

# Bau eines Verteilzentrums mit LEGO Mindstorms

Joachim Wanke, B. Sc. Elektro- und Informationstechnik  
Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg

**Kurzfassung**—Modernes Einkaufen erfolgt immer öfter per Knopfdruck. Der Online-Handel boomt. Um Kosten zu senken und die Effizienz zu steigern, bietet sich für Unternehmen eine Automatisierung ihrer Logistik an. Im Rahmen eines Projektseminars an der Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg wurde ein Modell für die Automatisierung von Verteilzentren entwickelt. Die Konstruktion erfolgte mit LEGO Mindstorms. In das Programm der Anlage gibt man mehrere Bestellungen ein. Die Anlage erkennt die Produkte, wählt sie aus und verteilt deren Exemplare richtig auf die Bestellungen. Dieses Paper erläutert die mechanische Konstruktion, die Programmierung mittels mehrerer verknüpfter Funktionen und den Ablauf der Verteilung. Resultat ist eine funktionstüchtige Anlage, die größtenteils problemlos funktioniert, aber noch Verbesserungspotential hat.

**Schlagwörter**—Automatisierung, LEGO, Logistik, Mindstorms, Onlinehandel, Verteilzentrum

## I. EINLEITUNG

**E**FFIZIENT zu arbeiten, ist das Ziel jedes Unternehmens, das wettbewerbsfähig bleiben will. Um im Preiskampf mit anderen Anbietern zu bestehen, sparen Unternehmen, wo immer sie können. Eine Möglichkeit zur Kostenreduzierung liegt in der Automatisierung der Logistik. Eine zentrale Rolle nehmen dabei Verteilzentren ein. Hier werden angebotene Artikel auf ihre Bestellungen verteilt.

Eine der heute boomenden Branchen ist der Onlinehandel. Hier ergibt sich eine besonders einfache Möglichkeit, Prozesse zu automatisieren. Die Branche ist sehr dynamisch und wächst stabil [1], daher muss viel neue Infrastruktur entstehen. Bei deren Aufbau können von Anfang an technische Innovationen umgesetzt werden. Verteilzentren bieten sich deshalb besonders gut für die Automatisierung an.

Auf automatisierte Verteilzentren setzt beispielsweise Amazon. Bisher stellen Mitarbeiter die Bestellungen zusammen, in dem sie die bestellte Ware manuell einsammeln. Der Konzern will jedoch expandieren und plant neue Verteilzentren. Dort soll der Betrieb automatisiert werden. Amazon senkt so Kosten und steigert gleichzeitig das Tempo. [2] Ein automatisiertes Verteilzentrum erleichtert eine Erweiterung der Lager, man kommt mit wenigen Arbeitskräften aus und ist flexibler. [3]

## II. VORBETRACHTUNGEN

### A. Idee

Ziel des Projekts war der Bau eines Modells für ein solches automatisiertes Verteilzentrum. Grundlegend soll es verschiedenfarbige LEGO-Plastikkugeln sortieren. Jede Farbe entspricht je einem Produkt. Die Kugeln sind demnach die Produktexemplare. Zu Anfang sollen diese nach Produkten (Farbe) sortiert in Aufbewahrungsfächern liegen. Am Ende soll

jede Bestellung fertig zusammengestellt in je einem Bestellkorb liegen.

Das Verteilzentrum muss dazu verschiedene Aufgaben ausführen. Dazu gehört die Produkterkennung, umgesetzt durch den Farbsensor. Das richtige Produkt muss ausgewählt werden, zu den Bestellkörben transportiert und dort in den richtigen Bestellkorb einsortiert werden. Die Auswahl übernimmt im Modell die Fach-Wand, der Transport erfolgt über die Rutsche und die Einsortierung erfolgt über die Laufzeit des Förderbandes.

Zur konkreten Umsetzung des Projekts stand der LEGO-Mindstorms-Baukasten zur Verfügung. Zur Auswahl standen Sensoren für Farberkennung, Licht-/Helligkeitserkennung, Geräuscherkennung, Ultraschall und ein Tastsensor. Kernstück ist der programmierbare NXT-Stein. Er besitzt drei Ausgänge für Motoren und vier Eingänge für Sensoren (vgl. [4] S. 20).

### B. Konzept

Das Verteilzentrum sollte in der Lage sein, 4 verschiedene Produkte in jeweils variabler Stückzahl auf 5 Bestellungen zu verteilen. Zu Anfang sollten Exemplare jedes Produktes (d. h. Farbkugeln gleicher Farbe) in jeweils einem einzelnen Fach liegen. Die Anlage sollte nun ein Produkt nach dem anderen auswählen, und einzeln Exemplare aus ihren Fächern entnehmen. Auf einer Rutsche sollten diese nun auf ein Förderband rollen. Das Förderband sollte die Produktexemplare zur richtigen Position bringen, sodass die Anlage sie in die richtigen Bestellkörbe bringen konnte. Die Eingabe von bis zu 5 Bestellungen gleichzeitig sollte über ein Graphical User Interface (GUI) erfolgen. Aus Gründen der Effizienz werden zunächst alle bestellten Exemplare des ersten Produktes, dann des zweiten etc. verteilt.

Um den Aufwand der Anlage zu reduzieren, wurde im Lauf des Baus die Anzahl der Bestellkörbe von fünf auf vier und die Anzahl Produkte von vier auf drei verringert.

## III. HAUPTTEIL

### A. Mechanische Realisierung

Zunächst musste eine geeignete Konstruktion geschaffen werden. Dafür wird auf das Prinzip der Schwerkraft zurückgegriffen. So bewegen sich die Produktexemplare im Laufe der Sortierung immer weiter nach unten. Die Aufbewahrungsfächer liegen demnach oben. Sie sind entlang der Rutsche angeordnet, auf der die Produktexemplare zum Anfang des Förderbandes rutschen. Die Neigung der Rutsche ist gering, um unterschiedliche Geschwindigkeiten zu verhindern. Beim Auftreffen auf das Förderband wird das Produktexemplar durch hervorstehende Rillen gestoppt und in Position gehalten. Das Förderband fährt nun das Produktexemplar in eine Position direkt über dem richtigen Bestellkorb. Danach werden die

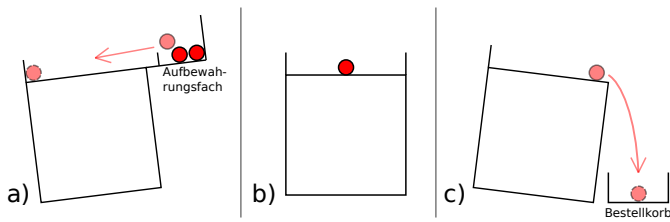


Abbildung 1. Kippmechanismus: a) Anlage nach vorne gekippt, b) Anlage nicht gekippt, c) Anlage nach hinten gekippt.

Produktexemplare seitlich vom Band geschoben und fallen so in den richtigen Bestellkorb.

Eine Hürde bei der Umsetzung bestand darin, dass der NXT-Baustein nur drei Ausgänge für Motoren hat (vgl. [4] S. 20). Also ging es darum, mit nur drei Motoren die Auswahl des Faches, Bewegung des Förderbandes, Transport aus dem Fach auf die Rutsche und Herunterschoben in den richtigen Bestellkorb zu realisieren. Wir entschlossen uns dazu, die zwei letztgenannten Aufgaben zusammenzufassen. Dazu ist die gesamte Vorrichtung in ihrer Längsachse kippbar. Nach vorne gekippt, fällt ein Produktexemplar bei geöffnetem Aufbewahrungsfach auf die Rutsche (vgl. Abbildung 1). Seitlich an der Rutsche und am Förderband ist einseitig eine Wand angebracht. Sie hindert das Produktexemplar daran, aus der Sortieranlage zu fallen. Das Produktexemplar rutscht zum Förderband. Nun fährt das Produktexemplar auf dem Förderband bis über den richtigen Bestellkorb. Die Anlage kippt in die andere Richtung. Auf der nun unten liegenden Seite ist keine Wand angebracht. So kann das Produktexemplar in den richtigen Bestellkorb fallen (vgl. Abbildung 1).

Der Farbsensor ist mit einem Arm an der Fach-Wand befestigt, sodass er sich über den Kugeln befindet und deren Farbe scannen kann.

Um ein Produktexemplar auf die Rutsche zu lassen, muss das richtige Aufbewahrungsfach geöffnet werden. Die Fächer sind an einer Stelle der an der Rutsche liegenden Seite offen. Zwischen dieser Öffnung und der Rutsche befindet sich eine bewegliche Fach-Wand. Sie hat in ihrer Mitte genau eine Öffnung, durch die ein Produktexemplar passt. Per Motor kann diese Fach-Wand so positioniert werden, dass sich ihre Öffnung genau an der Öffnung eines Aufbewahrungsfaches befindet. Somit kann ein Produktexemplar durch beide Öffnungen auf die Rutsche fallen. Sollen alle Fächer geschlossen sein, wird die Fach-Wand so positioniert, dass sich ihre Öffnung mit keiner der Fachöffnungen überschneidet.

Um sicherzustellen, dass nur eine Kugel gleichzeitig ausgegeben wird, ist der Boden jedes Aufbewahrungsfach teilweise beweglich (siehe Abb. 2). Auf den festen Teil des Bodens passt genau eine Kugel. An der Basis der Anlage (orange) ragt eine Stange bis zum Boden des Faches auf (blau eingezeichnet). Kippt die Anlage nach vorne (Abb. 2a), senkt sich der Boden des Aufbewahrungsfaches auf die Stange. Diese drückt daher den Boden des Faches nach oben. So rollen alle Kugeln im Fach in Richtung Öffnung. Kippt die Anlage nach hinten (Abb. 2b), dann hebt sich der Boden von der Stange und klappt so nach unten. Alle Kugeln bis auf eine (die genau auf den festen Teil

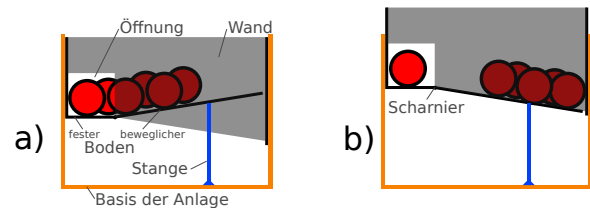


Abbildung 2. Vereinzelnungs-Mechanismus a) bei nach vorne gekippter Anlage, b) bei nach hinten gekippter Anlage.

des Bodens passt) rollen von der Öffnung weg. Da im Zustand (b) das Fach geöffnet wird, kann nur eine Kugel gleichzeitig ausgegeben werden.

### B. Programmierung

Die gesamte Programmierung erfolgte in der Programmiersprache MATLAB. Gesteuert wird das Verteilzentrum über mehrere Funktionen, die sich gegenseitig und teilweise rekursiv aufrufen. An oberster Stelle steht dabei die Main-Funktion.

Für die Bewegung des Kippens, des Förderbandes und der Fach-Wand sind entlang der Bewegungsrichtung Positionen festgelegt. Jede Position ist für unterschiedliche Zwecke nützlich. Der Kippmechanismus kennt zwei, die Fach-Wand 5 und das Förderband 4 Positionen. Die Positionen der Fach-Wand und ihr Zweck ist in Abbildung 3 dargestellt.

Die Bewegung zu den entsprechenden Positionen wird mit je einer Positionssteuerung realisiert. Die Main-Funktion übergibt als Parameter nur die aktuelle Position der Fach-Wand und die Zielposition. In der Positionssteuerung sind die Zeiten gespeichert, die der Motor laufen muss, um von jeder Position in die benachbarte zu gelangen. Die Positionssteuerung übergibt zunächst einen Befehl an die Motorsteuerung, den Motor mit voller Geschwindigkeit in die Richtung laufen zu lassen, in der die Zielposition liegt. Dann wird der Programmablauf für die Zeit unterbrochen, die der Motor zur Bewegung in die benachbarte Position braucht. Anschließend wird der Motorsteuerung der Befehl zum Anhalten des Motors übergeben. Der Motor hält an und die Fach-Wand befindet sich in der benachbarten Position. Ist dies die Zielposition, beendet sich die Positionssteuerung. Falls nicht, ruft sich die Positionssteuerung rekursiv auf, um die nächste Position in Richtung Zielposition zu erreichen. Sie ändert die Startposition allerdings zu jener, in der sich die Fach-Wand gerade befindet.

Das Kippen der Anlage erfolgt ebenfalls indirekt. Die Main-Funktion gibt den Befehl dazu an eine eigene Positionssteuerung. Diese ist nach dem gleichen Schema wie die Fach-Wand-Positionssteuerung aufgebaut. Jedoch gibt es hier nur zwei Positionen (siehe Abbildung 1): nach hinten (a) und nach vorne (c) gekippt. Daher wird nur ein Parameter übergeben: die gewünschte Kippposition.

Zur Bewegung des Förderbandes übergibt die Main-Funktion die Bestellnummer an die Band-Funktion. In der Band-Funktion ist gespeichert, wie lange sich das Band bewegen muss, um das Produktexemplar bis über den richtigen Bestellkorb zu fahren. Die Band-Funktion gibt den Befehl zum Start des Motors an die Motorsteuerung. Dann wird das Programm für den entsprechenden Zeitraum unterbrochen. Daraufhin wird der

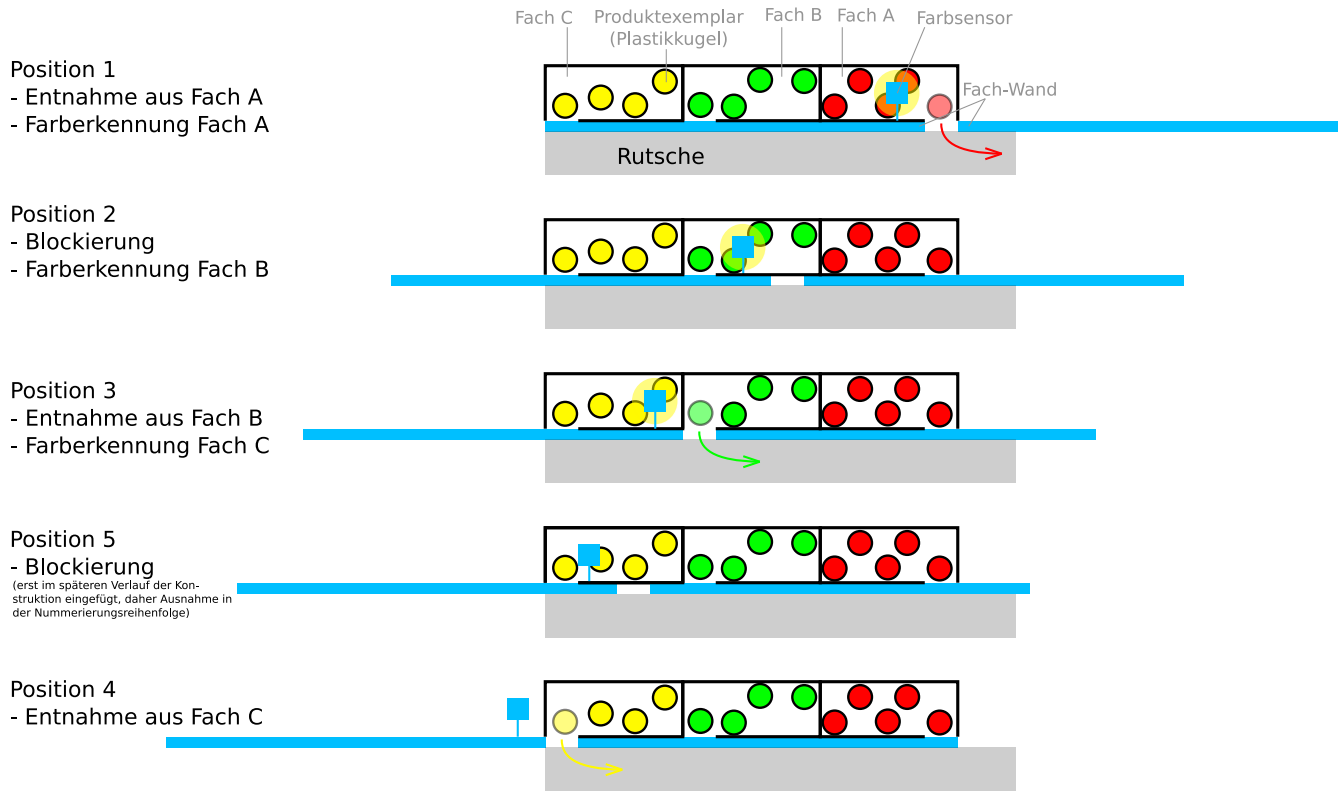


Abbildung 3. Positionen der Fach-Wand

Befehl zum Stopp des Motors an die Motorsteuerung gegeben. Das Band hält an und das Produktexemplar befindet sich über dem richtigen Bestellkorb.

Die Motorsteuerung ist für alle Motoren gleich und erhält als Parameter den Port des anzusteuern Motors am NXT und die Batterieleistung in Prozent, mit der sich der Motor drehen soll. Dies ist bei voller Geschwindigkeit  $\pm 100$  (je nach Bewegungsrichtung) und bei Stopp des Motors 0. Die Motorsteuerung führt danach die NXT-spezifischen Befehle aus, die den Motor wie gewünscht ansteuern. Sie hat also nur den Zweck, diese Codepassagen aus der Positionssteuerung auszulagern und den Code so übersichtlicher zu machen.

Die ursprünglich geplante GUI wurde nicht realisiert. Die Bestellungen werden stattdessen in ein TXT-Dokument eingegeben, dieses gespeichert und von der Main-Funktion eingelesen.

**C. Programmablauf**

Zu Anfang des Programms sollen die Farben erkannt werden. Der Farbsensor ist mechanisch an der Fach-Wand angebracht. Daher wird zunächst die Fach-Wand-Funktion mehrmals aufgerufen, um den Farbsensor nacheinander über alle Fächer zu bringen und so alle Farben zu erkennen. Die Information, welche Farbe in welchem Fach liegt, wird in einem Array gespeichert.

Als nächstes liest die Main-Funktion direkt das TXT-Dokument ein, in dem die Bestelldaten stehen (siehe Abb. 4). Beginnend mit der ersten Zeile wird zunächst die Bestellnummer (erster Eintrag) ausgelesen. Dann wird der zweite

Bestellnr.	Anz_Farbe_Rot	Anz_Farbe_Gruen	Anz_Farbe_Gelb
2	1	2	1
1	0	2	0
4	1	0	2
3	1	0	1

Abbildung 4. TXT-Dokument, das die Main-Funktion einliest. Die oberste Zeile gibt an, welche Spalte welche Information enthält.

Eintrag abgefragt, der die Anzahl bestellter roter Kugeln angibt. So viele Male, wie rote Kugeln bestellt werden, gibt die Sortieranlage nun rote Kugeln in den Korb mit der Bestellnummer. Das Programm fährt nun mit der zweiten, dann mit der dritten etc. Zeile fort und verteilt so zunächst die roten Kugeln. Sind alle Zeilen, also alle Bestellungen, durchgegangen, folgt die Verteilung der grünen Kugeln. Die Vorgehensweise gleicht der Verteilung der roten Kugeln, nur wird nun der dritte statt dem zweiten Eintrag in der jeweiligen Zeile abgefragt. Dieser gibt die Anzahl bestellter grüner Kugeln an. Nach der Verteilung der grünen Kugeln folgt nach gleichem Prinzip die Verteilung der gelben und dann das Programmende.

**D. Prozess: Ausgabe eines Produktexemplars**

Die Ausgabe der Produktexemplare funktioniert nach folgendem Prinzip: Zu Anfang ist die Anlage nach vorne gekippt. Die Fach-Wand fährt in eine Position, bei der keine Kugeln aus ihren Fächern rollen können. Dies ist Position 2, falls aus Fach A oder B eine Kugel entnommen werden soll; oder Position 5,

falls als nächstes Fach C geöffnet werden soll (siehe Abb. 3). Die Anlage kippt nun nach hinten, die Kugeln werden von der Fach-Wand noch blockiert, sodass sie nicht auf die Rutsche rollen. Je nach benötigtem Fach fährt die Fach-Wand auf die Positionen 1 (Fach A), 2 (Fach B) oder 4 (Fach C) und öffnet so das jeweilige Fach (siehe Abb. 3). Eine Kugel rollt aus dem Fach auf die Rutsche und danach auf das Förderband. Das Förderband setzt sich in Bewegung und fährt die Kugel über den richtigen Bestellkorb. Die Anlage kippt nach vorne. So rollt die Kugel vom Band und fällt in den richtigen Korb.

#### IV. ERGEBNISDISKUSSION

Aus unserer Arbeit ist eine Sortieranlage entstanden, die ihre Anforderungen in großen Teilen erfüllt. Die zu erfüllenden Aufgaben Auswahl, Transport und Einsortierung werden gelöst. Eine farblich erkannte, aus dem Fach ausgeworfene Kugel erreicht den richtigen Bestellkorb zuverlässig.

##### A. Bestehende Probleme

Ein seltenes, aber vorhandenes Problem besteht mit der Form der Kugeln aus dem Mindstorms-Kasten. Sie sind an einer Seite leicht abgeflacht, sodass sie manchmal liegen bleiben, statt zu rollen.

In Einzelfällen erkannte der Farbsensor schwarz statt der richtigen Farbe. Mit Justierungen an seiner Befestigung und anderer Platzierung der Exemplare im Fach konnte dieses Problem oft umgangen werden.

Probleme macht auch der Vereinzelnungs-Mechanismus, der schwierig umzusetzen ist. Aufgrund des knappen Zeitplans des Projektes gelang es nicht mehr, den Mechanismus zuverlässig zu konstruieren. Bei Fach A war der Platz zu eng, um zwischen der Kippachse und dem Fachboden den Mechanismus einzubauen. Bei den anderen Fächern war der Unterschied zwischen nach vorne und nach hinten gekippter Anlage so gering, dass der Boden sich nicht ausreichend hob und senkte.

##### B. Optimierungsmöglichkeiten

Die Eingabe könnte optimiert werden, indem ein GUI eingebaut würde. Dies wäre optisch ansprechender als das TXT-Dokument.

Bei Testläufen ergaben sich Ungenauigkeiten der Motoren bei niedriger Drehzahl. Zur Bewegung der Anlagenkomponenten sind jedoch niedrige Drehzahlen vonnöten. Zudem benötigt das Kippen der Anlage aufgrund ihres Gewichtes eine erhebliche Kraft. Daher wurden Zahnrad-Übersetzungen eingebaut, die die Drehzahl der Motoren, dadurch aber auch die Geschwindigkeit der Sortierung, verringern. Alle Motoren werden immer mit maximaler Drehzahl angesteuert, um die Effekte „Genauigkeit“ und „Kraft“ zu maximieren. Das hat jedoch zur Folge, dass immer nur ein Motor gleichzeitig laufen kann, da er mit voller Batterieleistung angesteuert wird. Dies verringerte die Geschwindigkeit der Verteilung weiter. Hier besteht noch Optimierungsbedarf, den wir noch in der Projektzeit erkannten. Aufgrund des begrenzten Zeitplans scheiterte jedoch eine Neukonstruktion der Zahnradübersetzung. Diese wäre zudem zwangsweise verbunden mit einer Umprogrammierung der Anlage aufgrund veränderter Motorlaufzeiten (siehe Abschnitt „Programmierung“).

#### V. ZUSAMMENFASSUNG UND FAZIT

Insgesamt genügt das Resultat seinem Anspruch. Es ist gelungen, ein Modell eines automatischen Verteilzentrums nach dem anfänglichen Konzept zu konstruieren. Die Anlage sortiert die korrekte Zahl Produktexemplare in die richtigen Bestellkörbe. Durch den Kippmechanismus wurde die Einschränkung von nur 3 Motoren umgangen. Die Probleme, Kugeln nicht einzeln ausgeben zu können und seltene Fehlfunktionen der Kugeln und des Farbsensors bleiben jedoch bestehen. Die Anlage hat noch Optimierungspotential bei der Sortierungsgeschwindigkeit. Optisch könnte die Anlage durch ein GUI ansprechender werden.

#### LITERATURVERZEICHNIS

- [1] IBI RESEARCH AN DER UNIVERSITÄT REGENSBURG GMBH: *Prognose: E-Commerce-Anteil am Einzelhandelsumsatz wird bis 2025 nochmals deutlich steigen.* <https://ibi.de/aktuelle-meldungen/prognose-e-commerce-anteil-am-einzelhandelsumsatz-wird-bis-2025-nochmals-deutlich-> Version: Januar 2020
- [2] HOFER, Joachim: *Amazon automatisiert Lager - Wenn das Regal Räder bekommt.* <https://www.handelsblatt.com/unternehmen/logistik-spezial/amazon-automatisiert-lager-wenn-das-regal-raeder-bekommt/20057656-all.html>. Version: Juli 2017
- [3] SWISSLOG HOLDING AG: *Absolut Vodka, Schweden: Flexibel erweiterbare Automatisierung im Verteilzentrum.* <https://www.swisslog.com/de-de/fallstudien-und-downloads/fallstudien-referenzen-kundenprojekte/2016/07/absolut>
- [4] THE LEGO GROUP: *LEGO® MINDSTORMS® Bedienungsanleitung.* <https://www.lego.com/biassets/bi/4589649.pdf>. Version: 2009

#### ANHANG

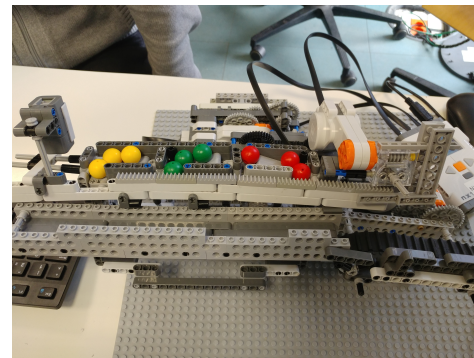


Abbildung 5. Seitliche Ansicht der fertigen Anlage. In der Mitte des Bildes die Fach-Wand (weiß mit aufgesetzten grauen Zähnen).

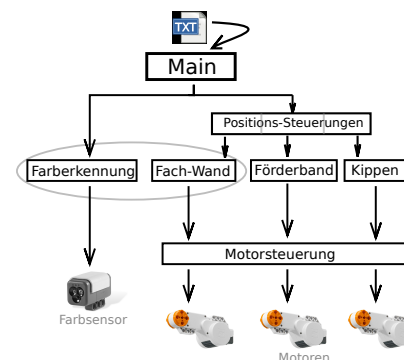


Abbildung 6. Diagramm der verwendeten Funktionen.