesamten Bereichs.

Nach der Analyse war nicht klar, ob dieser geringe Unterschied zur Einschlagsdetektion bei manchen Löchern ausreichen würde.
Im Folgenden wurde die BRIO-Softwareumgebung um dieses Verfahren erweitert. In einem Ringbuffer wurden die letzten 600 Werte des Piezosensors gespeichert. Bei einem Peak in den Werten des Piezosensors wurden 600 weitere Werte Aufgezeichnet und ebenfalls gespeichert. Auf diese 1200 Werte wurde dann die DFT angewandt und die Frequenzintensitäten im Bereich von 240 bzw. 245 Hz ausgeben. Während der Test dieses Verfahrens stellte sich heraus, das die Intensitäten einer Frequenz bei gleichen Events sehr stark schwankten, und somit nicht aussagekräftig sind. Dies kann darauf zurückgeführt werden, dass die Fallhöhe, der Aufschlagwinkel und die Eigenrotation der Kugel je nach Neigung der Spielfläche variiert. Es ist somit nicht möglich das Durchfallen einer Kugel mit diesem Ansatz zu detektieren.

6.3.4 Analyse des Ergebnisses:

Mit dem ersten Ansatz ist es möglich das Durchfallen einer Kugel zu detektieren. Im Gegensatz zu dem vorhanden Verfahren ist diese Methode robuster gegen das Anschlagen der Spielfläche an eine der vier Endpositionen. Um das Anschlagen der Spielfläche als Kugelverlust zu detektieren, muss die Spielfläche sehr stark auf den Endschalter aufschlagen. Bei dem vorhandenen Verfahren hingegen reicht oftmals ein leichtes Berühren des Endschalters aus um den fälschlichen Verlust einer Kugel zu detektieren. Dafür weist die von uns entwickelte Methode bei drei Löchern ein false negative Verhalten auf. Der Verlust einer Kugel wird also nicht detektiert. Diese Löcher befinden sich alle nahe an zwei Spielrändern. Bei diesen Löchern reicht das Herunterfallen nicht aus um den Einschlag direkt zu detektieren. Zwei der Löcher liegen sehr nah bei dem Auslass der Kugeln und somit reicht der kurze Zeitraum in dem die Kugel aus dem Spiel rollt nicht aus um das Rollen zu detektieren. Das dritte Loch liegt auf der linken Seite des Spiels. Unsere Vermutung ist, dass die Kugel sehr schnell an die untere Kante des Spiels rollt und dort zunächst gebremst wird. Von dieser Position fängt sie erneut an zu Rollen, da sie sehr langsam ist, reicht die Intensität des Piezosensorsignals nicht aus, um als Rollen detektiert zu werden. Wie im Punkt 6.3.3 beschrieben ist es mit dem zweiten Ansatz nicht zuverlässig möglich, das Einschlagen einer Kugel zu detektieren.
Als Alternative oder Unterstützung des vorhandenen Verfahrens und dem Windowbasierten Verfahren haben wir folgende Vorschläge:

- **Lichtschranke:**
  Die Lichtschranke kann am Kugelauslass des Spiels montiert werden. Sie würde zuverlässig das Herausrollen einer Kugel detektieren. Wenn das Verfahren zur Einschlagsdetektion mittels des Piezosensors einen Kugelverlust detektiert, könnte man sich den Zeitpunkt merken. Nachdem die Lichtschranke ausgelöst wurde, kann der zuvor gespeichert Zeitpunkt als wahrer Einschlags-Zeitpunkt bestätigt werden. Wenn nach einer gewissen Zeit die Lichtschranke nicht ausgelöst wurde, könnte der Zeitpunkt verworfen werden da das Verfahren fälschlicher Weise das durchfallen einer Kugel detektiert hätte.
  Im dem Fall, dass der Verlust einer Kugel nicht detektiert wurde, könnte man den Zeitpunkt des Auslösens der Lichtschranke als Einschlags-Zeitpunkt übernehmen. Von diesem Zeitpunkt muss dann noch die Zeit, die die Kugel benötigt, um aus dem Spiel zu rollen, abgezogen werden.

- **Dehungsmessstreifen (DMS):**
  Mit zwei DMS wäre es möglich die Verformung der Bodenplatte zu beobachten. Bei dem Aufschlagen einer Kugel verformt sich die Bodenplatte in zwei Richtungen. Diese Verformungen können detektiert und als Kugeleinschlag detektiert werden.

- **Härtere Bodenplatte:**
  Wenn die derzeitige Bodenplatte durch eine härtere ersetzt wird kann es sein, das sich die Werte des Piezosensors anders Verhalten und eins der zwei funktionierenden Verfahren das Durchfallen der Kugel zuverlässiger detektiert. Zur Zeit wird gerade ein zweites BRIO-Labyrinth umgebaut, in diesem wird eine Plexiglasplatte anstelle einer Holzplatte als Boden verbaut wird. Das neue Labyrinth wird mit einem Piezosensor desselben Typs ausgestattet. An diesem Labyrinth wird analysiert werden, ob die härtere Bodenplatte Einfluss auf die Messwerte des Piezosensors hat und sich die Verfahren dadurch verbessern.

6.4 Systemintegration

Bei der Systemintegration wurde die Servoansteuerung des Magazins in das vorhandene Framework eingebunden. Es gibt zwei Möglichkeiten den Ball auszulösen.

- Wird über das Signal des Piezosensors ein Ballverlust detektiert wird im Magazin automatisch ein neuer Ball ausgelöst.

- Wird das Spiel mit dem Joystick gespielt, kann durch den Spieler bei einem Ball-

verlust ein Knopf am Joystick gedrückt werden, um einen neuen Ball auf die Startposition zu bekommen.

Da das Detektieren eines Ballverlustes mit dem Piezosensor derzeit noch nicht zuverlässig genug funktioniert, wird die Information des Piezosensors nicht genutzt um einen Ball auszulösen. Sobald eine zuverlässige Balldetektion garantiert ist, wird diese zum Auslösen eines Balls benutzt werden. Daher wird zur Zeit nur die Ansteuerung per Joystick verwendet.
Die Ansteuerung des Magazins ist in der Klasse *Motor_Control* untergebracht. Wird von der Joystick-Klasse ein entsprechendes Signal gesendet, fährt die Spielfläche in die Ausgangsposition und der Servo im Auslösemodul betätigt die Schubstange des Magazins. Sobald die Detektion eines Ballverlustes fehlerlos funktioniert, wird das gleiche Verfahren zum Auslösen eines Balles benutzt.
Zusätzlich kann das Magazin so konfiguriert werden, dass ein Ball manuell ausgelöst werden kann. Dafür wird das automatische Auslösemodul gegen das manuelle ausgetauscht. Jetzt ist es möglich, jederzeit über einen Knopfdruck am Auslösemodul einen neuen Ball zuzuführen. Da in dieser Situation keine Servos zur Ansteuerung des Spiels benutzt werde, ist vom Spieler darauf zu achten, dass sich die Spielfläche in der waagerechten Positionen befindet.

Erklärung

Wir versichern, dass wir die schriftliche Hausarbeit einschließlich evtl. beigefügter Zeichnungen, Kartenskizzen, u.a.m. selbstständig angefertigt haben und keine anderen als die angegebenen Hilfsmittel benutzt haben. Alle Stellen, die dem Wortlaut oder dem Sinn nach anderen Werken entnommen sind, haben wir in jedem einzelnen Fall unter Angabe der Quelle kenntlich gemacht.

Bremen, den 5. Februar 2009

Marc Tabie

Johannes Teiwes

Nachwort

Für die stets gute Betreuung während des gesamten Projektes danken wir

Elsa Kirchner für die guten Vorschläge, Ideen und konstruktive Kritik,

Jan Hendrik Metzen für die Unterstützung im Bereich Programmierung,

Felix Grimminger für die Einführung und Anleitung im Bereich CAD und die vielen Reviews des Konzeptes bis zur Fertigstellung des Magazins,

allen Mitarbeitern des DFKI in Bremen.

Marc Tabie, Johannes Teiwes

Literaturverzeichnis

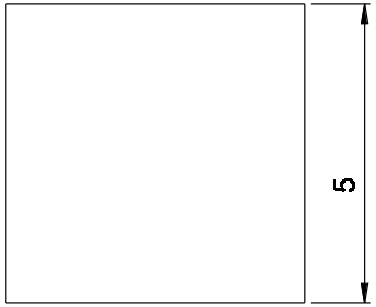
[1] Dynamixel. *Dx Series*. Datenblatt der Modelle DX-113, DX-115 und DX-117.

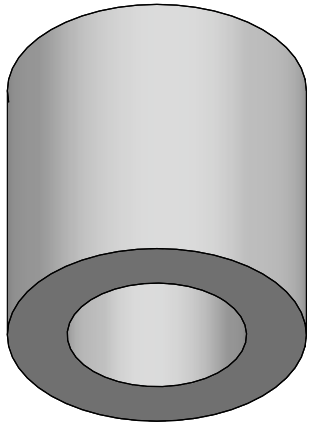
[2] Phil Hassey. Pygame - python game development. Website. `http://www.pygame.org` Abruf am 19.10.2008.

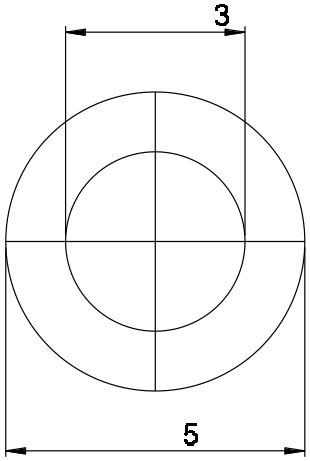
[3] Phil Hassey. Pygame - python game development, joystick reference. Website. `http://www.pygame.org/docs/ref/joystick.htm` Abruf am 19.10.2008.

[4] T. Westermann. *Mathematik für Ingenieure*. Springer Berlin Heidelberg, 2008.

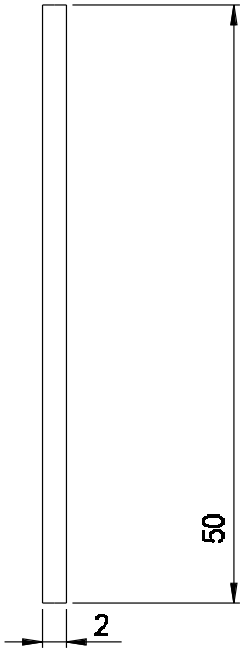
Anhang:



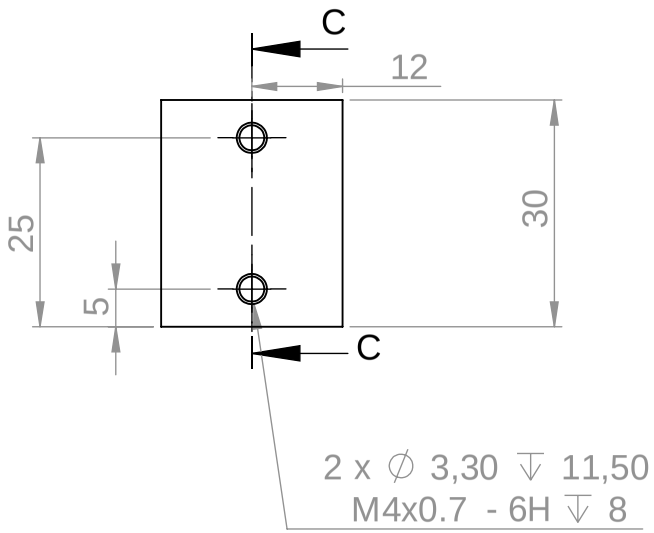


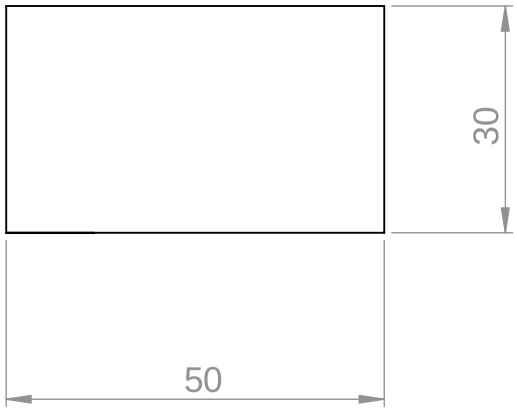


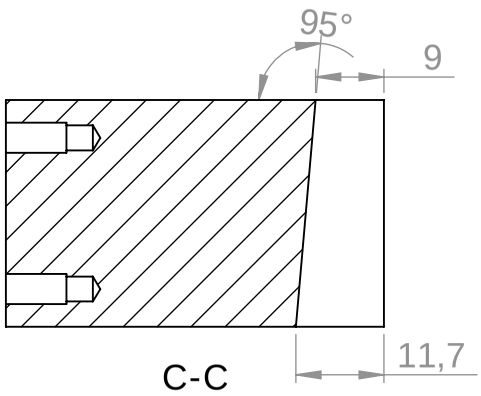
Autor: Johannes Teiwes Marc Tabie	Deutsches Forschungszentrum für Künstliche Intelligenz DFKI-Labor Bremen - Forschungsgruppe Robotik Robert-Hooke-Straße 5 - 28359 Bremen - 0421-218-64100 www.dfki.de/robotik - fax 0421-218-64150
Datum: 10.04.2008 Material: Pom schwarz	
Maßstab 10:1 — Blatt 1 von 1 Format A4 Alle Angaben in Millimeter	Name: abstandshalter servo
Kontakt: 0421/218 - 64166 / jteiwes@tzi.de, mtabie@tzi.de	Projekt: BRIO 2 — Zeichnungsnummer: 0001 — Revision:
Dieses Dokument ist Eigentum der DFKI GmbH und darf weder an Dritte weitergegeben noch veröffentlicht werden.	
Allgemeintoleranz ISO 2768 - m	Dateiname: Teil 1

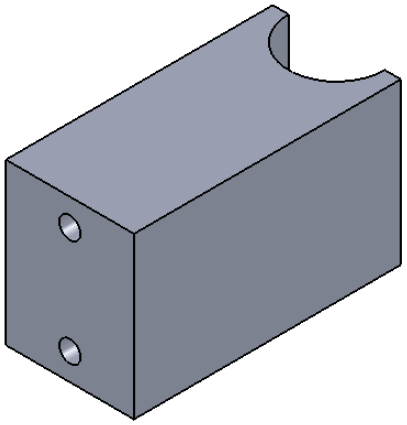


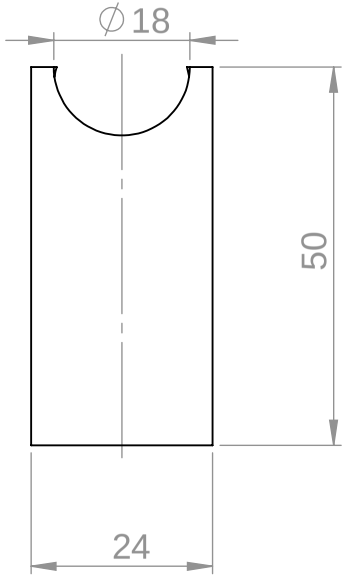
Autor: Johannes Teiwes Marc Tabie Datum: 10.04.2008 Material: Edelstahl	Deutsches Forschungszentrum für Künstliche Intelligenz DFKI-Labor Bremen - Forschungsgruppe Robotik Robert-Hooke-Straße 5 - 28359 Bremen - 0421-218-64100 www.dfki.de/robotik - fax 0421-218-64150
Maßstab 2:1 Blatt 1 von 1 Format A4 Alle Angaben in Millimeter	Name: achse umlenkung
Kontakt: 0421/218 - 64166 / jteiwes@tzi.de, mtabi@tzi.de	Projekt: BRIO 2 · Zeichnungsnummer: 0002 · Revision:
Dieses Dokument ist Eigentum der DFKI GmbH und darf weder an Dritte weitergegeben noch veröffentlicht werden.	
Allgemeintoleranz ISO 2768 - m	Dateiname: Teil 2



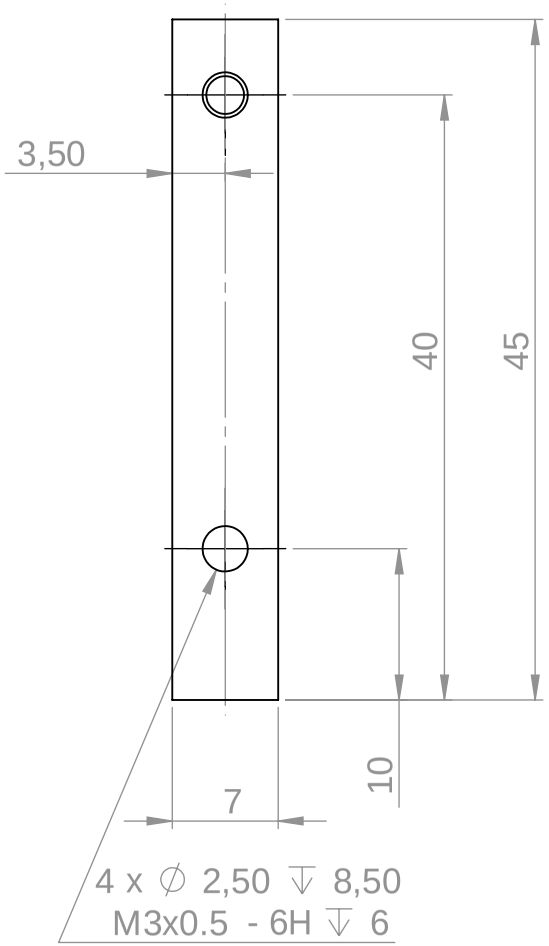


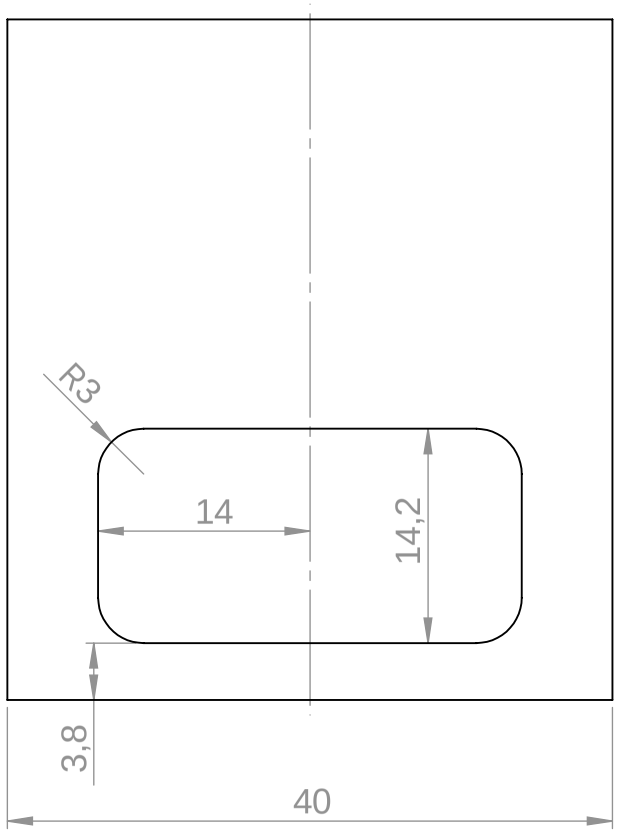


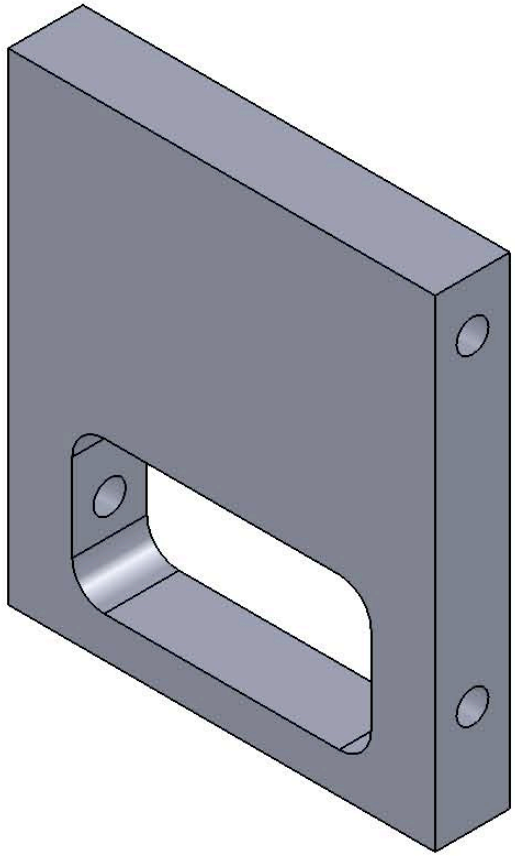




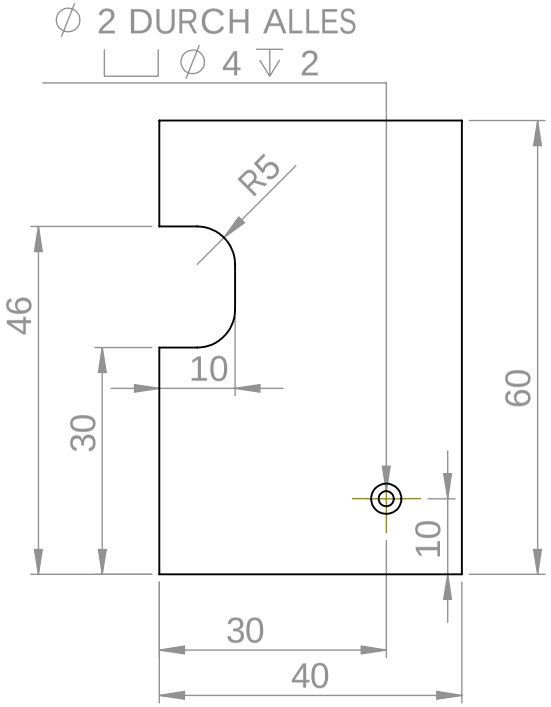
Autor: Johannes Teiwes, Marc Tabie Datum: 10.04.2008 Material: Pom schwarz		Deutsches Forschungszentrum für Künstliche Intelligenz DFKI-Labor Bremen - Forschungsgruppe Robotik Robert-Hooke-Straße 5 - 28359 Bremen - 0421-218-64100 www.dfki.de/robotik - fax 0421-218-64150
Maßstab 1:1	Blatt 1 von 1 Format A4 Alle Angaben in Millimeter	Name: Anbau block
Kontakt: 0421/218 - 64168 / jteiwes@tzi.de, mtabi@tzi.de		Projekt: BRIO 2 · Zeichnungsnummer: 0003 · Revision:
Dieses Dokument ist Eigentum der DFKI GmbH und darf weder an Dritte weitergegeben noch veröffentlicht werden.		
Allgemeintoleranz ISO 2768 - m		Dateiname: Teil 3

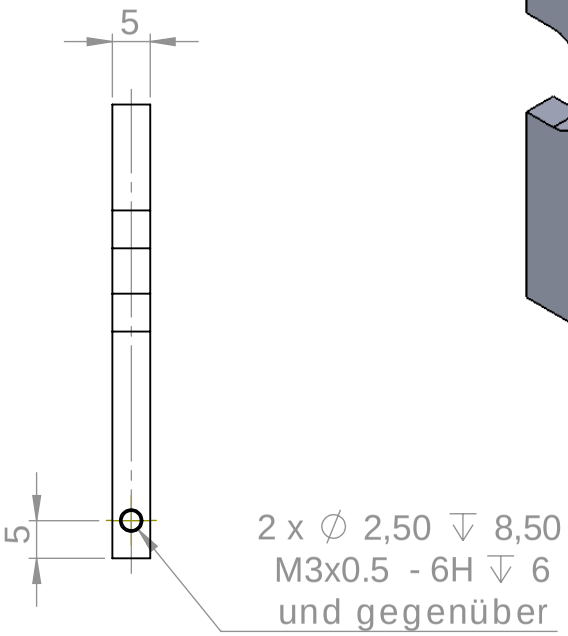


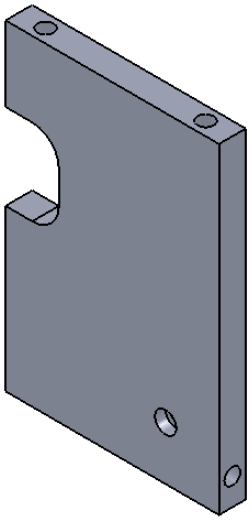


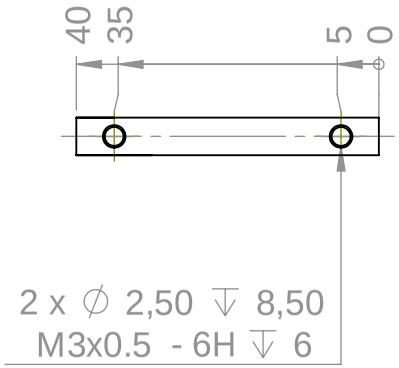


Autor: Johannes Teiwes, Marc Tabie Datum: 10.04.2008 Material: Pom schwarz		Deutsches Forschungszentrum für Künstliche Intelligenz DFKI-Labor Bremen - Forschungsgruppe Robotik Robert-Hooke-Straße 5 - 28359 Bremen - 0421-218-64100 www.dfki.de/robotik - fax 0421-218-64150
Maßstab 2:1	Blatt 1 von 1 Format A4 Alle Angaben in Millimeter	Name: Anschlag für Servo
Kontakt: 0421/218 - 64168 / jteiwes@tzi.de, mtabi@tzi.de		Projekt: BRIO 2 · Zeichnungsnummer: 0004 · Revision:
Dieses Dokument ist Eigentum der DFKI GmbH und darf weder an Dritte weitergegeben noch veröffentlicht werden.		
Allgemeintoleranz ISO 2768 - m		Dateiname: Teil 4

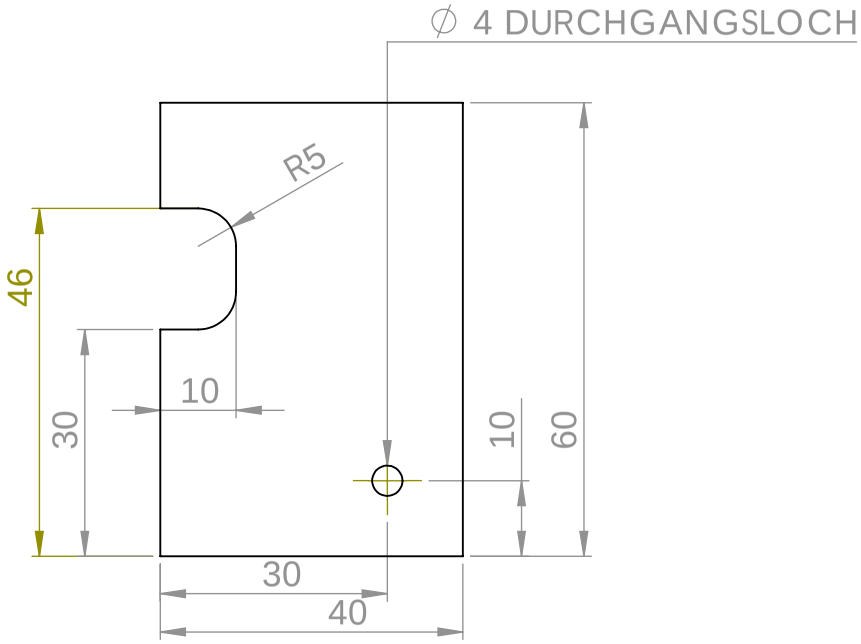


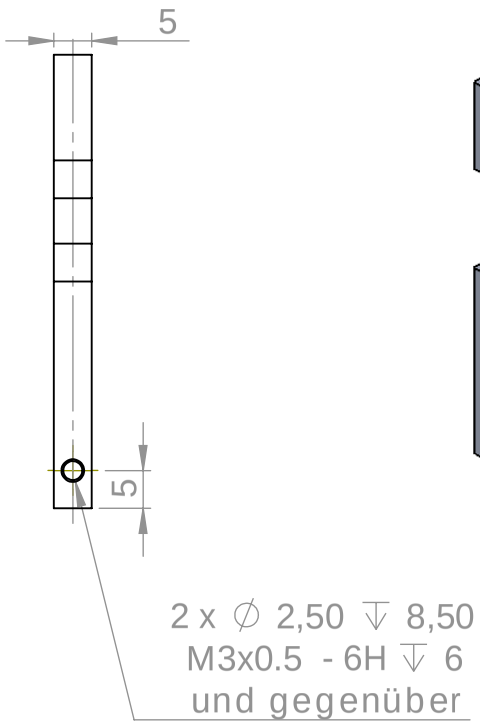


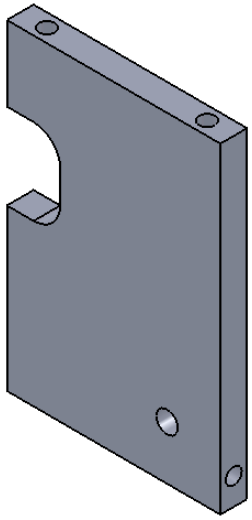


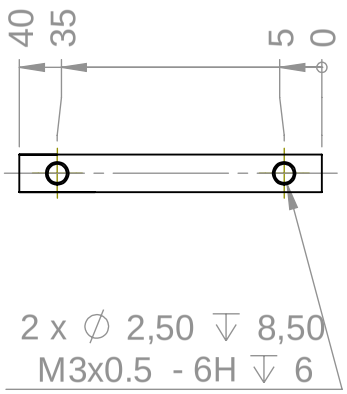


Autor: Johannes Teiwes, Marc Tabie Datum: 10.04.2008 Material: Pom schwarz		Deutsches Forschungszentrum für Künstliche Intelligenz DFKI-Labor Bremen - Forschungsgruppe Robotik Robert-Hooke-Straße 5 - 28359 Bremen - 0421-218-64100 www.dfki.de/robotik - fax 0421-218-64150
Maßstab 1:1	Blatt 1 von 1 Format A4 Alle Angaben in Millimeter	Name: Anschlagplatee für Anbau mechanisch
Kontakt: 0421/218 - 64168 / jteiwes@tzi.de, mtabi@tzi.de		Projekt: BRIO 2 — Zeichnungsnummer: 0005 — Revision:
Dieses Dokument ist Eigentum der DFKI GmbH und darf weder an Dritte weitergegeben noch veröffentlicht werden.		
Allgemeintoleranz ISO 2768 - m		Dateiname: Teil 5

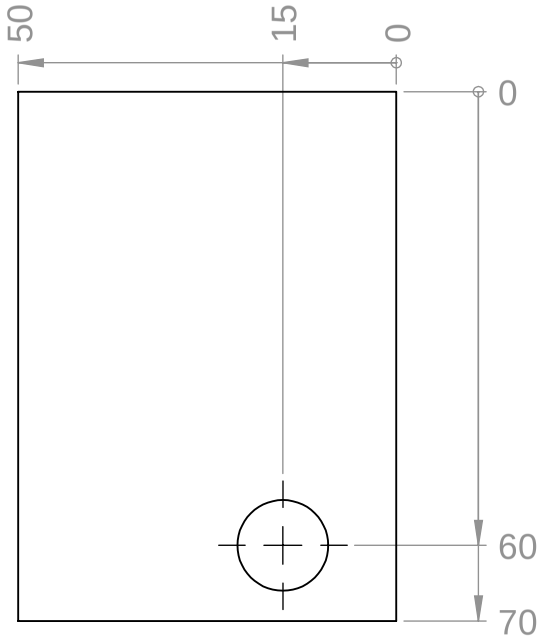


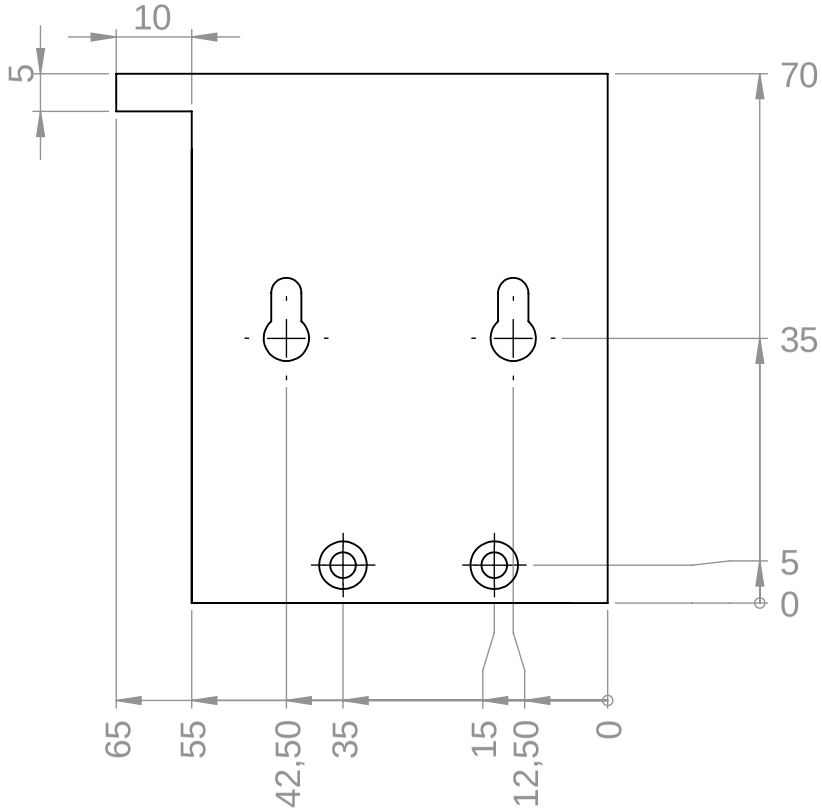


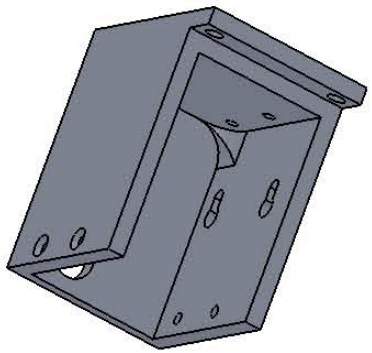


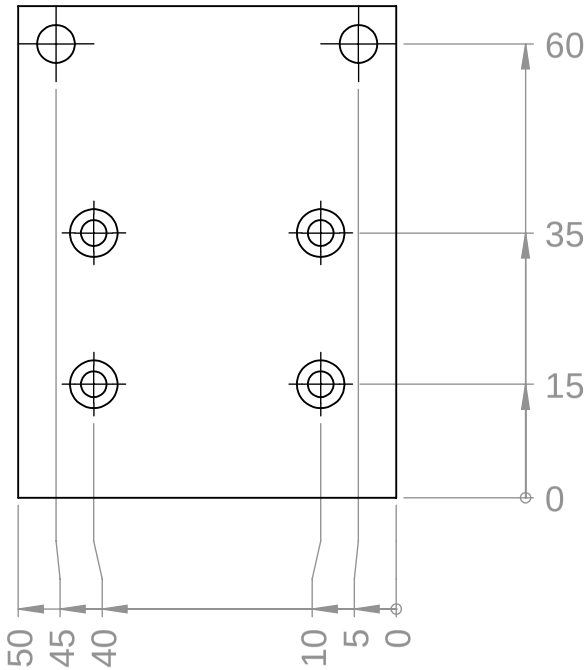


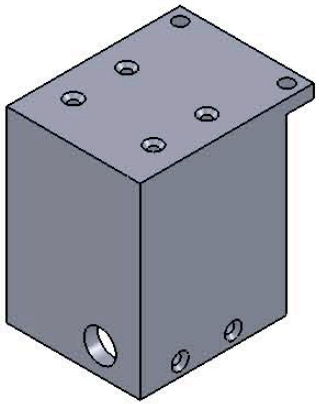
Autor: Johannes Teiwes, Marc Tabie Datum: 10.04.2008 Material: Pom schwarz		Deutsches Forschungszentrum für Künstliche Intelligenz DFKI-Labor Bremen - Forschungsgruppe Robotik Robert-Hooke-Straße 5 - 28359 Bremen - 0421-218-64100 www.dfki.de/robotik - fax 0421-218-64150
Maßstab 1:1	Blatt 1 von 1 Format A4 Alle Angaben in Millimeter	Name: Anschlagplatte nummer zwo
Kontakt: 0421/218 - 64168 / jteiwes@tzi.de, mtabi@tzi.de		Projekt: BRIO 2 — Zeichnungsnummer: 0006 — Revision:
Dieses Dokument ist Eigentum der DFKI GmbH und darf weder an Dritte weitergegeben noch veröffentlicht werden.		
Allgemeintoleranz ISO 2768 - m		Dateiname: Teil 6



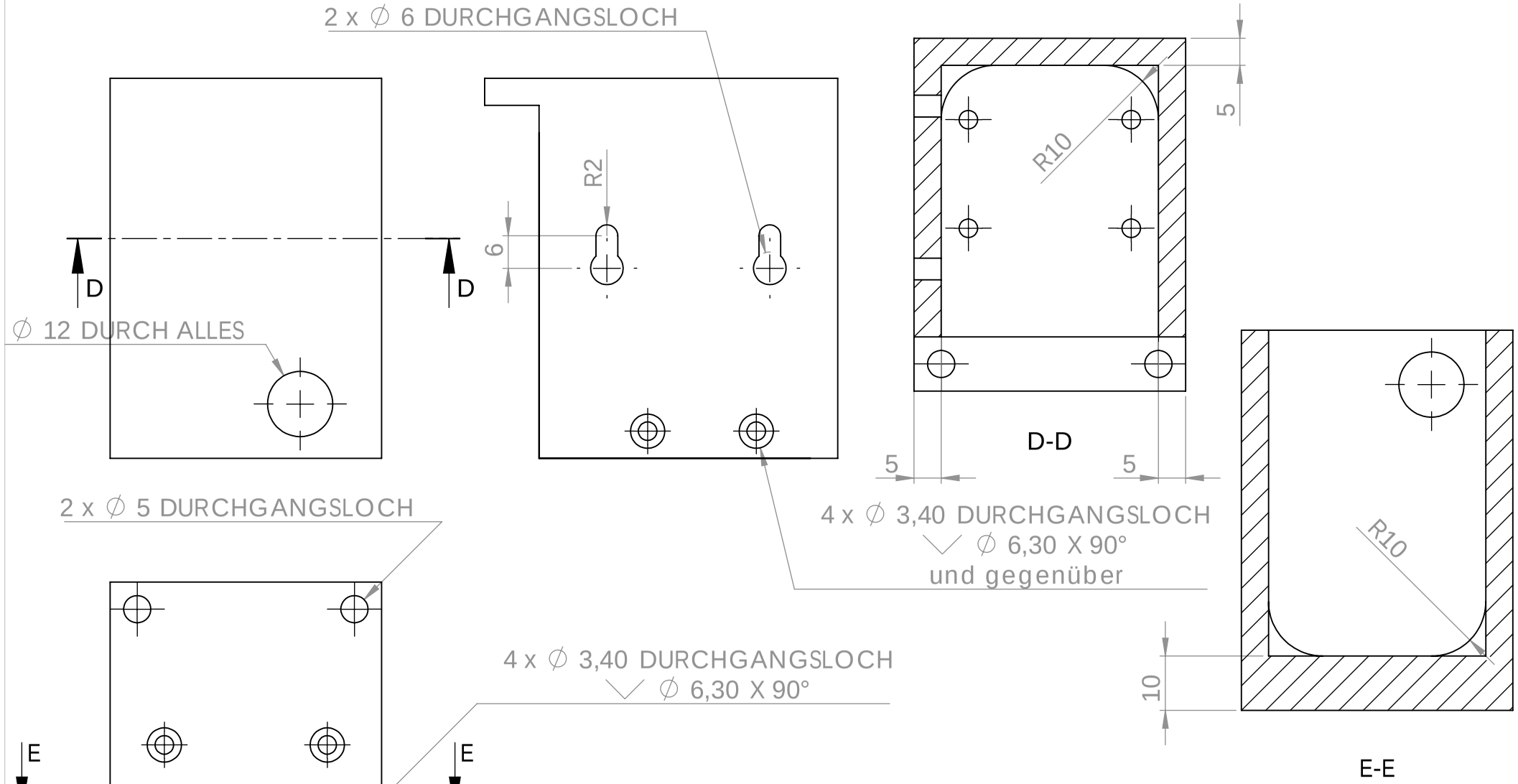




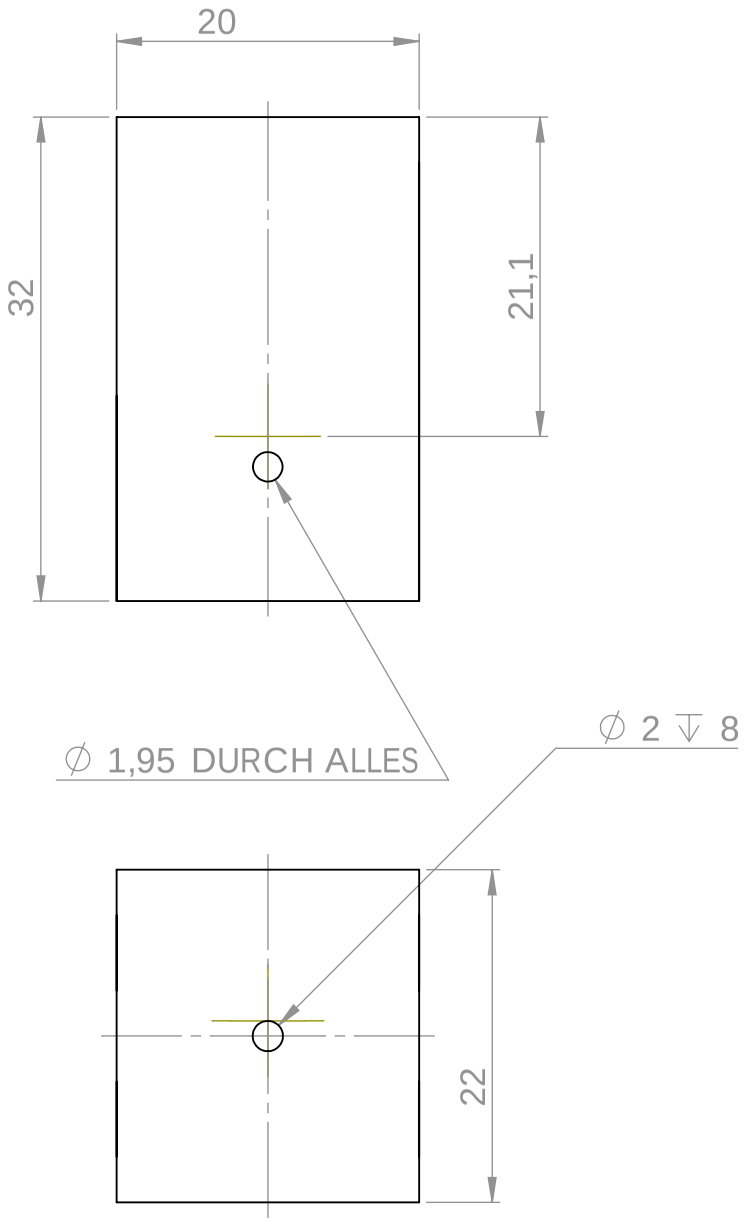


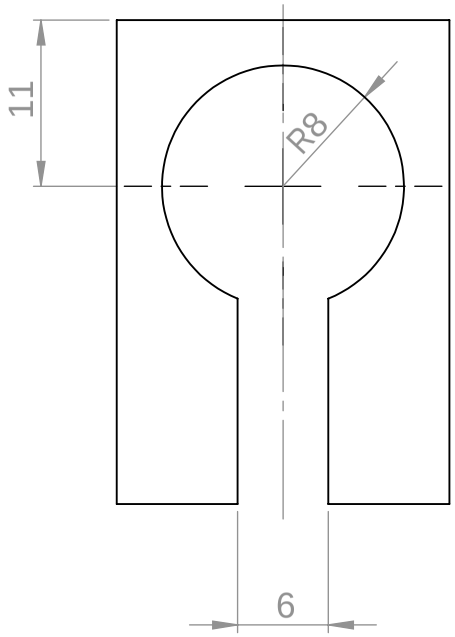


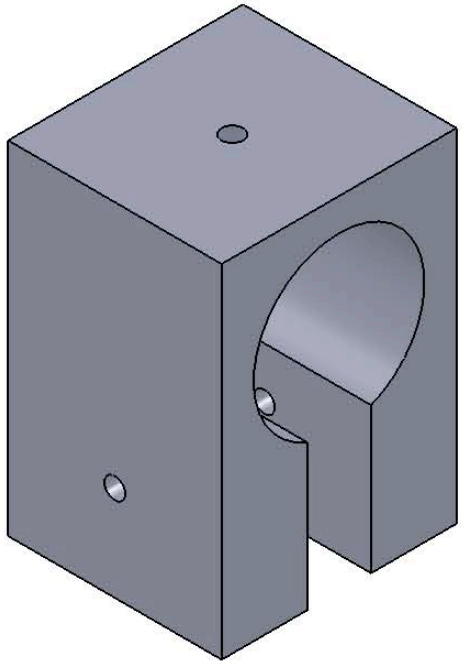
Autor: Johannes Teiwes, Marc Tabie Datum: 10.04.2008 Material: Pom schwarz		Deutsches Forschungszentrum für Künstliche Intelligenz DFKI-Labor Bremen - Forschungsgruppe Robotik Robert-Hooke-Straße 5 - 28359 Bremen - 0421-218-64100 www.dfki.de/robotik - fax 0421-218-64150
Maßstab 1:1	Blatt 1 von 2 Format A4 Alle Angaben in Millimeter	Name: Aufbau rohling Mechanisch
Kontakt: 0421/218 - 64168 / jteiwes@tzi.de, mtabi@tzi.de		Projekt: BRIO 2 — Zeichnungsnummer: 0007 — Revision:
Dieses Dokument ist Eigentum der DFKI GmbH und darf weder an Dritte weitergegeben noch veröffentlicht werden.		
Allgemeintoleranz ISO 2768 - m		Dateiname: Teil 7



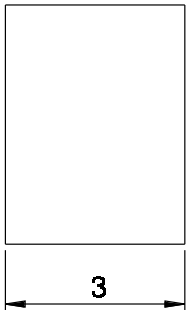
Autor	Johannes Teiwes Marc Tabie	Deutsches Forschungszentrum für Künstliche Intelligenz DFKI-Labor Bremen - Forschungsgruppe Robotik Robert-Hooke-Straße 5 - 28359 Bremen - 0421-218-64100 www.dfki.de/robotik - fax 0421-218-64150
Datum	10.04.2008	
Material	Pom schwarz	
Maßstab 1:1	Blatt 2 von 2 Format A4 Alle Angaben in Millimeter	Name: Aufbau rohling Mechanisch
Kontakt	0421/218 - 64168 / jteiwes@tzi.de, mtabi@tzi.de	Projekt: BRIO 2 · Zeichnungsnummer: 0007 · Revision:
	Dieses Dokument ist Eigentum der DFKI GmbH und darf weder an Dritte weitergegeben noch veröffentlicht werden.	
	Allgemeintoleranz ISO 2768 - m	Dateiname: Teil 7

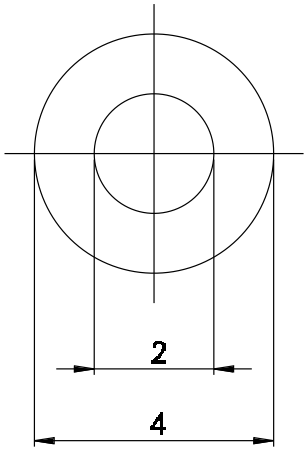


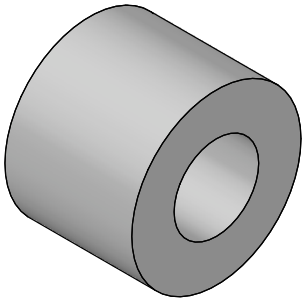




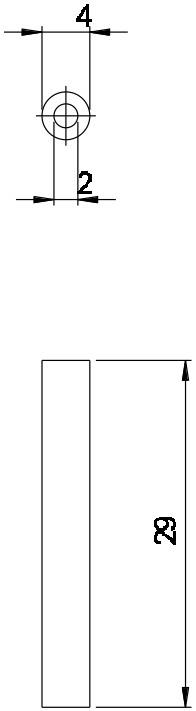
Autor: Johannes Teiwes, Marc Tabie Datum: 10.04.2008 Material: Pom schwarz		Deutsches Forschungszentrum für Künstliche Intelligenz DFKI-Labor Bremen - Forschungsgruppe Robotik Robert-Hooke-Straße 5 - 28359 Bremen - 0421-218-64100 www.dfki.de/robotik - fax 0421-218-64150
Maßstab 2:1	Blatt 1 von 1 Format A4 Alle Angaben in Millimeter	Name: Ballauslaß
Kontakt: 0421/218 - 64168 / jteiwes@tzi.de, mtabi@tzi.de		Projekt: BRIO 2 · Zeichnungsnummer: 0008 · Revision:
Dieses Dokument ist Eigentum der DFKI GmbH und darf weder an Dritte weitergegeben noch veröffentlicht werden.		
Allgemeintoleranz ISO 2768 - m		Dateiname: Teil 8

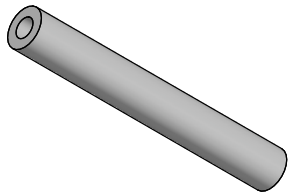




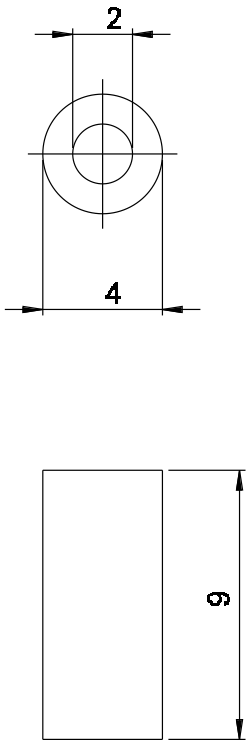


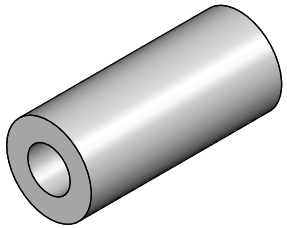
Autor: Johannes Teiwes Marc Tabie Datum: 10.04.2008 Material: Pom schwarz		Deutsches Forschungszentrum für Künstliche Intelligenz DFKI-Labor Bremen - Forschungsgruppe Robotik Robert-Hooke-Straße 5 - 28359 Bremen - 0421-218-64100 www.dfki.de/robotik - fax 0421-218-64150
Maßstab 10:1	Blatt 1 von 1 Format A4 Alle Angaben in Millimeter	Name: hülse 1
Kontakt: 0421/218 - 64166 / jteiwes@tzi.de, mtabi@tzi.de		Projekt: BRIO 2 / Zeichnungsnummer: 0009 / Revision:
Dieses Dokument ist Eigentum der DFKI GmbH und darf weder an Dritte weitergegeben noch veröffentlicht werden.		
Allgemeintoleranz ISO 2768 - m		Dateiname: Teil 9



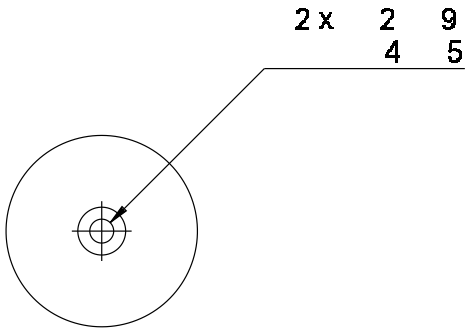


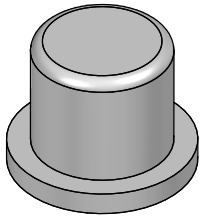
Autor: Johannes Teiwes Marc Tabie Datum: 10.04.2008 Material: Pom schwarz		Deutsches Forschungszentrum für Künstliche Intelligenz DFKI-Labor Bremen - Forschungsgruppe Robotik Robert-Hooke-Straße 5 - 28359 Bremen - 0421-218-64100 www.dfki.de/robotik - fax 0421-218-64150
Maßstab 2:1	Blatt 1 von 1 Format A4 Alle Angaben in Millimeter	Name: Hülse Lteil groß
Kontakt: 0421/218 - 64166 / jteiwes@tzi.de, mtabi@tzi.de		Projekt: BRIO 2 — Zeichnungsnummer: 0010 — Revision:
Dieses Dokument ist Eigentum der DFKI GmbH und darf weder an Dritte weitergegeben noch veröffentlicht werden.		
Allgemeintoleranz ISO 2768 - m		Dateiname: Teil 10

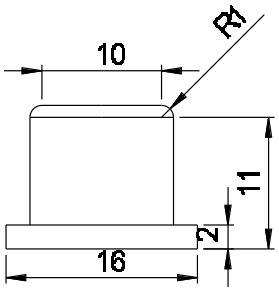




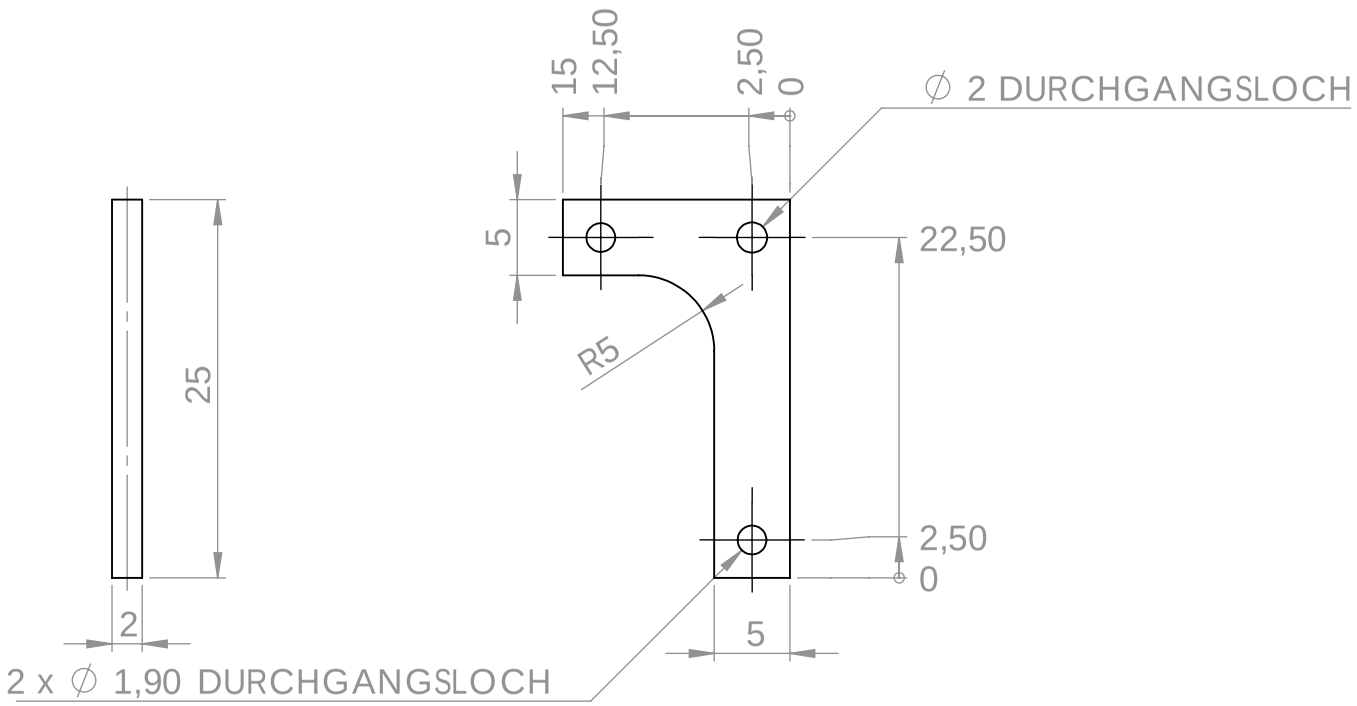
Autor: Johannes Teiwes Marc Tabie Datum: 10.04.2008 Material: Pom schwarz		Deutsches Forschungszentrum für Künstliche Intelligenz DFKI-Labor Bremen - Forschungsgruppe Robotik Robert-Hooke-Straße 5 - 28359 Bremen - 0421-218-64100 www.dfki.de/robotik - fax 0421-218-64150
Maßstab 5:1	Blatt 1 von 1 Format A4 Alle Angaben in Millimeter	Name: Hülse Lteil klein
Kontakt: 0421/218 - 64166 / jteiwes@tzi.de, mtabi@tzi.de		Projekt: BRIO 2 — Zeichnungsnummer: 0011 — Revision:
Dieses Dokument ist Eigentum der DFKI GmbH und darf weder an Dritte weitergegeben noch veröffentlicht werden.		
Allgemeintoleranz ISO 2768 - m		Dateiname: Teil 11

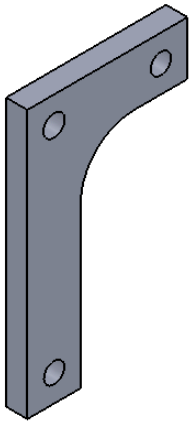




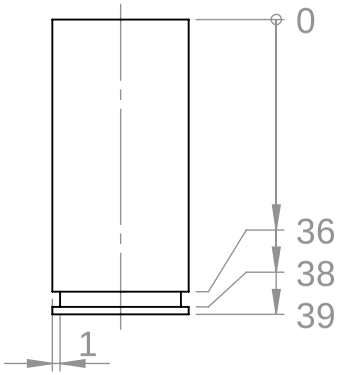


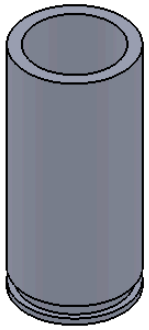
Autor: Johannes Teiwes Marc Tabie Datum: 10.04.2008 Material: Pom schwarz		Deutsches Forschungszentrum für Künstliche Intelligenz DFKI-Labor Bremen - Forschungsgruppe Robotik Robert-Hooke-Straße 5 - 28359 Bremen - 0421-218-64100 www.dfki.de/robotik - fax 0421-218-64150
Maßstab 2:1	Blatt 1 von 1 Format A4 Alle Angaben in Millimeter	Name: knopf anbau mechanisch
Kontakt: 0421/218 - 64166 / jteiwes@tzi.de, mtabi@tzi.de		Projekt: BRIO 2 — Zeichnungsnummer: 0012 — Revision:
Dieses Dokument ist Eigentum der DFKI GmbH und darf weder an Dritte weitergegeben noch veröffentlicht werden.		
Allgemeintoleranz ISO 2768 - m		Dateiname: Teil 12

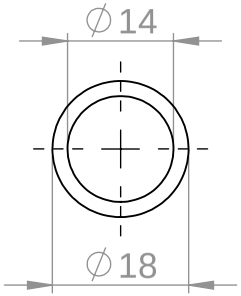




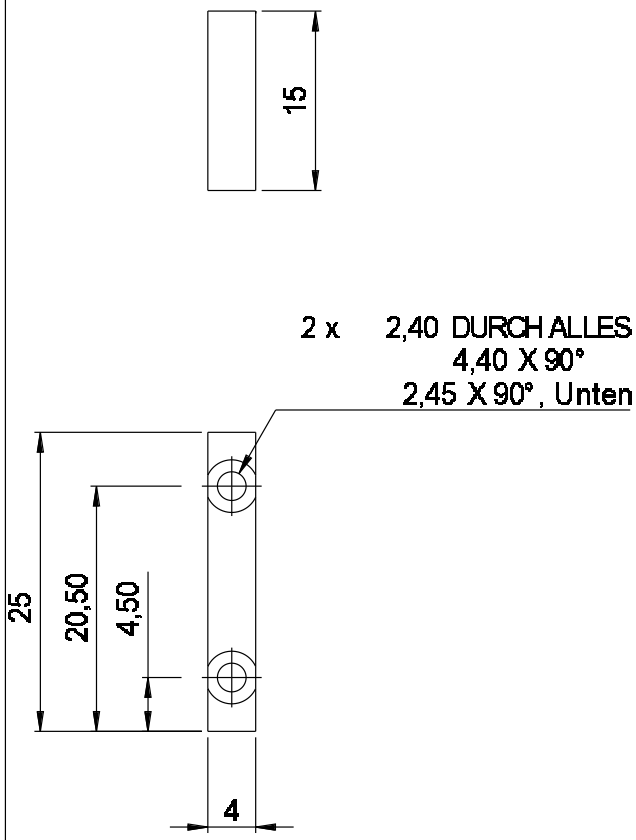
Autor: Johannes Teiwes, Marc Tabie Datum: 10.04.2008 Material: Aluminium		Deutsches Forschungszentrum für Künstliche Intelligenz DFKI-Labor Bremen - Forschungsgruppe Robotik Robert-Hooke-Straße 5 - 28359 Bremen - 0421-218-64100 www.dfki.de/robotik - fax 0421-218-64150
Maßstab 2:1	Blatt 1 von 1 Format A4 Alle Angaben in Millimeter	Name: L teil
Kontakt: 0421/218 - 64168 / jteiwes@tzi.de, mtabi@tzi.de		Projekt: BRIO 2 · Zeichnungsnummer: 0013 · Revision:
Dieses Dokument ist Eigentum der DFKI GmbH und darf weder an Dritte weitergegeben noch veröffentlicht werden.		
Allgemeintoleranz ISO 2768 - m		Dateiname: Teil 13

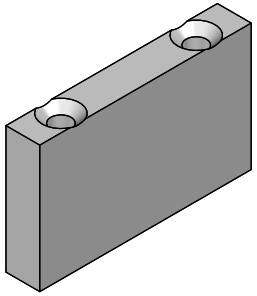




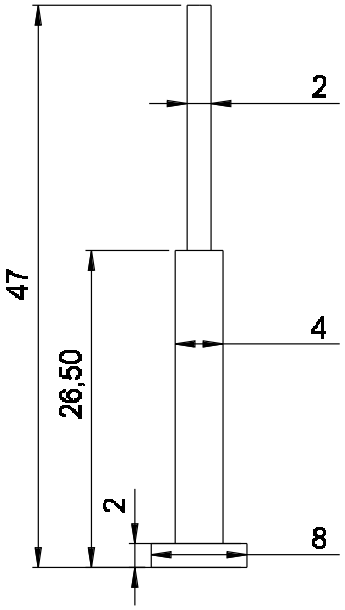


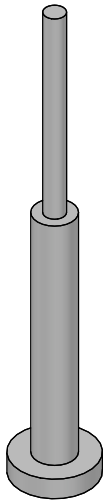
Autor: Johannes Teiwes, Marc Tabie Datum: 10.04.2008 Material: Pom schwarz		Deutsches Forschungszentrum für Künstliche Intelligenz DFKI-Labor Bremen - Forschungsgruppe Robotik Robert-Hooke-Straße 5 - 28359 Bremen - 0421-218-64100 www.dfki.de/robotik - fax 0421-218-64150
Maßstab 1:1	Blatt 1 von 1 Format A4 Alle Angaben in Millimeter	Name: Röhre klein
Kontakt: 0421/218 - 64168 / jteiwes@tzi.de, mtabi@tzi.de		Projekt: BRIO 2 — Zeichnungsnummer: 0014 — Revision:
Dieses Dokument ist Eigentum der DFKI GmbH und darf weder an Dritte weitergegeben noch veröffentlicht werden.		
Allgemeintoleranz ISO 2768 - m		Dateiname: Teil 14



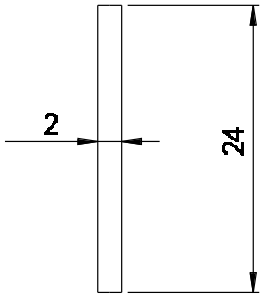


Autor: Johannes Teiwes, Marc Tabie Datum: 10.04.2008 Material: Pom schwarz		Deutsches Forschungszentrum für Künstliche Intelligenz DFKI-Labor Bremen - Forschungsgruppe Robotik Robert-Hooke-Straße 5 - 28359 Bremen - 0421-218-64100 www.dfki.de/robotik - fax 0421-218-64150
Maßstab 2:1	Blatt 1 von 1 Format A4 Alle Angaben in Millimeter	Name: Servo Auslöser
Kontakt: 0421/218 - 64166 / jteiwes@tzi.de, mtabi@tzi.de		Projekt: BRIO 2 — Zeichnungsnummer: 0015 — Revision:
Dieses Dokument ist Eigentum der DFKI GmbH und darf weder an Dritte weitergegeben noch veröffentlicht werden.		
Allgemeintoleranz ISO 2768 - m		Dateiname: Teil 15

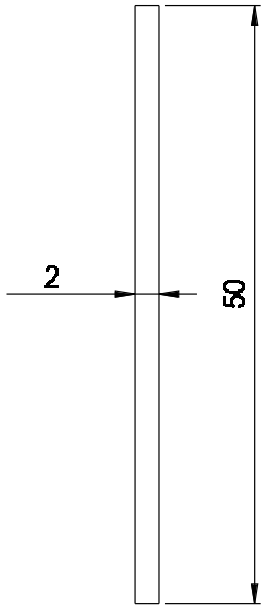




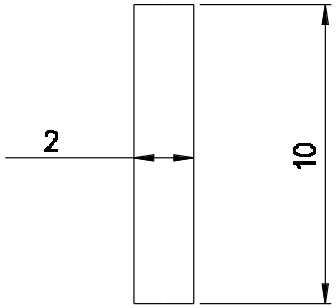
Autor: Johannes Teiwes Marc Tabie Datum: 10.04.2008 Material: Pom schwarz	Deutsches Forschungszentrum für Künstliche Intelligenz DFKI-Labor Bremen - Forschungsgruppe Robotik Robert-Hooke-Straße 5 - 28359 Bremen - 0421-218-64100 www.dfki.de/robotik - fax 0421-218-64150
Maßstab 2:1 Blatt 1 von 1 Format A4 Alle Angaben in Millimeter	Name: Stift für Anbau mechanisch
Kontakt: 0421/218 - 64166 / jteiwes@tzi.de, mtabi@tzi.de	Projekt: BRIO 2 · Zeichnungsnummer: 0016 · Revision:
Dieses Dokument ist Eigentum der DFKI GmbH und darf weder an Dritte weitergegeben noch veröffentlicht werden.	
Allgemeintoleranz ISO 2768 - m	Dateiname: Teil 16



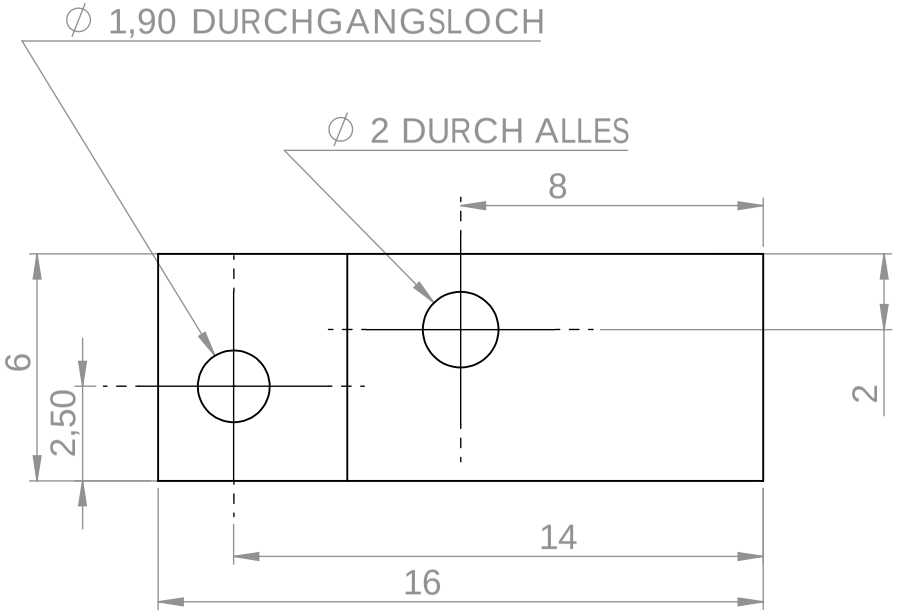
Autor: Johannes Teiwes Marc Tabie Datum: 10.04.2008 Material: Edelstahl	Deutsches Forschungszentrum für Künstliche Intelligenz DFKI-Labor Bremen - Forschungsgruppe Robotik Robert-Hooke-Straße 5 - 28359 Bremen - 0421-218-64100 www.dfki.de/robotik - fax 0421-218-64150
Maßstab 2:1 Blatt 1 von 1 Format A4 Alle Angaben in Millimeter	Name: Stift für die Wippe
Kontakt: 0421/218 - 64166 / jteiwes@tzi.de, mtabi@tzi.de	Projekt: BRIO 2 — Zeichnungsnummer: 0017 — Revision:
Dieses Dokument ist Eigentum der DFKI GmbH und darf weder an Dritte weitergegeben noch veröffentlicht werden.	
Allgemeintoleranz ISO 2768 - m	Dateiname: Teil 17

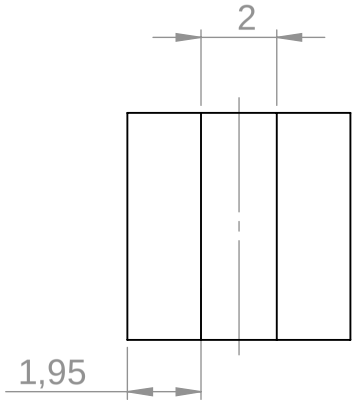


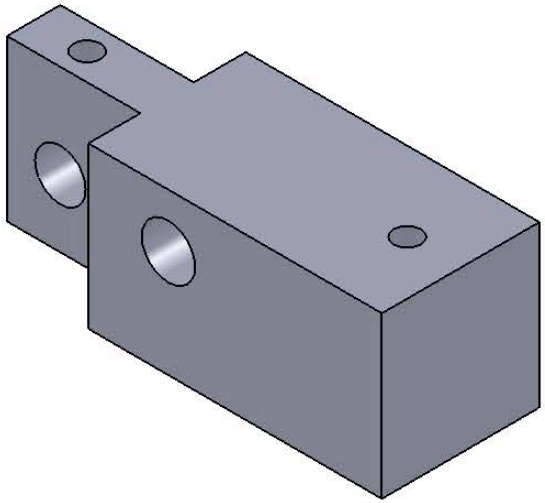
Autor: Johannes Teiwes Marc Tabie Datum: 10.04.2008 Material: Edelstahl	Deutsches Forschungszentrum für Künstliche Intelligenz DFKI-Labor Bremen - Forschungsgruppe Robotik Robert-Hooke-Straße 5 - 28359 Bremen - 0421-218-64100 www.dfki.de/robotik - fax 0421-218-64150
Maßstab 2:1 Blatt 1 von 1 Format A4 Alle Angaben in Millimeter	Name: Stift für L teil
Kontakt: 0421/218 - 64166 / jteiwes@tzi.de, mtabi@tzi.de	Projekt: BRIO 2 · Zeichnungsnummer: 0018 · Revision:
Dieses Dokument ist Eigentum der DFKI GmbH und darf weder an Dritte weitergegeben noch veröffentlicht werden.	
Allgemeintoleranz ISO 2768 - m	Dateiname: Teil 18

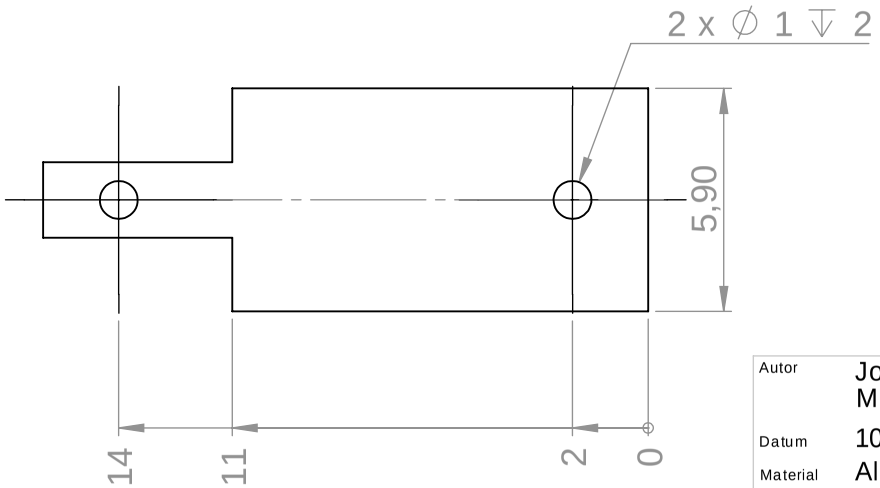


Autor: Johannes Teiwes Marc Tabie Datum: 10.04.2008 Material: Pom schwarz	Deutsches Forschungszentrum für Künstliche Intelligenz DFKI-Labor Bremen - Forschungsgruppe Robotik Robert-Hooke-Straße 5 - 28359 Bremen - 0421-218-64100 www.dfki.de/robotik - fax 0421-218-64150
Maßstab 5:1 Blatt 1 von 1 Format A4 Alle Angaben in Millimeter	Name: stift für verbindung
Kontakt: 0421/218 - 64166 / jteiwes@tzi.de, mtabi@tzi.de	Projekt: BRIO 2 · Zeichnungsnummer: 0019 · Revision:
Dieses Dokument ist Eigentum der DFKI GmbH und darf weder an Dritte weitergegeben noch veröffentlicht werden.	
Allgemeintoleranz ISO 2768 - m	Dateiname: Teil 19

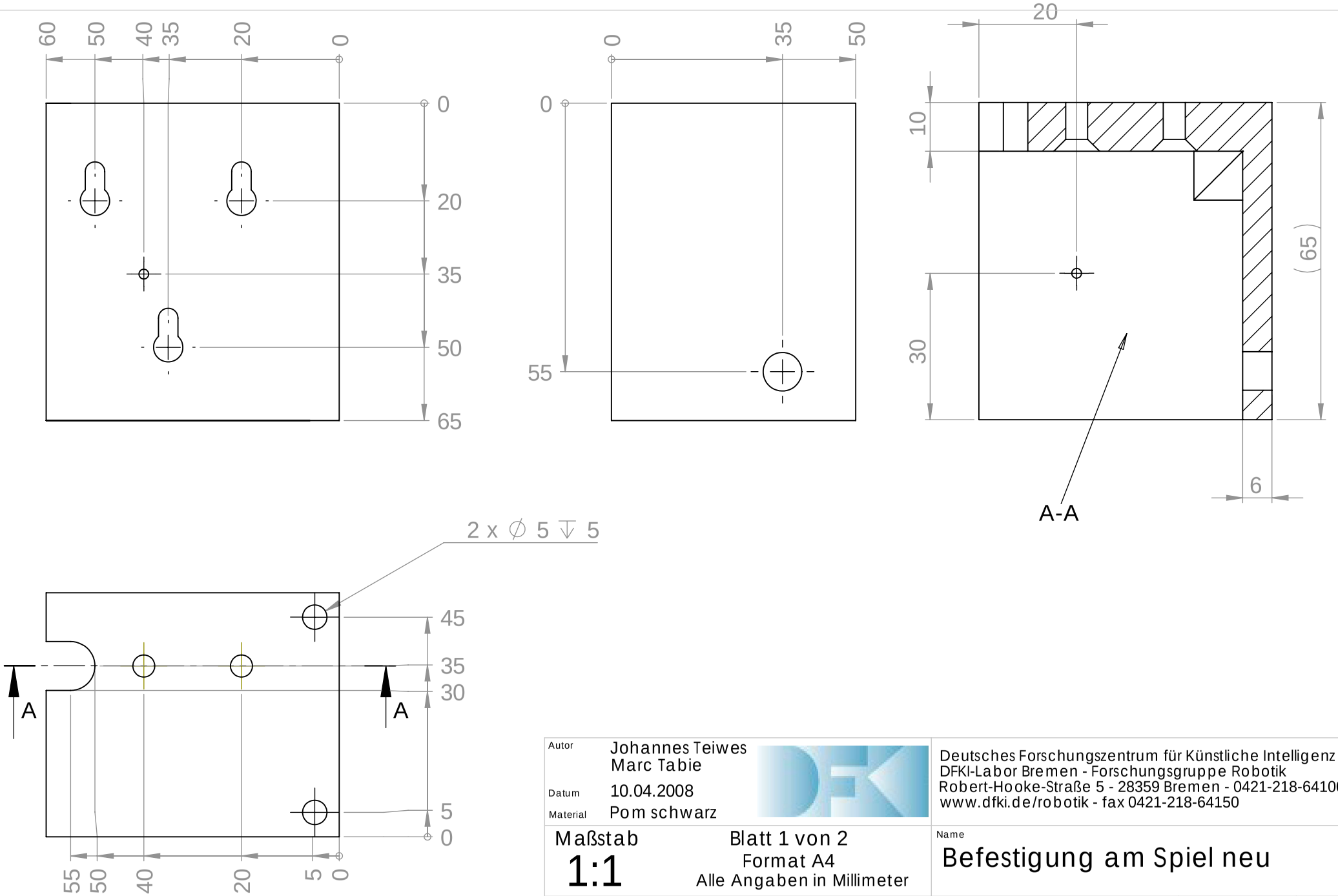




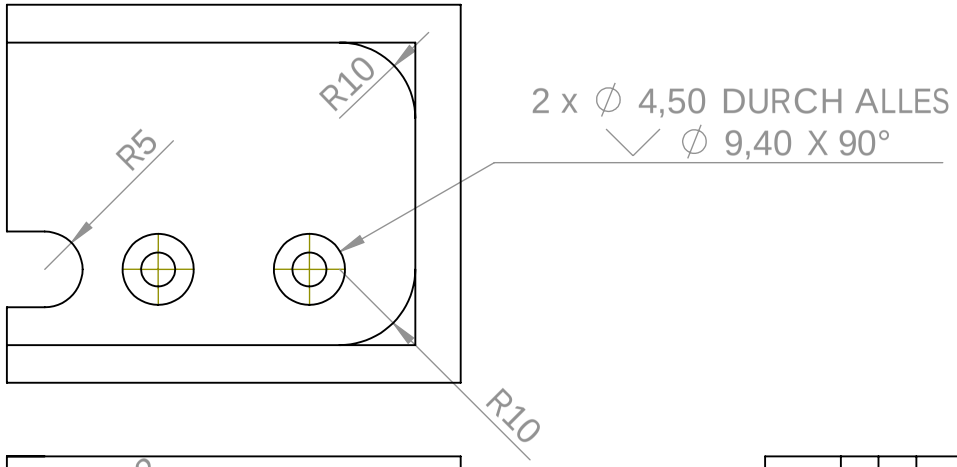


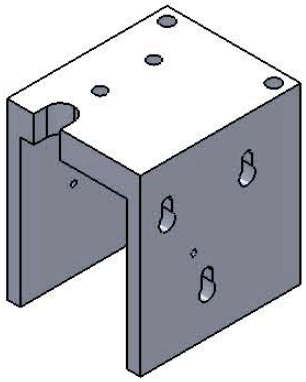


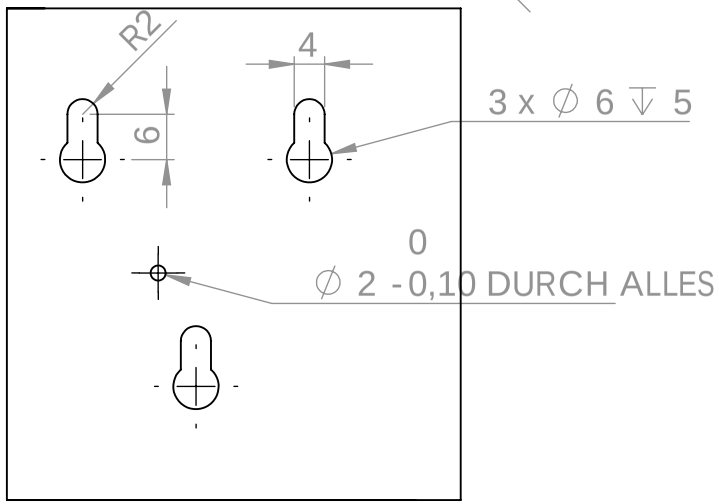
Autor: Johannes Teiwes, Marc Tabie Datum: 10.04.2008 Material: Aluminium		Deutsches Forschungszentrum für Künstliche Intelligenz DFKI-Labor Bremen - Forschungsgruppe Robotik Robert-Hooke-Straße 5 - 28359 Bremen - 0421-218-64100 www.dfki.de/robotik - fax 0421-218-64150
Maßstab 5:1	Blatt 1 von 1 Format A4 Alle Angaben in Millimeter	Name: wippe
Kontakt: 0421/218 - 64168 / jteiwes@tzi.de, mtabi@tzi.de		Projekt: BRIO 2 · Zeichnungsnummer: 0022 · Revision:
Dieses Dokument ist Eigentum der DFKI GmbH und darf weder an Dritte weitergegeben noch veröffentlicht werden.		
Allgemeintoleranz ISO 2768 - m		Dateiname: Teil 22

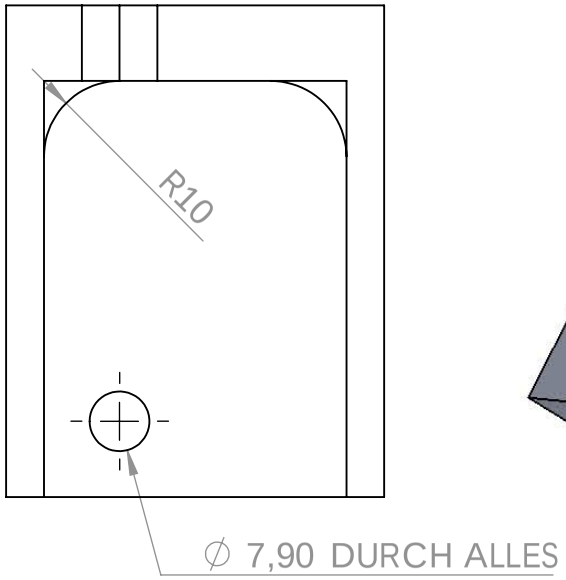


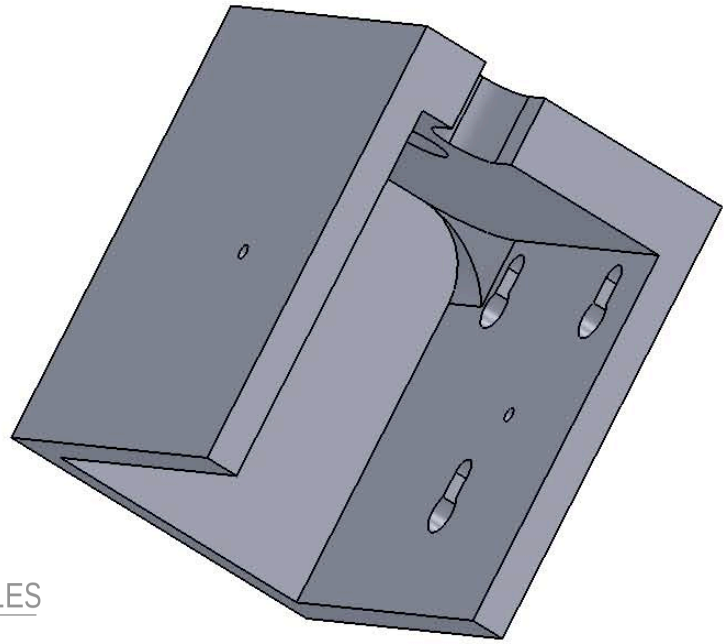
Autor: Johannes Teiwes, Marc Tabie Datum: 10.04.2008 Material: Pom schwarz		Deutsches Forschungszentrum für Künstliche Intelligenz DFKI-Labor Bremen - Forschungsgruppe Robotik Robert-Hooke-Straße 5 - 28359 Bremen - 0421-218-64100 www.dfki.de/robotik - fax 0421-218-64150
Maßstab 1:1	Blatt 1 von 2 Format A4 Alle Angaben in Millimeter	Name: Befestigung am Spiel neu
Kontakt: 0421/218 - 64168 / jteiwes@tzi.de, mtabi@tzi.de		Projekt: BRIO 2 · Zeichnungsnummer: 0023 · Revision:
Dieses Dokument ist Eigentum der DFKI GmbH und darf weder an Dritte weitergegeben noch veröffentlicht werden.		
Allgemeintoleranz ISO 2768 - m		Dateiname: Teil 23

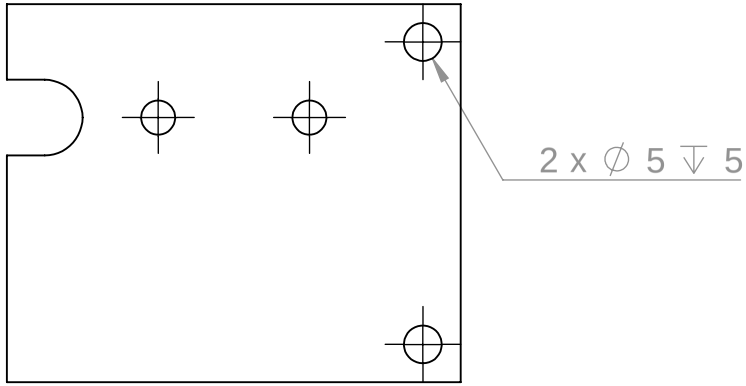




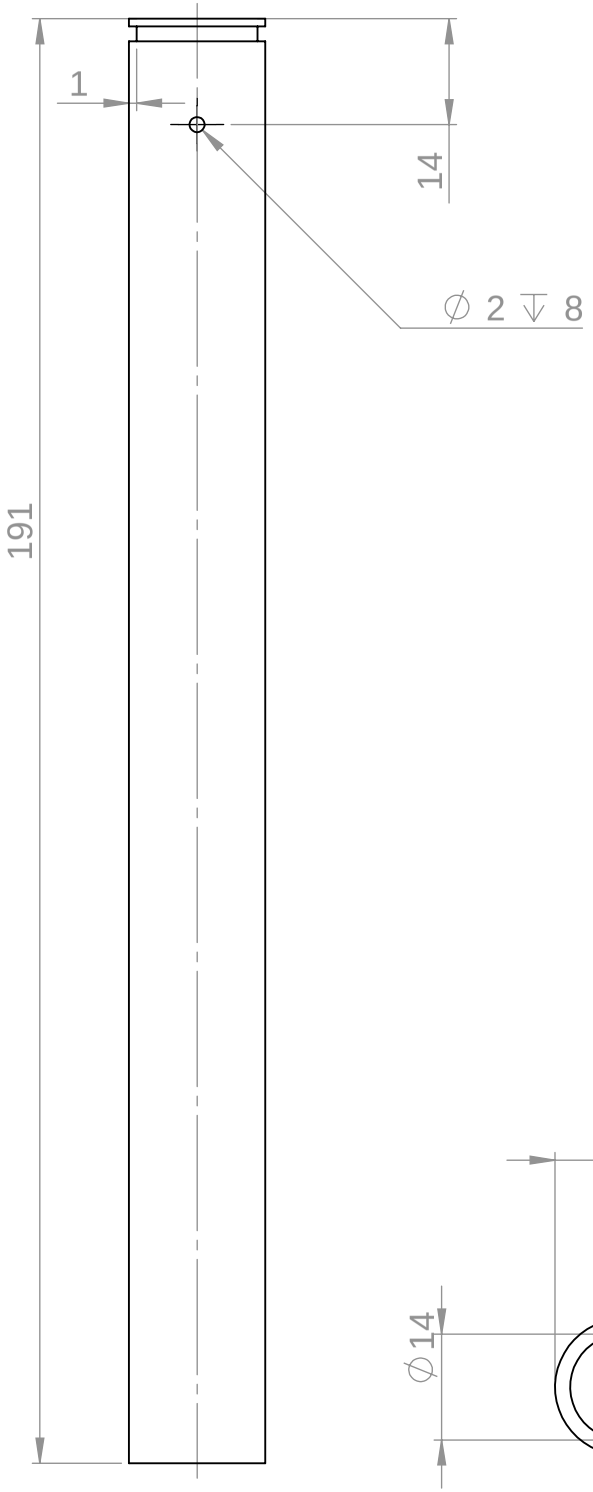


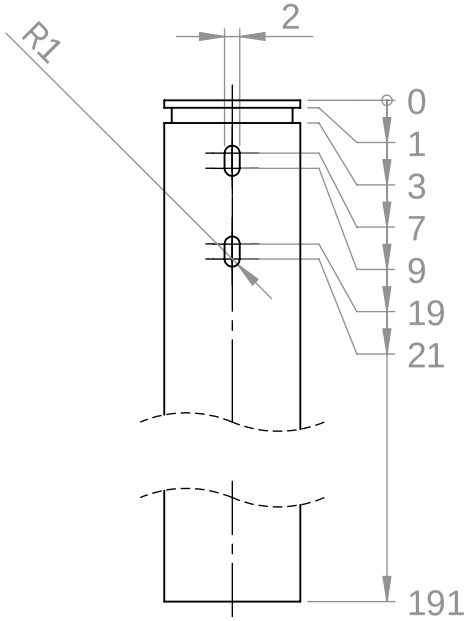


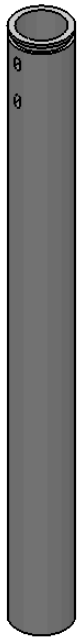


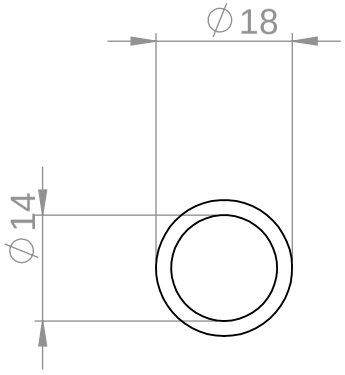


Autor: Johannes Teiwes, Marc Tabie Datum: 10.04.2008 Material: Pom schwarz		Deutsches Forschungszentrum für Künstliche Intelligenz DFKI-Labor Bremen - Forschungsgruppe Robotik Robert-Hooke-Straße 5 - 28359 Bremen - 0421-218-64100 www.dfki.de/robotik - fax 0421-218-64150
Maßstab 1:1	Blatt 2 von 2 Format A4 Alle Angaben in Millimeter	Name: Befestigung am Spiel neu
Kontakt: 0421/218 - 64168 / jteiwes@tzi.de, mtabi@tzi.de		Projekt: BRIO 2 — Zeichnungsnummer: 0023 — Revision:
Dieses Dokument ist Eigentum der DFKI GmbH und darf weder an Dritte weitergegeben noch veröffentlicht werden.		
Allgemeintoleranz ISO 2768 - m		Dateiname: Teil 23

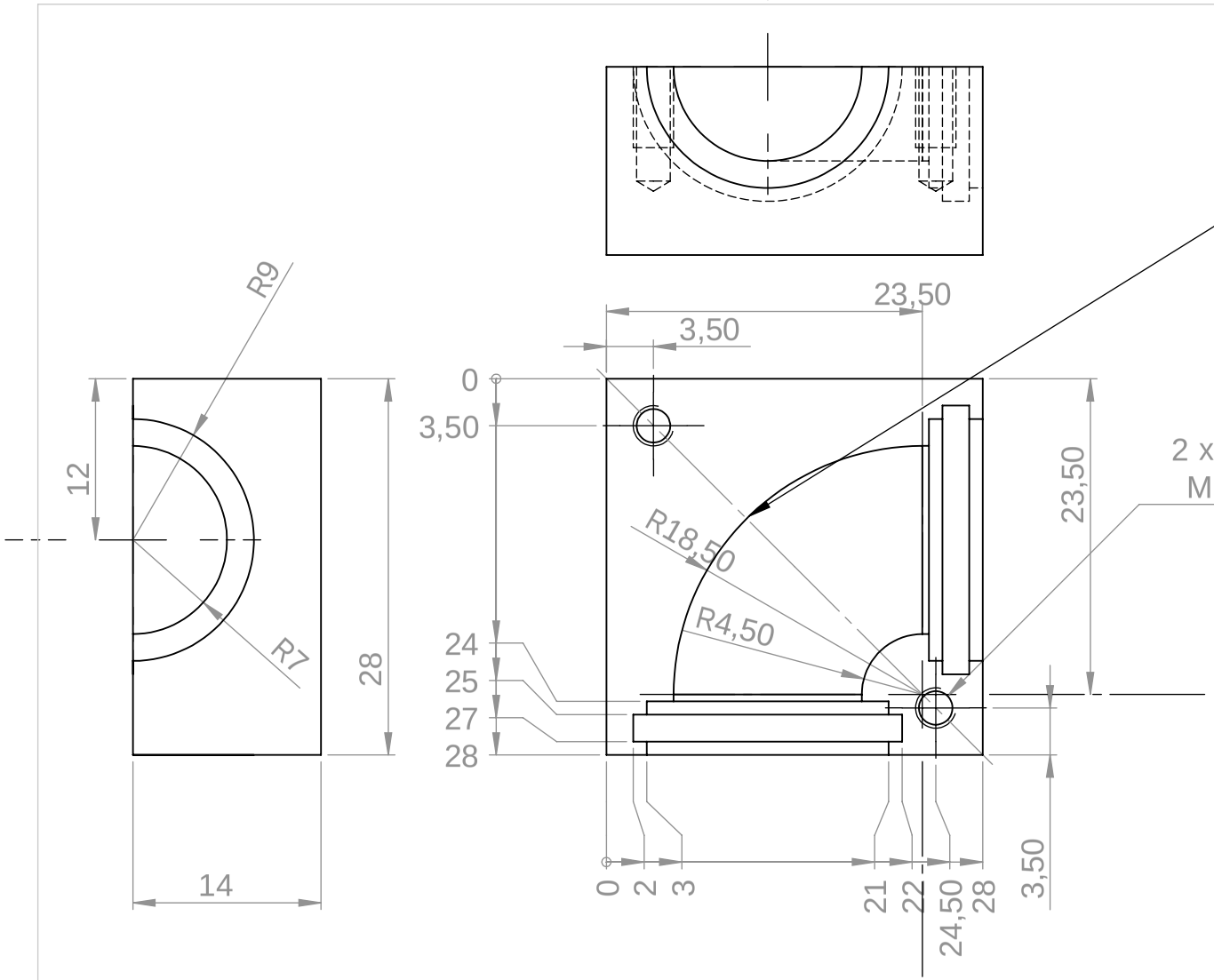


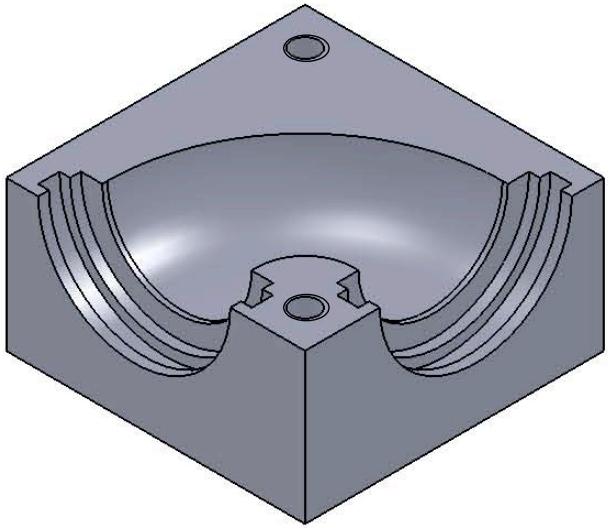




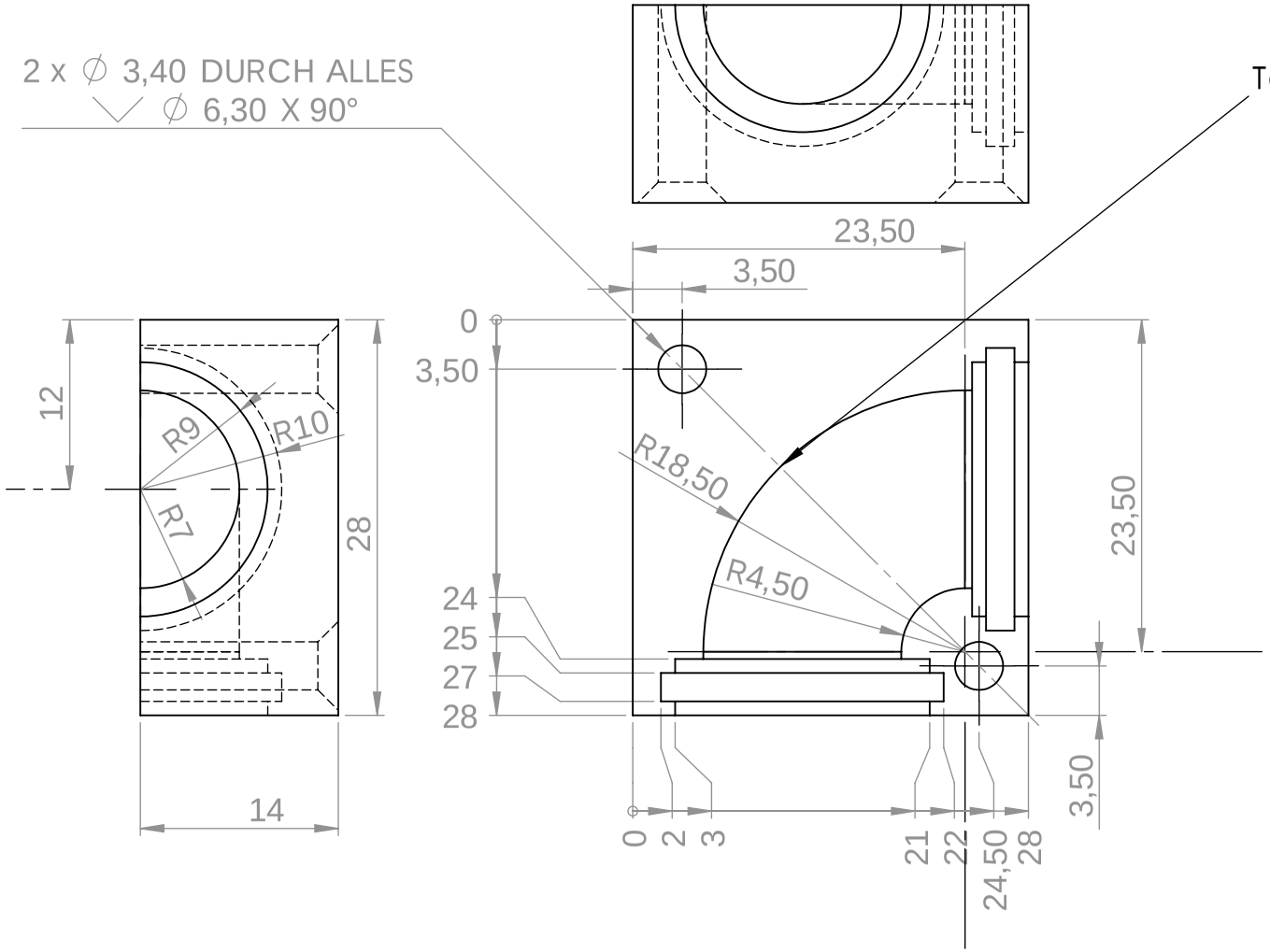


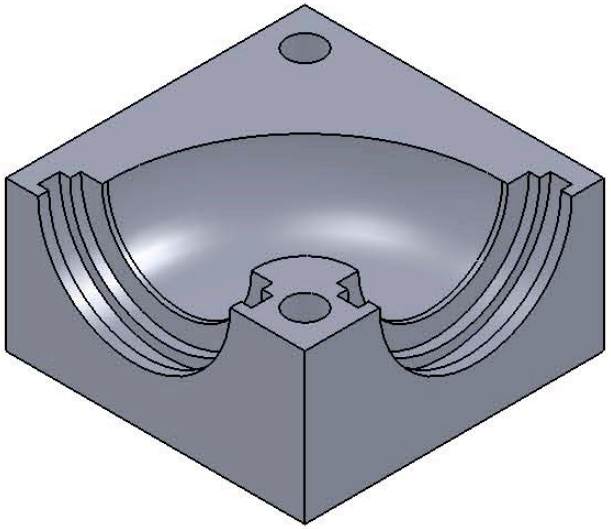
Autor: Johannes Teiwes, Marc Tabie Datum: 10.04.2008 Material: Pom schwarz		Deutsches Forschungszentrum für Künstliche Intelligenz DFKI-Labor Bremen - Forschungsgruppe Robotik Robert-Hooke-Straße 5 - 28359 Bremen - 0421-218-64100 www.dfki.de/robotik - fax 0421-218-64150
Maßstab 1:1	Blatt 1 von 1 Format A4 Alle Angaben in Millimeter	Name: Röhre lang
Kontakt: 0421/218 - 64168 / jteiwes@tzi.de, mtabi@tzi.de		Projekt: BRIO 2 · Zeichnungsnummer: 0024 · Revision:
Dieses Dokument ist Eigentum der DFKI GmbH und darf weder an Dritte weitergegeben noch veröffentlicht werden.		
Allgemeintoleranz ISO 2768 - m		Dateiname: Teil 24



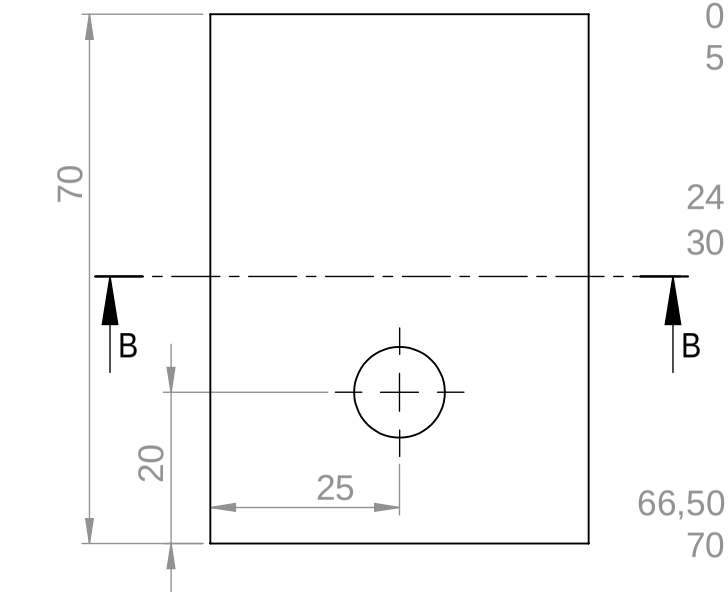


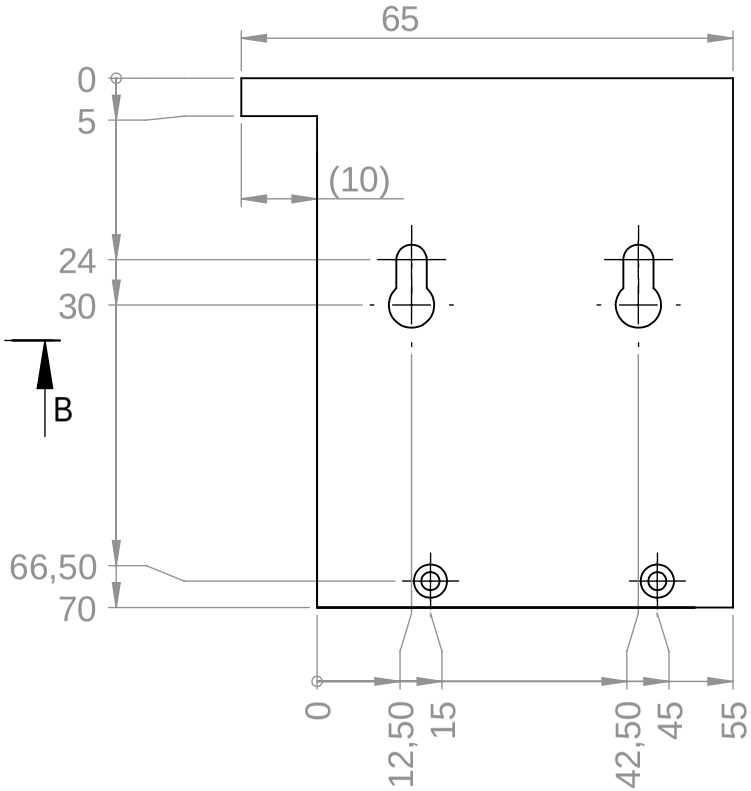
Autor: Johannes Teiwes, Marc Tabie Datum: 10.04.2008 Material: Pom schwarz		Deutsches Forschungszentrum für Künstliche Intelligenz DFKI-Labor Bremen - Forschungsgruppe Robotik Robert-Hooke-Straße 5 - 28359 Bremen - 0421-218-64100 www.dfki.de/robotik - fax 0421-218-64150
Maßstab 2:1	Blatt 1 von 1 Format A4 Alle Angaben in Millimeter	Name: Kurve oben
Kontakt: 0421/218 - 64168 / jteiwes@tzi.de, mtabi@tzi.de		Projekt: BRIO 2 · Zeichnungsnummer: 0025 · Revision:
Dieses Dokument ist Eigentum der DFKI GmbH und darf weder an Dritte weitergegeben noch veröffentlicht werden.		
Allgemeintoleranz ISO 2768 - m		Dateiname: Teil 25

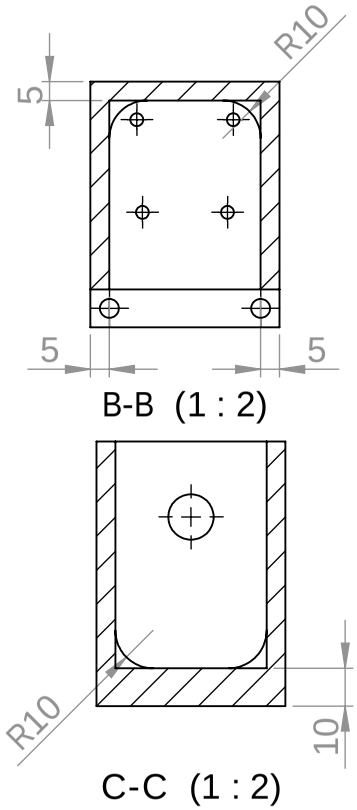


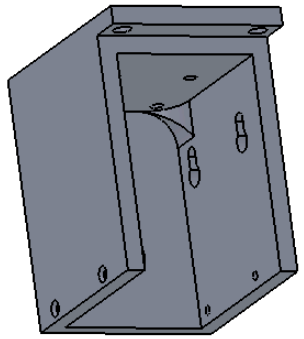


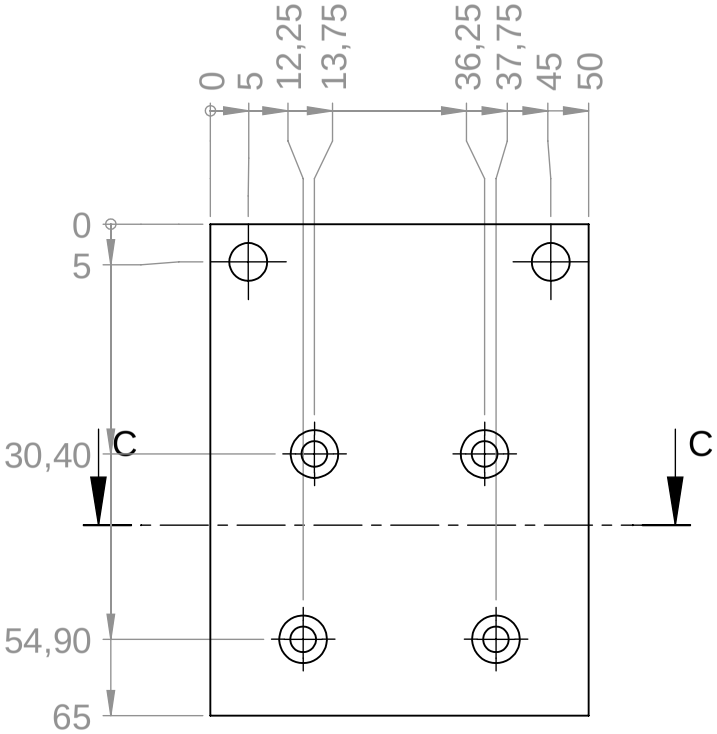
Autor: Johannes Teiwes, Marc Tabie Datum: 10.04.2008 Material: Pom schwarz		Deutsches Forschungszentrum für Künstliche Intelligenz DFKI-Labor Bremen - Forschungsgruppe Robotik Robert-Hooke-Straße 5 - 28359 Bremen - 0421-218-64100 www.dfki.de/robotik - fax 0421-218-64150
Maßstab 2:1	Blatt 1 von 1 Format A4 Alle Angaben in Millimeter	Name: kurve unten
Kontakt: 0421/218 - 64168 / jteiwes@tzi.de, mtabi@tzi.de		Projekt: BRIO 2 · Zeichnungsnummer: 0026 · Revision:
Dieses Dokument ist Eigentum der DFKI GmbH und darf weder an Dritte weitergegeben noch veröffentlicht werden.		
Allgemeintoleranz ISO 2768 - m		Dateiname: Teil 26



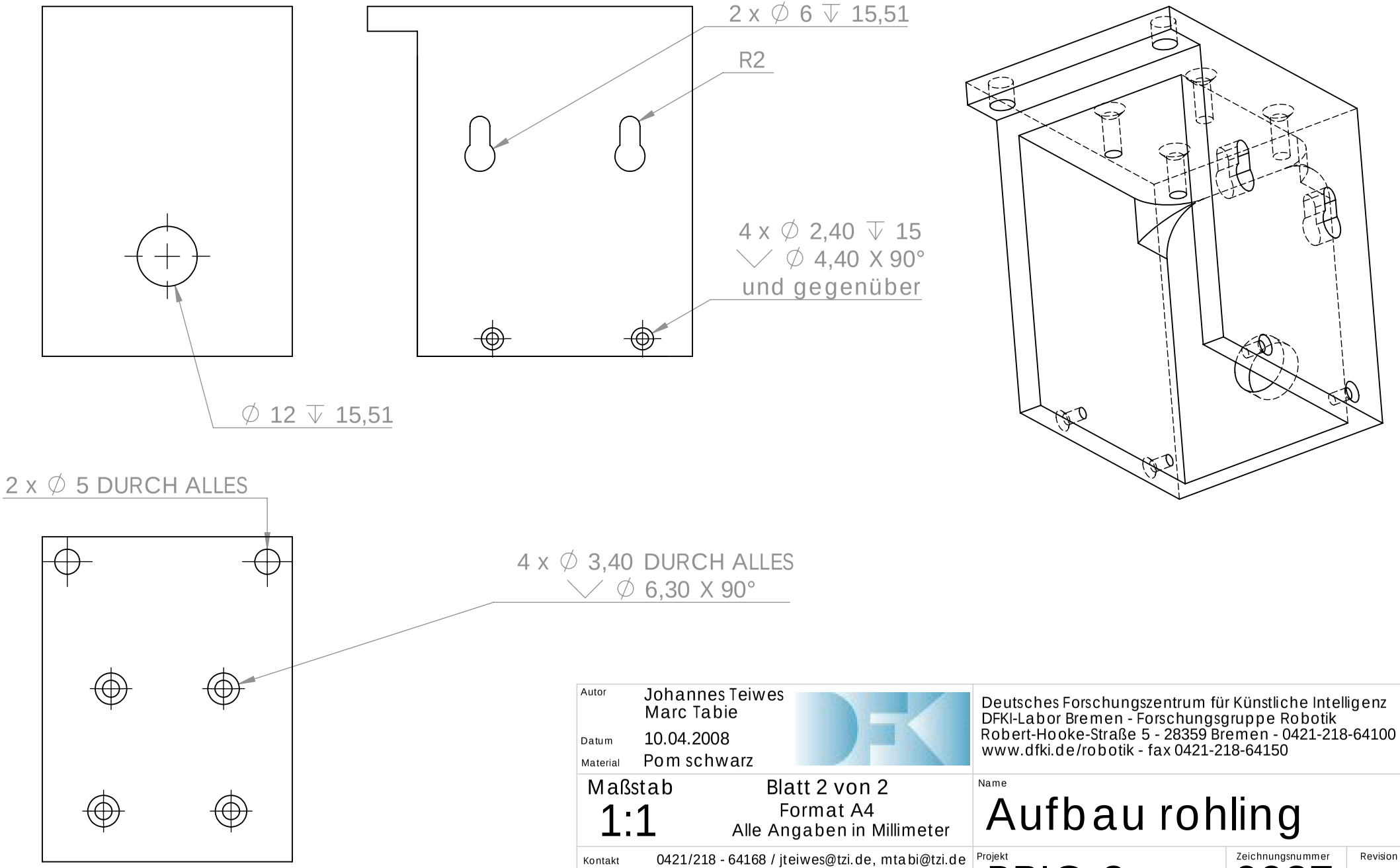








Autor: Johannes Teiwes, Marc Tabie Datum: 10.04.2008 Material: Pom schwarz		Deutsches Forschungszentrum für Künstliche Intelligenz DFKI-Labor Bremen - Forschungsgruppe Robotik Robert-Hooke-Straße 5 - 28359 Bremen - 0421-218-64100 www.dfki.de/robotik - fax 0421-218-64150
Maßstab 1:1	Blatt 1 von 2 Format A4 Alle Angaben in Millimeter	Name: Aufbau rohling
Kontakt: 0421/218 - 64168 / jteiwes@tzi.de, mtabi@tzi.de		Projekt: BRIO 2 — Zeichnungsnummer: 0027 — Revision:
Dieses Dokument ist Eigentum der DFKI GmbH und darf weder an Dritte weitergegeben noch veröffentlicht werden.		
Allgemeintoleranz ISO 2768 - m		Dateiname: Teil 27



Autor: Johannes Teiwes, Marc Tabie Datum: 10.04.2008 Material: Pom schwarz		Deutsches Forschungszentrum für Künstliche Intelligenz DFKI-Labor Bremen - Forschungsgruppe Robotik Robert-Hooke-Straße 5 - 28359 Bremen - 0421-218-64100 www.dfki.de/robotik - fax 0421-218-64150
Maßstab 1:1	Blatt 2 von 2 Format A4 Alle Angaben in Millimeter	Name: Aufbau rohling
Kontakt: 0421/218 - 64168 / jteiwes@tzi.de, mtabi@tzi.de		Projekt: BRIO 2 — Zeichnungsnummer: 0027 — Revision:
Dieses Dokument ist Eigentum der DFKI GmbH und darf weder an Dritte weitergegeben noch veröffentlicht werden.		
Allgemeintoleranz ISO 2768 - m		Dateiname: Teil 27