

# Zeichenroboter

Vincent Schwalm, B. Sc. Elektrotechnik  
Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg

**Zusammenfassung**—Im Rahmen des hier beschriebenen Projektes des Seminars Elektro- und Informationstechnik der Otto-von-Guericke-Universität 2026 wurde ein Zeichenroboter mittels theoretischer und praktischer Lösungen realisiert. Nicht nur mathematische Konzepte wie inverse Kinematik werden angerissen, sondern auch mechanische, wie die Limitationen der verwendeten LEGO-Mindstorms-Aspekte. Das Ganze wird in einer Auswertung diskutiert und mit einem Ausblick auf zukünftige Arbeiten vollendet.

**Schlagwörter**—Legoroboter, Robotik, Mensch-Maschine Interaktion, Zeichnen.

## I. EINLEITUNG

**Z**EICHENROBOTER stellen eine anschauliche Anwendung robotischer Kinematik im zweidimensionalen Raum dar. Sie ermöglichen die automatisierte Übertragung digital definierter Spuren auf eine physische Zeichenfläche und verbinden dabei mechanische Konstruktion, mathematische Modellierung sowie softwarebasierte Ansteuerung, und auch ein bisschen Kunst.

Ziel dieser Arbeit ist die Entwicklung eines planaren Zeichenroboters auf Basis eines geschlossenen 5R-Mechanismus, realisiert mit Komponenten des Systems „LEGO Mindstorms“. Ein 5R-Mechanismus ist ein kinematisches System mit zwei Freiheitsgraden, das aus fünf Gliedern besteht, die durch fünf Drehgelenke in einer geschlossenen Schleife verbunden sind. Das zu lösende Problem bestand in der Positionierung eines Stiftes innerhalb eines definierten Arbeitsraumes bei Übersetzung von Motordrehungen in X-Y-Bewegungen.

Besondere Anforderungen ergaben sich aus der mechanischen Struktur, welche eine Berechnung der inversen Kinematik erforderlich machte. Darüber hinaus mussten mechanische Maßnahmen zur Drehmomentverstärkung implementiert werden, um elastische Spannelemente im System nutzen zu können.

Die zentrale Idee des Projekts bestand darin, die inverse Kinematik geometrisch über Kreisschnittpunkte zu bestimmen und diese Berechnung in MATLAB zu implementieren. Dadurch konnte eine flexible Spurgenerierung realisiert werden, mit der geometrische Formen wie Kreise sowie komplexere Figuren, beispielsweise ein Smiley, gezeichnet werden konnten.

## II. VORBETRACHTUNGEN

### A. Bestehende Lösungsansätze

Zeichenroboter werden häufig entweder als kartesische Plotter-Systeme oder als serielle Manipulatoren ausgeführt. Kartesische Systeme zeichnen sich durch eine einfache kinematische Beschreibung aus, benötigen jedoch lineare Führungssysteme mit entsprechendem Bauraum. Serielle Roboterarme besitzen

einen größeren Arbeitsraum, weisen jedoch eine geringere strukturelle Robustheit auf.

Eine alternative Bauform stellt der planare 5R-Parallellink-Mechanismus dar. Dieser bietet eine höhere Steifigkeit bei gleichzeitig kompakter Bauweise. Als Literaturquelle für dieses Projekt fand sich der Artikel von Bryan Vasquez-Pineda [1].

### B. Genutzte Verfahren

Für die eigene Umsetzung wurde ein geometrischer Ansatz zur Lösung der inversen Kinematik gewählt. Anstatt eine geschlossene analytische Lösung herzuleiten, wird der Schnittpunkt zweier Kreise bestimmt, wodurch sich die Gelenkpositionen berechnen lassen.

Die Implementierung der kinematischen Berechnungen sowie der Spurplanung erfolgte vollständig in MATLAB. Dieser Ansatz ermöglicht eine flexible Generierung von Zielpunkten sowie eine variable Auflösung der zu zeichnenden Konturen.

## III. UMSETZUNG

### A. Konzept und Kinematik

Zur mathematischen Beschreibung wird ein kartesisches Koordinatensystem verwendet, dessen Ursprung im linken Basismotor (Motor 1) liegt. Der zweite Motor befindet sich auf der x-Achse im Abstand  $d$  bei  $(d, 0)$ . Eine Skizze zum Aufbau ist in Abb. 1 zu sehen.

Der Mechanismus entspricht einem planaren 5R-System mit zwei Armen der Länge  $l_1$  und zwei Koppelgliedern der Länge  $l_2$ . Für eine gewünschte Endeffektorposition  $(x, y)$  wird die inverse Kinematik geometrisch gelöst. Eine Visualisierung des entstehenden Programms ist im Programmablaufplan in Abb. 2 aufgeführt.

### B. Inverse Kinematik mit Kreisschnitt

Die Berechnung erfolgt durch Bestimmung des Schnittpunktes zweier Kreise:

- Kreis um den jeweiligen Motor mit Radius  $l_1$
- Kreis um den Endeffektor mit Radius  $l_2$

Ein anderer Lösungsansatz für die inverse Kinematik wäre das Errechnen der Winkel über Winkel-Seitenbeziehungen. Dieser braucht jedoch eine wesentlich kompliziertere Mathematik, die in der Kürze dieses Projektes von zu großem Umfang war. Zur Bestimmung der Schnittpunkte wird in MATLAB die Funktion `circirc` verwendet, Ausschnitte des Quellcodes für die Implementierung lassen sich in Abb. 3 finden. Im Quellcode wird zuerst die Winkelverschiebung der genutzten Arme auf 14 Grad gesetzt. Dies war nötig, da die Arme nicht direkt am Gelenk verbunden waren. Danach werden Koordinaten für die Mittelpunkte der zwei zu erstellenden Kreise

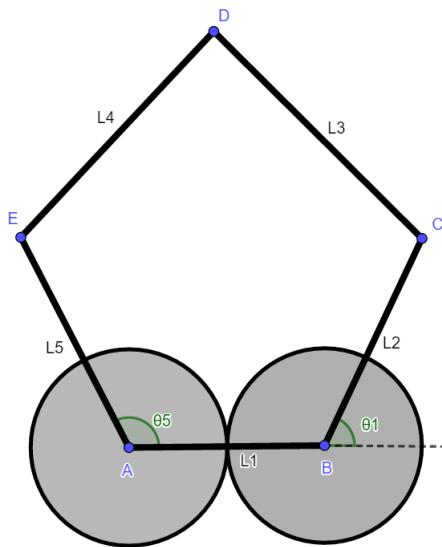


Abbildung 1. Skizze zum Aufbau

gesetzt, und über Winkelfunktionen die nötigen Motorwinkel, um die durch die Kreisfunktion berechneten Schnittpunkte zu erreichen, berechnet. Zuletzt wird die präferierte Winkelösung ausgewählt. Wie oben erwähnt, wurde die `circirc`-Funktion verwendet, diese liefert zwei mögliche Lösungen. Aufgrund mechanischer Einschränkungen unseres Roboters war ausschließlich die sogenannte „Elbow-Up“-Konfiguration realisierbar, welche ein „Einknicken“- der Arme verhindert. Mit der sogenannten „Elbow-Down“- Konfiguration wäre ein anderer bzw. größerer Arbeitsradius möglich, diese ließ sich allerdings der Gelenksteifigkeit wegen nicht umsetzen.

Die Auswahl der korrekten Lösung erfolgte pragmatisch über eine einfache Entscheidungsstrategie:

- Für Motor 1 wurde der kleinere Winkel mittels einer `min`-Funktion gewählt.
- Für Motor 2 wurde der größere Winkel mittels einer `max`-Funktion gewählt.

Durch diese Auswahl wird konstant die Elbow-Up-Konfiguration erzwungen. Mit mehr Zeit wäre ein Algorithmisches finden der optimalen Lösung für jeden Motorwinkel mit mehreren Konfigurationen denkbar.

### C. Spurgenerierung

Die Spur des Endeffektors wurde direkt im MATLAB-Code definiert. Hierbei wurden diskrete Zielpunkte mit variabler Auflösung generiert. Eine höhere Punktdichte führte zu einer feineren Approximation der gewünschten Kurve, erhöhte jedoch die Anzahl der notwendigen Motorbewegungen.

Zunächst wurde ein Kreis parametrisch erzeugt. Anschließend wurde das Verfahren erweitert, um eine komplexere Figur in Form eines Smileys zu realisieren. Die berechneten Winkelwerte wurden sequenziell an die Motoren übertragen.

### D. Mechanische Realisierung

Der mechanische Aufbau wurde mit Komponenten aus dem System „LEGO Mindstorms“ realisiert. Zur Verbesserung der

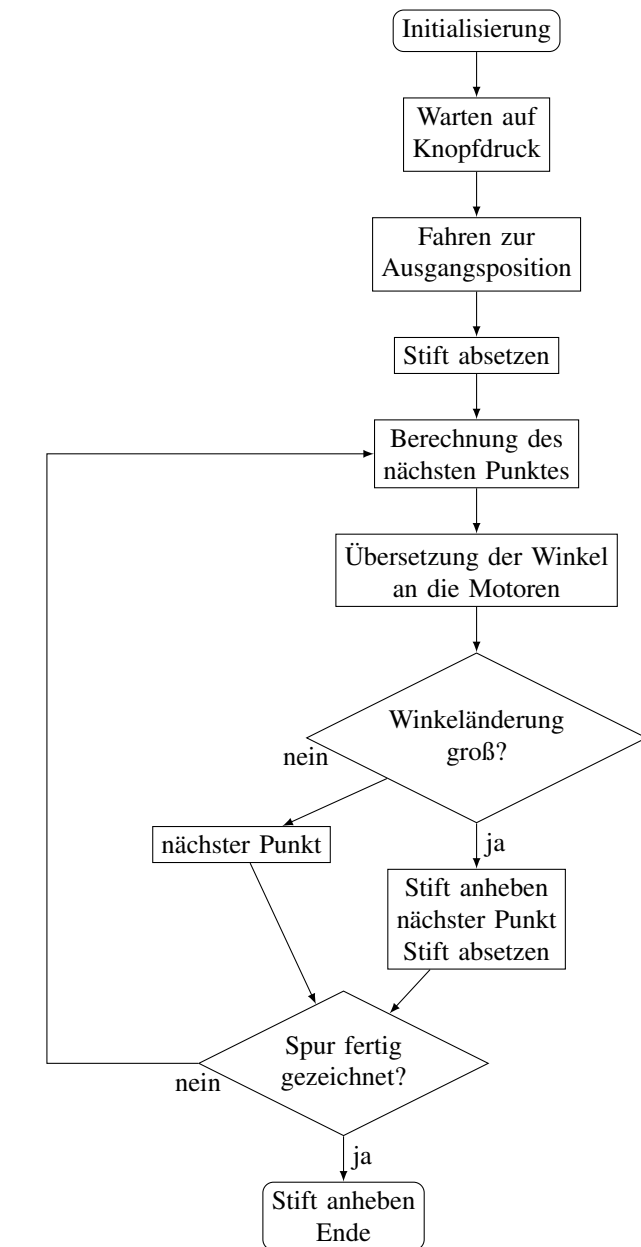


Abbildung 2. Programmablaufplan des Zeichenroboters

Bewegungsstabilität wurden Gummielemente integriert, die eine elastische Vorspannung erzeugen und insbesondere Abwärtsbewegungen des Endeffektors unterstützen. Desweiteren sollte es dem Roboter möglich sein, den Stift abzusetzen und anzuheben, um auch komplexere Formen zu zeichnen. Implementiert wurde das Ganze durch einen Kipp-Mechanismus, der über einen dritten Motor betätigt wurde, wie in Abb. 4 zu sehen.

In der initialen Konstruktion zeigte sich jedoch, dass das verfügbare Motordrehmoment nicht ausreichte, um diese Gummibänder ausreichend zu spannen. Daher wurde ein Schneckengetriebe implementiert, welches das Drehmoment deutlich erhöhte und zusätzlich eine Selbsthemmung bewirkte. Die fertige Konstruktion lässt sich in Abb. 5 einsehen.

```
function [phi1,phi2]=inverse_kinematics(x_pen,y_pen,d,arm1,arm2,hand1,hand2)
% Positionen des linken Ellenbogen als Schnittpunkt zweier Kreise in m -> Skalar
% circles are given with format: [XC YC R]
offset = 14; %motorarm degree offset
circle1=[0,0,arm1];
circle2=[x_pen,y_pen,hand1];
points=intersectCircles(circle1,circle2);
% zugehörigen Winkel ausrechnen in ° -> Skalar
phi1_a=atan2d(points(1,2),points(1,1));
phi1_b=atan2d(points(2,2),points(2,1));
% größeren der beiden Winkel nehmen in ° -> Skalar
phi1=max(phi1_a,phi1_b)+offset;
% Positionen des rechten Ellenbogen als Schnittpunkt zweier Kreise in m -> Skalar
% circles are given with format: [XC YC R]
circle1=[d,0,arm2];
circle2=[x_pen,y_pen,hand2];
points=intersectCircles(circle1,circle2);
% zugehörigen Winkel ausrechnen in ° -> Skalar
phi2_a=atan2d(points(1,2),points(1,1)-d);
phi2_b=atan2d(points(2,2),points(2,1)-d);
% kleineren der beiden Winkel nehmen in ° -> Skalar
phi2=min(phi2_a,phi2_b)-offset;
end
```

Abbildung 3. Inverse-Kinematik Funktion



Abbildung 4. Kipp-Mechanismus in Aktion

E. Praktische Einschränkungen und Beobachtungen

Trotz funktionierender kinematischer Berechnung traten Abweichungen in der tatsächlichen Zeichnung auf. Winkelfehler, mechanisches Spiel sowie Bauraumlimitationen führten insbesondere bei Kreisbewegungen zu sichtbaren Verzerrungen.

Ein weiteres wesentliches Problem bestand darin, dass beide Motoren nicht exakt gleichzeitig angesteuert werden konnten. Die sequentielle Ansteuerung führte dazu, dass lineare Bewegungen nicht als ideale Geraden ausgeführt wurden, sondern eine leicht wellige Struktur aufwiesen.

Diese Effekte verdeutlichen die Diskrepanz zwischen Modell und realem mechanischem System. Auch die Nutzung der Formeln aus der wissenschaftlichen Arbeit von Abdel Gahny Mohammed [2] erwies sich im Nachhinein als fehlerhaft, sodass letztendlich auf die Kreisschnittpunkt-Lösung ausgewichen wurde.

IV. ERGEBNISDISKUSSION

In der praktischen Umsetzung traten ebenfalls mehrere Abweichungen zwischen theoretischem Modell und realem System auf. Mechanisches Spiel, elastische Verformungen sowie begrenzte Winkelauflösung führten zu sichtbaren Verzerrungen, insbesondere bei Kreisbewegungen. Zusätzlich konnten die beiden Motoren nicht simultan angesteuert werden, wodurch lineare Bewegungen nicht ideal geradlinig, sondern leicht wellig ausgeführt wurden.

Die Integration eines Schneckengetriebes zur Drehmomentverstärkung stellte eine notwendige konstruktive Anpassung dar. Erst durch diese Maßnahme konnte die erforderliche Vorspannung der Gummielemente zuverlässig realisiert werden. Desweiteren gelang uns die Programmierung einer Simulation in MATLAB, mithilfe derer es uns möglich war, Spuren des Roboters im Voraus auszuwerten und mit der realen Umsetzung zu vergleichen. Insgesamt zeigt das Projekt deutlich die Wechselwirkung zwischen Theorie und praktischer mechanischer Umsetzung.

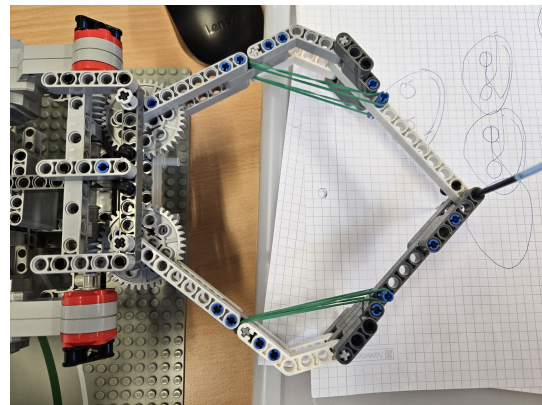


Abbildung 5. Fertiger Zeichenroboter

V. ZUSAMMENFASSUNG UND FAZIT

Im Rahmen des Projekts konnte ein funktionsfähiger planarer Zeichenroboter auf Basis eines 5R-Parallelリンク-Mechanismus realisiert werden. Die kinematische Modellierung sowie die Implementierung der inversen Kinematik in MATLAB erwiesen sich als geeignet, um definierte Spuren reproduzierbar abzufahren.

Die praktische Umsetzung mit LEGO-Komponenten erforderte konstruktive Anpassungen, insbesondere die Integration eines Schneckengetriebes zur Erhöhung der Belastbarkeit der Motoren. Die experimentellen Ergebnisse zeigen, dass das System in der Lage ist, definierte Spuren wie Kreise oder komplexere Figuren nachzufahren.

Für zukünftige Arbeiten könnten eine verbesserte Präzision, eine synchrone Motoransteuerung sowie eine geschlossene Positionsregelung des Endeffektors implementiert werden. Ebenso wäre eine Arbeitsraumanalyse mit Optimierung der Armlängen denkbar, um die Genauigkeit weiter zu erhöhen, oder ein Algorithmus, um die Ellenbogenlösungen konstant ideal auszuwählen.

LITERATURVERZEICHNIS

[1] VASQUEZ-PINEDA, B. ; CARDONA, M. N.: Forward and Inverse Kinematics of a 5R Parallel Planar Robot. In: *Technology and Engineering Management Society Conference (TEMSCON LATAM)* (2025). <http://dx.doi.org/10.1109/TEMSCONLATAM65810.2025.11238935>. – DOI 10.1109/TEMSCONLATAM65810.2025.11238935

[2] INTERNATIONAL JOURNAL OF BUSINESS ENGINEERING AND APPLIED SCIENCES (Hrsg.): *Mathematical Model of two-DOF five links closed-chain mechanism (pantograph)*. 1. Future University in Egypt: International Journal of Business Engineering and applied Sciences, 2021. [https://www.researchgate.net/publication/351809143\\_MATHEMATICAL\\_MODEL\\_OF\\_TWO-DOF\\_FIVE\\_LINKS\\_CLOSED-CHAIN\\_MECHANISM\\_PANTOGRAPH](https://www.researchgate.net/publication/351809143_MATHEMATICAL_MODEL_OF_TWO-DOF_FIVE_LINKS_CLOSED-CHAIN_MECHANISM_PANTOGRAPH)