

StairBOT

Treppen befahren mit einem (nicht ganz so) einfachen Differentialantrieb-Roboter

38723 Seesen / Deutschland

Günter Wendel

November 2004
www.stairbot.de

Übersicht

StairBOT ist ein Differentialantrieb-Fahrroboter variabler Größe, der Innenräume von Gebäuden einschließlich normaler Treppen befahren kann. Mit nur fünf Aktoren und elf Sensoren stellt er ein vergleichsweise einfaches und kostengünstiges System dar. *StairBOTs* Konzept zum Befahren von Treppen (auf und ab) wird vorgestellt und die dafür erforderlichen Konstruktionselemente und Kontrollstrukturen werden beschrieben.

Da ich Roboterbau nur als Hobby betreibe, ist die Darstellung eher beschreibend als wissenschaftlich und eventuelle Bewertungen erfolgen aus einer Perspektive, die den im Hobbybereich manchmal anzutreffenden Beschränkungen an Fachkenntnis und Ressourcen geschuldet ist.

Schlüsselworte: Roboter, Fahrroboter, Differentialantrieb, Treppe, Treppen steigen, Innenräume

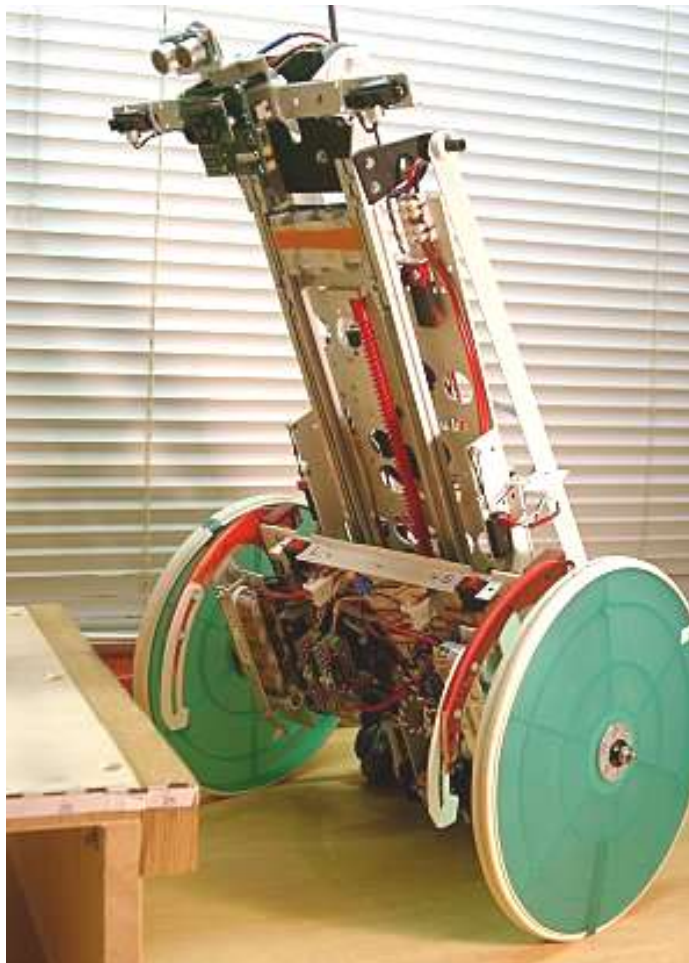


Abb. 1 StairBOT – in Position für die erste Stufe

1. Problembeschreibung

Ziel war es, einen Roboter zu bauen, der

- jeden frei zugänglichen Ort in einem Gebäude erreichen kann;
- nicht länger als ca. 50 cm ist;
- möglichst wenig Aktoren und Sensoren benötigt;
- mit einfachen Steuerungsmechanismen bewegt werden kann

Vorsicht Stufe!

Sieht man von der Hindernisvermeidung und anderen Problemen der autonomen Navigation ab, so liegt die größte Herausforderung von Robotern, die Gebäude befahren sollen, im Auftreten von niedrigen Hindernissen (z.B. Türschwellen, Absätzen u.ä.), die nicht umgangen werden können, und bei den Treppen, die die Stockwerke verbinden. In beiden Fällen sind Funktion und Dimensionierung dieser Hindernisse auf menschliche Bedürfnisse abgestellt, d.h. ein erfolgreicher Innenraum-Roboter muss sich einer für Menschen gemachten Umgebung anpassen können. In den folgenden Ausführungen wird der Schwerpunkt auf der Diskussion des Treppenproblems liegen.

1.1 Treppenabmessungen

Treppen sind genormt in der DIN 18065.

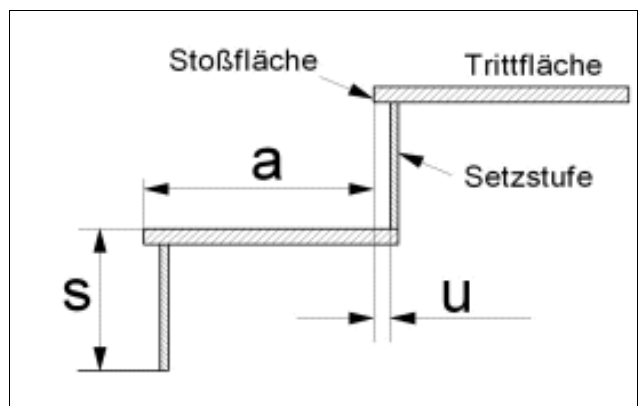
Kenngößen:

s = Steigung

a = Auftritt

u = Unterschneidung

Die Unterschneidung **u** zählt nicht zum Auftritt, da sie beim Abwärtsgehen nicht genutzt werden kann.



Abmessungen:

	Steigung s [cm]	Auftritt a [cm]	Neigung [°]	Anmerkung
a	22	25	41,3	gerade noch sicher begehbar
b	20	26	37,6	von <i>StairBOT</i> noch befahrbar
c	17	29	30,4	Idealmaß für öffentliche Gebäude

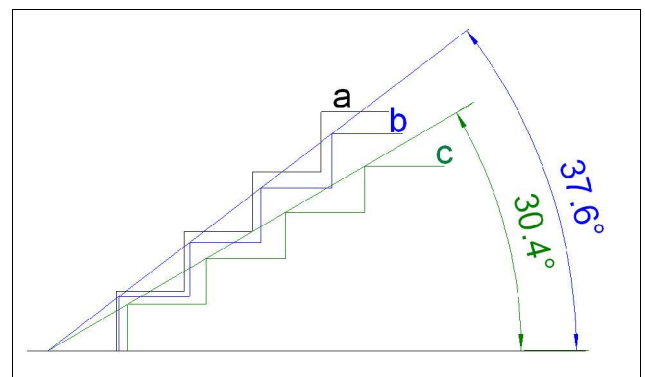


Abb.1b

Bei der Auslegung von Treppen kommt auch heute noch die Formel des französischen Architekten *Blondel* zur Anwendung. Ausgehend von der Schrittlänge berechnet sich danach eine ideale Treppe nach der Formel $2s + a = 65\text{cm}$ (DIN: $2s + a = 59\text{ cm bis } 65\text{cm}$). Im Regelfall werden Treppen heute mit einer mittleren Schrittlänge von 63cm gerechnet. Berücksichtigt man auch entsprechende Sicherheits- und Bequemlichkeitsformeln, so ist eine Treppe mit einer Steigung von 17cm und einem Auftritt von 29cm die Idealtreppe. Entsprechend häufig wird sie in öffentlichen Gebäuden eingesetzt. Um die Bequemlichkeit beim Aufstieg noch zu steigern, erhalten die Treppen zur Vergrößerung der Trittläche eine Unterschneidung von 2 bis 3 cm. Die Treppen können auch als offene Treppen ohne Setzstufe ausgeführt sein. Im Außenbereich erhält die Trittläche eine Neigung von 1 bis 3%, um das Regenwasser besser abfließen zu lassen.

1.2 Treppen steigen

“ Although brute force solutions to step climbing clearly exist (e.g. treaded and very large robots), it is a daunting task to create a mechanism that is both safe for the robot and safe for the environment.”

E. Hamner et al. [1]

Wenn man nach einer konstruktiven Lösung für das Treppenproblem sucht und keinen Kettenantrieb verwenden will, kommen die biologisch inspirierten Laufroboter ins Blickfeld. Trotz der Erfolge des sechsbeinigen *RHex* [2] scheinen am Vorbild des Menschen orientierte zweibeinige Laufroboter die eleganteren Treppensteiger zu sein. Leider müssen sie (oder zumindest ihre Beine) dazu auch fast menschengroß sein. Sonys 60cm großer *Qrio*[3] kann keine normalen Treppen ersteigen, der 120cm große *Asimo*[4] von Honda schon. Außerdem bedürfen solche großen Roboter eines immensen mechanischen, sensorischen und regeltechnischen Aufwandes. Sie sind damit wohl auf absehbare Zeit außerhalb der Reichweite der hobbymäßigen Roboterbauer.

Trotzdem liegen in der Orientierung am menschlichen Vorbild auch Chancen. Analysiert man den Bewegungsablauf beim Treppensteigen, so kann man vier sich wiederholende Phasen unterscheiden:

Phase 1: ein Bein stützt sich am Boden ab und unterstützt den Körperschwerpunkt,

Phase 2: das entlastete Bein wird auf die erste Stufe gehoben,

Phase 3: der Körperschwerpunkt wird über das Bein auf der ersten Stufe bewegt,

Phase 4: das nun entlastete Bein wird auf die zweite Stufe gehoben.

Das Ganze erfolgt nicht so holperig wie diese Beschreibung klingt, sondern der treppensteigende Mensch befindet sich dabei in einem fließenden dynamischen Gleichgewicht. Aber auch ein mehr statisches Treppensteigen ist bei Menschen zu beobachten. Kleine Kinder zum Beispiel, die das Treppensteigen gerade erlernen und deren Schrittlänge für normale Treppen noch nicht ausreicht, lassen die Phase 4 auf der ersten Stufe enden. Der Ablauf wirkt nicht mehr so dynamisch, dennoch wird die Treppe erstiegen.

Dieses Beispiel liegt dem von *StairBOT* verwendeten Steigmechanismus zu Grunde. Allerdings mit der Vereinfachung, dass in Phase 2 und 4 die „Beine“ nicht frei gehoben werden, sondern nach oben fahren bzw. auf einer abstützenden Führung nach oben gleiten. Diese vereinfachte Steigstrategie erlaubt es, statt komplexer Beine einfache Räder zu verwenden.

1.3 Treppen befahren

1.3.1 Raddurchmesser

Ein Vorbild für einen Treppen befahrenden Roboter könnte *shrimp* [5] von der EPFL Lausanne sein. Sechs angetriebene Räder an einem genialen Fahrgestell. Durch dieses Fahrgestell ist *shrimp* in der Lage ohne Sensorrückmeldung Hindernisse von der zweifachen Höhe des Raddurchmessers, auch Treppenstufen, zu überfahren. Leider hat er konstruktionsbedingt mit unterschrittenen Treppenstufen Probleme und offene Treppen ohne Setzstufe kann er meines Wissens wegen des Raddurchmessers von 11 cm (siehe gestrichelt gezeichnetes Rad in Abb.1c) gar nicht befahren.

Entscheidet man sich für einen Fahrroboter, dann sollte der Raddurchmesser D so gewählt werden, dass unterschrittene Stufen und offene Treppen das Rad nicht blockieren können.

Setzt man

s für die Steigung und

t für die Höhe der Stoßfläche am Auftritt

liefert folgende Formel einen Anhaltswert

für den Raddurchmesser D

$$D = 2(s - t) * 0,85$$

Der Faktor 0,85 ist ein durch Versuche bestätigter Näherungswert, der andeutet, in welchem Maß der Raddurchmesser problemlos gegenüber dem Idealwert verkleinert werden kann.

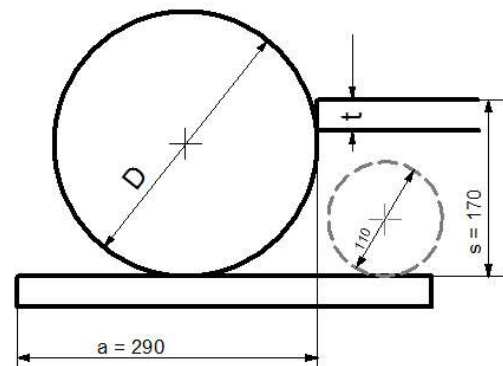


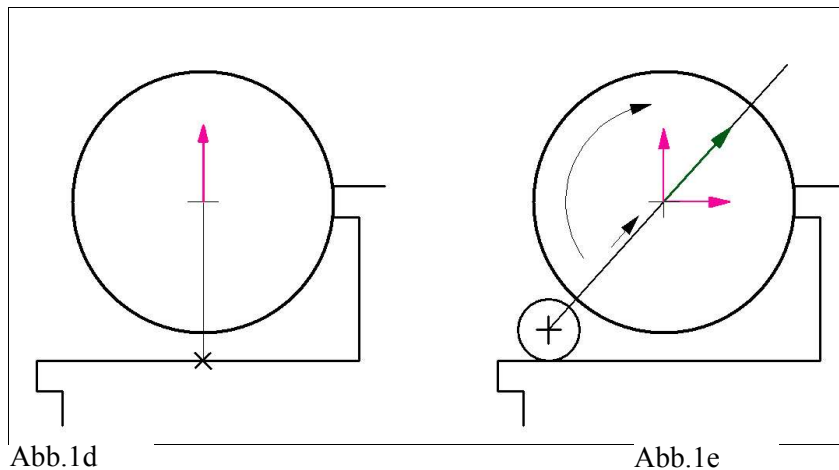
Abb.1c

Für das Treppensteigen und das dargestellte Steigekonzept gibt es auch Einschränkungen beim Raddurchmesser. Muss, wie bei *StairBOT*, der ganze Roboter auf einer Stufe Platz finden, so darf der Raddurchmesser nicht zu groß werden. Die Länge a des Auftritts beschränkt die Länge des Roboters. Und bei Treppen in Wohngebäuden wird ein Auftritt a von 29cm oft nicht erreicht.

Die hier verwendeten großen Raddurchmesser bieten auch beim Fahren in der Ebene Vorteile. So können Hindernisse bis ca. 4 cm Höhe einfach überfahren werden. Diese Vorteile eines großen Rades werden am Roboter *Orpheus* der Universität Brno[6] deutlich, der nicht zuletzt wegen seiner großen Räder den RoboCup Rescue Wettbewerb 2003 souverän gewonnen hat.

1.3.2 Senkrecht fahren

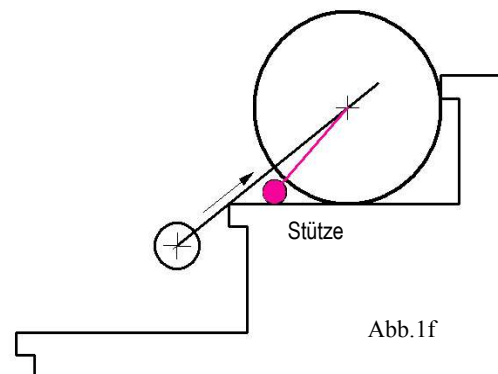
Wie wird das Rad nun auf die erste Stufe bewegt? Man schiebt es hoch. Zwei mögliche Vorgehensweisen sind dabei denkbar. Nimmt man vereinfachend an, dass sich der Masseschwerpunkt in der Radmitte befindet, ergibt sich folgendes Bild:



a) Das Rad wird durch eine Kraft, die sich senkrecht unter dem Masseschwerpunkt abstützt, nach oben geschoben. Da so keine Normal-Kraft auf die Stoßfläche der Stufe wirkt, kann eine angetriebene Drehbewegung des Rades diesen Vorgang nicht unterstützen. Ein weiteres Problem ergibt sich daraus, dass das Rad zwar auf die Höhe der Stufe aber nicht auf die Stufe kommt. Dazu müsste nun eine waagerechte Kraft das Rad auf die Stufe schieben. Gerade im Hobbybereich (z.B. beim Lego-Roboter P'titgneugneu [5]) gibt es solche Treppensteige-Strategien.

b) Das Rad wird durch eine Kraft, die sich seitlich vom Masseschwerpunkt abstützt, nach oben geschoben. Nun entsteht auch eine Normalkraft, so dass das Rad durch eine eigene Drehbewegung den Hebevorgang unterstützen kann, es fährt nach oben. Diese Drehbewegung und die Normalkraftkomponente wird das Rad auf die Stufe bewegen. Funktionieren kann dieser Vorgang aber nur, wenn der seitliche Abstützpunkt trotz der waagerechten Reaktionskraft seine Lage beibehält. Hier ergeben sich Probleme der Haftreibung, der Abstimmung der Geschwindigkeiten der linearen Schubbewegung mit der Drehbewegung des Rades und der Gewichtsverteilung.

Hat das Rad seine Position auf der oberen Stufe erreicht, kann die Stütze nachgezogen werden, vorausgesetzt der Gesamt-Schwerpunkt (eventuell durch eine zusätzliche Stütze gehalten) befindet sich auf der oberen Stufe.



1.3.3 Ausrichtung zur Treppe

Beim sicheren Befahren von Treppen ist die Ausrichtung des Fahrzeugs/Roboters zur Treppenkante ein weiteres wichtiges Problem. Ideal ist eine Fahrtrichtung senkrecht zur Treppe.

1.4 Konstruktionskonzept

Am häufigsten wird sich ein Innenraum-Roboter auf ebenem Grund bewegen. Eine einfache Antriebsmethode für Fahrroboter ist dazu der Differentialantrieb mit zwei unabhängig angetriebenen Haupträdern und einem Stützrad. Dieser Antrieb wurde auch für *StairBOT* gewählt. Das Stützrad wurde im Hinblick auf die Treppensteigefunktion durch zwei Allseitenräder ersetzt.

Zum Treppensteigen muss der Roboter

- klein genug sein, um auf eine Treppenstufe zu passen, also etwa die Fußlänge eines Erwachsenen haben,
- lang genug sein, um den Abstand zwischen zwei Trittflächen überspannen zu können.

Um diese sich eher widersprechenden Anforderungen erfüllen zu können, wurde *StairBOT* als Differentialantriebs-Roboter mit variabler Länge ausgeführt. Er ist dazu aus zwei gegeneinander verstellbaren Hauptelementen aufgebaut:

Der Rad-Einheit mit den Antriebsrädern und der Linearführungs-Einheit mit dem Verstellmechanismus, den Stützrädern und dem neigbaren Sensorkopf.

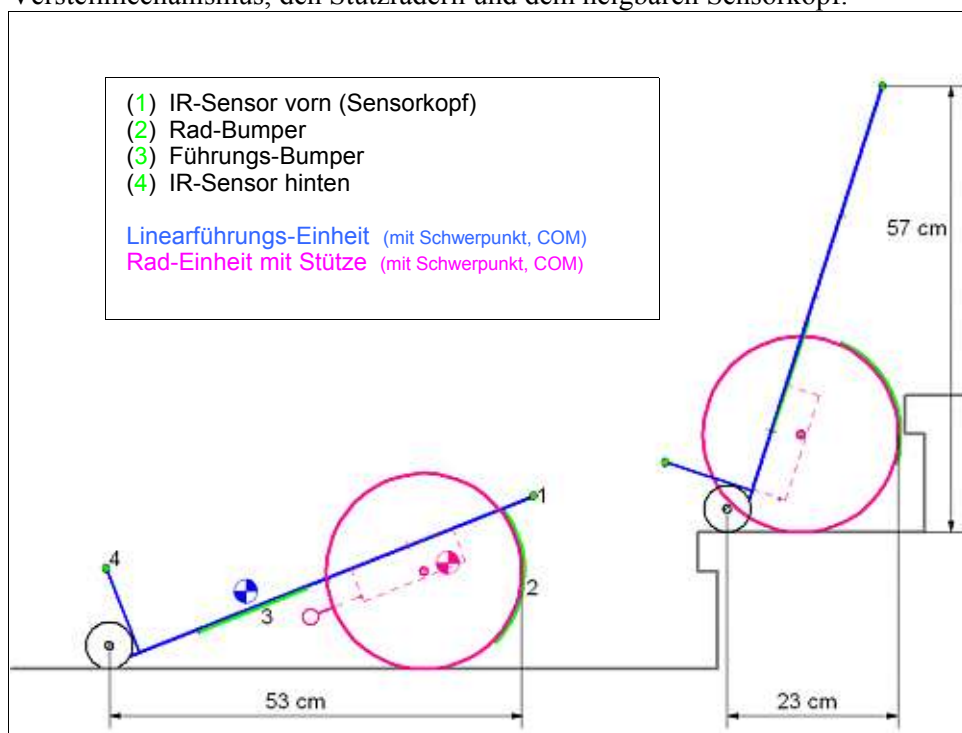


Abb.1g Konstruktionschema und Hauptabmessungen

1.4.1 Eine Stufe aufwärts

Im Folgenden soll die mit diesem Konstruktionskonzept mögliche Vorgehensweise beim Ersteigen einer Stufe beschrieben werden:

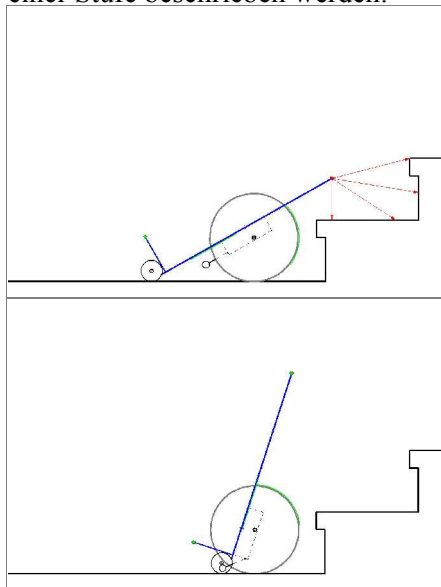


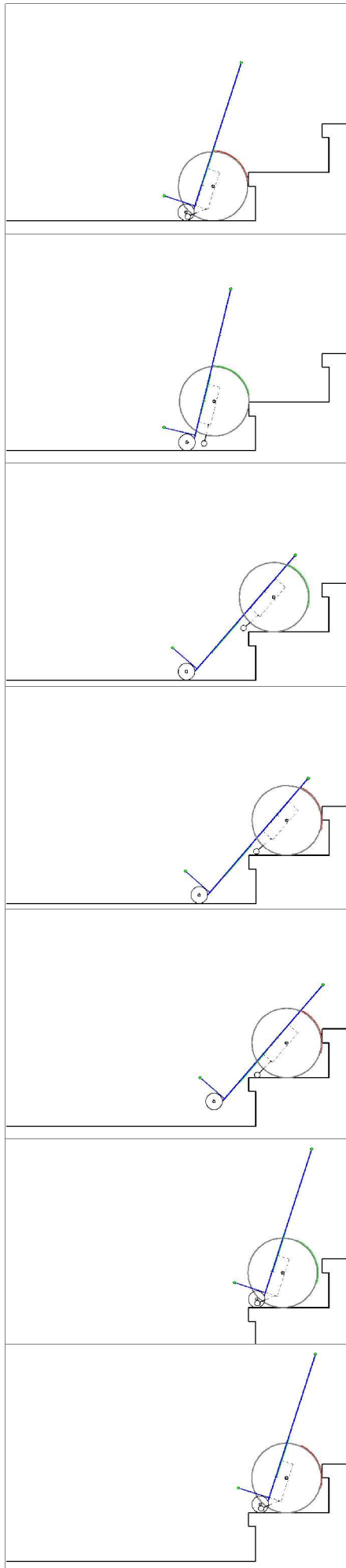
Abb.1h

.1

Die Treppenstufe wird entdeckt. Da die Sensoren zusammen mit dem Ultraschallsensor (SRF08) und der Kamera (CMUcam2) auf einem um die waagrechte Achse drehbaren Träger (1 DOF) befestigt sind, kann der Roboter feststellen, ob es sich um eine Treppe, die überfahren werden kann, handelt.

.2

Die kurze Spindelposition wird eingenommen. In dieser Position muss die Stütze angeklappt werden.



.3

Der Roboter fährt an die Treppenkante vor. Der linke und der rechte Fahrmotor werden angehalten, wenn die zugeordneten Radbumper an der Treppenkante anstoßen. Dadurch erfolgt automatisch eine Ausrichtung senkrecht zur Treppe.

.4

Die Allseitenräder werden gebremst, die Spindel bewegt den Radschlitten nach oben, gleichzeitig drehen die Fahrmotoren die Haupträder mit einer angepassten Geschwindigkeit, um den Steigvorgang des Radschlittens zu unterstützen. Von der Synchronisation dieser Geschwindigkeiten und der Gewichtsverteilung hängt ab, ob die gebremsten Allseitenräder ihre Position behalten oder von der Treppe weggedrückt werden.

.5

Ist die längste Spindelposition erreicht, d.h. die Haupträder sind auf der Stufe, werden die Bremsen gelöst.

.6

Die Fahrmotoren werden abgeschaltet, wenn die Rad-Bumper an der nächsten Stufe oder die Führungsbumper an der gerade erstiegenen Stufe anstoßen. Dadurch bleibt die senkrechte Ausrichtung des Roboters zur Treppe gewährleistet.

.7

Die Allseitenräder werden nach oben gezogen. Gehalten wird der Roboter dabei durch die Stütze. Kritisch ist die Verteilung der Gewichte von Radschlitten und Führung. Die Bremse muss gelöst sein, damit die Allseitenräder leicht über die Treppenkante rollen.

.8

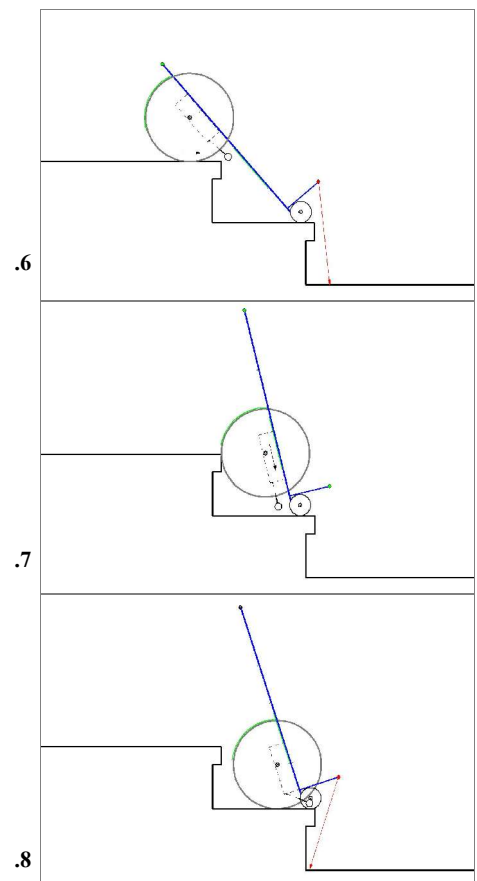
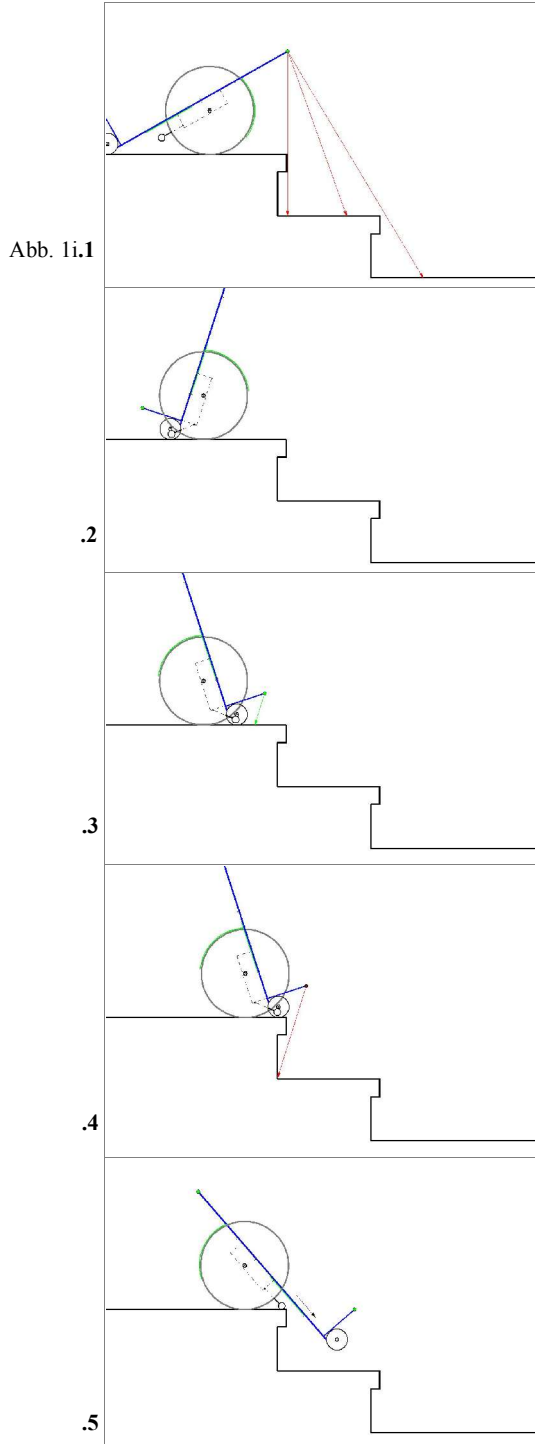
Wird die kurze Spindelposition erreicht, muss die Stütze eingeklappt werden, damit die Allseitenräder auf der Stufe abgesetzt werden können. Gleichzeitig werden die Allseitenräder gebremst, um ein eventuelles Zurückrollen zu vermeiden.

.9

Hat der Roboter einen sicheren Stand auf der Stufe erreicht, werden die Bremsen wieder gelöst. Der Roboter fährt vor bis die Rad-Bumper an der nächsten Stufe anschlagen und der ganze Vorgang wiederholt sich. Sollte innerhalb einer vorgegeben Entfernung keine Stufe berührt werden, geht das Steuerprogramm davon, dass die Treppe vollständig erstiegen wurde und das normale Fahrprogramm wird wieder aufgenommen.

1.4.2 Eine Stufe abwärts

Beim Treppab-Fahren wird der unter 1.4.1 beschriebene Vorgang umgekehrt, d.h. der Roboter fährt rückwärts die Treppe hinunter. Erkennt der Roboter eine abwärts führende Treppe, so nimmt er die kurze Spindelposition (= kleinerer Wendekreis) ein, dreht auf der Stelle um 180° und nähert sich dann mit den Allseitenrädern voran der Treppe. Auch dabei richtet er sich automatisch senkrecht zur Treppenkante aus. Der gesamte Treppenabstieg wird nur über die beiden hinteren IR-Sensoren gesteuert.



2. Die ausgeführte Konstruktion

2.1 Elemente für das Fahren auf ebenem Untergrund

Mit einem Durchmesser von 255mm sind die Antriebsräder deutlich größer als es bei Robotern vergleichbarer Abmessung üblich ist. Als Antrieb dienen zwei 6 Watt DC Motoren mit 84:1 Planetengetriebe und Encodern. Die Ansteuerung erfolgt durch PID-Controller über 3A H-Brücken. Als Stützräder dienen zwei 60mm Allseitenräder. So ausgestattet kann *StairBOT* geradeaus fahren, auf der Stelle drehen oder einem Radius folgen.

2.2 Zusätzliche Elemente für das Treppensteigen

Um den Roboter beim Steigvorgang abzustützen, sind die beiden Allseitenräder mit einfachen Scheibenbremsen ausgestattet, die über einen Modellbauservo gleichzeitig betätigt werden (Abb.2.c). Die Polyurethan-Rollen dieser Räder ergeben eine hinreichende Haftung auch auf glattem Untergrund. Der Vorschub der Radeinheit wird durch eine Linearführung mit Spindeltrieb (Steigung 5mm) bewirkt. Die Linearführung hat einen Hub von 290 mm. Der Antriebsmotor für die Spindel ist ein DC-Motor (11Watt, 4,8:1 Planetengetriebe, Encoder). Die Ansteuerung erfolgt wie bei den Radmotoren. Zur Terminierung und Kalibrierung des Spindeltriebs werden zusätzlich zwei Endschalter verwendet. Durch die Spindelverstellung läßt sich die Gesamtlänge des Roboters zwischen ca. 60cm und 30cm stufenlos einstellen. Die Linearführung dient gleichzeitig zur Abstützung beim Heraufziehen der Stützräder. Zusätzlich ist die Radeinheit mit einer beweglichen Stütze ausgestattet, auf der sich der Roboter beim Hoch- und Runterfahren der Linearführung abstützt.

2.3 Masse und Massenverteilung

Die Rad-Einheit und die Linearführungs-Einheit haben jeweils eine Masse von ca. 3 kg. Die ungefähre Lage der jeweiligen Masse-Schwerpunkte, die im Versuch ermittelt wurde, ist in Abbildung 1.g zu sehen. An der Gesamtmasse von ca. 6 kg haben die Batterien einen Anteil von 20%. Die Verteilung der Batterien stellt die einfachste Möglichkeit des Ausbalancierens des Roboters dar.

2.4 Sensoren für das Treppensteigen

Um die Treppenstufen, die Stellung zur Treppenkante und die Position auf der Treppe zu erkennen ist der Roboter mit folgenden Sensoren ausgestattet:

	Anbringung	rechts	links	Typ	Steigrichtung: Aufgabe
1	vorn	x	x	80cm IR Ranger Sharp GP2D12	auf/abwärts: Beginn der Treppe
2	vorn	x	x	Rad-Bumper	aufwärts: Rad an Treppenkante
3	mittig	x	x	Führungs-Bumper	aufwärts: Führung an Treppenkante
4	hinten	x	x	30cm IR Ranger Sharp GP2D120	abwärts : Treppenkante

Zum eigentlichen Befahren der Treppe werden nur die Sensoren 2,3 und 4 benötigt. Um die senkrechte Ausrichtung des Roboters zur Treppenkante zu gewährleisten, sind die Sensoren jeweils an der rechten und linken Seite angebracht. Erreicht z.B. das linke Rad die Treppenkante, wird der zugeordnete linke Fahrmotor ausgeschaltet, während der rechte Motor weiterläuft bis auch das rechte Rad die Treppenkante erreicht hat. Der Roboter ist so in der Lage auch Wendeltreppen zu befahren, wenn die Auftrittlänge ausreicht.

Die Sensoren 1 sind auf dem beweglichen Sensorkopf montiert. Der Sensorkopf hält über eine Rückmeldung der aktuellen Spindelposition eine vorgegebene „Blickrichtung“ bei. Zusätzlich zu den zwei GP2D12 sind hier noch eine CMUcam2 und ein SRF08 Ultraschallsensor angebracht, die aber für das Befahren der Treppe nicht benötigt werden.

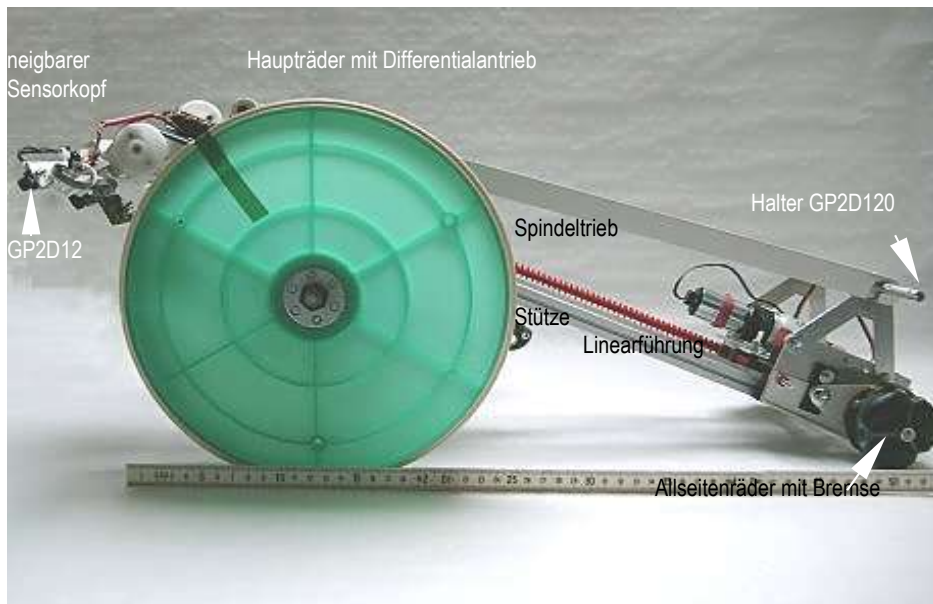


Abb.2a *stairBOT* Konstruktionselemente: lange Spindelposition



Abb.2b kurze Spindelposition

Anmerkung zum Baumaterial:

Dieser Prototyp des *stairBOT* wurde aus Fischertechnik-Teilen (Linearführung, Spindel), Aluminiumprofilen und Sperrholz gebaut. Die grünen Räder sind eigentlich fahrbare Blumenuntersetzer, deren Rollen demontiert wurden. Um die Haftung der Räder zu erhöhen, sind sie mit Fensterdichtungs-Profil beklebt. Die Scheibenbremsen haben Bremsbeläge aus Tischtennisschläger-Belag.

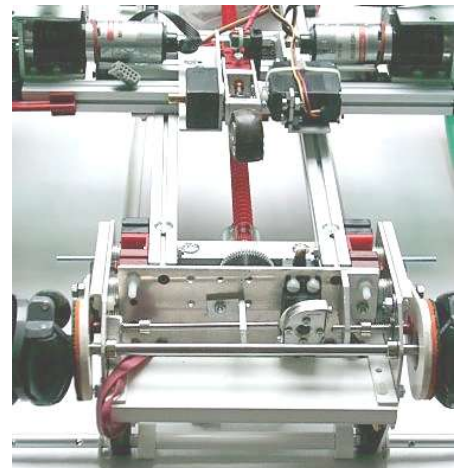


Abb.2c Roboter von unten mit Stütze und Bremse

Der bewegliche weiße Teil der Rad-Bumper wird beim Treppabfahren von der Treppenkante nach oben geschoben, damit die Bumper nicht den Abstieg blockieren.



Abb.2d Stützräder halb aufgezogen

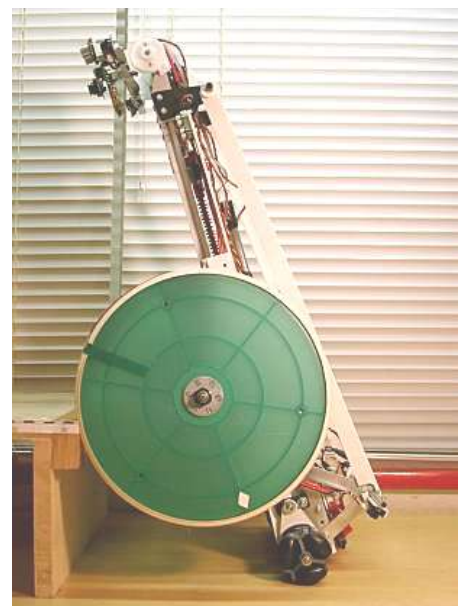
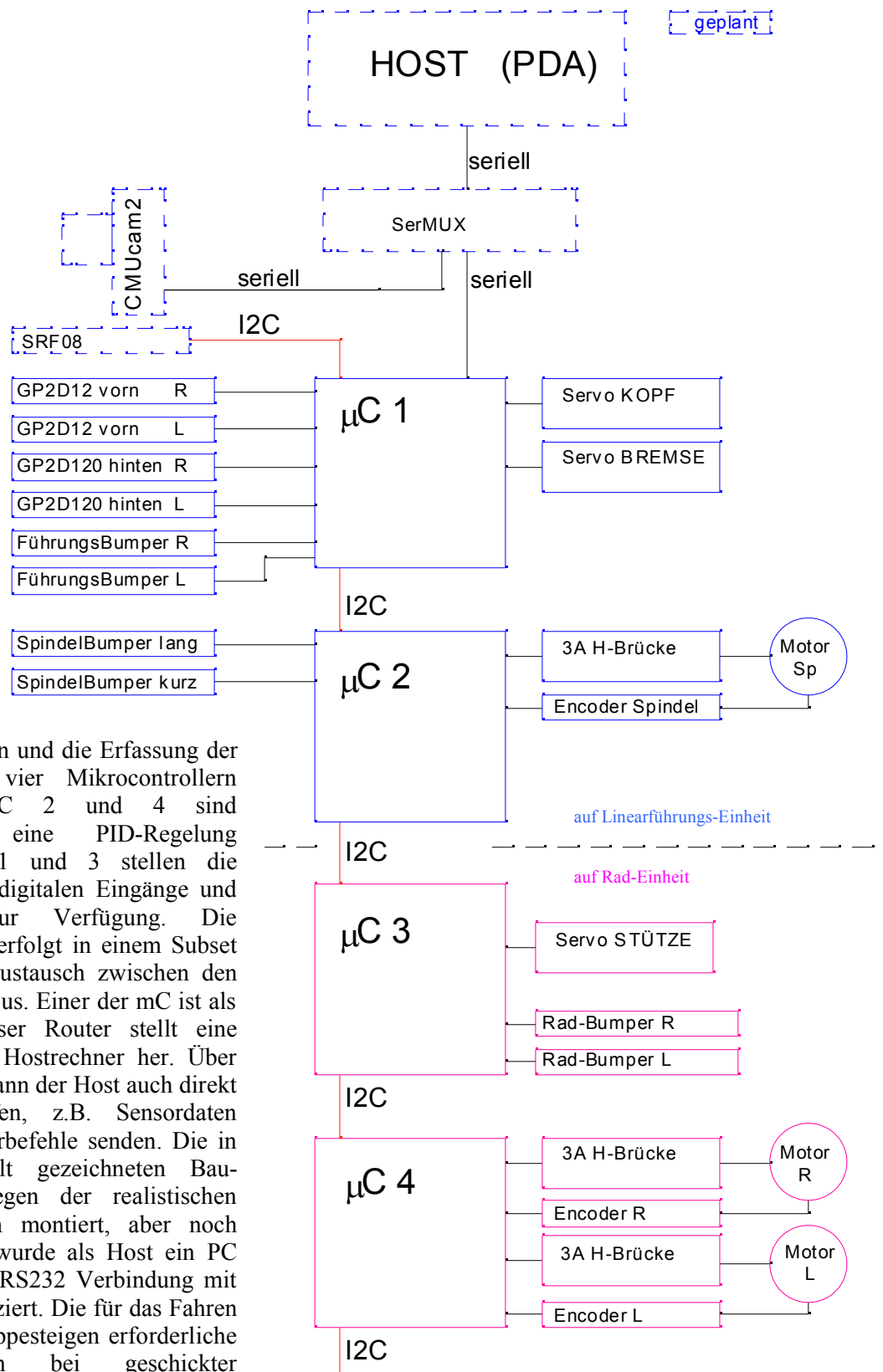


Abb.2e Aufstieg

2.4 Steuerelektronik



Die Steuerung der Motoren und die Erfassung der Sensordaten wird von vier Mikrocontrollern vorgenommen. Die μC 2 und 4 sind Motorcontroller, die eine PID-Regelung ermöglichen. Die μC 1 und 3 stellen die benötigten analogen und digitalen Eingänge und die Servosteuerung zur Verfügung. Die Programmierung der μC erfolgt in einem Subset von ANSI-C. Die Datenaustausch zwischen den μC läuft über einen I2C-Bus. Einer der μC ist als Router konfiguriert. Dieser Router stellt eine serielle Verbindung zum Hostrechner her. Über den Router und I2C-Bus kann der Host auch direkt auf jeden μC zugreifen, z.B. Sensordaten abfragen oder Motorsteuerbefehle senden. Die in der Übersicht gestrichelt gezeichneten Bauelemente sind zwar wegen der realistischen Gewichtsverteilung schon montiert, aber noch nicht in Betrieb. Bisher wurde als Host ein PC verwendet, der über eine RS232 Verbindung mit dem Router- μC kommuniziert. Die für das Fahren in der Ebene und das Treppesteigen erforderliche Rechenkapazität stellen bei geschickter Programmierung schon die vier μC zur Verfügung. Die komfortable Programmierung auf dem PC mit VB5 ist für mich aber flexibler und entspannter. Die so entwickelten Programme lassen sich dann leicht (hoffentlich) in eVB für den PDA portieren.

Die Verteilung der μC auf zwei gegeneinander bewegliche Boards war nicht so problematisch wie zuerst befürchtet. Die Verbindung wird durch ein 8-poliges Flachbandkabel hergestellt. 2 für I2C (SDA und SCL) und die sechs Verbleibenden für die Spannungsversorgung V_{logik} , V_{servo} und V_{motor} .

3. Die Fahrversuche

3.1 Fahren in der Ebene

Beim Fahren auf ebenem Untergrund verhält sich stairBOT wie andere Differentialantriebs-Roboter auch.

Seine Länge sollte dabei so eingestellt sein, dass er

- lang genug ist, für ein stabiles Fahrverhalten bei zügiger Geschwindigkeit (z.B. beim schnellen Bremsen),
- kurz genug ist, dass das Drehen auf der Stelle nicht durch die Allseitenräder an einem unnötig langen Hebelarm behindert wird,
- kurz genug ist für einen kleinen Wendekreis, um eine möglichst gute Manövrierbarkeit zu gewährleisten,
- kurz genug ist, um dem Sensorkopf eine möglichst große Höhe über dem Boden zu geben.

Eine Einstellung der Gesamtlänge (ohne Sensorkopf) auf 42 cm hat sich dabei als ein guter Kompromiss erwiesen. Die Kamera befindet sich dann ca. 38cm über dem Boden. Der Roboter kann auch mit der kürzesten Einstellung (Gesamtlänge dann ca. 30 cm) noch sicher fahren, wenn seine Geschwindigkeit entsprechend verringert wird. In dieser Stellung kann er ein Hindernis von einem halben Meter Höhe noch sicher überschauen.

3.2 Fahren auf der Treppe

Da der Roboter noch mit einem PC verbunden ist, haben keine Fahrversuche auf realen Treppen stattgefunden. Die Teststufen, die er bisher überwunden hat, sind realen Treppenstufen nachgebildet. (Trittfläche 29cm, bei einer Unterschneidung von 2,5cm ergibt das einen Auftritt von 26,5cm; Material: Tischlerplatte unlackiert).

Zumindest diese Teststufen kann stairBOT sicher hinauf und hinab fahren (siehe auch die Filme auf der Homepage des Roboters [8]).

3.2.1 Probleme treppauf

Als besonders kritisch hat sich die Abstimmung der Radgeschwindigkeit mit der Spindelgeschwindigkeit zu Beginn der Aufstiegsphase erwiesen. Ist die Radgeschwindigkeit zu groß, drehen die Räder durch, der Roboter steigt nicht, die Haftreibung der gebremsten Allseitenräder reicht nicht mehr aus und die Räder werden von der Spindel nach hinten gedrückt. Ein Aufstieg ist dann nicht mehr möglich. Ist die Radgeschwindigkeit zu langsam, d.h. die Räder steigen langsamer als der Vorschub der Linearführung, tritt der gleiche Effekt ein. Für den gebauten Roboter wurde die richtige Abstimmung der Geschwindigkeiten durch Versuche bestimmt. Durch eine langsame Veränderung der Gleiteigenschaften in der Führung ist eine häufige Neuabstimmung nötig.

3.2.2 Probleme treppab

Hat man sich erst mit dem Gedanken angefreundet, dass ein Roboter der gewählten Bauform eine Treppe am besten rückwärts herunterfährt, kann man sich auch auf den Charme dieser nicht so ganz elegant aussehenden Lösung einlassen. Ohne weiteren konstruktiven Aufwand, nur von zwei Sensoren gesteuert, die auch beim Rückwärtsfahren in der Ebene gute Dienste leisten, kann der Roboter die Stufen, die er aufwärts bewältigt hat, auch wieder hinab fahren. Die einzige kleine Konstruktions-änderung, die dazu erforderlich war, sind die beweglichen weißen Endstücke an den Rad-Bumpers (siehe Bild und Beschreibung zu Abb. 2.d). Voraussetzung dafür ist, dass der Roboter bezogen auf den Aufsetzpunkt der Stütze gut ausbalanciert ist.

Als weitere kritische Punkte sind zu nennen:

- 1) Beim Abstieg ist die richtige Winkeleinstellung der IR-Sensoren zum Erkennen der Treppenkante von besonderer Bedeutung, damit der Beginn des Abstiegs weder zu früh noch zu spät einsetzt.
- 2) Haben die Allseitenräder die untere Stufe erreicht und die Haupträder werden nachgezogen, muss die Stütze rechtzeitig vor dem Aufsetzen der Haupträder auf der unteren Stufe eingeklappt werden. Bei dem gebauten Prototyp blieb wegen eines ungeschickt platzierten Querträgers dafür nur ein kleines Zeitfenster.

3.3 Schlussfolgerung und zukünftige Arbeit

Die Fahrversuche haben ergeben, dass die eingangs genannten Ziele mit der hier vorgestellten Konstruktion sicher zu erreichen sind. Und obwohl die Herstellung des Prototyps teurer war, kann man davon ausgehen, dass sich mit diesem Konstruktionsprinzip für weniger als 1000€ zumindest das Fahrgestell eines Gebäude-Roboters bauen lässt, der überall dorthin fährt, wo ASIMO für etwas mehr Geld hin läuft.

Wie wird die zukünftige Arbeit aussehen? Der jetzt gebaute Prototyp mit seinen direkt aufeinander gleitenden fischertechnik-Aluminium-Profilen als Linearführung ist mittlerweile in einem so beklagenswerten Zustand, dass die Frage Reparatur oder Neukonstruktion ansteht. Vermutlich wird eine komplette Neukonstruktion die effektivste Lösung sein.

Diese Neukonstruktion sollte u.a. die folgenden Probleme angehen:

1. eine geeignete Linearführung mit günstigerem Wirkungsgrad, die ein schnelleres Steigen bei gleicher Motorleistung zulässt,
2. Gewichtersparnis in der Gesamtkonstruktion,
3. eine verbesserte Ausführung der Räder,
4. eine vereinfachte Bremseneinstellung,
5. die PID-Regelung des Spindelmotors sollte für die Geschwindigkeitsregelung und nicht für die Positionierung eingesetzt werden, um Störeinflüsse durch ein verändertes Reibungsverhalten in der Linearführung besser ausgleichen zu können,
6. eine redundante Ausführung der hinteren Entfernungsmesser für mehr Sicherheit beim Abstieg.

Danksagung

Wem ist Dank zu sagen? Zuerst natürlich meiner Frau und allen Familienmitgliedern, die noch mehr Geduld als üblich mit mir aufbringen mussten. Ein allgemeiner Dank richtet sich an alle Roboterbauer, Amateure und Profis, die ihre Ergebnisse im Internet veröffentlicht und ihre Erfahrungen in Foren bereitwillig zur Verfügung gestellt haben. Ohne diesen steten Informationsfluss wäre mir der Bau von *stairBOT* kaum möglich gewesen. Ein besonderer Dank geht dabei an Mark Whitney von der Firma acronym [9], der mir durch schnelle und kompetente Antworten auf verzweifelte Anfragen den Einstieg in die Mikrocontroller-Programmierung erleichtert hat.

Seesen, November 2004

Günter Wendel

Referenzen

- [1] E. Hamner, R. Gockley, E. Porter, and I. Nourbakhsh "The Personal Rover Project: The comprehensive design of a domestic personal robot", *Robotics and Autonomous systems: Special Issue on Socially Interactive Robots*, Vol.42, No. 3 – 4, March, 2003, pp. 245 –258.
- [2] <http://www.cim.mcgill.ca/~arlweb/> oder: <http://www.rhex.net/>
- [3] http://www.sony.net/SonyInfo/QRIO/top_nf.html
- [4] <http://world.honda.com/ASIMO/>
- [5] <http://asl.epfl.ch/index.html?content=research/systems/Shrimp/shrimp.php>
- [6] <http://www.uamt.feec.vutbr.cz/robotics/index.html.iso-8859-1>
(oder auf Englisch: <http://robotarenas.nist.gov/Robrno%20Awardee%20Paper.pdf>)
- [7] <http://www.philohome.com/stairs/ptitgneugneu.htm>
- [8] <http://www.stairbot.de>
- [9] <http://www.acronym.com>

Anhang: Technische Daten

Prozessoren	2 BrainStem GP 1.0 (acroname, USA) 2 Brainstem Moto 1.0 (acroname, USA) 1 iPAQ
Sensoren	1 CMUcam2 1 SRF08 US-Entfernungsmesser 2 GP2D12 IR-Entfernungsmesser (vorn) 2 GP2D120 IR-Entfernungsmesser (hinten) 2 Mikroschalter (Rad-Bumper) 2 Mikroschalter (Führungs-Bumper) 2 Mikroschalter (Endschalter des Spindelantriebs)
Batterien	11 SubC NiMH 3000Ah (13.2V) Motor 5 SubC NiMH 3000Ah (6V) Servos 5 SubC NiMH 3000Ah (6V) Controller 1 iPAQ Lilon-Batterie
Antriebsart	2 Rad Differentialantrieb (mit 2 bremsbaren Allseitenrädern als Stützrad) 1 Spindelantrieb
Aktoren	2 DC-Motoren 6W, 84:1 Planetengetriebe, Encoder (Differentialantrieb) 1 DC-Motor 11W, 4.8:1 Planetengetriebe, Encoder (Spindelantrieb) 1 Servo (Allseitenrad-Bremse) 1 Servo (Stütze) 1 Servo (Sensor-Neigekopf)
Baumaterial	Fischertechnik-Teile (Führung und Spindel), Aluminium- und Kunststoffprofile und Sperrholz
Abmessungen	Abhängig von der Spindelposition und Stellung des Sensorkopfes L x B x H: (Maße über alles) kurz: 30cm x 37cm x 60cm lang: 63cm x 37cm x 27cm
Masse	ca. 6 kg mit Batterien