

# Der Stabelgabler

Jamie Georg, ETIT  
Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg

**Abstract**— Im Rahmen des Projektseminars Elektrotechnik und Informationstechnik wurde die Aufgabe gestellt, einen Automaten zu entwerfen, der Lego Mindstorms (Abbildung [1]) als strukturelle Basis verwendet. Dieser sollte mit Hilfe von Matlab als Programmiersoftware umgesetzt werden. Der in diesem Projekt realisierte Automat ist ein selbstfahrender Gabelstapler. Im Folgenden wird sowohl auf die Hard- und Softwarekonzepte als auch auf die Umsetzung, die dabei aufgetretenen Probleme und deren Lösungen eingegangen. Abschließend werden die Einsatzmöglichkeiten und mögliche Verbesserungen diskutiert.

**Schlagwörter**— autonom, Gabelstapler, innerbetrieblich, Roboter, Transport



Abbildung [1]: NXT-Kontrollstein

## I. EINLEITUNG

Die Industrialisierung war vor 250 Jahren (in Großbritannien) der Beginn einer Epoche, in der körperliche Arbeit durch Maschinen ersetzt wurde und dadurch eine exponentielle Steigerung der Produktion möglich wurde. In den letzten Jahrzehnten ist diese Automatisierung bereits in die nächste Entwicklungsphase eingetreten, in der der Mensch vollständig von der Ausführung entfernt wird und die Maschinen durch komplexere Programmierung und künstliche Intelligenz in der Lage sind, Routinen selbstständig auszuführen und sogar teilweise autonom auf irreguläre Ereignisse zu reagieren.

Ein Anwendungsbereich, in dem die Automatisierung bereits weit fortgeschritten ist, ist die Lagerhaltung (Sortieren und Transportieren von Waren). Bisher wurden für den innerbetrieblichen Transport von schweren Lasten Gabelstapler eingesetzt, die jedoch von Menschen bedient

werden mussten. Hier setzt der Automat dieses Projektes an, der, wie in Abbildung [2] gezeigt wird, den Menschen ersetzen soll.



Abbildung [2]: Autonomer Gabelstapler der Marke Agilox

## II. VORBETRACHTUNGEN

Um den Gabelstapler automatisieren zu können, werden im Folgenden die Funktionen definiert, die für den Ersatz des Menschen angepasst bzw. neu implementiert werden müssen.

Die beiden Hauptfunktionen, die automatisiert werden müssen, sind die Orientierung im Raum und das Be- und Entladen der richtigen Güter. Dabei stellt die Orientierung das weitaus größere Problem dar. Denn der Automat muss den optimalen Weg zu seinen Stationen finden und zufällige oder unnötige Wege, die den Betrieb und damit die Effizienz mindern, müssen vermieden werden. Die Orientierung kann auf unterschiedliche Art und Weise erfolgen, z.B. optisch oder durch Positionsbestimmung (GPS). In diesem Projekt wurde aufgrund technischer Einschränkungen eine optische Variante gewählt, bei der der Stapler einer Linie folgt, um entlang einer bestimmten Farbe zur entsprechenden Abteilung zu gelangen.

Im nächsten Schritt muss die Sensorik und Programmierung der Lenkung an die Antriebsart des Fahrzeugs angepasst werden, damit der Roboter der Führungslinie exakt folgen kann. Der Antrieb bietet hier verschiedene Möglichkeiten. Zum einen können Antrieb und Lenkung kombiniert werden, indem beide Räder von separaten Motoren angesteuert werden. Dadurch kann die Auslenkung des Gabelstaplers durch den unterschiedlichen Schub der beiden Motoren verändert werden, ähnlich wie bei einem Panzer. Eine andere Möglichkeit besteht darin, den Antrieb auf ein oder mehrere schwenkbare Hinterräder zu verlagern, die dann die Richtung des Staplers ändern. Diese Technik wird bereits bei konventionellen Gabelstaplern eingesetzt.

Sobald sich der Roboter vor dem gewünschten Regal positioniert hat, muss er das gesuchte Modul erkennen.

Hierfür bietet sich die Warenerfassung mittels Codierungen an, wie sie bereits im Verkauf in Form von Barcodes oder QR-Codes eingesetzt werden. Daraus ergibt sich, dass mindestens zwei Sensoren benötigt werden, einer für die Linienverfolgung und einer für die Erkennung der gesuchten Palette. Außerdem sind mindestens drei Motoren erforderlich, einer für die Gabel und zwei für den Antrieb und die Lenkung.

Das Design der Führungslinie wurde dreifarbig gestaltet. Schwarz definiert den Idealpfad und Blau bzw. Rot die jeweilige Abweichung nach links bzw. rechts von der Spur.

### III. UMSETZUNG

Da die Richtung der Abweichung durch Farben bestimmt wird, muss bei der Umsetzung des Projekts nicht nur die Konstruktion und Programmierung des Gabelstaplers, sondern auch die Gestaltung der Strecke berücksichtigt werden.

#### A. Erstellung der Linie

Das Grundkonzept der Bahn sieht vor, dass auf dem Weg zum Regal die rote Linie auf der rechten Seite und die blaue Linie auf der linken Seite in Bezug zur schwarzen Linie in der Mitte stehen. Außerdem sind Anfang und Ende der schwarzen Linie durch gelbe Punkte definiert, die dem Gabelstapler signalisieren, dass er eine Station erreicht hat.

Zu Beginn betrug die Breite jeder Linie 1 cm. Da es bei späteren Versuchen zu Problemen kam, bei denen das Fahrzeug durch einen annähernd senkrechten Anfahrwinkel die äußeren Linien nicht erkannte und überfuhr, wurden alle Linien auf 3cm verbreitert. Daher mussten alle Linien auf 3 cm verbreitert werden. Trotzdem musste eine exakte Position vor dem Regal gewährleistet sein, weshalb sich die schwarze Linie, wie in Abbildung [3] erkennbar ist, am Anfang und am Ende zu den gelben Markierungen hin auf 1 cm verjüngt.

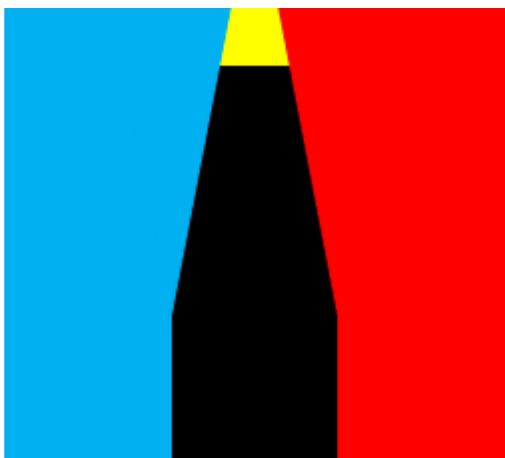


Abbildung [3]: Anfangs-/Endsequenz der Führungslinie

#### B. Konstruktion

Da für diesen autonomen Gabelstapler eine konventionelle Lenkung gewählt wurde, stellt sich die Frage, wie der für den Antrieb zuständige Motor die Rotationsenergie auf die Räder übertragen soll. Eine Möglichkeit wäre, den Motor über Gelenke in der Antriebswelle und ein Differentialgetriebe mit

den Rädern zu verbinden. Die schließlich gewählte Möglichkeit sieht vor, dass sowohl die Räder als auch der Antriebsmotor um den Lenkmotor schwenken, so dass der Schub immer direkt vom Antriebsmotor auf die Räder übertragen wird (siehe Abbildung [4]).

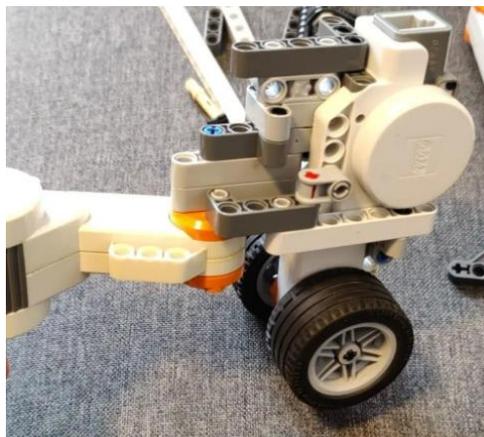


Abbildung [4]: Erster Prototyp der Antriebsgondel

Für die Struktur bedeutet dies, dass der Antriebsmotor nicht nur stabil, sondern auch starr mit dem beweglichen Teil des Lenkmotors verbunden sein muss, um die Last des darüber liegenden NXT und der restlichen Struktur tragen zu können. Außerdem muss der Platzbedarf dieser Verbindung minimiert werden, um den Auslenkungsgrad der Antriebsgondel zu maximieren. Ein maximaler Schwenkwinkel von  $180^\circ$  wird angestrebt, um das Wenden an einem Punkt zu ermöglichen.

Bei der Konstruktion kam es jedoch zu Konflikten zwischen der Stabilität und der Bewegungsfreiheit der Gondel, da der Antrieb zwar annähernd um  $180^\circ$  geschwenkt werden konnte, die Konstruktion jedoch unter dem Gewicht des NXT nachgab. Daher musste schließlich ein Kompromiss gefunden werden, der eine maximale Auslenkung von  $150^\circ$  vorsieht. Außerdem wurde der Motor, der für die Lenkung zuständig ist, weit nach vorne und unter die restliche Karosserie verlegt, was zwar den Anschluss des Motors nach vorne verlegt, aber die Stabilität des Gabelstaplers weiter verbessert. Das Fahrzeug ist dadurch kürzer und die Hebelwirkung auf die Verbindung ist geringer. Aus diesem Grund konnte der Farbsensor für die Linienverfolgung nicht direkt auf Höhe der Vorderachse, sondern vorne angebracht werden. Dadurch könnte es theoretisch zu leichten Abweichungen beim Lenken kommen. Dies konnte jedoch durch die bereits diskutierte Linienverbreiterung behoben werden.

Zuletzt musste die Position des dritten Motors festgelegt werden, der die Gabel hebt und senkt. Es wurde schnell klar, dass der Motor hoch montiert werden musste, um einen möglichst großen Hub der Gabel zu gewährleisten und mehrere Module im Regal anfahren zu können. Die Übersetzung der Kreisbewegung des Motors in eine lineare Bewegung der Gabel wurde realisiert, indem ein Zahnrad direkt am Motor angebracht wurde und die Gabel an der Rückseite mit Zähnen versehen wurde, auf die das Zahnrad zugreifen kann.

Zusätzlich wurden an beiden Seiten Schienen angebracht, die die Gabel fixieren. Da die Gabel trotz der Schienen auf einer Seite nach unten fiel, wurde parallel zum Motor ein weiteres Zahnrad angebracht, das das Problem schließlich löste.

### C. Programmierung

Bei der Programmierung stellte die Lenkung bzw. das Spurhalten aufgrund der gewählten Antriebsvariante die größte Herausforderung dar. Denn im Gegensatz zur Lenkung mit zwei separaten Antriebsmotoren ist bei der gewählten Variante ein punktgenaues Drehen nicht möglich, so dass immer ein gewisser Weg eingeplant werden muss, um die Richtung des Fahrzeugs zu ändern.

Phase 1: Zu Beginn speichert der Rechner mit Hilfe des im Lenkmotor integrierten Drehwinkelsensors die gerade Ausrichtung der Antriebsgondel als Nullposition. Da der Grad der Auslenkung variabel sein sollte, so dass der Roboter bei leichten Abweichungen von der Ideallinie nur geringe Richtungskorrekturen vornehmen muss, war es notwendig, die Dauer der Auslenkung des Roboters zu speichern. Da jedoch die TicToc-Funktion von Matlab das Auslesen der Zeit bei laufender Stoppuhr nicht erlaubt, wurden Matrizen verwendet, um die gescannten Farbwerte zu speichern.

```
if rot > 0 && rot <= 5
    gesucht = -15
elseif rot > 5 && rot <= 10
    gesucht = -25
elseif rot > 10 && rot <= 15
    gesucht = -35
elseif rot > 15 && rot <= 20
    gesucht = -45
end
```

Abbildung [5]: Stufen der Einlenkung

Das Programm entscheidet dann in Abhängigkeit vom Verhältnis der Farben zueinander (Abbildung [5]), wie groß die Auslenkung der Gondel sein soll. Dies kann dazu führen, dass der Lenkmotor automatisch die Nullposition anfährt, da beim Auffinden der Ideallinie Blau und Rot aus der Matrix verdrängt werden, was auf geraden Strecken zu einer immer geringeren Richtungsanpassung führt.

```
if gesucht - aktuell > 2
    mot2.Power = 5;
    SendToNXT(mot2);
elseif gesucht - aktuell < 2
    mot2.Power = -5;
    SendToNXT(mot2);
else
    mot2.Power = 0;
    SendToNXT(mot2)
end
```

Abbildung [6]: Schub des Lenkmotors bis Zielauslenkung

Sobald die gewünschte Auslenkung ermittelt ist, wird der Fahrbefehl an den Lenkmotor gegeben, der je nach Verhältnis der aktuellen Position zur ermittelten Auslenkung (kleiner oder größer) solange Schub gibt, bis der Zielwert erreicht ist (Abbildung [6]). Da die Motoren von Lego Mindstorms relativ ungenau sind, ist eine Abweichung von  $\pm 2^\circ$  zwischen Zielwert und aktueller Position eingeplant.

Der Antriebsmotor gibt ab dem Zeitpunkt, an dem der Startpunkt erkannt wurde, einen konstanten Schub, bis der Zielpunkt wieder erreicht ist. Hierbei trat wiederholt das Problem auf, dass der Farbsensor aufgrund eines unbekanntes Fehlers fälschlicherweise gelbe Signale auf der schwarzen Fahrspur erkannte, wodurch der Gabelstapler ungewollt auf der Fahrspur stoppte und in die Routine der Palettauswahl übergang. Dies konnte umgangen werden, indem Phase 1 erst dann beendet wird, wenn der Farbsensor über einen längeren Zeitraum Gelb erkannt hat.

Phase 2: Bei Erreichen des Regals wird der Farbsensor an der Gabel zur Palettenerkennung aktiviert und der Motor, der die Gabel hebt bzw. senkt, gibt einen konstanten Schub. Erkennt der Sensor die gesuchte Palette, wird die Phase 2 beendet und die Palette aus dem Regal entnommen. Wird die gesuchte Palette nicht gefunden und die zuvor ermittelte maximale Gabelhöhe überschritten, wird Phase 2 abgebrochen.

Phase 3: Sobald die richtige Palette gefunden ist, wird der Farbsensor an der Gabel deaktiviert und die Gabel um einen bestimmten Wert abgesenkt, der durch mehrmaliges Testen ermittelt wurde. Dadurch positioniert sich die Gabel unter der Palette, ohne an der darunter liegenden Palette hängen zu bleiben. Anschließend fährt der Roboter vor, hebt die Gabel leicht an und fährt zurück, um wieder frei vor dem Regal zu stehen. Nun wendet das Fahrzeug, indem es mit maximaler Rechtskurve zurückfährt, bis der Gabelstapler rechtwinklig zum Fahrweg steht. Anschließend fährt der Gabelstapler mit der gleichen Länge nach links, bis er wieder in der Spur steht.

Phase 4: Schließlich wird Phase 1 mit umgekehrter Richtungszuordnung der Linienfarben wiederholt, bis der Startpunkt erkannt wird. Dies markiert das Ende der Routine. Danach fährt der Roboter ein Stück vorwärts, fährt die Gabel in die gespeicherte Startposition zurück, geht in den Standby-Modus und wartet auf ein neues Startsignal (Abbildung [7]).

## IV. AUSWERTUNG UND MÖGLICHE VERBESSERUNGEN

Das Ergebnis der Vorführung war mehr als zufriedenstellend. Die Spur konnte erfolgreich verfolgt und die Zielpunkte in ca. 19 von 20 Fällen erkannt werden.

Die gewählte Lenkungsoption zeigte jedoch trotz der Verbesserung einige Grenzen auf. Beispielsweise ist es mit der gewählten Lenkung nicht möglich, in der Nullposition auf der Stelle zu wenden, was mit der zuvor genannten Option leicht möglich gewesen wäre. Dies hatte zur Folge, dass der Roboter zeitweise Probleme hatte, in engen Kurven die Spur zu halten. Um dieses Problem zu minimieren, musste der Antriebsschub deutlich reduziert werden. Dadurch kann der „Stabelgabler“ nur sehr langsam fahren.

Auf der Seite der Sensorik und Programmierung wäre eine mögliche Verbesserung, die Farbsensoren durch

Videokameras zu ersetzen. Damit wäre es möglich, den Linienverlauf als Grafik einzulesen und je nach Position und Steigung die Lenkung anzupassen. Dadurch würde sich die Breite der Linie drastisch reduzieren und es wäre jeweils nur eine Linie zur Anpassung notwendig. Außerdem würde sich die Möglichkeit eröffnen, mehrere Linien zu verwenden, um durch unterschiedliche Farben mehrere Regale/Ziele anzusteuern.

V. ZUSAMMENFASSUNG UND FAZIT

Der Gabelstapler (sog. „Stabelgabler“) (Abbildung [7]) funktioniert gut und macht seine Arbeit für die zwei Wochen, die für das Projekt vorgesehen sind, schon sehr gut. Mit mehr Bearbeitungszeit wäre es möglich gewesen, die Verarbeitung der Farben zu beschleunigen, so dass der Gabelstapler schneller fahren könnte. Außerdem wäre eine bessere Lenkanpassung möglich gewesen. Dies würde bedeuten, dass die Auslenkung nicht nur in Stufen unterteilt, sondern komplett variabel und in jedem Grad steuerbar wäre. Dies würde es dem Roboter ermöglichen, beim Auftreffen auf die schwarze Linie so gegenzusteuern, dass der Gabelstapler annähernd gerade über die schwarze Linie fährt.

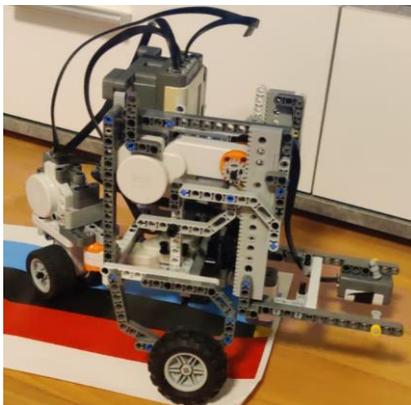


Abbildung [8]: Das Endresultat des Projekts

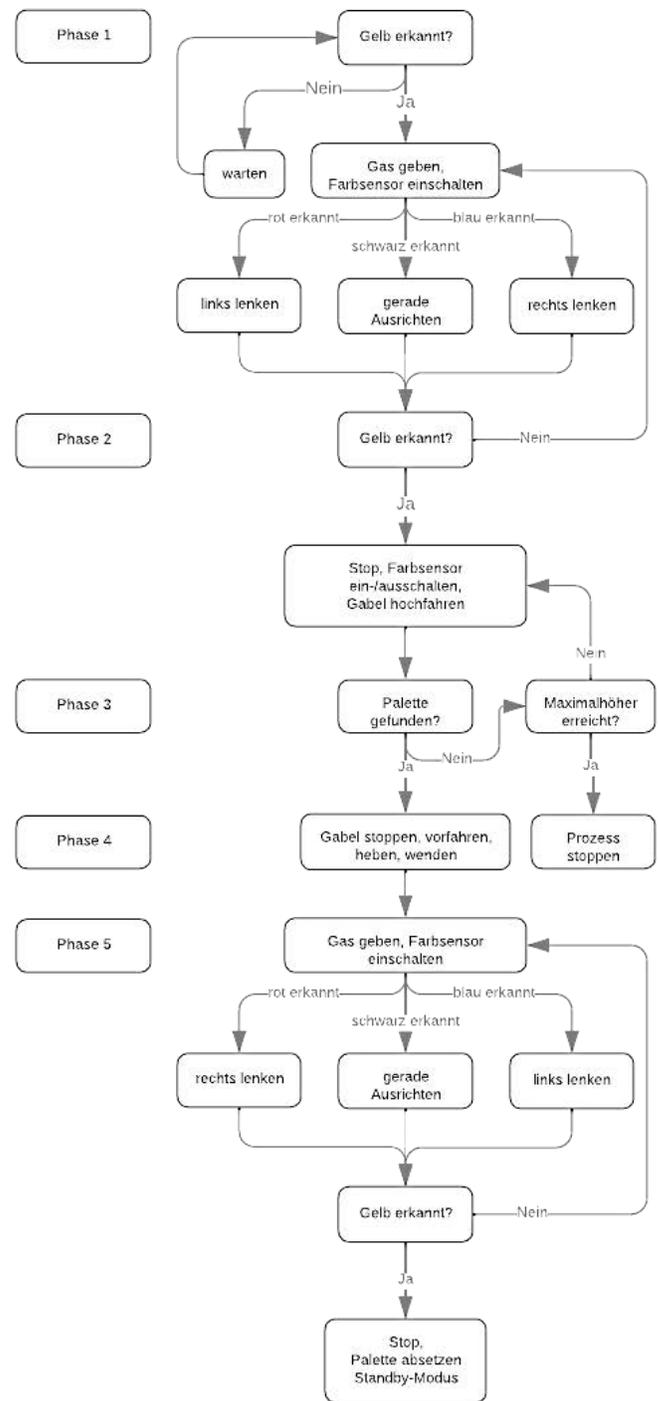


Abbildung [7]: Programmablauf als Flussdiagramm

LITERATURVERZEICHNIS

Bildquellen:

- [1] [https://www.brick-shop.de/images/product\\_images/original\\_images/9841-NXT-Brick.jpg](https://www.brick-shop.de/images/product_images/original_images/9841-NXT-Brick.jpg) (16.04.2023)
- [2] <https://automationspraxis.industrie.de/allgemein/autonomer-gabelstapler-mit-schwarmintelligenz/> (23.02.2023)

Literatur:

- [3] Freddie Wilkinson. (2022, Juni). "Industrial Revolution and Technology". Website: <https://education.nationalgeographic.org/resource/industrial-revolution-and-technology/>